

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



Hikari Viviane Yamamoto Fukuda  
Orientadora: Profa. Dra. Rachel Ifanger Albrecht

# **Propriedades físicas e morfológicas da precipitação e eletrificação sobre lagos tropicais**

**São Paulo  
2021**

Hikari Viviane Yamamoto Fukuda

## **Propriedades físicas e morfológicas da precipitação e eletrificação sobre lagos tropicais**

**Projeto de Conclusão de Curso** desenvolvido e apresentado para o Curso de Bacharelado em Meteorologia da Universidade de São Paulo, sendo também premissa fundamental à conquista da qualificação de Bacharel em Meteorologia.

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

Orientador: Profa. Dra. Rachel Ifanger Albrecht

São Paulo

2021

# AGRADECIMENTOS

"Nunca me esquecerei que no meio do caminho

Tinha uma pedra

Tinha uma pedra no meio do caminho"

Assim como Carlos Drummond de Andrade em seus versos, no poema "No meio do caminho", nunca deixarei de recordar os obstáculos que ocorreram durante as etapas que vivi. Apesar disso, estou certa que esses desafios me fizeram prosperar e que, ao longo desse caminho, encontrei, além de pedras, pessoas que contribuíram com o minha jornada.

Com isso, deixo meus pareceres de gratidão à Profa. Dra. Rachel Ifanger Albrecht, sendo mais do que mentora, uma inspiradora cientista e a primeira docente que conheci na Universidade.

Para os membros do Laboratório de Física de Nuvens (LabNuvens) e os monitores que me auxiliaram em diversas dificuldades, seja de disciplinas ou a elaboração de simples figuras.

Aos professores, pesquisadores e funcionários que me proporcionaram conhecimento, informação, documentos ou cumprimentavam-me todas as manhãs.

Para meus colegas de curso, turma, estudo ou conversa, seja pelo apoio, tolerância e desespero conjunto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo financeiro para minhas pesquisas.

Por último, remerceio minha família. Meus pais, Sílvia e Omar, por nunca me impedirem de sair de casa e sempre me acolherem de braços abertos, em conjunto com minha irmã Vanessa, por escutarem meus remorsos e inúmeras pré-apresentações que se passaram.

# RESUMO

Tempestades são fenômenos que impactam a sociedade como um todo, a exemplo disso, poder-se-ia citar a produção de alimentos na indústria agropecuária ou até mesmo as fatalidades causadas por esses eventos. Em vista disso, este estudo visou compreender as propriedades físicas e morfológicas da precipitação e eletrificação que se desenvolvem sobre lagos tropicais. Para a maior atividade de descargas elétricas, observou-se que é propício que o lago tenha área maior que 4.000 km<sup>2</sup> e regiões mais elevadas na zona adjacente ao corpo d'água, o que colabora com circulações de brisa. A precipitação, área e profundidade das tempestades não se correlacionaram linearmente com a taxa de relâmpagos, no entanto, os resultados indicaram que a precipitação e a área das tempestades convectivas estão associadas com a atividade elétrica, o que pode ser visto no ciclo diurno com a intensificação da atividade de relâmpagos em conjunto com a precipitação convectiva no período noturno. Considerando os Lagos Maracaibo e Vitória, foi notável que o primeiro apresentou maior eletrificação e maior porcentagem de área convectiva, enquanto o segundo lago é maior, possibilitando o desenvolvimento de tempestades mais extensas e com mais chuva. Além disso, a maior frequência de tempestades não proporcionou diretamente maior atividade de raios, mostrando que somente 10,2% e 7,7% das tempestades têm presença de *flashes* para os Lagos Maracaibo e Vitória respectivamente.

**Palavras-chaves:** lagos, tempestades, relâmpagos e precipitação.

# ABSTRACT

Storms are phenomena that impact society as a whole, for example, one could mention the production of food in the agricultural industry or even the fatalities caused by these events. Herewith, this study aimed to understand the physical and morphological properties of precipitation and electrification that develop over tropical lakes. For the greater activity of electrical discharges, it was observed that it is favorable for the lake to have an area greater than 4,000 km<sup>2</sup> and higher regions in the area adjacent to the water body, which collaborates with breeze circulations. The precipitation, area and depth of the storms did not linearly correlate with the lightning rate, however, the results indicated that the precipitation and area of convective storms are associated with electrical activity, which can be seen in the diurnal cycle with the intensification of lightning activity together with convective precipitation at nighttime. Considering Lakes Maracaibo and Victoria, it was notable that the first one presented greater electrification and a greater percentage of convective area, while the second lake is larger, allowing the development of more extensive storms and with more rain. Furthermore, the higher frequency of storms did not directly provide greater lightning activity, showing that only 10.2% and 7.7% of the storms have flashes for Lakes Maracaibo and Victoria, respectively.

**Keywords:** lake, storm, lightning and precipitation.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Total de relâmpagos observados na climatologia de 16 anos (1998-2013) do <i>Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Lightning Imaging Sensor (LIS)</i> : (a) Taxa de densidade de flashes ( $\text{fl km}^{-2} \text{ano}^{-1}$ ) e (b) horário local de máxima taxa de densidade de flashes. . . . .	1
Figura 2 – Exemplo dos dados interpolados apenas no corpo d'água. . . . .	9
Figura 3 – Representação das regiões de um quadrado com lado de cerca de 55,5 km, 111 km, 166,5 km, 222 km, 277,5 km, 333 km, 444 km, 555 km e 666 km tendo como ponto central a longitude e a latitude aproximadas do centro do lago. . . . .	10
Figura 4 – Mapa com a localização dos corpos d'água analisados inicialmente. . .	17
Figura 5 – Atividade elétrica ( $\text{fl min}^{-1}$ ) nos períodos diurno e noturno sobre o Vale do Rifte. . . . .	18
Figura 6 – Atividade elétrica ( $\text{fl min}^{-1}$ ) nos períodos diurno e noturno sobre o Lago Chad. . . . .	19
Figura 7 – Atividade elétrica ( $\text{fl min}^{-1}$ ) nos períodos diurno e noturno sobre o Lago Cocibolca. . . . .	20
Figura 8 – Atividade elétrica ( $\text{fl min}^{-1}$ ) nos períodos diurno e noturno sobre o Lago Maracaibo. . . . .	21
Figura 9 – Atividade elétrica ( $\text{fl min}^{-1}$ ) nos períodos diurno e noturno sobre o Lago Titicaca. . . . .	21
Figura 10 – Atividade elétrica ( $\text{fl min}^{-1}$ ) nos períodos diurno e noturno sobre o Lago de Valência. . . . .	22
Figura 11 – Relação entre a média da taxa de <i>flashes</i> total (i.e., dia e noite) (esquerda) e somente durante a noite (direita) ( $\text{fl min}^{-1}$ ) e área dos lagos ( $\text{km}^2$ ) com o ajuste de série de potências. . . . .	23
Figura 12 – Frequência (%) da amplitude de elevação (altitudes da topografia subtraídas pela altitude média do lago) ao redor de um raio de 666 km centrado nos lagos e média da atividade elétrica noturna ( $\text{fl min}^{-1}$ ) sobre o lago. . . . .	24

Figura 13 – Histograma de frequência (eixo esquerdo) e frequência cumulativa relativa (eixo direito) das áreas das tempestades ( $\text{km}^2$ ), porcentagem da área e chuva convectiva (%), chuva volumétrica, chuva volumétrica convectiva e estratiforme ( $\text{mm km}^2 \text{ h}^{-1}$ ), taxa de <i>flashes</i> ( $\text{fl min}^{-1}$ ), temperatura mínima com correção de polarização de 37 e 85 GHz (K), altura máxima com refletividade maior ou igual 20, 30 e 40 dBZ (km) sobre cada lago para as tempestades com $\text{fl} > 0$ . . . . .	27
Figura 14 – Gráficos de dispersão da taxa de <i>flashes</i> ( $\text{fl min}^{-1}$ ), chuva volumétrica ( $\text{mm km}^2 \text{ h}^{-1}$ ), chuva volumétrica estratiforme ( $\text{mm km}^2 \text{ h}^{-1}$ ) e convectiva ( $\text{mm km}^2 \text{ h}^{-1}$ ) com a área das tempestades ( $\text{km}^2$ ), a área estratiforme ( $\text{km}^2$ ) e a área de chuva convectiva ( $\text{km}^2$ ). . . . .	29
Figura 15 – Gráficos de dispersão da taxa de <i>flashes</i> ( $\text{fl min}^{-1}$ ), chuva volumétrica ( $\text{mm km}^2 \text{ h}^{-1}$ ), chuva volumétrica estratiforme ( $\text{mm km}^2 \text{ h}^{-1}$ ) e convectiva ( $\text{mm km}^2 \text{ h}^{-1}$ ) com a chuva volumétrica ( $\text{mm km}^2 \text{ h}^{-1}$ ), chuva volumétrica estratiforme ( $\text{mm km}^2 \text{ h}^{-1}$ ) e convectiva ( $\text{mm km}^2 \text{ h}^{-1}$ ). . .	30
Figura 16 – Gráficos de dispersão da taxa de <i>flashes</i> ( $\text{fl min}^{-1}$ ), chuva volumétrica ( $\text{mm km}^2 \text{ h}^{-1}$ ), chuva volumétrica estratiforme ( $\text{mm km}^2 \text{ h}^{-1}$ ) e convectiva ( $\text{mm km}^2 \text{ h}^{-1}$ ) com a temperatura de brilho mínima com correção de polarização de 37 GHz (K) e a temperatura de brilho mínima com correção de polarização de 85 GHz (K). . . . .	31
Figura 17 – Gráficos de dispersão da taxa de <i>flashes</i> ( $\text{fl min}^{-1}$ ), chuva volumétrica ( $\text{mm km}^2 \text{ h}^{-1}$ ), chuva volumétrica estratiforme ( $\text{mm km}^2 \text{ h}^{-1}$ ) e convectiva ( $\text{mm km}^2 \text{ h}^{-1}$ ) com a altura máxima com refletividade maior ou igual a 20 dBZ (km), a altura máxima com refletividade maior ou igual a 30 dBZ (km) e a altura máxima com refletividade maior ou igual a 40 dBZ (km). . . . .	32
Figura 18 – Diagrama bidimensional da mínima temperatura de brilho 37 GHz e 85 GHz PCT para o Lago Maracaibo, Lago Vitória e para ambos sobrepostos no mesmo painel. . . . .	32
Figura 19 – CFAD das refletividades máximas (dBZ) das tempestades sobre o Lago Maracaibo e Vitória, assim como a diferença das frequências de refletividade dos lagos, a cada 0,5 km de altura e 1 dBZ de refletividade, para as tempestades com áreas $\leq 30.000 \text{ km}^2$ e $> 30.000 \text{ km}^2$ . O número de perfis indica quantos perfis foram utilizados para a construção do CFAD.	35

Figura 20 – CFAD das refletividades máximas (dBZ) das tempestades sobre o Lago Maracaibo e Vitória, assim como a diferença das frequências de refletividade dos lagos, a cada 0,5 km de altura e 1 dBZ de refletividade, para as tempestades com taxa de flashes de $0 \text{ fl min}^{-1}$ , menor ou igual a mediana da atividade elétrica para tempestades com <i>flashes</i> ( <i>Md</i> ) e maior que a mediana. O número de perfis indica quantos perfis foram utilizados para a construção do CFAD. . . . .	36
Figura 21 – Série temporal ao longo do dia (a cada 6 minutos) de todas as áreas, estratiformes e convectivas ( $\text{km}^2$ ) com a taxa de <i>flashes</i> ( $\text{fl min}^{-1}$ ) dentro dos lagos e em uma vizinhança fora dos lagos. . . . .	37
Figura 22 – Histograma de frequência (eixo esquerdo) e frequência cumulativa relativa (eixo direito) das áreas das tempestades ( $\text{km}^2$ ), porcentagem da área de chuva convectiva (%) e taxa de <i>flashes</i> ( $\text{fl min}^{-1}$ ) sobre cada lago de dia e de noite. . . . .	38
Figura 23 – CFAD das refletividades máximas (dBZ) das tempestades (sem ou com <i>flashes</i> ) sobre o Lago Maracaibo e Vitória, assim como a diferença das frequências de refletividade dos lagos, a cada 0,5 km de altura e 1 dBZ de refletividade, para as tempestades com áreas $\leq Md \text{ km}^2$ e $> Md \text{ km}^2$ no período do dia e da noite. O número de perfis indica quantos perfis foram utilizados para a construção do CFAD. . . . .	39
Figura 24 – CFAD das refletividades máximas (dBZ) das tempestades (com <i>flashes</i> ) sobre o Lago Maracaibo e Vitória, assim como a diferença das frequências de refletividade dos lagos, a cada 0,5 km de altura e 1 dBZ de refletividade, para as tempestades com áreas $\leq Md \text{ km}^2$ e $> Md \text{ km}^2$ no período do dia e da noite, sendo <i>Md</i> a mediana. O número de perfis indica quantos perfis foram utilizados para a construção do CFAD. . . . .	40
Figura 25 – Série temporal mensal de todas as áreas, estratiformes e convectivas ( $\text{km}^2$ ) com a taxa de <i>flashes</i> ( $\text{fl min}^{-1}$ ) dentro dos lagos e em uma vizinhança fora dos lagos. . . . .	42
Figura 26 – Histograma de frequência (eixo esquerdo) e frequência cumulativa relativa (eixo direito) da porcentagem da área convectiva (%) sobre cada lago de DJF, MAM, JJA e SON. . . . .	42
Figura 27 – CFAD das refletividades máximas (dBZ) das tempestades (com <i>flashes</i> ) sobre o Lago Maracaibo e Vitória, assim como a diferença das frequências de refletividade dos lagos, a cada 0,5 km de altura e 1 dBZ de refletividade, para as tempestades com áreas $\leq Md \text{ km}^2$ e $> Md \text{ km}^2$ no período do inverno e do verão em cada hemisfério, sendo <i>Md</i> a mediana. O número de perfis indica quantos perfis foram utilizados para a construção do CFAD. . . . .	43

Figura 28 – CFAD das refletividades máximas (dBZ) das tempestades (com <i>flashes</i> ) sobre o Lago Maracaibo e Vitória, assim como a diferença das frequências de refletividade dos lagos, a cada 0,5 km de altura e 1 dBZ de refletividade, para as tempestades com áreas $\leq Md$ km <sup>2</sup> e $> Md$ km <sup>2</sup> no período do inverno e do verão em cada hemisfério, sendo <i>Md</i> a mediana. O número de perfis indica quantos perfis foram utilizados para a construção do CFAD. . . . .	44
Figura 29 – Mapa da elevação topográfica sobre o globo. . . . .	55
Figura 30 – Mapa da densidade de raios ao longo dos meses. . . . .	56
Figura 31 – Mapa da densidade de raios ao longo do ciclo diurno (horário local entre 0 a 11 horas). . . . .	57
Figura 32 – Mapa da densidade de raios ao longo do ciclo diurno (horário local entre 12 a 23 horas). . . . .	58
Figura 33 – CFAD das refletividades máximas (dBZ) das tempestades sobre o Lago Maracaibo e Vitória, assim como a diferença das frequências de refletividade dos lagos, a cada 0,5 km de altura e 1 dBZ de refletividade, para as tempestades com áreas de precipitação convectiva $\leq Md$ % e $> Md$ %, sendo <i>Md</i> a mediana. O número de perfis indica quantos perfis foram utilizados para a construção do CFAD. . . . .	59
Figura 34 – CFAD das refletividades máximas (dBZ) das tempestades sobre o Lago Maracaibo e Vitória, assim como a diferença das frequências de refletividade dos lagos, a cada 0,5 km de altura e 1 dBZ de refletividade, para as tempestades com precipitação convectiva $\leq Md$ % e $> Md$ %, sendo <i>Md</i> a mediana. O número de perfis indica quantos perfis foram utilizados para a construção do CFAD. . . . .	60
Figura 35 – CFAD das refletividades máximas (dBZ) das tempestades sobre o Lago Maracaibo e Vitória, assim como a diferença das frequências de refletividade dos lagos, a cada 0,5 km de altura e 1 dBZ de refletividade, para as tempestades com taxa de <i>flashes</i> $\leq Md$ % e $> Md$ % no período do dia e da noite. O número de perfis indica quantos perfis foram utilizados para a construção do CFAD. . . . .	61
Figura 36 – CFAD das refletividades máximas (dBZ) das tempestades sobre o Lago Maracaibo e Vitória, assim como a diferença das frequências de refletividade dos lagos, a cada 0,5 km de altura e 1 dBZ de refletividade, para as tempestades com áreas de precipitação convectiva $\leq Md$ % e $> Md$ % no período do dia e da noite. O número de perfis indica quantos perfis foram utilizados para a construção do CFAD. . . . .	62

Figura 37 – CFAD das refletividades máximas (dBZ) das tempestades sobre o Lago Maracaibo e Vitória, assim como a diferença das frequências de refletividade dos lagos, a cada 0,5 km de altura e 1 dBZ de refletividade, para as tempestades com precipitação convectiva  $\leq Md$  % e  $> Md$  % no período do dia e da noite. O número de perfis indica quantos perfis foram utilizados para a construção do CFAD. . . . . 63

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Contexto e problema</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Motivação</b>	<b>2</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>3</b>
1.3.1	Objetivo geral	3
1.3.2	Objetivos específicos	3
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Área de estudo</b>	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>Período de estudo</b>	<b>5</b>
<b>2.3</b>	<b>Dados</b>	<b>5</b>
<b>2.4</b>	<b>Métodos</b>	<b>8</b>
2.4.1	Determinação dos corpos d'água	8
2.4.1.1	Estimativa da área	8
2.4.1.2	Extração da atividade de <i>flashes</i> dentro dos corpos d'água	9
2.4.1.3	Relação entre elevação e atividade de <i>flashes</i>	9
2.4.2	Comparação dos PFs	10
2.4.3	Análise da estrutura tridimensional dos PFs	11
2.4.4	Avaliação da relação da chuva e atividade elétrica com os ciclos diurno e sazonal	11
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>12</b>
<b>3.1</b>	<b>Formação de tempestades</b>	<b>12</b>
<b>3.2</b>	<b>Tempestades nos trópicos</b>	<b>12</b>
<b>3.3</b>	<b>Tempestades sobre lagos</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>17</b>
<b>4.1</b>	<b>Determinação dos corpos d'água</b>	<b>17</b>
4.1.1	Atividade elétrica nos períodos noturno e diurno	18
4.1.1.1	Vale do Rifte	18
4.1.1.2	Lago Chad	19
4.1.1.3	Lago Cocibolca	19
4.1.1.4	Lago Maracaibo	20
4.1.1.5	Lago Titicaca	21
4.1.1.6	Lago de Valência	22
4.1.2	Influência da área do lago	22

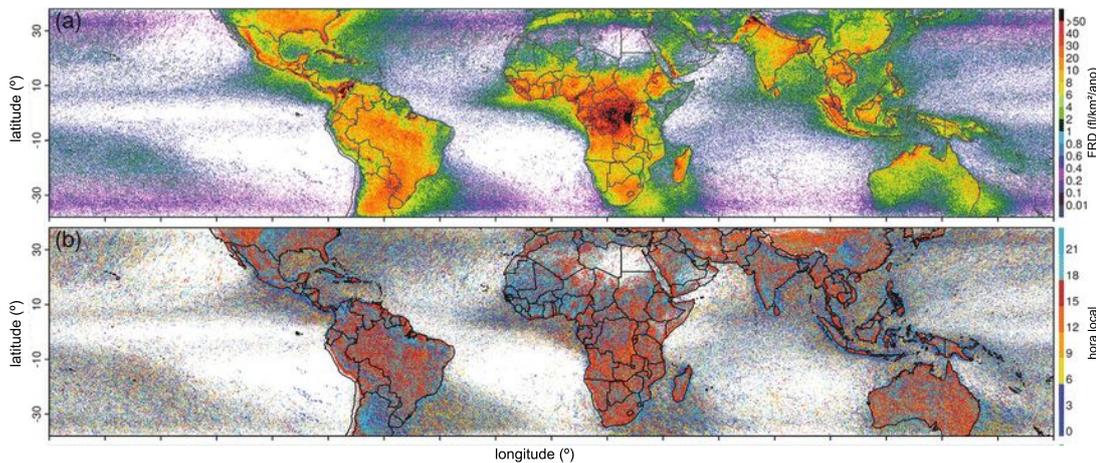
4.1.3	Influência da topografia . . . . .	23
<b>4.2</b>	<b>Propriedades físicas e morfológicas dos PFs . . . . .</b>	<b>24</b>
4.2.1	Frequência de ocorrência . . . . .	25
4.2.2	Relações entre as propriedades físicas e morfológicas . . . . .	28
<b>4.3</b>	<b>Análise da estrutura tridimensional dos PFs . . . . .</b>	<b>33</b>
<b>4.4</b>	<b>Avaliação da relação da chuva e atividade elétrica com os ciclos diurno e sazonal . . . . .</b>	<b>37</b>
4.4.1	Ciclo diurno . . . . .	37
4.4.2	Ciclo sazonal . . . . .	41
	<b>Conclusões . . . . .</b>	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>49</b>
	<b>APÊNDICES . . . . .</b>	<b>54</b>
	<b>APÊNDICE A – APÊNDICES . . . . .</b>	<b>55</b>
<b>A.1</b>	<b>Topografia . . . . .</b>	<b>55</b>
<b>A.2</b>	<b>Variação da atividade elétrica anual e diurna . . . . .</b>	<b>56</b>
<b>A.3</b>	<b>Análise da estrutura tridimensional dos PFs . . . . .</b>	<b>59</b>
A.3.1	Total . . . . .	59
A.3.2	Ciclo diurno . . . . .	61

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto e problema

A precipitação e a atividade elétrica de relâmpagos são eventos que podem ser impulsionados por diferentes fatores, entre eles: topografia e tipo de superfície. Nos estudos de Christian et al. (2003), Cecil, Buechler e Blakeslee (2014) e Albrecht et al. (2016), foi possível observar a clara distinção entre a densidade de relâmpagos sobre os oceanos e o continente, sendo mais intensa em áreas terrestres e no período da tarde, como mostrado na Figura 1. A razão desse contraste é esclarecida pela teoria termal tradicional, ou seja, como o continente apresenta rápido aquecimento e caráter estático em relação aos oceanos, a superfície terrestre fica mais quente e a baixa atmosfera mais instável para o movimento vertical do ar, o que é significativo para a convecção profunda e atividade elétrica (WILLIAMS; STANFILL, 2002; WILLIAMS; CHAN; BOCCIPPIO, 2004).

Figura (1) – Total de relâmpagos observados na climatologia de 16 anos (1998-2013) do *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Lightning Imaging Sensor (LIS)*: (a) Taxa de densidade de flashes ( $\text{fl km}^{-2} \text{ano}^{-1}$ ) e (b) horário local de máxima taxa de densidade de flashes.



Adaptado de: Albrecht et al. (2016). © American Meteorological Society. Usado com permissão.

Da mesma forma, a distribuição, o tamanho das gotas de chuva e a intensidade não permanecem constantes para distintas regiões, possuindo diferenças segundo a microestrutura e dinâmica da nuvem assim como a orografia (ROSENFELD; ULBRICH, 2003; MACHADO et al., 2014). Com isso, as nuvens precipitantes rasas e isoladas apresentam dominância sobre o oceano, enquanto que os fenômenos convectivos e violentos estão presentes basicamente no continente (LIU; ZIPSER, 2009; HOUZE JR et al., 2015). Por outro lado, a função da direção do vento, do contraste térmico, das variações de pequena

escala na temperatura da superfície do mar e a topografia foram também evidenciadas para a composição dos ciclos diurno e sazonal da precipitação (BIASUTTI et al., 2012).

Contudo, o local com maior eletrificação não ocorre sobre o solo continental, mas sobre o Lago Maracaibo na Venezuela (ALBRECHT et al., 2009; MUÑOZ et al., 2016; ALBRECHT et al., 2016). Esse corpo d'água evidencia convecção profunda e noturna estabelecida com a brisa continente-lago local, ocorrendo casos análogos para outras regiões (e.g., os lagos ao longo do Vale do Rift na África Oriental) (ALBRECHT et al., 2016). Também, condizente com o estudos e comparações de Holle e Murphy (2017) e Virts et al. (2013) sobre o Lago Maracaibo na América do Sul, o estreito de Malaca na Ásia, o Lago Vitória no África Oriental e o Lago Titicaca na América do Sul. Dessa maneira, diferente do período da tarde em que a terra está mais aquecida, no período noturno os lagos estão mais quentes, desenvolvendo frequência de relâmpagos e convecção profunda mais volumosa.

## 1.2 Motivação

Os grandes lagos estão em maior frequência no Hemisfério Norte e em médias latitudes (DOWNING; DUARTE, 2009), zonas que exibem menor concentração de episódios de tempestade, tal como densidade de relâmpagos (CHRISTIAN et al., 2003; LIU et al., 2008; CECIL; BUECHLER; BLAKESLEE, 2014; ALBRECHT et al., 2016). Os lagos podem ser utilizados para atividades de lazer, agropecuária e entre outros, como consequência, os lagos tropicais podem apresentar maior risco para populações locais devido ao desenvolvimento de tempestades, desse modo, faz-se imprescindível compreender a frequência de ocorrência e a intensidade das tempestades formadas sobre esses corpos d'água. Com isso, também é possível aprimorar aspectos como o monitoramento e a prevenção de desastres naturais, colaborando com menores prejuízos de diversas escalas.

Ao decorrer da história, aconteceram diversos eventos onde a natureza foi catalisadora de catástrofes, deixando vestígios de desolação, óbitos e prejuízos econômicos. Entre esses fenômenos que podem facilmente provocar destruição estão os relâmpagos, após o ano de 1873, a maior quantidade de fatalidades verificada foi de 21 pessoas mortas diretamente por um único relâmpago em Zimbábue e 469 mortes relacionadas com um incêndio causado por relâmpagos no Egito (CERVENY et al., 2017). Além disso, segundo Holle (2016a), Holle (2016b) e Holle (2016c), nações desenvolvidas apresentam menos mortalidades por relâmpagos (em média, 0,2 fatalidades por milhão de pessoas por ano) e países em desenvolvimento mostram uma alta correlação de mortalidades em atividades agrícolas, como o caso do Brasil (CARDOSO et al., 2014; FERREIRA et al., 2017). Por outro lado, a precipitação também pode se tornar um grande perigo para os cidadãos, ocorrendo, por exemplo, inundações e deslizamentos de terra, assim como problemas

relacionados com a qualidade da água. Na Venezuela, aproximadamente 30.000 mortes devido a um evento de inundação e deslizamento de terra ocorreram em 1999 (JONKMAN, 2005). Em setembro de 2009, chuvas intensas e inundações impactaram 600.000 indivíduos em 16 nações do Oeste da África (UNITED NATIONS; UN-WATER, 2009). No momento, as informações diretas sobre os impactos de relâmpagos em vários países são escassas, o que dificulta uma análise aprofundada dos efeitos e prejuízos causados. Em países africanos, Holle e Cooper (2018) observaram que a taxa anual de fatalidades registradas em Uganda, Burundi e Malawi foram de 0,9, 2,5 e 5,5 mortes por milhão de pessoas, nações que estão próximas de grandes lagos tropicais, como os Lagos Vitória, Tanganyika e Malawi, sendo provável que as quantidades de mortos sejam ainda maiores devido à falta de dados e análises.

Nos trópicos, a maioria dos corpos d'água estão em países em desenvolvimento ou subdesenvolvidos, assim, na falta de uma adequada gestão dos riscos, a atividade elétrica desses lagos pode causar danos para a população, principalmente, os dependentes da agropecuária. Exemplificando o caso do Lago Vitória, um corpo d'água circundado com uma alta densidade populacional (STEEL et al., 2021), comumente é utilizado para a pesca, cerca de 3.000 a 5.000 fatalidades ocorrem favorecidas por trovoadas a cada ano (VIRTS; GOODMAN, 2020).

Dessa maneira, é evidente a necessidade de maior compreensão da atividade elétrica e da precipitação, principalmente nas regiões em desenvolvimento, para se poder pormenorizar as perdas decorrentes desses eventos, seja com programas de previsão de zonas de perigo e intensidade mais corretos, assim como a maior difusão do conhecimento sobre as tempestades formadas nessas regiões lacustres.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo geral

Determinar as propriedades físicas e morfológicas da precipitação e atividade elétrica das tempestades desenvolvidas sobre corpos d'água tropicais.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Neste estudo, foram abordadas as características da precipitação e eletrificação sobre lagos tropicais. Visou-se compreender:

- O tamanho dos corpos d'água e a topografia da região são decisivos para a atividade elétrica?

- 
- A atividade elétrica se relaciona linearmente com a área, a chuva e a profundidade das tempestades?
  - Para diferentes casos de tempestades, ou seja, com maiores (menores) áreas, chuvas e taxas de *flashes*, a estrutura tridimensional da precipitação é alterada? Existe maior presença de gelo ou precipitação estratiforme?
  - Como é o ciclo diurno e anual da área das tempestades e precipitação total, estratiforme e convectiva com relação à atividade elétrica?
  - O máximo de frequência de ocorrência das tempestades coincide com as maiores intensidades de atividade elétrica?

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Área de estudo

As regiões de estudo serão os grandes corpos d'água nos trópicos, tendo como ponto de partida o Lago Maracaibo e Lago Vitória, o 18° e o 3° maiores lagos do mundo segundo Downing e Duarte (2009). A escolha desses dois lagos inicialmente é decorrente do fato de o Lago Maracaibo ser o local com maior atividade elétrica no globo (ALBRECHT et al., 2009; MUÑOZ et al., 2016; ALBRECHT et al., 2016) e o Lago Vitória ser o maior lago tropical que também apresenta efeitos das circulações de brisa locais (ALBRECHT et al., 2016), com isso, a priori se considerou que o tamanho do lago impacta positivamente na atividade elétrica.

### 2.2 Período de estudo

O período de análise desta pesquisa é do dia 1° de janeiro de 1998 até 31 de dezembro de 2013, os anos em que o satélite utilizado esteve ativo.

### 2.3 Dados

Os dados que serão utilizados na pesquisa serão:

(a) *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM)

O TRMM foi um satélite projetado em 28 de novembro de 1997, na altitude de 350 km e em órbita equatorial com 35° de inclinação (KUMMEROW et al., 1998), ele foi descomissionado em 2014 e tinha como instrumentos um radar de precipitação (em inglês *Precipitation Radar* - PR), um sensor de micro-ondas passivo (*TRMM Microwave Imager* - TMI), um sensor de relâmpagos (*Lightning Imaging Sensor* - LIS), entre outros.

Neste projeto, serão usados 16 anos de dados (1998-2013) do PR, TMI e LIS:

- PR: é um radar banda Ku (13,8 GHz, 2,2 cm de comprimento de onda), permite uma varredura cruzada ao longo de uma largura de faixa de 215 km com uma resolução espacial de alcance cruzado próxima de 4,3 km e tem taxa mínima de precipitação detectável de 0,5 mm h<sup>-1</sup> com resolução de 250 km (KOZU et al., 2001). A refletividade (Z) inferida pelo PR foi utilizada para analisar a

estrutura vertical dos sistemas convectivos, dessa maneira, determinar a classe da precipitação, o conteúdo de água líquida e gelo;

- TMI: é um radiômetro de micro-ondas passivo com dupla polarização e cinco frequências variando de 10 a 85 GHz. A partir dos dados de temperatura de brilho do TMI, tem-se as informações sobre a coluna integrada da nuvem, em que o espalhamento do gelo é mais expressivo;
- LIS: é um conjunto de uma câmera de dispositivo carregado (em inglês *charged coupled device - CCD*) com 16 128×128 *pixels*, junto a um interferômetro centrado na linha do oxigênio atômico neutro a 777,4 nm (CHRISTIAN et al., 2003). A descarga elétrica é estabelecida quando os *pixels* da CCD ultrapassam um valor pré-definido, a congregação dessa descargas ao decorrer do espaço e do tempo sucedem em um relâmpago. O LIS foi usado para determinar a taxa de relâmpagos totais (intranuvem e nuvem-solo) sobre os lagos, ele tem área de visada de 668 km, resolução espacial próxima de 4 km no nadir e temporal de cerca de 93 s, eficiência de detecção de 90% no período da noite e 66% no período do dia.

Cada instrumento tem características particulares e produtos resultantes independentes, em vista disso, a Universidade de Utah integrou as informações do PR, TMI e LIS em uma base de características de precipitação (utilizado em inglês como *precipitation features - PFs*) (LIU et al., 2008). Esse conjunto é atualmente atualizado pela Universidade A&M do Texas, está disponível em <https://atmos.tamucc.edu/trmm/> e é composto por três níveis:

- Nível 1: contém as informações originais do TMI (produtos 1B11 e 2A23), *Visible and Infrared Scanner* (VIRS) (1B01), PR (2A25 e 2A23) e LIS com relação à grade do TMI;
- Nível 2: a partir do nível 1, os PFs são estabelecidos como os *pixels* com taxa de chuva do PR maior que 0;
- Nível 3: fornece um sumário das estatísticas dos atributos dos PFs, por exemplo, a precipitação volumétrica total e a refletividade máxima de uma área particular.

Para este caso, utilizou-se os dados do nível 2 e empregou-se as informações de: quantidade de *flashes* e duração da observação dos *flashes*, número de *pixels* de precipitação total, estratiforme e convectiva do PR, volume de precipitação total, estratiforme e convectiva do PR, mínimas temperaturas de brilho (Tb) com polarização corrigida (do inglês, *Polarization corrected temperature - PCT*) de 37 e 85 GHz, máximas alturas para as refletividades maiores ou iguais a 20, 30 e 40 dBZ, e máximas refletividades.

Em vista de uma melhor compreensão das variáveis, tem-se que:

- Evento: um único *pixel* ultrapassando o limite de detecção do instrumento;
- Grupo: um ou mais eventos concomitantes que estão *pixels* vizinhos em uma matriz do plano focal;
- *Flash*: um ou mais pulsos que ocorrem na mesma célula de tempestade em um tempo e distância determinados equivalente a um composto de grupos;
- Tb de 37 GHz: detecta melhor a camada de precipitação líquida sobre corpos d'água, mas não sobre o continente;
- Tb de 85 GHz: apresenta atenuação devido ao espalhamento, principalmente, por partículas de gelo precipitáveis, não identifica a camada de chuva abaixo, porém identifica concentrações de precipitação de gelo (temperaturas menores);
- PCT: quando é feita a correção da polarização, o efeito da polarização é retirado, colaborando na identificação da convecção mais acentuada e remoção de sinais equívocos de superfície de terra ou de água (CECIL; CHRONIS, 2018);
- Refletividade (Z): é uma medida de eficiência de um alvo e retorno de energia, variando com a morfologia do objeto.

(b) *European Space Agency (ESA) Climate Change Initiative (CCI) Water Bodies (WB)*

O CCI WB é um banco de dados descrito por Lamarche et al. (2017) que fornece a informação dos corpos d'água, diferenciando-os entre água e terra. O conjunto foi obtido do ESA CCI (<http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php>) e unifica os dados do *Synthetic Aperture Radar (SAR)*, dos corpos d'água ópticos e do grupo de elementos suplementares. A base de dados contém informações de *Esri shapefiles*, sendo que a resolução espacial e de coordenadas são respectivamente 150 m e 0,001389°.

A informação do CCI WB é muito importante para se poder discernir entre superfícies de água e de terra, portanto, foi possível identificar as variáveis estudadas apenas sobre os lagos. Outrossim, pode-se usar os dados para estimar as dimensões e área desses corpos d'água.

(c) *Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010)*

O GMTED2010 designa informações da topografia global, é composto por produtos de elevação de varredura para as resoluções espaciais de 30, 15 e 7,5 segundos de arco e foi obtido em <https://www.temis.nl/data/gmted2010/>. Danielson e Gesch (2011) caracterizaram este banco de informações por meio da metodologia de agregação, assim, utilizaram a elevação mínima, máxima, média e mediana, o desvio padrão da elevação, a subamostra sistemática e a proeminência na quebra de linha.

A elevação foi usada para se compreender a orografia da região dos lagos, com isso, observar áreas de vale ou crista que podem ser relevantes para os efeitos de brisa e convecção.

## 2.4 Métodos

### 2.4.1 Determinação dos corpos d'água

A princípio, foi necessário designar os potenciais lagos que representariam as características dos grandes corpos d'água tropicais. Com isso, utilizou-se no total 11 lagos, os 9 maiores lagos do mundo entre aproximadamente  $-20^\circ$  e  $20^\circ$  de latitude classificados por Downing e Duarte (2009) mais os Lagos Kivu e de Valência. Mesmo com essa categorização, não empregou-se a área que foi encontrada por esses pesquisadores, pois ao longo dos anos os corpos hídricos são modificados, seja pela falta/excesso de chuva ou pelo uso antrópico, dessa maneira, optou-se pela estimativa da área com os dados do CCI WB (Seção 2.4.1.1). Foram feitos mapas da atividade elétrica e, a partir dos dados do CCI WB, extraiu-se também a atividade de *flashes* dentro dos corpos d'água (Seção 2.4.1.2), possibilitando a análise da relação entre a taxa de *flashes* e a taxa de *flashes* no período da noite com o tamanho do lago e a topografia (Seção 2.4.1.3). Com o Banco de dados meteorológicos de superfície integrado do *NOAA National Climatic Data Center's* (NCDC) *Integrated Surface Database* (ISD), observou-se a possibilidade da análise das rosas dos ventos, entretanto, a maioria dos lagos não tinham estações meteorológicas de superfície próximas o suficiente, por isso, as rosas dos ventos não foram estudadas.

#### 2.4.1.1 Estimativa da área

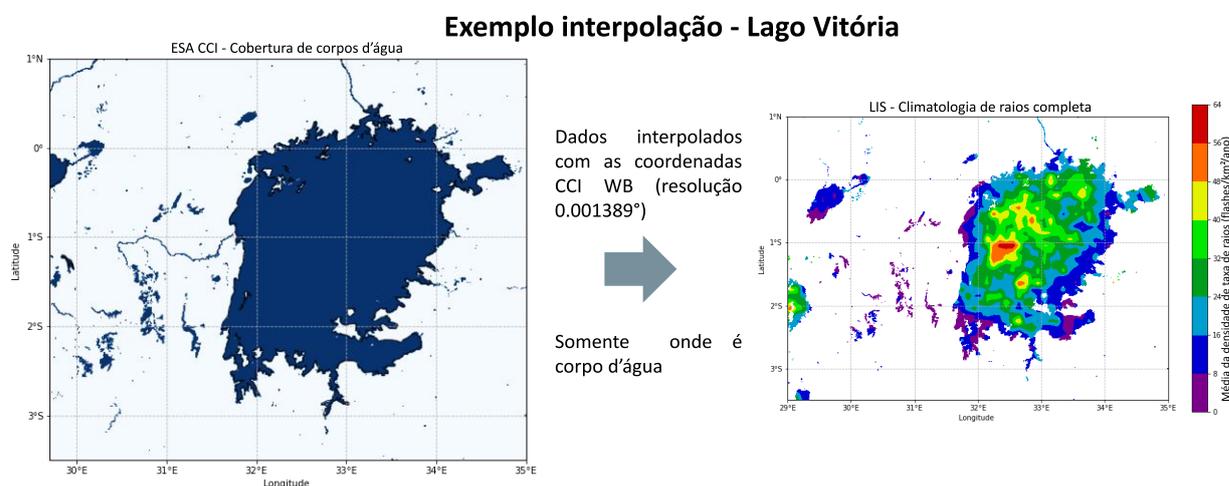
Para cada corpo d'água, foi necessário obter informações das coordenadas de latitude e longitude que enquadravam o lago, após a composição dos mapas de elevação com os dados do GMTED2010 e da atividade elétrica com os dados do LIS, verificou-se novamente se as delimitações feitas foram adequadas, evitando obstruções de outros corpos hídricos ou eliminações de parte do objeto examinado.

Tendo a limitação de coordenadas do lago, calculou-se as áreas utilizando a ideia de que todos os *pixels* que são corpo d'água dentro de determinada zona pertencem ao lago ou rio. Com isso, o produto da soma de todos os *pixels* e da resolução espacial ao quadrado seria o resultado da área (i.e.,  $\#pixels \times 0,150^2$  km<sup>2</sup>). Para determinar essas informações, usou-se a linguagem de programação *Python*.

### 2.4.1.2 Extração da atividade de *flashes* dentro dos corpos d'água

Os dados CCI WB permitem distinguir os locais que são água ou não, por isso, para determinar a quantidade de *flashes* por segundo dentro do corpo de água, bastou-se obter os dados em que o CCI WB indicava ser água. Contudo, cada banco de dados tinha resoluções distintas, portanto, foi necessário padronizar as coordenadas de todos os arquivos. Em vista disso, aplicou-se uma função que interpolava os dados para novas coordenadas e utilizou-se o método linear (`xarray.DataArray.interp` do pacote `xarray` (HOYER; HAMMAN, 2017) do `Python`), utilizou-se as coordenadas do CCI WB ou múltiplos, como ilustra a Figura 2.

Figura (2) – Exemplo dos dados interpolados apenas no corpo d'água.

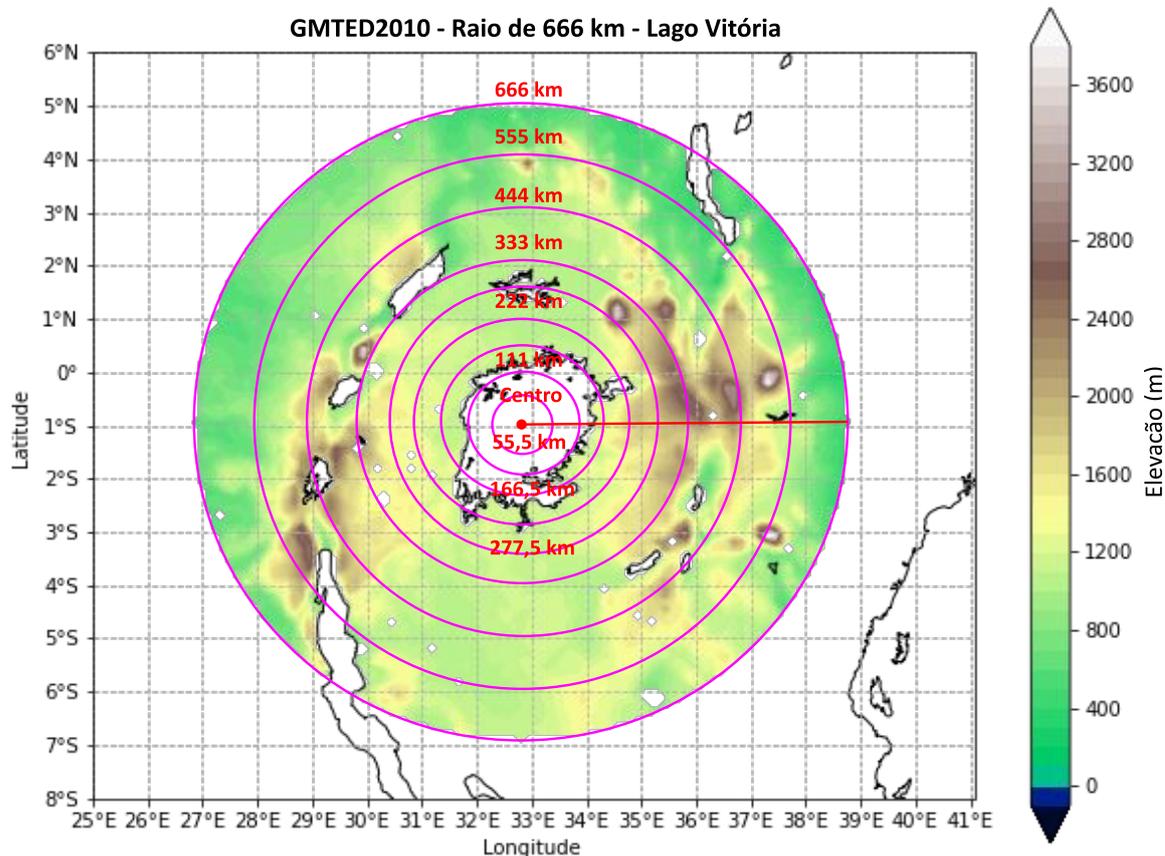


Dados: CCI WB e LIS.

### 2.4.1.3 Relação entre elevação e atividade de *flashes*

Dado que o relevo pode ser um fator para intensificação da atividade elétrica e a precipitação, calculou-se a amplitude da elevação, ou seja, a elevação subtraída pela média altitude do lago, na área do corpo d'água analisado. Assim, determinou-se a porcentagem da amplitude de elevação fora do lago que tinha elevações: <200 m, [200-400) m, [400-600) m, [600-800) m, [800-1000) m, [1000-1500) m, [1500-2000) m, [2000-2500) m, [2500-3000) m, [3000-3500) m, [3500-4000) m,  $\geq 4000$ m em um raio de 666 km (aproximadamente 6° de longitude ou latitude) tendo como ponto central a longitude e a latitude aproximadas do centro do lago, como ilustra a Figura 3.

Figura (3) – Representação das regiões de um quadrado com lado de cerca de 55,5 km, 111 km, 166,5 km, 222 km, 277,5 km, 333 km, 444 km, 555 km e 666 km tendo como ponto central a longitude e a latitude aproximadas do centro do lago.



Dados: GMTED2010.

Com isso, foram feitos os gráficos da porcentagem da amplitude da elevação para o raio de 666 km em conjunto com a média de flashes por minuto no período noturno (19-06HL).

#### 2.4.2 Comparação dos PFs

Fez-se histogramas da área das tempestades, área convectiva e estratiforme, chuva volumétrica convectiva e estratiforme, temperatura de brilho mínima PCT em 37 e 85 GHz, altura máxima com refletividades maiores ou iguais a 20, 30 e 40 dBZ e taxa de *flashes*. Também, para se poder correlacionar quantidade de área ou chuva convectiva, calculou-se a porcentagem de área ou chuva convectiva, ou seja, a razão entre o valor de área convectiva e a soma da área total (convectiva e estratiforme), multiplicando por 100 para se obter em porcentagem. Também, foi calculado a estatística de Kolmogorov-Smirnov (ks) para duas amostras para os dados do Lago Maracaibo com os dados do Lago Vitória,

com isso, faz-se possível verificar se os dados entre os lagos são iguais, sendo que o valor 1 indicaria que as curvas são compatíveis entre si e 0 que não são.

Para correlacionar as variáveis entre si, utilizou-se gráficos de dispersão, determinando um ajuste linear e o coeficiente de determinação ( $R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$ , sendo  $y_i$  o valor observado,  $\bar{y}$  a média observada e  $\hat{y}$  o valor previsto) da reta ajustada. Dessa maneira, caso os dados estejam bem correlacionados linearmente entre si, o  $R^2$  deveria estar próximo de 1.

Por outro lado, foi feito um diagrama bidimensional da temperatura de brilho PCT em 37 e 85 GHz com intuito de compreender a dominância dos tipos de hidrometeoros nas tempestades.

### 2.4.3 Análise da estrutura tridimensional dos PFs

Para o estudo da estrutura tridimensional dos PFs, utilizou-se o método do *Cumulative Frequency Altitude Diagram* (CFAD) (YUTER; HOUZE JR, 1995). O CFAD é um gráfico de frequência cumulativa com a altura, é interessante para se observar a distribuição tridimensional de tempestades e comparar os CFADs para diferentes situações, como distintas áreas de tempestade, áreas convectivas e estratiformes, chuvas convectivas e estratiformes, chuva volumétrica e taxa de *flashes*. Para realizar os CFADs, fez-se a contagem das ocorrências de refletividades em intervalos de 1 dBZ e 1 km de altura, desde 18 (devido à sensibilidade de detecção) a 80 dBZ de refletividade e 0,5 a 20 km de altura, posteriormente, normalizou-se pelo número total de ocorrências em cada altura e multiplicou-se por 100, ou seja, a soma total da frequência a cada altura deve ser equivalente a 100.

### 2.4.4 Avaliação da relação da chuva e atividade elétrica com os ciclos diurno e sazonal

Foram feitos gráficos da série temporal das médias a cada 6 minutos ao longo do dia e das médias mensais da atividade elétrica, áreas e chuvas das tempestades. Também, foram feitos os CFADs e os histogramas para o ciclo diurno, período diurno e noturno, assim como para o período sazonal, separando-se em dezembro, janeiro e fevereiro do Hemisfério Sul (Norte) e junho, julho e agosto do Hemisfério Norte (Sul) como verão (inverno), março, abril e maio do Hemisfério Sul (Norte) e setembro, outubro e novembro do Hemisfério Norte (Sul) como outono (primavera).

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Formação de tempestades

As nuvens são formadas quando o ar ascende, esfriando com a altura e condensando. Com isso, geralmente os impulsos para as nuvens são o aquecimento de superfície e convecção livre, o levantamento junto com a topografia, ascensão generalizada relacionada com a convergência do ar de superfície ou o levantamento com as frentes. Uma tempestade pode ser composta por apenas uma nuvem *cumulonimbus* ou um composto de nuvens. As tempestades com relâmpagos e trovões, são as trovoadas, tempestades convectivas que se desenvolvem com o levantamento do ar, por isso, a origem da trovoada comumente ocorre quando o ar quente e úmido sobe em ambiente condicionalmente instável, ou seja, quando o ar frio e seco sobrepõe o ar quente e úmido da superfície (AHRENS, 2009).

Os relâmpagos são descargas elétricas que usualmente acontecem em trovoadas maduras, podendo ser dentro da nuvem, de uma nuvem a outra, de uma nuvem para o ar ao redor ou da nuvem para o solo. Para se ter um relâmpago, faz-se necessário que áreas com cargas opostas existam dentro de uma nuvem *cumulonimbus*. Uma das possíveis justificativas da eletrificação em uma nuvem é quando o *graupel* ou pedras de granizo caem por uma região de gotas líquidas super-resfriadas e cristais de gelo. Quando as gotas líquidas colidem com o granizo, eles congelam em contato e liberam calor latente. Com esse processo se repetindo, a superfície do granizo fica mais quente que os cristais de gelo ao redor, tendo uma transferência líquida de íons positivos do objeto mais quente para o objeto mais frio, logo, o granizo fica negativamente carregado e o cristal de gelo positivamente carregado (AHRENS, 2009).

Para melhor compreensão da eletrificação nas nuvens, faz-se imprescindível o monitoramento de alta resolução e de longo período das tempestades (ALBRECHT et al., 2011).

### 3.2 Tempestades nos trópicos

Em estudos feitos em ilhas, foi visto que a atividade elétrica sofre a influência da intensidade da corrente ascendente devido à contraposição oceano-continente, o que foi compatível com a hipótese termal tradicional (WILLIAMS; STANFILL, 2002), ou seja, o fato de a superfície do continente aquecer e esfriar mais rapidamente do que os corpos d'água devido ao calor específico. Posteriormente, foi observado de novo que a predominância de relâmpagos sobre ilhas são mais consistentes com a teoria termal do que a hipótese

de aerossol quando a instabilidade e o CAPE (do inglês *Convective Available Potential Energy*, Energia Potencial Convectiva Disponível) são fomentados pelo aquecimento solar (WILLIAMS; CHAN; BOCCIPPIO, 2004). Também foi possível identificar a área que a ilha ( $10^2$ - $10^3$  km<sup>2</sup>) deveria ter para que a justificativa termodinâmica fosse mais coerente no tratamento teórico simplificado utilizado (WILLIAMS; CHAN; BOCCIPPIO, 2004). A produção de relâmpagos continental, de ilhas e costeiras representam cerca de 88% total (CHRISTIAN et al., 2003).

Os máximos mais destacados da atividade elétrica sobre os continentes tiveram relação a uma composição de topografia como observado por Albrecht et al. (2009). A América do Sul subtropical mostrou as tempestades convectivas mais profundas, sistemas convectivos de mesoescala e alta frequência de granizo largo (RASMUSSEN; ZULUAGA; HOUZE JR, 2014). Apesar disso, o continente com maior quantidade de focos de relâmpagos é a África, em seguida, tem-se a Ásia, América do Sul, América do Norte e Austrália, sendo que o máximo da densidade de taxa de *flashes* mostrou predominância sobre o oceano durante a noite e sobre o continente durante a tarde (ALBRECHT et al., 2016).

Segundo Ahrens (2009), a quantidade estimada de trovoadas que ocorrem durante um dia no mundo ultrapassa 50.000, sendo que a região de massas de terra equatorial é mais favorável devido ao conjunto de calor e umidade. Também, as trovoadas são mais frequentes sobre a água ao longo da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), em que a convergência de baixo nível do ar colabora para impulsionar o soergimento. Por outro lado, trovoadas são menos frequentes em climas secos, como regiões polares e áreas desérticas dominadas por altas subtropicais.

Tempestades oceânicas mostraram contribuição bimodal de precipitação provindo de sistemas muito fracos com pouco espalhamento de gelo e sistemas parcialmente fortes que não apresentam altas taxas de *flashes* (NESBITT; ZIPSER; CECIL, 2000). Também, usualmente apresentam máximos de eco mais altos e maior largura horizontal do que no continente (LIU et al., 2012), assim como gotas de nuvem largas, coalescência ativa, precipitação quente e fracas correntes ascendentes (ROSENFELD; ULBRICH, 2003). Sistemas continentais que geraram maior parte da chuva possivelmente têm altas taxas de *flashes*, relacionando com mais acentuadas intensidades de radar e espalhamento de gelo (NESBITT; ZIPSER; CECIL, 2000). Apresentando gotas de nuvem pequenas, coalescência de gotas de nuvem suprimidas, mecanismos de precipitação quente e fortes correntes ascendentes (ROSENFELD; ULBRICH, 2003).

Cerca de 78% de todos os relâmpagos acontecem entre -30° e 30° de latitude, tendo uma variação da taxa de *flashes* pequena (na ordem de 10%) e, possivelmente, uma modulação semianual (CHRISTIAN et al., 2003). Cecil et al. (2005) observaram que 1% dos PFs analisados apresentaram contribuição de 90% dos relâmpagos e 21% da precipitação. Cerca de metade dos relâmpagos foi gerada por tempestades com taxas

de *flashes* intermediárias ( $2,2-31 \text{ fl min}^{-1}$ ) e  $1/8$  do total de relâmpagos são  $0,01\%$  dos PFs, tendo pelo menos  $122 \text{ fl min}^{-1}$ . Posteriormente, (VIRTS et al., 2013) notaram que metade dos relâmpagos (no caso, *strokes*) eram observados em  $8\%$  de área, enquanto metade da precipitação cai em  $22\%$ , mostrando novamente que os relâmpagos tendem a ficar mais concentrados geograficamente. Esses resultados mostraram a relevância do aquecimento diurno da camada limite atmosférica sobre o continente para desenvolver um estado propício para iniciar a convecção intensa.

Sobre o continente, foi observado que os ciclos de nuvem, precipitação e relâmpagos são compatíveis com o ciclo de vida dos sistemas precipitantes dominados pela convecção da tarde. Enquanto que sobre o oceano, os ciclos diurnos da precipitação e relâmpagos podem ser relacionados com os ciclos de vida dos sistemas convectivos noturnos e das chuvas ao início da tarde comumente, entretanto, ainda não tinham sido compreendidos alguns aspectos dos ciclos diurno de precipitação e nuvens (LIU et al., 2008). Em 2012, foi visto que os ciclos diurno e sazonal da precipitação são influenciados pela mudanças da direção do vento, o contraste termal oceano-continente, variações de pequena escala na temperatura da superfície do mar e a orografia (BIASUTTI et al., 2012). Em 2015, notaram que nuvens de chuva isoladas rasas eram basicamente um fenômeno oceânico, enquanto que características convectivas fortes e profundas aconteciam praticamente sempre sobre o continente. Os conjuntos de nuvens sobre o oceano comumente mostram menos intensa convecção do que o continente, porém, formando amplas regiões estratiformes (HOUZE JR et al., 2015), onde a refletividade é aproximadamente homogênea em cada nível e crescente com alturas decrescendo acima do nível de  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  nos CFADs (YUTER; HOUZE JR, 1995), e precipitação se desenvolve em correntes ascendentes menores que  $1 \text{ m s}^{-1}$  majoritariamente como cristais de gelo que agregam em flocos de neve e derretem em chuva na banda brilhante do radar (ROSENFELD; ULBRICH, 2003).

Nos trópicos, a maior parte dos sistemas de chuvas quente apresentam tamanho menor que  $100 \text{ km}^2$  e fraco eco do radar com um máximo modal próximo da superfície de refletividade cerca de  $23 \text{ dBZ}$ . Os sistemas precipitantes quentes de mesoescala mostram fortes ecos de radar em regiões largas de oceanos tropicais, mais acentuado durante a noite do que durante o dia. Mesmo que a média de altura das características da precipitação quente sobre os oceanos seja menor do que sobre a terra, não foi observada distinção regional significativa no tamanho e intensidade (LIU; ZIPSER, 2009).

Observou-se que a mínima temperatura de brilho  $37 \text{ GHz}$  do PF pode ser um bom indicador de probabilidade de relâmpago, entretanto, a área de baixas temperaturas de brilho dos PFs são mais favoráveis para relacionar com as taxas de *flashes*. Por consequência, a taxa de *flashes* não está profundamente correlacionada com o pico de intensidade convectiva da trovoadas. O que é melhor correlacionado com a área total de taxas de *flashes* seria a quantidade total de gelo passando através da área de fase

mista nos centros convectivos (LIU; CECIL; ZIPSER, 2011). Utilizando como indicador as temperaturas em 20, 30 e 40 dBZ dos máximos de eco dos radares, foi notado que as temperaturas em 30 e 40 dBZ são melhores indicadores de probabilidade de relâmpago, no entanto, existe uma grande variação regional nos limites de temperatura, em particular, entre oceano e continente. (LIU et al., 2012).

Nos trópicos profundos (entre  $-10^\circ$  e  $10^\circ$  de latitude), em que há convergência de umidade de larga escala, as circulações diurnas bloqueadas são grandes colaboradoras dos gradientes intensos na distribuição espacial da precipitação média sazonal, durando praticamente todo o ano e podendo ser potencializados ou alterados pelo campo de vento sazonal de grande escala. Por outro lado, algumas áreas apresentam frequências de precipitações climatológicas que mudam intensamente nas costas, opondo ao esperado de que os sistemas meteorológicos de moderada larga escala controlassem a precipitação (BIASUTTI et al., 2012).

### 3.3 Tempestades sobre lagos

No estudo de Albrecht et al. (2016), foi notado que o local com maior taxa de relâmpagos na Terra é o Lago Maracaibo, localizado na Venezuela, como também visto em Muñoz et al. (2016). Cerca de 297 dias do ano, o lago apresenta desenvolvimento de tempestades elétricas, tendo convergência de brisa no período noturno sobre a água aquecida e máximo em setembro. Esse comportamento de convecção noturna profunda impulsionada pelo fluxo convergente localmente forçado sobre uma superfície de lago quente também foi perceptível em outros lagos, como o Lago Vitória, como também analisado por Virts e Goodman (2020), e lagos ao redor do Vale do Rift na África Oriental. Mais especificamente o Lago Vitória, Virts e Goodman (2020) observaram que a mudança sazonal na ZCIT provoca máximos de relâmpagos semianualmente sobre o lago, tendo anualmente cerca de  $450 \text{ fl km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ , a maior densidade total de relâmpagos da região da África Oriental

Com uma comparação entre o Lago Maracaibo na América do Sul, o Estreito de Malaca na Ásia Equatorial, o Lago Vitória na África Oriental e o Lago Titicaca na América do Sul, foi observado novamente a maior frequência de relâmpagos no período noturno. Mesmo com os máximos de atividade elétrica no período da tarde ao redor dos 4 corpos d'água acontecendo entre 15 e 17 HL, os máximos noturnos sobre os lagos foram fora de fase (HOLLE; MURPHY, 2017). De forma geral, foi determinado que o padrão pode ser considerado razoável com o regime do ciclo diurno convectivo costeiro de Kikuchi e Wang (2008), em que o lado do mar tem amplitude moderadamente larga e pico da atividade elétrica entre 21 e 12 HL, enquanto que do lado terrestre se tem intensa amplitude e pico entre 12 e 21 HL. Dessa maneira, foi feita a hipótese que as diferentes fases do máximo

noturno da taxa de relâmpagos seja devido ao conjunto de fatores dos locais específicos.

Por outro lado, por exemplo, o Lago Okeechobee, localizado na latitude de 26°N nos Estados Unidos, apresenta frequência mínima de relâmpagos sobre o lago em relação as maiores densidades na região adjacente de terra aquecida (HOLLE, 2014). Esse lago é menor, está em latitudes mais altas, não apresenta topografia elevada ao redor dele e é localizado em uma península em que as brisas marítimas são muito intensas no verão (HOLLE; MURPHY, 2017).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Determinação dos corpos d'água

Figura (4) – Mapa com a localização dos corpos d'água analisados inicialmente.



Os 11 corpos d'água analisados inicialmente estão mostrados na Tabela 1 e na Figura 4, tendo também as informações do *ranking* de maiores lagos de acordo com Downing e Duarte (2009), o continente em que o corpo d'água é localizado, as longitudes e latitudes ( $^{\circ}$ ) finais e iniciais que foram consideradas ao se estimar a área dos corpos d'água, a área determinada ( $\text{km}^2$ ) e a taxa de *flashes* ( $\text{fl min}^{-1}$ ) média no período diurno, noturno e no ciclo diurno completo.

Tabela (1) – Ranking dos maiores lagos segundo Downing e Duarte (2009), coordenadas empregadas nos cálculos ( $^{\circ}$ ), área dos lagos ( $\text{km}^2$ ) e média da taxa de *flashes* ( $\times 10^{-2} \text{ fl min}^{-1}$ ) durante o dia, noite e total.

Ranking	Nome do corpo d'água	Continente	Longitude ( $^{\circ}$ )		Latitude ( $^{\circ}$ )		Área ( $\text{km}^2$ )	Média da taxa de <i>flashes</i> ( $10^{-2} \text{ fl min}^{-1}$ )		
			Inicial	Final	Inicial	Final		Dia	Noite	Total
32	Lago Albert	África	30,1	31,6	0,9	2,4	5.231	0,30	1,15	0,73
17	Lago Chad	África	13,8	15,3	12,6	13,6	1.829	0,18	0,21	0,20
22	Lago Cocibolca	C. América	-86,0	-84,7	11,0	12,1	8.339	0,24	0,31	0,28
67	Lago Kivu	África	28,5	29,5	-2,5	-1,5	2.295	0,78	0,77	0,78
13	Lago Malawi	África	32,5	36,0	-16,0	-9,0	30.495	0,19	0,55	0,37
18	Lago Maracaibo	S. América	-72,4	-70,9	8,9	10,9	12.419	0,62	4,16	2,43
7	Lago Tanganyika	África	28,5	31,9	-9,0	-3,1	36.661	0,39	0,85	0,62
23	Lago Titicaca	S. América	-70,2	-68,5	-16,7	-15,0	8.041	0,07	0,21	0,14
21	Lago Turkana	África	35,8	36,8	2,0	4,6	7.317	0,03	0,01	0,02
	Lago de Valência	S. América	-67,9	-67,6	10,1	10,3	362	0,21	0,31	0,26
3	Lago Vitória	África	29,7	35,0	-3,5	1,0	65.833	0,44	0,87	0,66

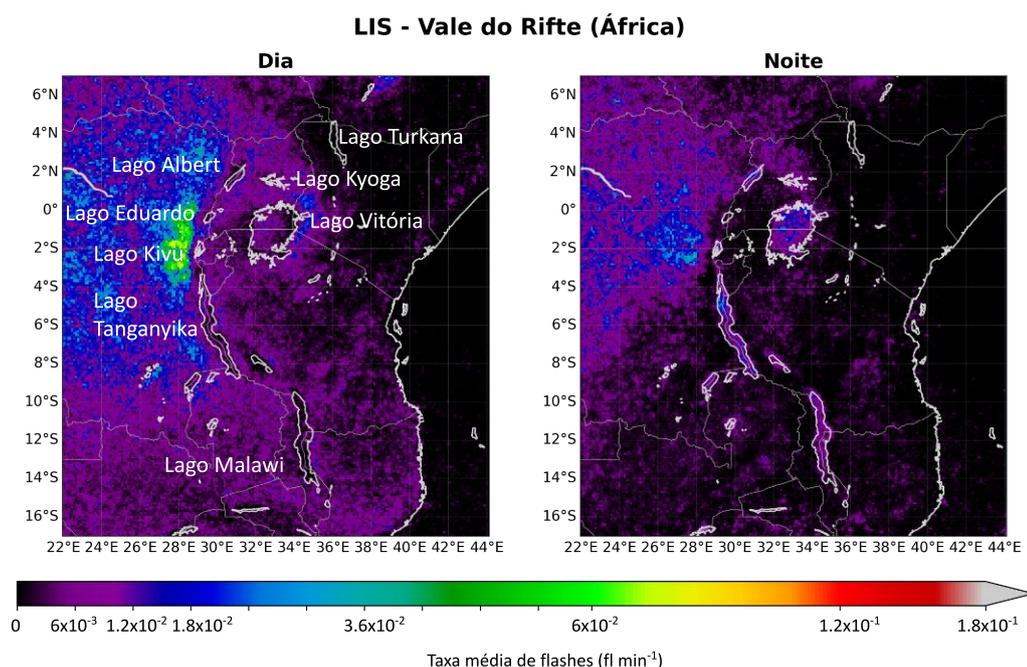
### 4.1.1 Atividade elétrica nos períodos noturno e diurno

Na Seção A.1, pode ser visto a Figura da topografia para o globo, enquanto que na Seção A.2, é possível observar a densidade média da taxa de *flashes* ao longo do ano e do dia entre os trópicos.

#### 4.1.1.1 Vale do Rifte

Existem diversos lagos próximos do Vale do Rifte, como os Lagos Vitória, Albert, Kivu, Tanganyika e Malawi. Observou-se que os Lagos Vitória, Kyoga, Albert, Kivu, Tanganyika e Malawi parecem apresentar comportamentos similares de distinção de atividade elétrica diurna e noturna, enquanto que, em geral outros lagos com menores áreas não parecem apresentar diferença significativa da atividade elétrica (Figura 5), mesmo tendo topografia mais elevada ao redor dos corpos d'água. No período noturno (diurno), a atividade elétrica é mais (menos) intensa sobre o lago em relação à área do solo continental, tendo comumente valores superiores a  $1,2 \times 10^{-2}$  fl  $\text{min}^{-1}$  no período noturno e inferiores a  $1,2 \times 10^{-2}$  fl  $\text{min}^{-1}$  no período diurno. Além disso, notou-se fora dos lagos, tanto no período do dia como da noite, a presença de alta atividade elétrica a Oeste dos Montes Mitumba, sendo especialmente mais intensa durante o dia com média da taxa de *flashes* ultrapassando  $6 \times 10^{-2}$  fl  $\text{min}^{-1}$ . Ainda no intervalo do dia, foi visível maior atividade elétrica a leste do Lago Vitória com valores superiores a  $1,2 \times 10^{-2}$  fl  $\text{min}^{-1}$ , o que não foi perceptível para a noite.

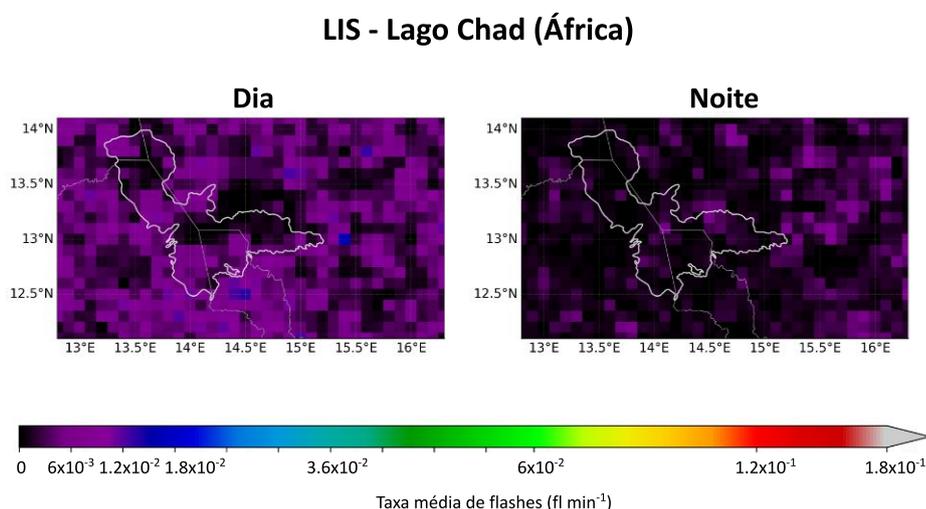
Figura (5) – Atividade elétrica (fl  $\text{min}^{-1}$ ) nos períodos diurno e noturno sobre o Vale do Rifte.



#### 4.1.1.2 Lago Chad

O Lago Chad não teve maior atividade de *flashes* no período noturno e apresentou poucos valores próximos de  $6 \times 10^{-3} \text{ fl min}^{-1}$  (Figura 6), sendo que comumente a taxa média de *flashes* ultrapassava esse valor no intervalo do dia, exceto para a região norte e para o centro do lago. Esse comportamento pode estar relacionado com o fato de que a área do Lago Chad foi alterada significativamente ao longo do tempo (LEMOALLE et al., 2012), tendo de um lado o uso da água para irrigação e outros serviços, e outro em relação à própria disponibilidade de chuva, dado que está na Zona Subsaariana e apresenta acumulado anual de precipitação de cerca de 680 mm (OKONKWO; DEMOZ; ONYEUKWU, 2013).

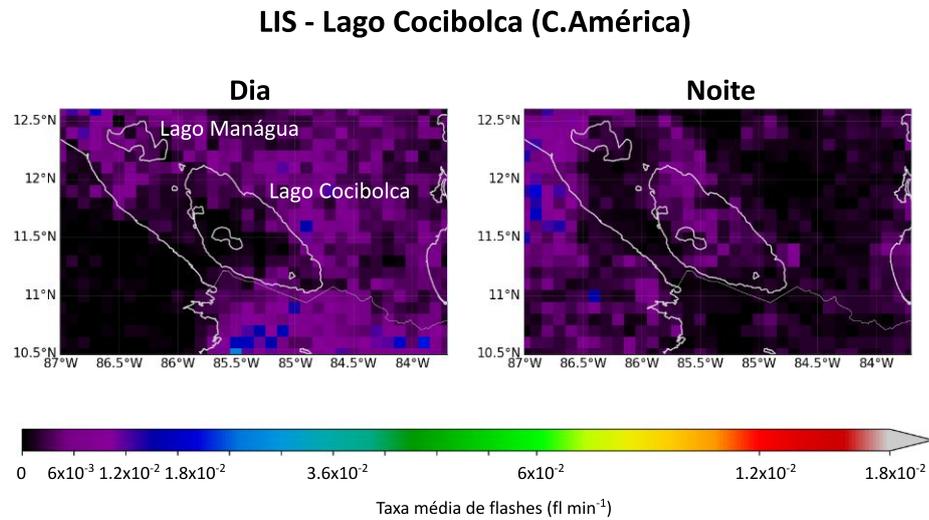
Figura (6) – Atividade elétrica ( $\text{fl min}^{-1}$ ) nos períodos diurno e noturno sobre o Lago Chad.



#### 4.1.1.3 Lago Cocibolca

Na Figura 7, observou-se que o Lago Cocibolca ou também conhecido como Lago Nicarágua teve maior atividade elétrica no período noturno com valores superiores a  $6 \times 10^{-3} \text{ fl min}^{-1}$ , enquanto que, no período diurno, a taxa média de *flashes* variou de 0 até cerca de  $6 \times 10^{-3} \text{ fl min}^{-1}$ . Por outro lado, o Lago Manágua ou Xolotlán não mostrou uma clara distinção entre o dia e a noite. Ambos os lagos estão localizados na Nicarágua, tendo o Oceano Pacífico a oeste e o Oceano Atlântico a leste dos lagos, sendo visível que o Oceano Pacífico também apresentou mais atividade de *flashes* à noite com valores de intensidade aproximadamente semelhantes à da área continental durante o dia, ultrapassando  $6 \times 10^{-3} \text{ fl min}^{-1}$ .

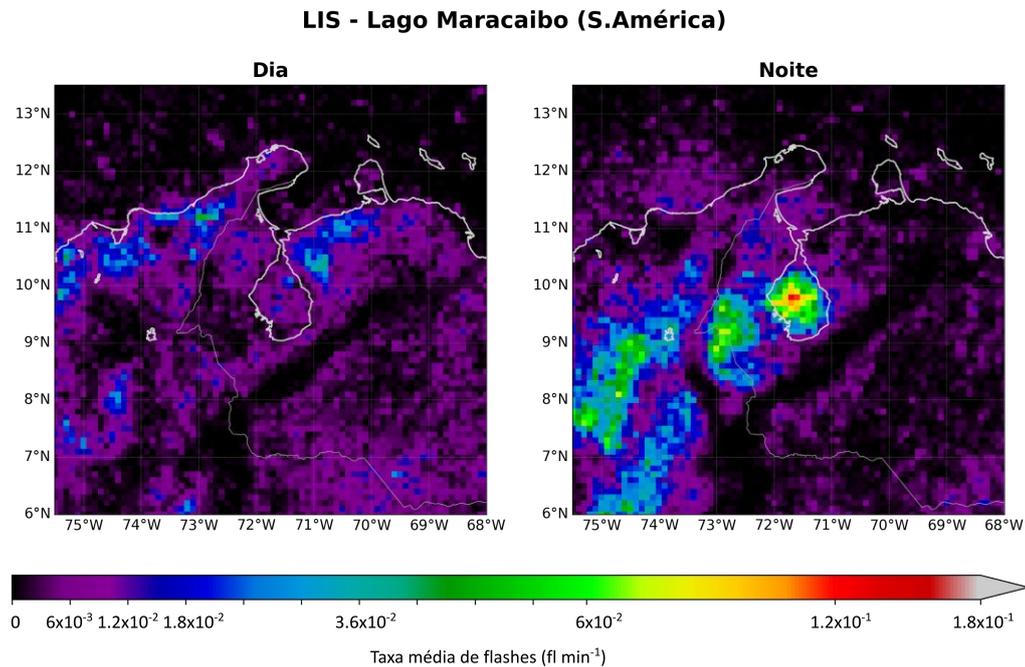
Figura (7) – Atividade elétrica ( $\text{fl min}^{-1}$ ) nos períodos diurno e noturno sobre o Lago Cocibolca.



#### 4.1.1.4 Lago Maracaibo

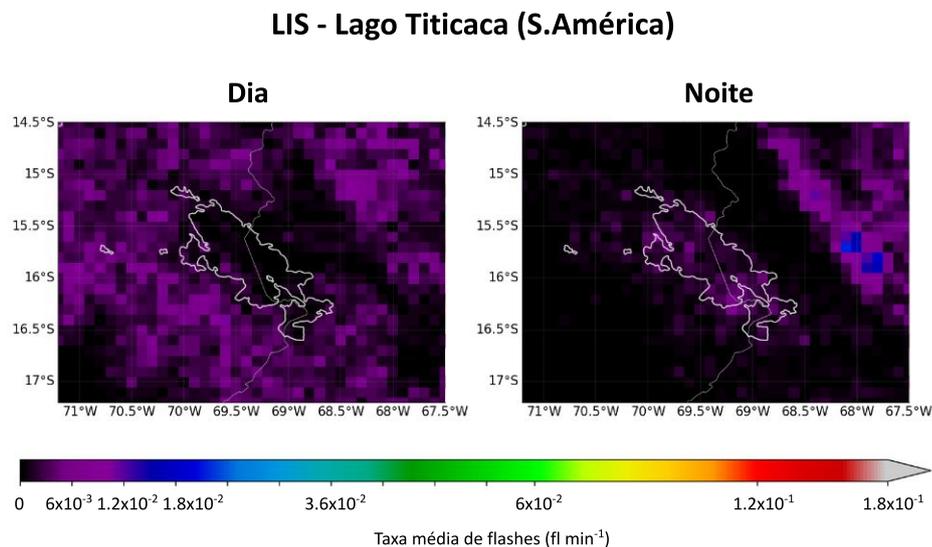
O Lago Maracaibo mostrou contraste acentuado da atividade elétrica entre o dia e a noite (Figura 8), alcançando valores de  $1,8 \times 10^{-2} \text{ fl min}^{-1}$  e  $1,2 \times 10^{-1} \text{ fl min}^{-1}$  respectivamente. O lago apresentou  $6 \times 10^{-3} \text{ fl min}^{-1}$  de dia e  $10^{-1} \text{ fl min}^{-1}$  de noite a mais do que o Lago Vitória, tendo diferença ainda maior para outros lagos. Foi interessante observar que, tanto de dia como de noite, a superfície continental apresentou valores elevados de atividade elétrica, mas as zonas de máximos de intensidade se alteram, de dia na zona costeira da Venezuela e da Colômbia e de noite próximo da Cordilheira dos Andes, a Sudoeste do Lago Maracaibo e nos vales da Colômbia.

Figura (8) – Atividade elétrica (fl  $\text{min}^{-1}$ ) nos períodos diurno e noturno sobre o Lago Maracaibo.



#### 4.1.1.5 Lago Titicaca

Figura (9) – Atividade elétrica (fl  $\text{min}^{-1}$ ) nos períodos diurno e noturno sobre o Lago Titicaca.



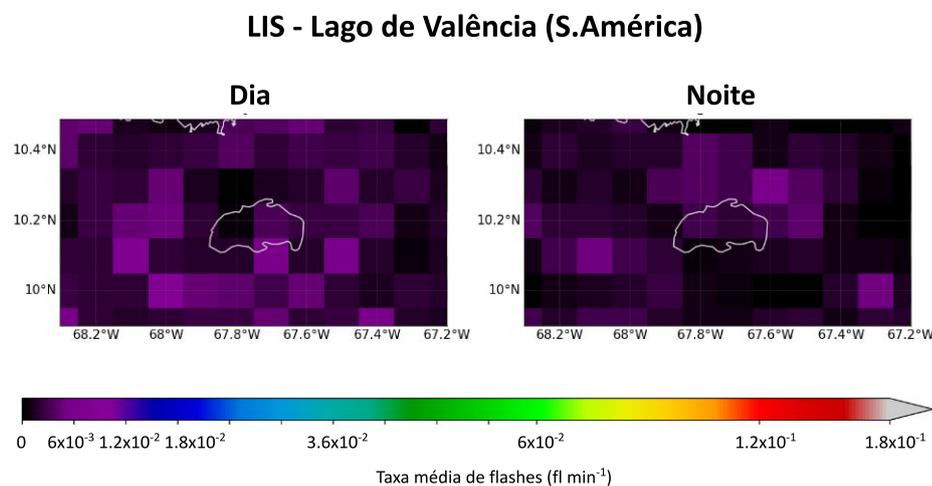
Durante o dia, o Lago Titicaca tem baixa eletrificação com uma taxa de *flashes* média próxima de zero (Figura 9), este lago está sobre a cordilheira dos Andes e a superfície continental apresentou taxas de *flashes* inferiores a  $1,2 \times 10^{-2}$  fl  $\text{min}^{-1}$ . À noite, o lago mostrou eletrificação levemente mais intensa em relação ao dia com cerca de  $6 \times 10^{-3}$  fl  $\text{min}^{-1}$  e foi notável um máximo de atividade elétrica a leste da Cordilheira dos Andes,

ultrapassando  $1,2 \times 10^{-3} \text{ fl min}^{-1}$ . Esse comportamento de maior atividade elétrica próximo da base de montanhas, cordilheiras e montes também foi notado no Vale do Rift e na área adjacente do Lago Maracaibo.

#### 4.1.1.6 Lago de Valência

Não foi possível determinar nitidamente o contraste da atividade elétrica de dia e de noite próximo do Lago de Valência, o menor dos lagos analisados. Apesar disso, geralmente a intensidade da atividade de *flashes* fora do lago de dia foi maior do que de noite, tendo com frequência valores superiores a  $6 \times 10^{-3} \text{ fl min}^{-1}$ .

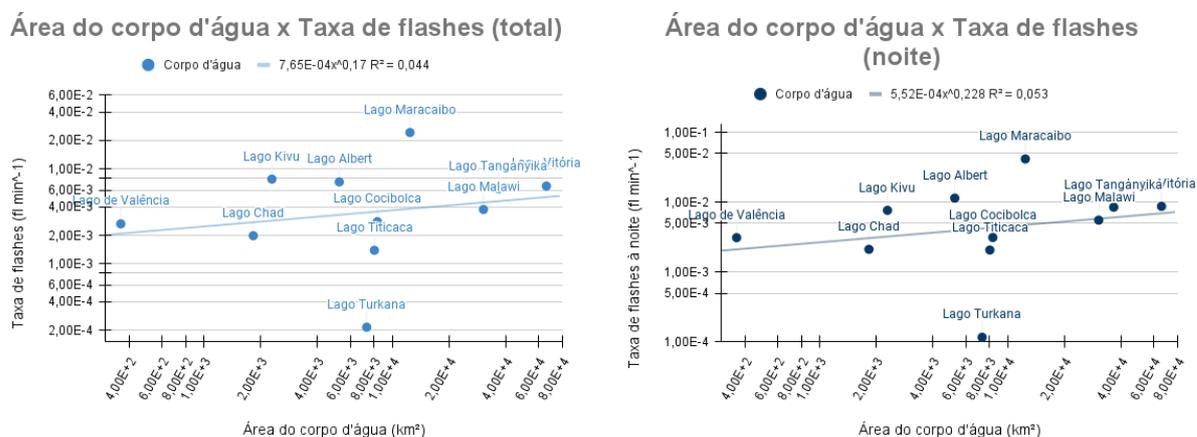
Figura (10) – Atividade elétrica ( $\text{fl min}^{-1}$ ) nos períodos diurno e noturno sobre o Lago de Valência.



#### 4.1.2 Influência da área do lago

Com as estimativas da área, observou-se que a relação entre a área do lago e a atividade elétrica tem baixa correlação (Figura 11). Para a média da taxa de flashes total (i.e., dia e noite juntos), obteve-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de  $7,65 \times 10^{-5} \times x^{0,17}$  foi de 0,044, próximo de zero e positivo. Na Figura 11, notou-se a alta atividade elétrica do Lago Maracaibo em comparação aos outros lagos com cerca de  $3 \times 10^{-2} \text{ fl min}^{-1}$  da média da atividade elétrica total, próximo de  $4 \times 10^{-2} \text{ fl min}^{-1}$  da média da atividade elétrica noturna e área de  $12.419 \text{ km}^2$ , sendo que, por exemplo, o Lago Turkana que está na Zona Subsaariana, uma região árida (MORRISSEY; SCHOLZ, 2014), mostrou menor atividade elétrica (valor inferior a  $3 \times 10^{-4} \text{ fl min}^{-1}$ ), mesmo tendo área não muito menor ao Lago Maracaibo com  $7.317 \text{ km}^2$ . À noite, a relação entre área do corpo d'água e taxa de *flashes* fica melhor, indicando que o tamanho tem correlação com os *flashes* durante a noite mais condizente do que durante todo o período de um ciclo diurno, tendo o ajuste da equação  $5,52 \times 10^{-6} \times x^{0,228}$  e  $R^2$  de 0,053.

Figura (11) – Relação entre a média da taxa de *flashes* total (i.e., dia e noite) (esquerda) e somente durante a noite (direita) ( $\text{fl min}^{-1}$ ) e área dos lagos ( $\text{km}^2$ ) com o ajuste de série de potências.

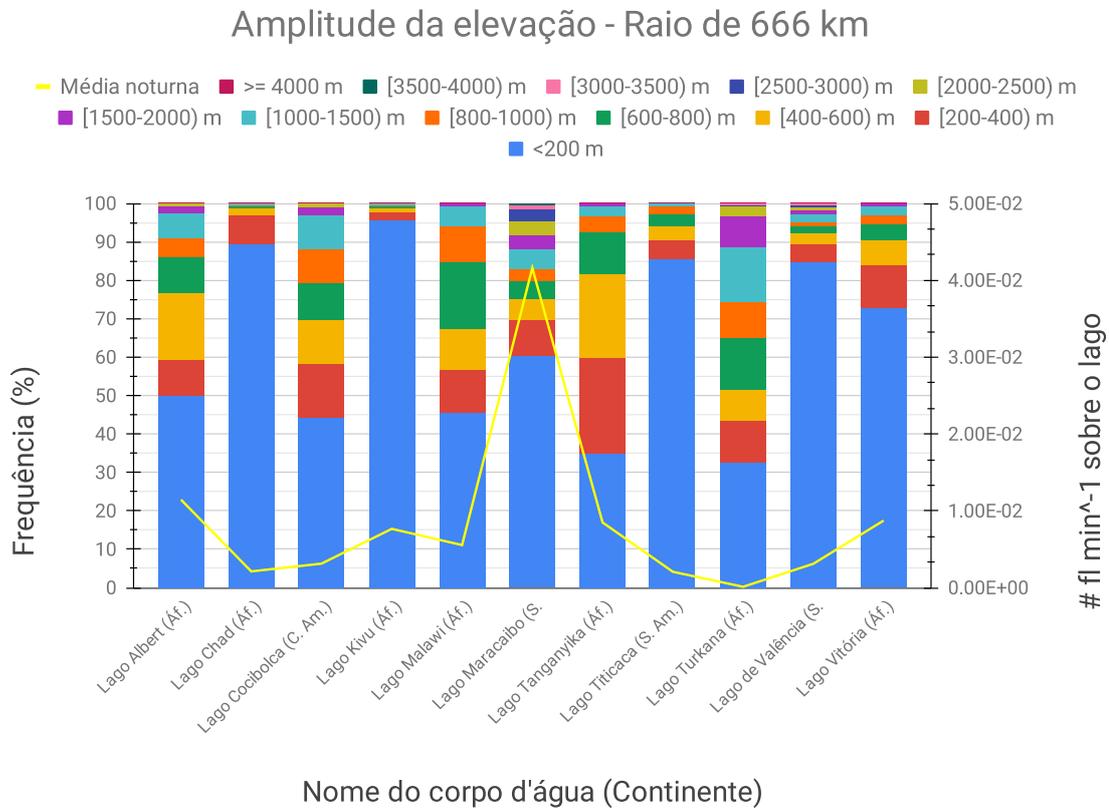


A partir da visualização da relação da eletrificação e área, mesmo tendo valor pequeno de coeficiente de determinação, os resultados indicam que os lagos com mais de  $4.000 \text{ km}^2$  apresentam as maiores atividades elétricas. Todavia, outros fatores também são significativos para a intensificação da atividade de relâmpagos, como a topografia e a circulação de brisa.

### 4.1.3 Influência da topografia

Com a observação da topografia fora dos lagos (Figura 12), inferiu-se a relevância do relevo para a intensificação da atividade elétrica. Utilizando a amplitude da elevação (Figura 12) no raio de  $666 \text{ km}$  fora do corpo d'água, ou seja, a elevação subtraída pela média de altitude dentro do corpo d'água, pôde-se notar que a amplitude pode ser relevante na intensificação da eletrificação, porém, não é o único fator. Dos corpos d'água com maior atividade elétrica, o Lago Kivu foi o que apresentou amplitude de elevação menor, com 90% da região com amplitude de elevação inferior a  $200 \text{ m}$ , sendo que a Lagoa dos Patos, os Lagos Albert, Cocibolca, Malawi e Tanganyika tiveram amplitudes da elevação próximos ou superiores a  $200 \text{ m}$  na região, enquanto que a Lagoa Mirim, o Lago Vitória e Maracaibo mostraram valores de porcentagem da amplitude da elevação intermediários.

Figura (12) – Frequência (%) da amplitude de elevação (altitudes da topografia subtraídas pela altitude média do lago) ao redor de um raio de 666 km centrado nos lagos e média da atividade elétrica noturna (fl min<sup>-1</sup>) sobre o lago.



## 4.2 Propriedades físicas e morfológicas dos PFs

Tabela (2) – Número de órbitas do TRMM e tempestades que passaram sobre cada lago no *pre-boost*, *post-boost* e total, assim como o número de tempestades por órbita e tempestades por hora com os dados dos anos de 1998 a 2013 para as tempestades com *flashes*, sem *flashes* e total. Os valores entre parênteses para o número de tempestades indicam a porcentagem de tempestades com *flashes* e sem *flashes*.

Nome do corpo d'água	Órbita	# órbitas	# tempestade (%)			# tempestade órbita <sup>-1</sup>			# tempestade h <sup>-1</sup>		
			Total	Com <i>flashes</i>	Sem <i>flashes</i>	Total	Com <i>flashes</i>	Sem <i>flashes</i>	Total	Com <i>flashes</i>	Sem <i>flashes</i>
Lago Maracaibo	<i>Pre-boost</i>	781	755	58 (7,7)	697 (92,3)	0,97	0,07	0,89	43,5	3,3	40,2
	<i>Post-boost</i>	2.871	2.781	304 (10,9)	2.465 (89,1)	0,97	0,11	0,86	38,7	4,2	34,3
	Total	3.652	3.536	362 (10,2)	3.162 (89,8)	0,97	0,10	0,87	41,1	3,8	37,3
Lago Vitória	<i>Pre-boost</i>	1.141	2.675	203 (7,6)	2.472 (92,4)	2,34	0,18	2,17	105,5	8,0	97,5
	<i>Post-boost</i>	3.970	9.676	754 (7,8)	8.820 (92,2)	2,44	0,19	2,22	97,5	7,6	88,9
	Total	5.111	12.351	957 (7,7)	11.292 (92,3)	2,42	0,19	2,21	101,5	7,8	93,2

Na Tabela 2, está mostrado a quantidade de órbitas e tempestades que passaram sobre os lagos entre 1998 a 2013 no *pre-boost*, *post-boost* e o total, tal como o número de tempestades por órbita e tempestades por hora para casos com e sem *flashes*, considerando que cada órbita dura cerca de 91,3 minutos no *pre-boost* (até dia 7 de agosto de 2001) e

92,4 minutos no *post-boost* (a partir de 24 de agosto de 2001), observando os lagos por cerca de 80 s e 92 s respectivamente (ALBRECHT et al., 2011). Pelo fato de o Lago Vitória ser mais extenso, mais órbitas e tempestades passam sobre o lago, tendo aproximadamente 2,42 tempestade órbita<sup>-1</sup> e 101,5 tempestade hora<sup>-1</sup>, enquanto que o Lago Maracaibo 0,97 tempestade órbita<sup>-1</sup> e 41,1 tempestade hora<sup>-1</sup>. Notou-se que o número de tempestades com *flashes* por órbita e número de tempestades com *flashes* por hora são pequenos em relação ao sem *flashes*, sendo que o Lago Maracaibo apresentou menores valores em relação ao Lago Vitória, mostrando uma diferença de aproximadamente 0,09 tempestade órbita<sup>-1</sup> e 4,0 tempestade h<sup>-1</sup> para os casos com *flashes* e ainda maior contraste para os casos sem *flashes*. Apesar disso, a porcentagem de tempestades com *flashes* sobre o Lago Maracaibo é superior ao do Lago Vitória, tendo cerca de 10,2% das tempestades com *flashes*, enquanto que o Lago Vitória 7,7% das tempestades com *flashes*. Dessa maneira, ter um maior número de tempestades não implica necessariamente maior atividade elétrica.

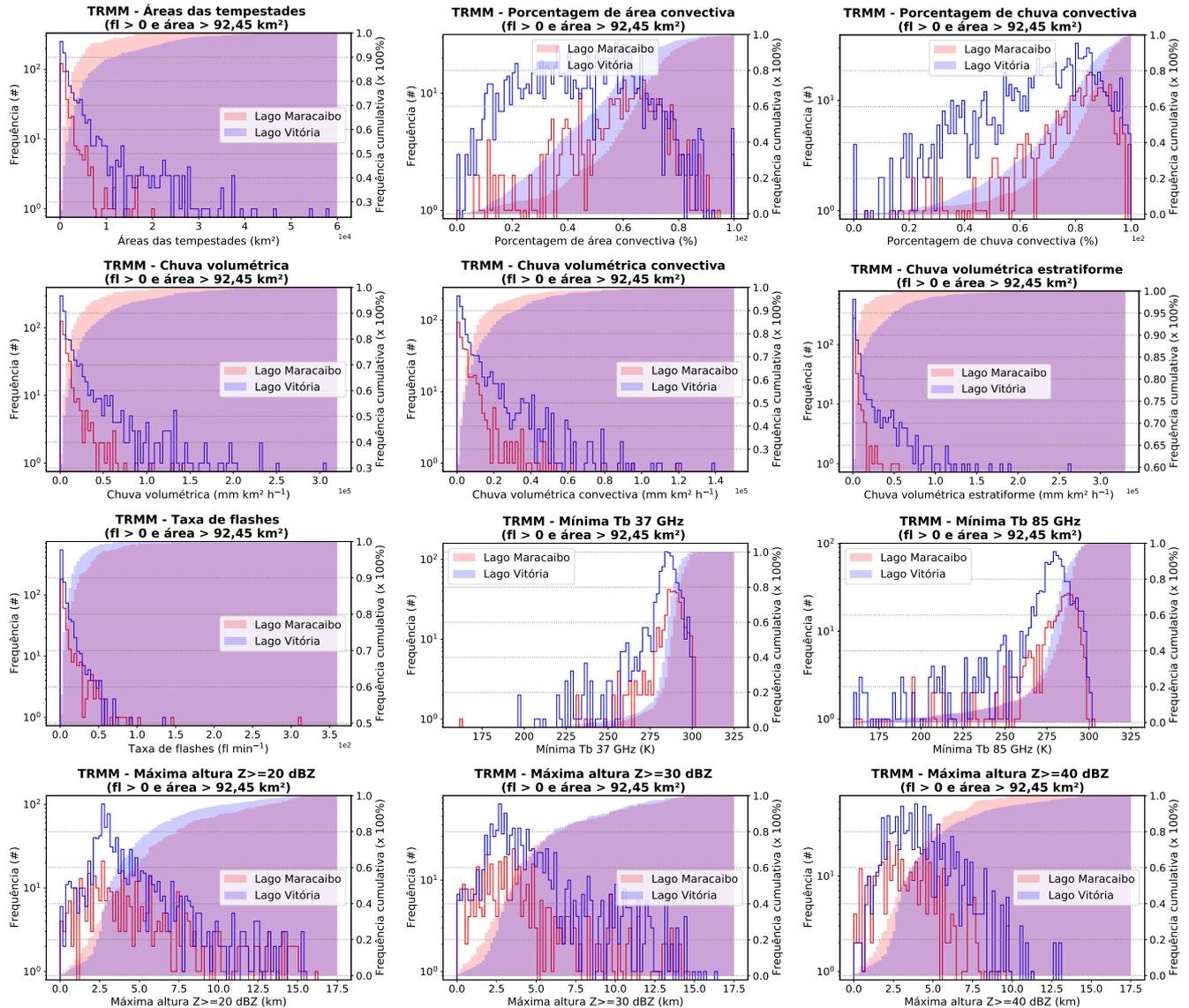
#### 4.2.1 Frequência de ocorrência

Tendo em vista as tempestades com quantidade de flashes maior que zero, as áreas das tempestades (Figura 13) são inferiores a 10.000 km<sup>2</sup> em aproximadamente 96% das tempestades sobre o Lago Maracaibo e 89% sobre o Lago Vitória, com isso, foi visível que o Lago Vitória apresentou áreas de tempestade maiores, alcançando valores superiores que 50.000 km<sup>2</sup>. Ambos os lagos mostraram frequências de tempestades com *flashes* e presença de chuva e área totalmente estratiformes próximas de zero. No Lago Maracaibo, cerca de 28% (12%) das tempestades têm maior parte da área (chuva) estratiforme, assim, as tempestades apresentam maior dominância de chuva e área de chuva convectiva. No caso do Lago Vitória, 56% (20%) das tempestades são compostas em maior parte por área (chuva) estratiforme, apresentando comportamento diferente ao Lago Maracaibo em relação à área das tempestades. Observou-se que as precipitações volumétricas são superiores no Lago Vitória, ultrapassando 200.000 mm km<sup>2</sup> h<sup>-1</sup> e tendo cerca de 90% das tempestades com valores inferiores a 50.000 mm km<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>, enquanto 95% no Lago Maracaibo. Tanto a chuva convectiva como a estratiforme alcançaram valores maiores no Lago Vitória, entretanto, foi claro que o Lago Maracaibo mostrou maiores frequências de altas taxas de chuva convectiva do que altas taxas de chuva estratiforme.

Ainda, notou-se que as tempestades sobre o Lago Maracaibo têm maior taxa de *flashes* do que sobre o Lago Vitória, obtendo valores superiores a 300 fl min<sup>-1</sup>, cerca de 90% das tempestades apresentaram valores menores que 30 fl min<sup>-1</sup> no Lago Maracaibo, enquanto que 95% no Lago Vitória. A temperatura de brilho mínima com correção de polarização de 37 GHz indicou que o Lago Maracaibo teve menor mínimo de temperatura com um valor inferior a 175 K e máximo de frequência de ocorrência na temperatura de 288 K, enquanto que o Lago Vitória teve um pico em 286 K, apesar disso, cerca de

90% das tempestades adquirem temperatura entre 275 a 300 K para ambos os lagos. De forma semelhante, a temperatura de brilho mínima com correção de polarização de 85 GHz apresentou temperaturas entre 250 e 300 K em aproximadamente 90% das tempestades. A altura máxima das tempestades para refletividades maiores ou iguais a 20, 30 e 40 dBZ, em geral, alcançou um pico próximo de 2,5 km, tendo cerca de 30% das tempestades com alturas máximas inferiores a 2,5 km. Especificamente para 20 dBZ, o Lago Maracaibo exhibe alturas máximas mais elevadas do que o Lago Vitória, 80% (90%) das tempestades tiveram máxima altura inferior a 7,5 km (11,2 km) para o Lago Maracaibo, enquanto que para o Lago Vitória, 80% (90%) das tempestades tiveram máxima altura de 6,1 km (7,7 km), mostrando que o Lago Maracaibo apresenta tempestades mais profundas. Além disso, observou-se que cerca de 5% das tempestades tiveram núcleo profundo dado que apresentam altura máxima com refletividade que ultrapassa 40 dBZ superior ou igual a 10 km (RASMUSSEN; ZULUAGA; HOUZE JR, 2014).

Figura (13) – Histograma de frequência (eixo esquerdo) e frequência cumulativa relativa (eixo direito) das áreas das tempestades ( $\text{km}^2$ ), porcentagem da área e chuva convectiva (%), chuva volumétrica, chuva volumétrica convectiva e estratiforme ( $\text{mm km}^2 \text{h}^{-1}$ ), taxa de *flashes* ( $\text{fl min}^{-1}$ ), temperatura mínima com correção de polarização de 37 e 85 GHz (K), altura máxima com refletividade maior ou igual 20, 30 e 40 dBZ (km) sobre cada lago para as tempestades com  $\text{fl} > 0$ .



Com o teste ks das variáveis utilizadas nos histogramas mostrado na Tabela 3, foi perceptível que os valores foram menores que 0,32 para todos os casos, sendo que o melhor resultado foi entre a porcentagem convectiva da área da tempestade dos lagos com 0,31 e p-valor de  $2,00 \times 10^{-15}$ , enquanto que o pior foi para a taxa de *flashes* com 0,08 e p-valor de  $7,03 \times 10^{-2}$ . Com isso, considera-se possível rejeitar hipótese nula de que os dados são iguais, ou seja, os dados dos lagos são considerados diferentes entre si, o que também mostra de outra forma que cada lago apresenta comportamentos diferentes por terem circunstâncias distintas.

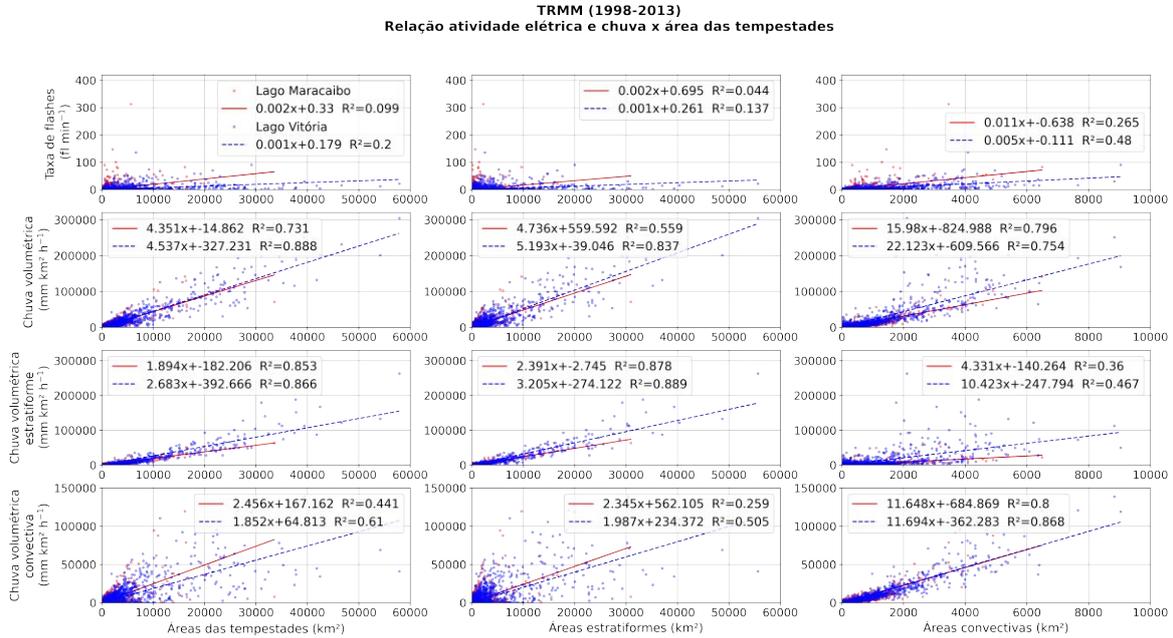
Tabela (3) – Valores do teste ks aplicado e p-valor sobre os dados do Lago Maracaibo e Vitória.

Nome da variável	teste ks	p-valor
Área das tempestades (km <sup>2</sup> )	0,19	$2,93 \times 10^{-8}$
Taxa de flashes (fl min <sup>-1</sup> )	0,08	$7,03 \times 10^{-2}$
Precipitação volumétrica (mm km <sup>2</sup> h <sup>-1</sup> )	0,15	$9,16 \times 10^{-6}$
Mínima Tb 37 GHz PCT	0,25	$6,01 \times 10^{-14}$
Mínima Tb 85 GHz PCT	0,24	$5,96 \times 10^{-13}$
Máxima altura (km) $Z \geq 20$ dBZ	0,13	$6,05 \times 10^{-4}$
Máxima altura (km) $Z \geq 30$ dBZ	0,12	$1,09 \times 10^{-3}$
Máxima altura (km) $Z \geq 40$ dBZ	0,16	$1,70 \times 10^{-6}$
Porcentagem convectiva da área da tempestade (%)	0,31	$2,00 \times 10^{-15}$
Porcentagem convectiva da precipitação da tempestade (%)	0,26	$3,44 \times 10^{-15}$

#### 4.2.2 Relações entre as propriedades físicas e morfológicas

Nas tempestades sobre lagos tropicais, a chuva volumétrica, volumétrica estratiforme e convectiva com as áreas das tempestades, área estratiforme e convectiva tiveram coeficiente de determinação (i.e.,  $R^2$ ) mais próximos de 1 do que as demais variáveis, como taxa de *flashes*, temperatura de brilho mínima e altura máxima (Figuras 14, 15, 16 e 17). Comumente, o Lago Vitória mostrou coeficientes de determinação mais condizentes com uma distribuição linear, apresentando melhores correlações para chuva volumétrica convectiva e áreas das tempestades, assim como chuva volumétrica estratiforme e área estratiforme com  $R^2=0,888$ . O Lago Maracaibo também mostrou melhor correlação para chuva volumétrica estratiforme e área estratiforme, apresentou  $R^2=0,878$ . A atividade elétrica não se correlacionou adequadamente de forma linear com as áreas, chuvas volumétricas, temperaturas de brilho mínimas e alturas máximas, apesar disso, a melhor correlação foi com a área e chuva volumétrica convectiva, alcançando  $R^2$  de 0,265 e 0,48 para as áreas de tempestade com precipitação convectiva, assim como 0,291 e 0,469 para a precipitação convectiva das tempestades sobre os Lagos Maracaibo e Vitória respectivamente.

Figura (14) – Gráficos de dispersão da taxa de *flashes* ( $\text{fl min}^{-1}$ ), chuva volumétrica ( $\text{mm km}^2 \text{h}^{-1}$ ), chuva volumétrica estratiforme ( $\text{mm km}^2 \text{h}^{-1}$ ) e convectiva ( $\text{mm km}^2 \text{h}^{-1}$ ) com a área das tempestades ( $\text{km}^2$ ), a área estratiforme ( $\text{km}^2$ ) e a área de chuva convectiva ( $\text{km}^2$ ).



Em Liu, Cecil e Zipser (2011), os autores observaram uma relação entre a temperatura de brilho e a taxa de *flashes*, notaram que a temperatura de brilho em 37 GHz do PF é um bom indicador de probabilidade de *flashes*, porém, a área de baixa temperatura de brilho do PF é mais condizente com a quantidade de *flashes* do que a temperatura de brilho mínima. Nas distribuições observadas sobre os lagos tropicais (Figura 16), não notou-se claramente essa correlação, apresentando valores baixos de coeficiente de determinação.

Figura (15) – Gráficos de dispersão da taxa de *flashes* ( $\text{fl min}^{-1}$ ), chuva volumétrica ( $\text{mm km}^2 \text{h}^{-1}$ ), chuva volumétrica estratiforme ( $\text{mm km}^2 \text{h}^{-1}$ ) e convectiva ( $\text{mm km}^2 \text{h}^{-1}$ ) com a chuva volumétrica ( $\text{mm km}^2 \text{h}^{-1}$ ), chuva volumétrica estratiforme ( $\text{mm km}^2 \text{h}^{-1}$ ) e convectiva ( $\text{mm km}^2 \text{h}^{-1}$ ).

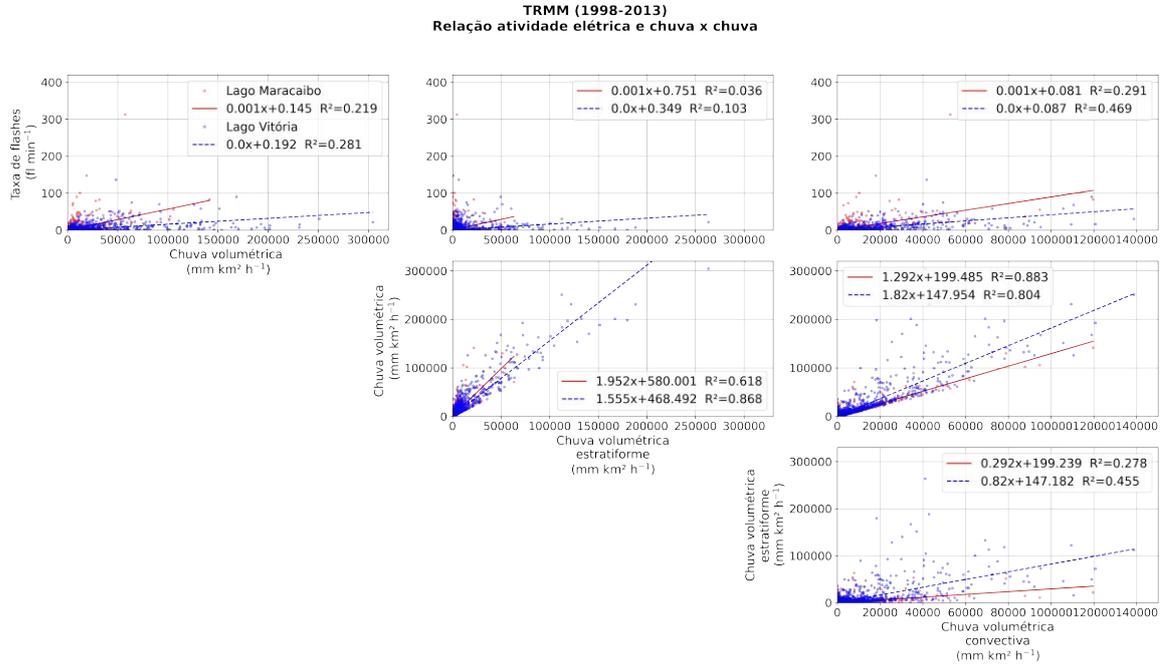


Figura (16) – Gráficos de dispersão da taxa de *flashes* ( $\text{fl min}^{-1}$ ), chuva volumétrica (mm  $\text{km}^2 \text{h}^{-1}$ ), chuva volumétrica estratiforme (mm  $\text{km}^2 \text{h}^{-1}$ ) e convectiva (mm  $\text{km}^2 \text{h}^{-1}$ ) com a temperatura de brilho mínima com correção de polarização de 37 GHz (K) e a temperatura de brilho mínima com correção de polarização de 85 GHz (K).

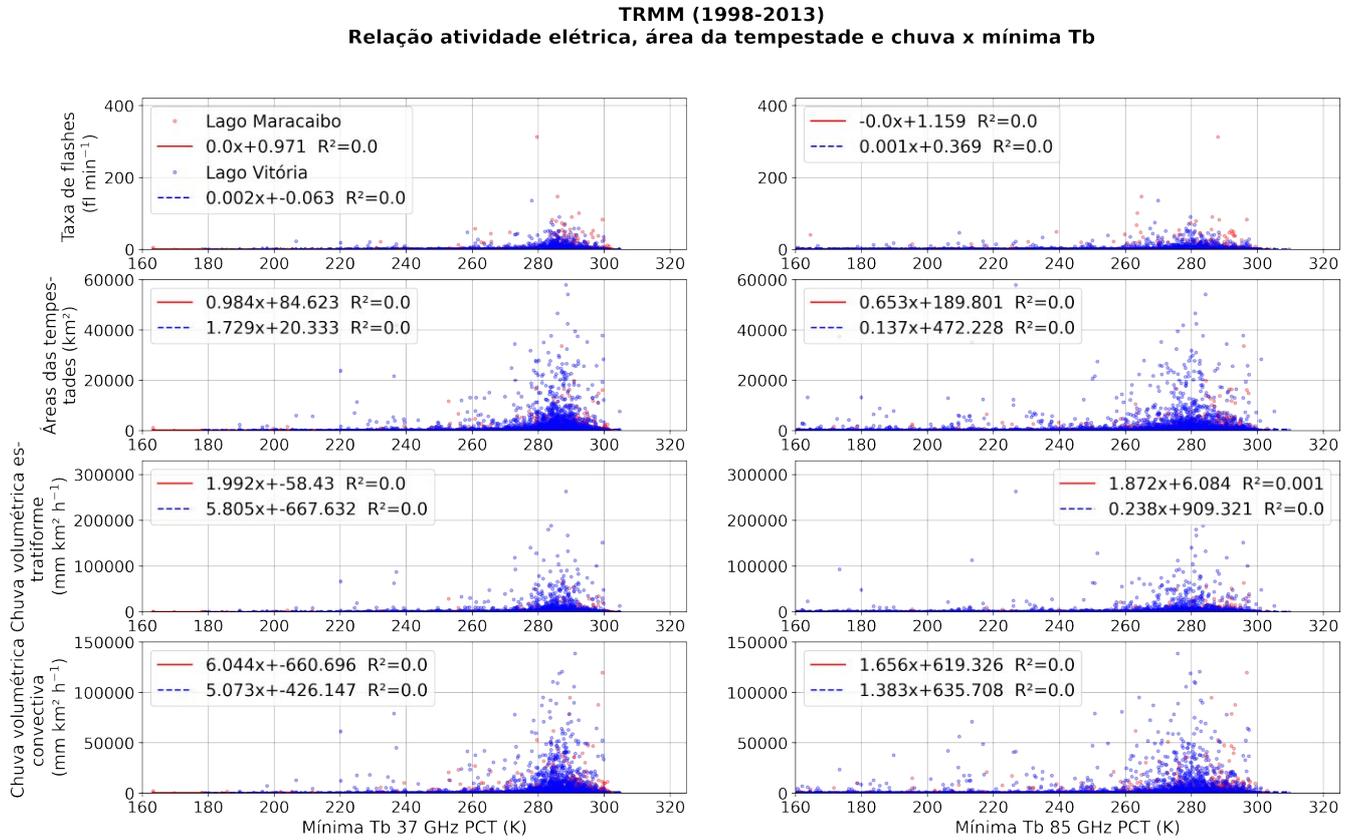


Figura (17) – Gráficos de dispersão da taxa de *flashes* ( $\text{fl min}^{-1}$ ), chuva volumétrica ( $\text{mm km}^2 \text{h}^{-1}$ ), chuva volumétrica estratiforme ( $\text{mm km}^2 \text{h}^{-1}$ ) e convectiva ( $\text{mm km}^2 \text{h}^{-1}$ ) com a altura máxima com refletividade maior ou igual a 20 dBZ (km), a altura máxima com refletividade maior ou igual a 30 dBZ (km) e a altura máxima com refletividade maior ou igual a 40 dBZ (km).

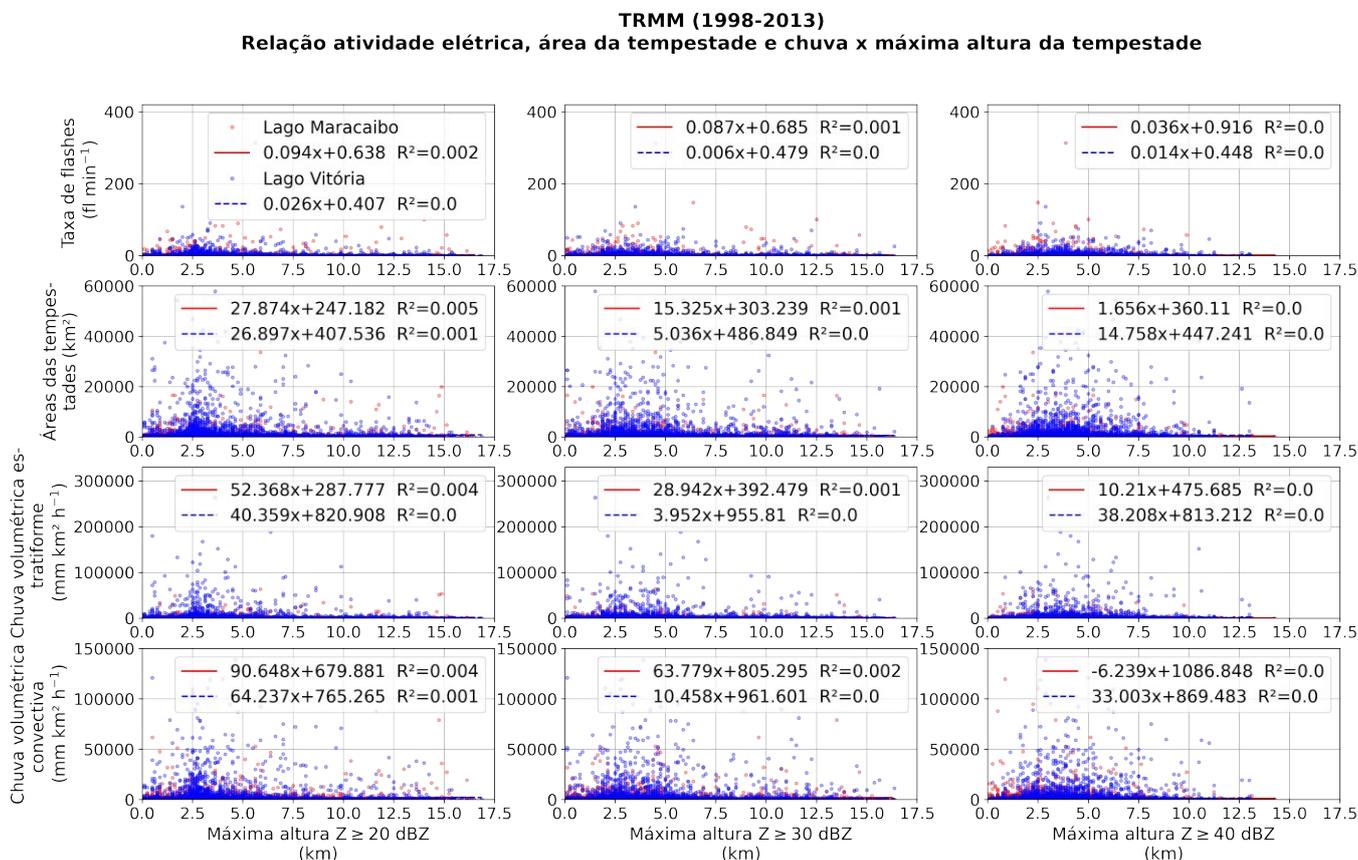
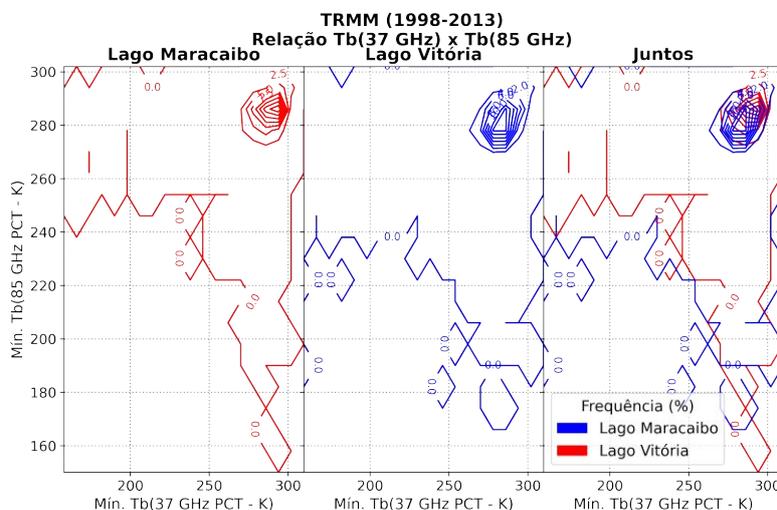


Figura (18) – Diagrama bidimensional da mínima temperatura de brilho 37 GHz e 85 GHz PCT para o Lago Maracaibo, Lago Vitória e para ambos sobrepostos no mesmo painel.



O diagrama bidimensional da mínima temperatura de brilho 37 e 85 GHz PCT

(Figura 18) frequências de temperaturas menores para o Lago Maracaibo, indicando maior presença de *graupel*. As temperaturas de brilho PCT 37 e 85 GHz variaram entre aproximadamente 270 e 300 K, e 270 e 295 K respectivamente.

### 4.3 Análise da estrutura tridimensional dos PFs

Com os CFADs (Figuras 19 e 20), foi notado a mudança da inclinação no perfil da refletividade que, resultado do derretimento do gelo abaixo da isoterma de 0 °C, está visível acima de 3,5 km de altura tanto sobre o Lago Maracaibo quanto sobre o Lago Vitória. Abaixo do nível de 0 °C, os ecos são produzidos pelas gotas de chuva (HOUZE JR.; WILTON; SMULL, 2007) e acima, tem-se a região de mista e de gelo. O valor de área equivalente a 30.000 km<sup>2</sup> separa aproximadamente fenômenos de microescala com a mesoescala.

Para as tempestades com áreas menores ou iguais que 30.000 km<sup>2</sup>, notou-se uma maior amplitude da refletividade abaixo do nível de congelamento, o que é compatível com a precipitação que cai da convecção em distintas fases de desenvolvimento, semelhante ao encontrado por Houze Jr., Wilton e Smull (2007), tendo média da refletividade de aproximadamente 35 dBZ. Próximo da isoterma de 0°C, tem-se comumente uma banda brilhante devido à camada de derretimento onde um eco de refletividade mais alta fica visível, essa banda brilhante foi mais aparente nos casos de tempestades com áreas menores ou iguais que 30.000 km<sup>2</sup> e taxa de *flashes* igual a 0 fl min<sup>-1</sup> sobre o Lago Vitória, coincidente com uma tendência de precipitação mais estratiforme. Além disso, o Lago Maracaibo comumente mostrou um regime com frequências mais elevadas próximo de 20 e 40 dBZ em superfície, o que não ocorre claramente com o Lago Vitória, tendo maiores frequências apenas próximo de 20 dBZ em superfície.

Para tempestades com porcentagens de área e chuva mais estratiformes, foi notável frequências mais elevadas de refletividades próximas a 20 dBZ em alturas superiores, alcançando cerca de 8% da frequência acima de 5 km no Lago Maracaibo e na altura de 3 km no Lago Vitória, enquanto que para tempestades mais convectivas, frequências maiores foram mostradas maior perto da superfície em torno de 20 dBZ também (Figuras disponíveis na Seção A.3.1).

Observou-se que tempestades com maiores áreas ou taxas de *flashes*, a amplitude da refletividade próxima da superfície foi pequena em relação aos eventos de tempestade com valores menores, tendo uma refletividade média em alturas superiores mais elevada, cerca de 50 dBZ. Por outro lado, devido à pequena quantidade de perfis para os casos de tempestades com áreas maiores que 30.000 km<sup>2</sup>, não é possível fazer uma análise e comparação estatística adequada.

A partir da diferença entre os CFADs dos Lagos Maracaibo e Vitória, foi visível que

o Lago Maracaibo apresenta frequências maiores próximas de 40 dBZ perto da superfície para todos os eventos analisados, enquanto que o Lago Vitória mostrou frequências mais elevadas em refletividades inferiores 40 dBZ para tempestades com áreas menores que 30.000 km<sup>2</sup> ou sem *flashes*, e superiores a 40 dBZ para as tempestades com presença de *flashes*. Acima de 5 km de altura, tanto o Lago Maracaibo como o Vitória mostraram altas frequências de refletividades próximas de 20 dBZ para tempestades com áreas menores ou iguais a 30.000 km<sup>2</sup> ou sem *flashes*, não tendo grande diferença entre os CFADs. Já para as tempestades com *flashes* para alturas acima de 7 km, foi notado frequências mais elevadas para refletividades menores do que o caso do Lago Vitória para tempestades com quantidade de *flashes* menor ou igual a mediana, mas para tempestades com quantidade de *flashes* maior que a mediana, o Lago Maracaibo se destacou para refletividades superiores, condizente com a maior atividade elétrica neste lago. Com isso, de forma geral, os CFADs apresentaram valores de refletividades superiores em altos níveis para as tempestades sobre o Lago Maracaibo, conseqüentemente, mostram maior presença de gelo nesses níveis em relação ao Lago Vitória, sendo provável que essas tempestades tenham mais relâmpagos intranuvem e em níveis mais elevados, assim como alta probabilidade de detecção pelo LIS.

Figura (19) – CFAD das refletividades máximas (dBZ) das tempestades sobre o Lago Maracaibo e Vitória, assim como a diferença das frequências de refletividade dos lagos, a cada 0,5 km de altura e 1 dBZ de refletividade, para as tempestades com áreas  $\leq 30.000 \text{ km}^2$  e  $> 30.000 \text{ km}^2$ . O número de perfis indica quantos perfis foram utilizados para a construção do CFAD.

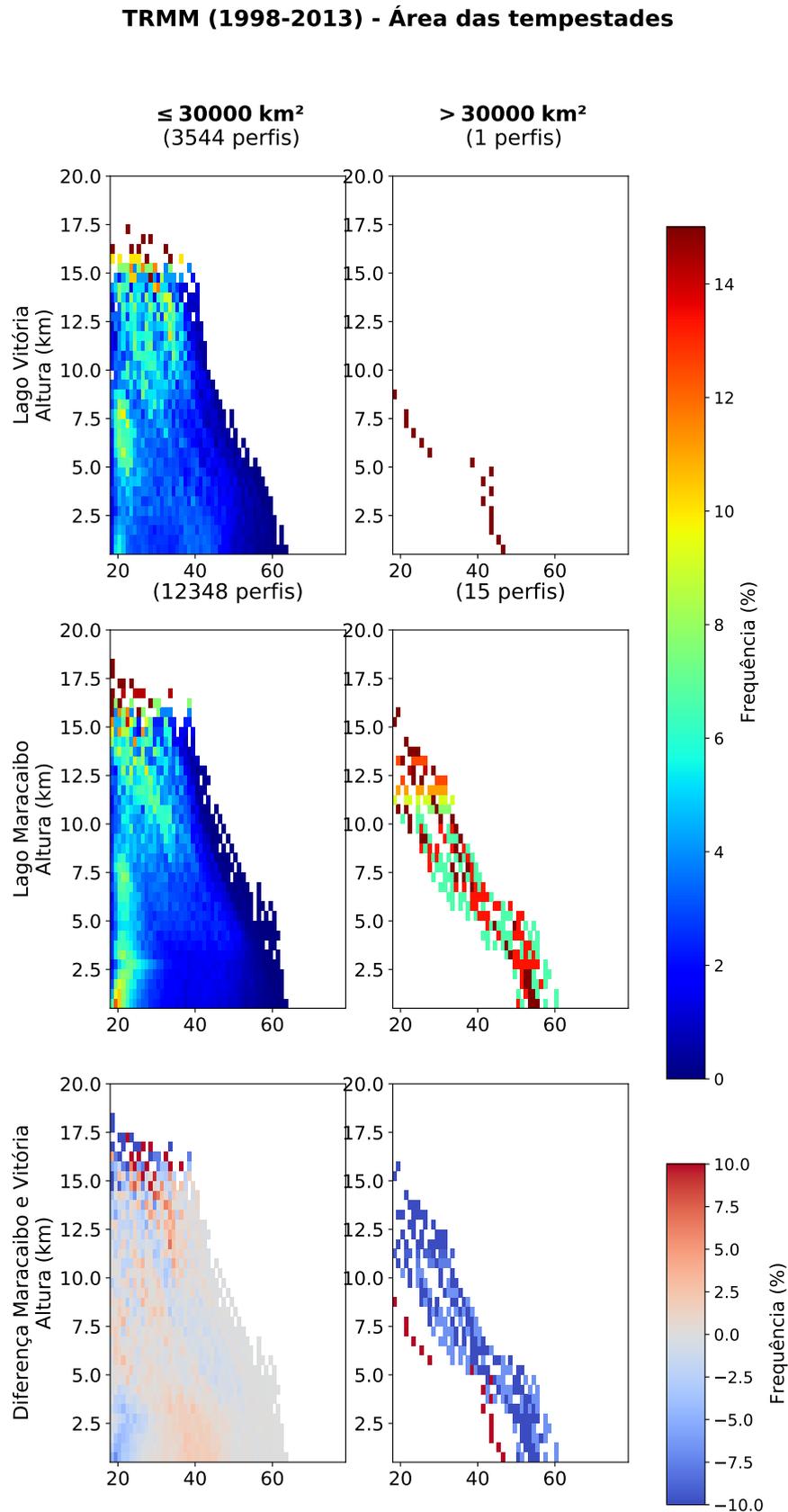
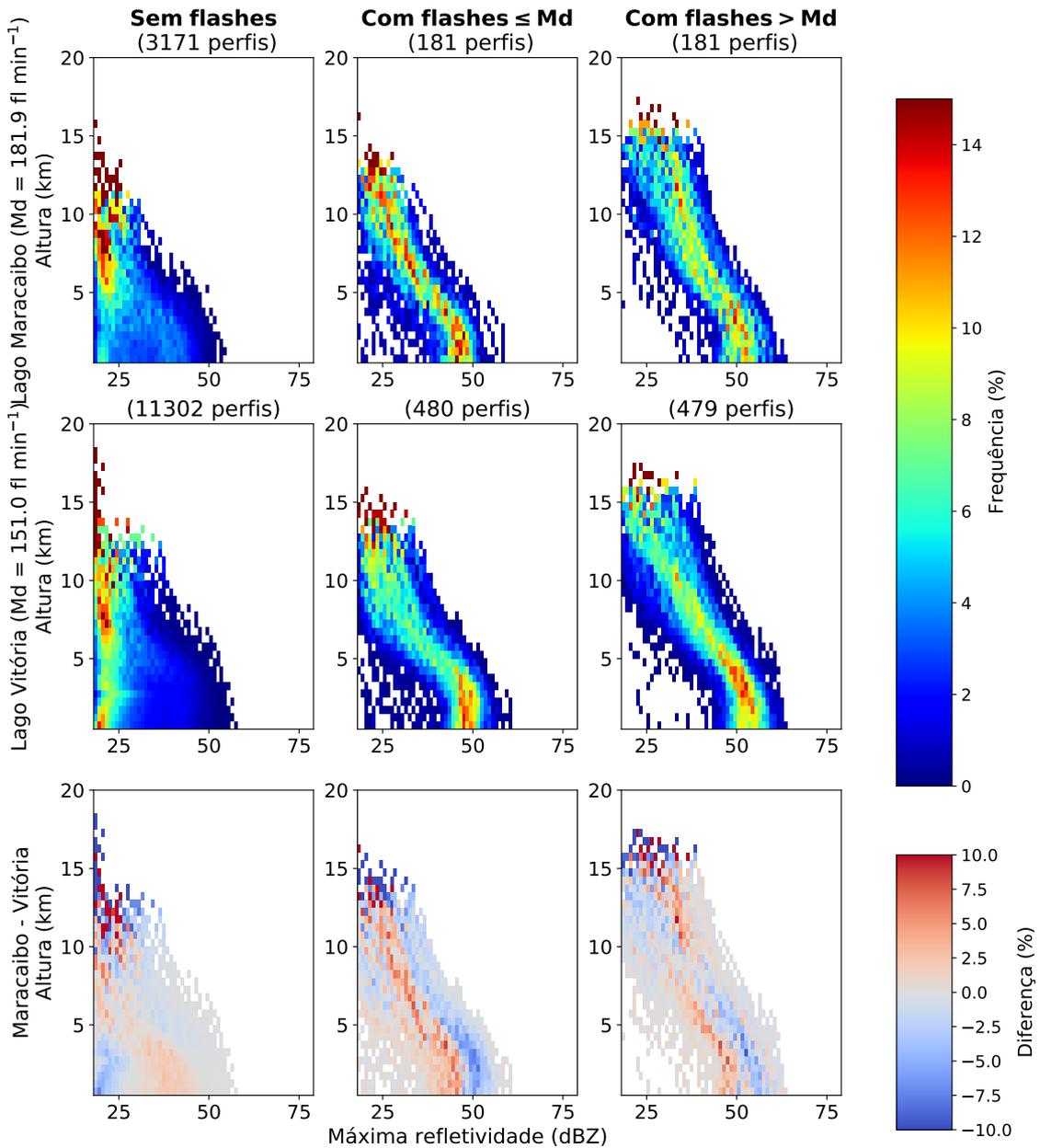


Figura (20) – CFAD das refletividades máximas (dBZ) das tempestades sobre o Lago Maracaibo e Vitória, assim como a diferença das frequências de refletividade dos lagos, a cada 0,5 km de altura e 1 dBZ de refletividade, para as tempestades com taxa de flashes de  $0 \text{ fl min}^{-1}$ , menor ou igual a mediana da atividade elétrica para tempestades com *flashes* (Md) e maior que a mediana. O número de perfis indica quantos perfis foram utilizados para a construção do CFAD.

**TRMM (1998-2013) - Taxa de flashes**



## 4.4 Avaliação da relação da chuva e atividade elétrica com os ciclos diurno e sazonal

Para se avaliar o comportamento da precipitação e eletrificação sobre os lagos ao longo do tempo, faz-se imprescindível utilizar de gráficos temporais, como por exemplo, a Figura 21.

### 4.4.1 Ciclo diurno

Na Figura 21, foi evidente a maior concentração de atividade elétrica no período noturno dentro de ambos os lagos. Na vizinhança fora do Lago Maracaibo, ainda é possível notar altas taxas de *flashes* à noite, mas também se percebe no período da tarde, nunca ultrapassando  $15 \text{ fl min}^{-1}$  como ocorreu sobre o Lago Maracaibo durante o período noturno. Já na vizinhança fora do Lago Vitória, existe um claro aumento da atividade elétrica ao fim da tarde e começo da noite, tendo como valor máximo cerca de  $1,5 \text{ fl min}^{-1}$ , praticamente a metade do máximo da atividade elétrica dentro do lago. Quando a atividade de *flashes* é maior, faz-se perceptível que as áreas e chuvas convectivas aumentam, além disso, as chuvas e áreas tendem a ter máximos superiores sobre os lagos do que fora deles, exceto para as áreas das tempestades sobre o Lago Maracaibo.

Figura (21) – Série temporal ao longo do dia (a cada 6 minutos) de todas as áreas, estratiformes e convectivas ( $\text{km}^2$ ) com a taxa de *flashes* ( $\text{fl min}^{-1}$ ) dentro dos lagos e em uma vizinhança fora dos lagos.

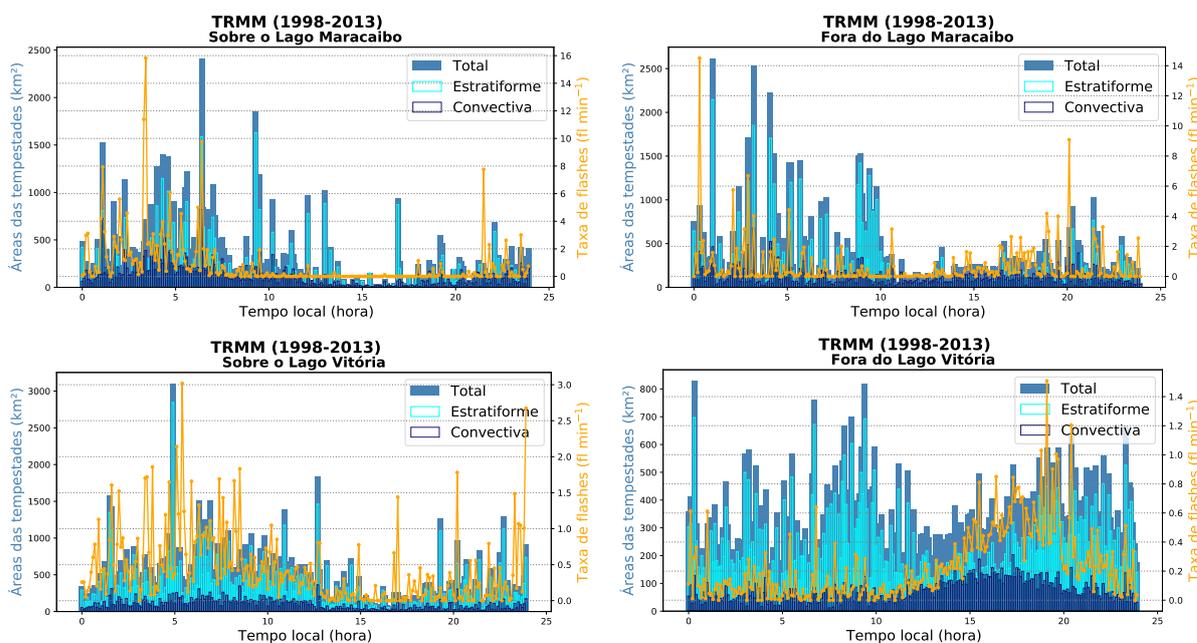
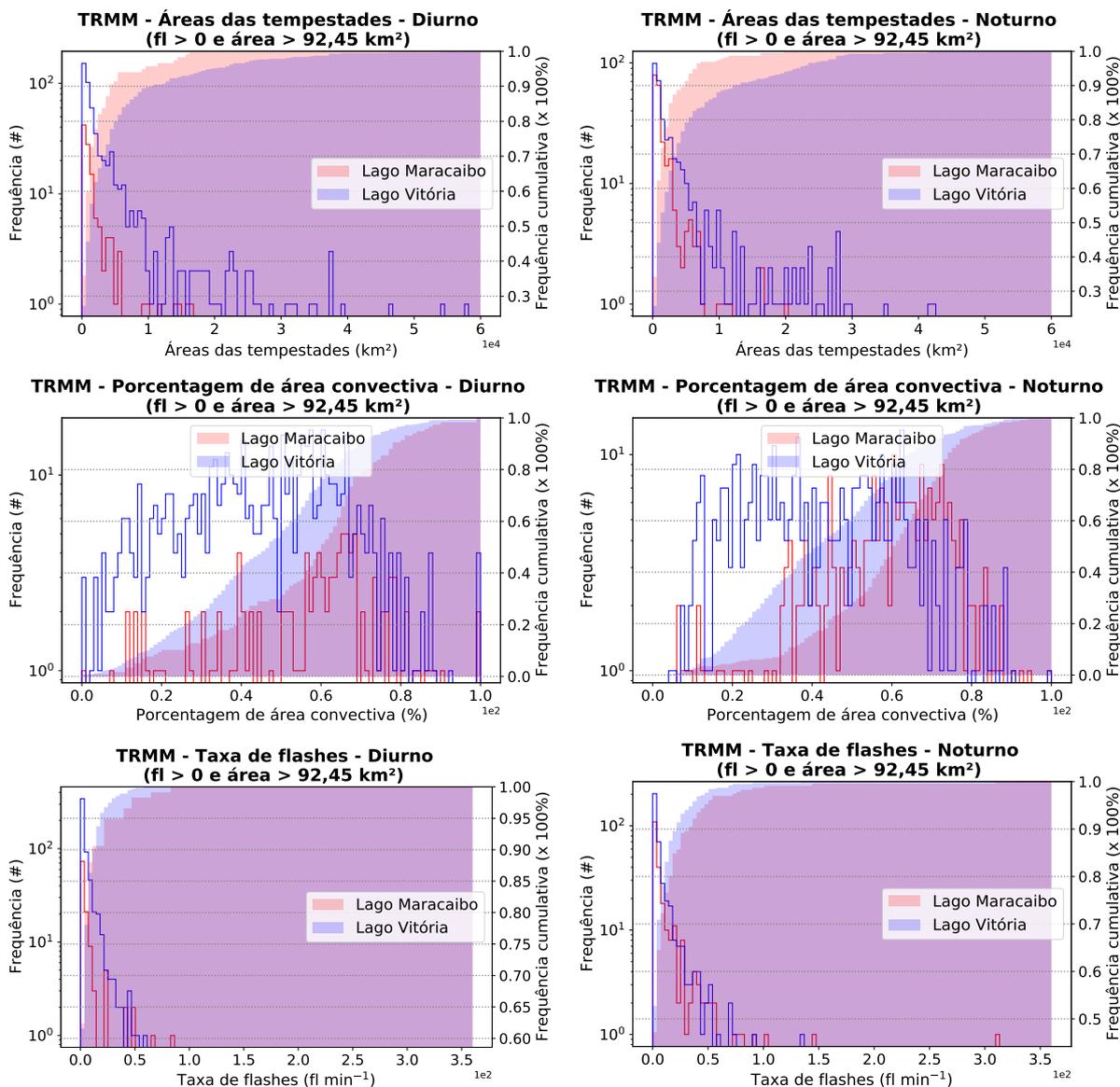


Figura (22) – Histograma de frequência (eixo esquerdo) e frequência cumulativa relativa (eixo direito) das áreas das tempestades (km<sup>2</sup>), porcentagem da área de chuva convectiva (%) e taxa de *flashes* (fl min<sup>-1</sup>) sobre cada lago de dia e de noite.



Na Figura 22, o Lago Vitória e Maracaibo alcançaram áreas de tempestades superiores a 15.000 km<sup>2</sup> durante o dia, o que também aconteceu à noite. Novamente, as áreas das tempestades sobre o Lago Vitória são maiores, em principal, para o período diurno. Cerca de 50% das tempestades apresentaram maior parte da área de chuva estratiforme sobre o Lago Vitória, em contraponto, o Lago Maracaibo mostrou apenas 26% durante o dia. Para a noite, 60% das tempestades tinham predominância de área de chuva estratiforme, enquanto que 24% para o Lago Maracaibo, assim, o Lago Maracaibo tende a ficar mais convectivo durante o intervalo da noite e o Lago Vitória mais estratiforme. Já a atividade de *flashes*, notou-se que os lagos mostram taxa de *flashes* inferiores a 120 fl min<sup>-1</sup> no período do dia e alcançando superiores a 120 fl min<sup>-1</sup> no período da noite,





e Vitória respectivamente (Figura 23), notou-se que a estrutura tridimensional não se alterou muito de dia e de noite, tendo alta frequência próximo de 20 dBZ aos longo de todos os níveis. Por outro lado, as tempestades com áreas maiores mostraram maior variação com relação às frequências dos valores de refletividade, enquanto que o Lago Maracaibo mostrou maiores frequências próximo de 40 dBZ, o Lago Vitória apresentou maiores frequências para refletividades de 20 a 30 dBZ abaixo de 3 km de altura. Acima de 3 km de altura, frequências superiores a 5% variam de 20 a 40 dBZ. Com a observação da diferença entre os lagos, foi visível que o Lago Maracaibo apresentou dominância para refletividades superiores a 30 dBZ para todos os casos, com exceção das tempestades com áreas menores ou iguais a mediana no período noturno, em que o Lago Vitória mostrou frequências maiores para refletividades acima de 50 dBZ próximo de superfície e acima de 40 dBZ próximo de 10 km de altura. Considerando as tempestades com *flashes* (Figura 24), as tempestades com áreas menores ou iguais a mediana mostraram valores de refletividade mais baixos, atingindo valores entre aproximadamente 20 e 60 dBZ perto da superfície, já as tempestades com áreas maiores mostraram menores frequências de refletividades inferiores a 40 dBZ perto da superfície e alturas inferiores, alcançando 15 km. A mediana da área das tempestades com *flashes* foi de 850,5 km<sup>2</sup> para o Lago Maracaibo e 1349,8 km<sup>2</sup> para o Lago Vitória. Foi visível que, em alturas menores que 5 km, o Lago Maracaibo mostrou maior frequência de refletividades menores que 50 dBZ para as distintas situações. Acima de 5 km, o Lago Maracaibo indicou frequências maiores próximas da refletividade de 35 dBZ e 17 km de altura, exceto para as tempestades com áreas inferiores ou iguais a mediana no período do dia.

Com os CFADs para outros casos (Figuras podem ser vistas na Seção A.3.2), como maior taxa de *flashes* e porcentagem de precipitação volumétrica convectiva, as estruturas verticais entre os diferentes CFADs de um mesmo lago apresentaram comportamentos semelhantes entre si. Considerando CFADs de lagos diferentes, as regiões de máximas frequências sem sempre foram iguais, como o que ocorre entre os Lagos Maracaibo e Vitória para as tempestades maiores próximo da superfície.

#### 4.4.2 Ciclo sazonal

Ao longo dos meses, obteve-se que, sobre o Lago Maracaibo, a maior eletrificação ocorreu em agosto alcançando mais que 3 fl min<sup>-1</sup>, tendo outro máximo em maio com cerca de 2,5 fl min<sup>-1</sup>. Sobre o Lago Vitória, notou-se maior atividade elétrica no mês de fevereiro com valores superiores a 0,9 fl min<sup>-1</sup>, tendo um segundo pico entre agosto e outubro com aproximadamente 0,45 fl min<sup>-1</sup>. Na vizinhança fora do Lago Maracaibo, teve-se um máximo no mês de setembro, enquanto que na vizinhança fora do Lago Vitória, observou-se uma máximo em fevereiro e outro menos intenso em agosto. Ao longo dos meses, notou-se maiores áreas totais, chuvas totais e chuvas convectivas das tempestades

com maiores atividades elétricas (Figura 25).

Figura (25) – Série temporal mensal de todas as áreas, estratiformes e convectivas (km<sup>2</sup>) com a taxa de *flashes* (fl min<sup>-1</sup>) dentro dos lagos e em uma vizinhança fora dos lagos.

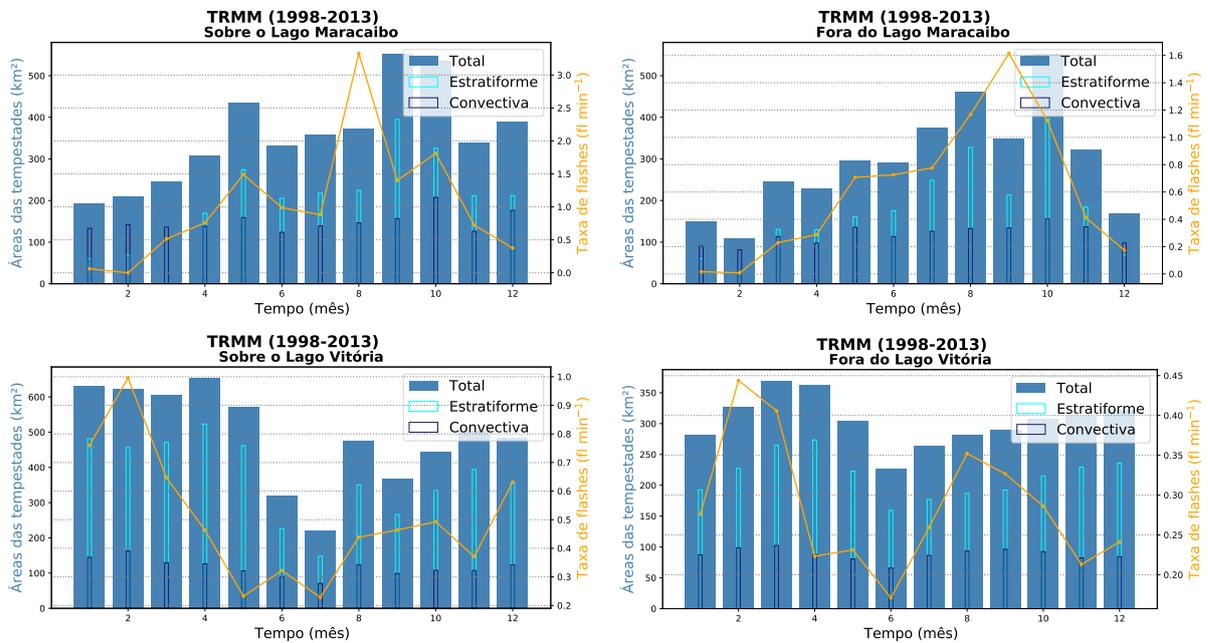


Figura (26) – Histograma de frequência (eixo esquerdo) e frequência cumulativa relativa (eixo direito) da porcentagem da área convectiva (%) sobre cada lago de DJF, MAM, JJA e SON.

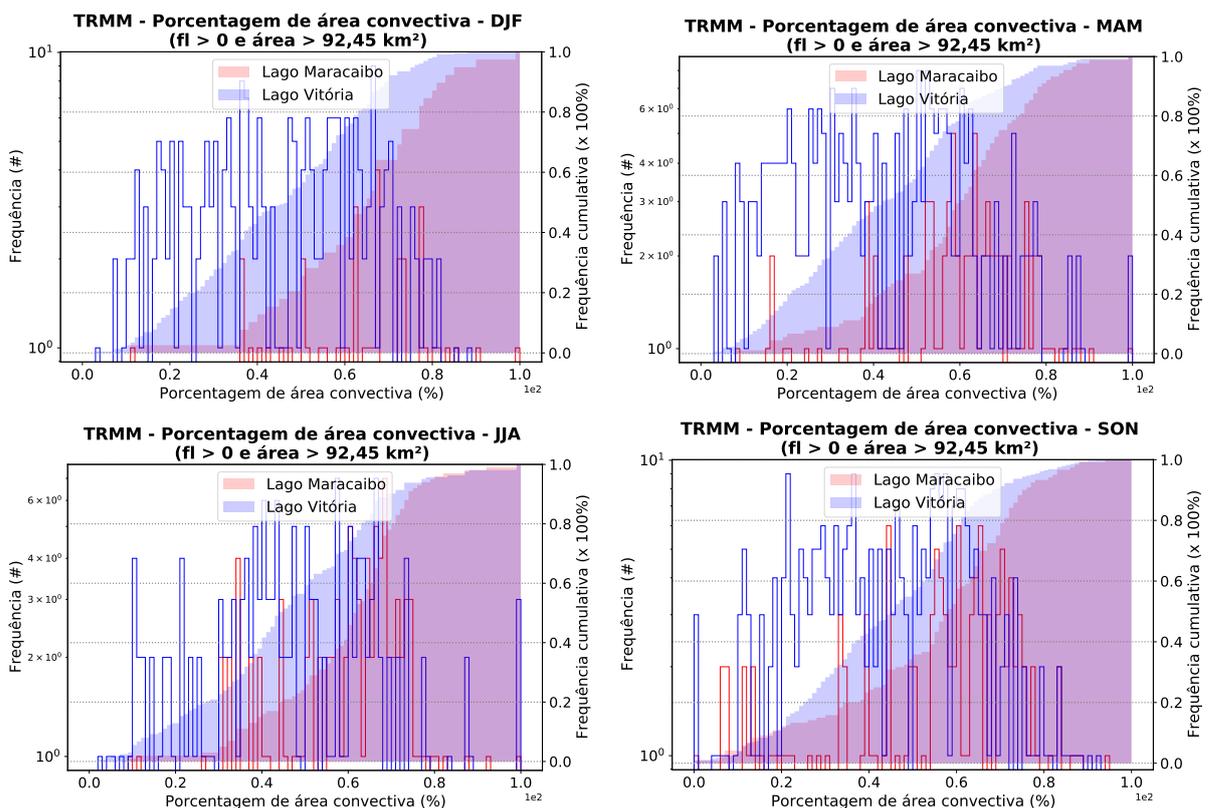
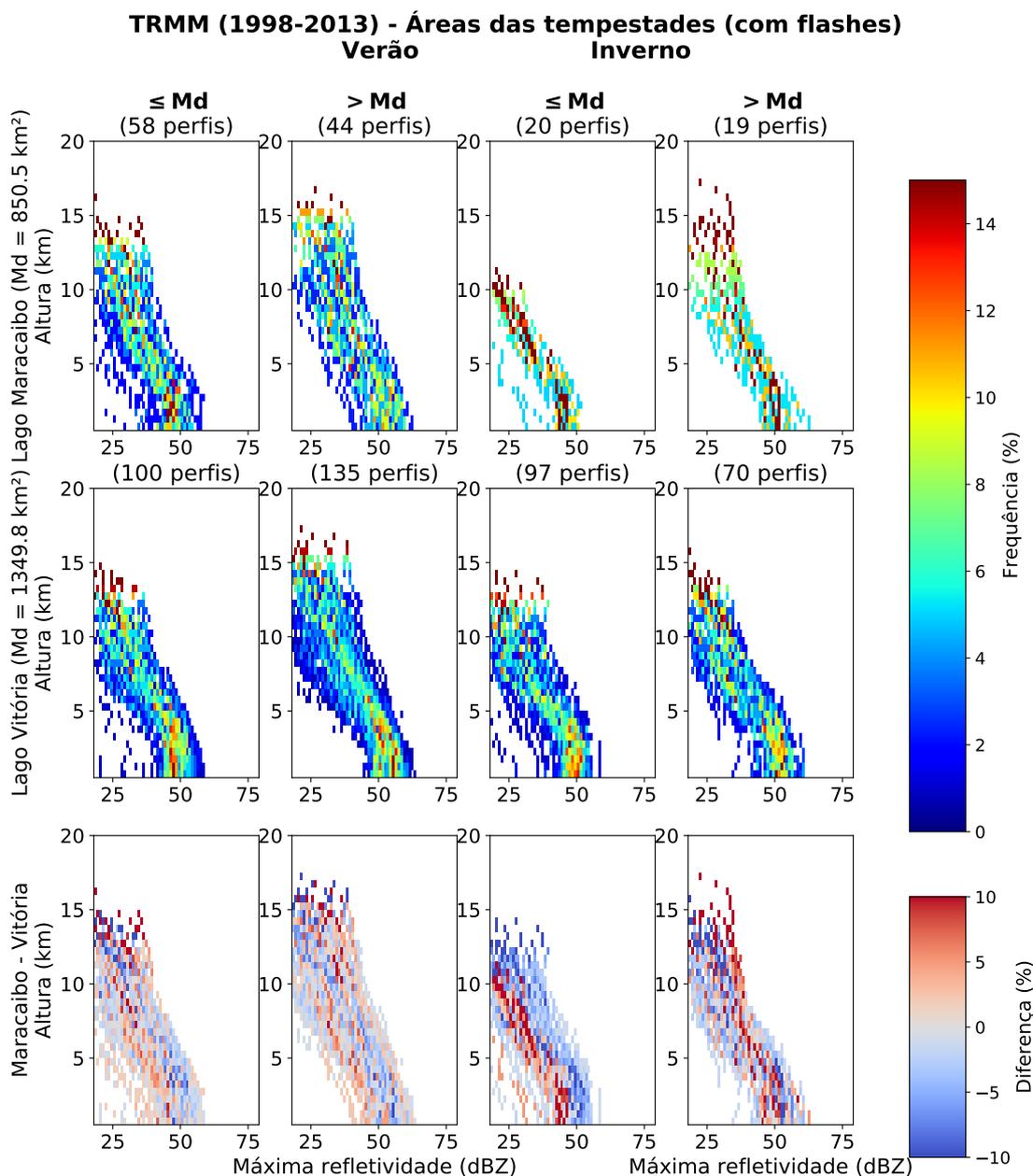


Figura (27) – CFAD das refletividades máximas (dBZ) das tempestades (com *flashes*) sobre o Lago Maracaibo e Vitória, assim como a diferença das frequências de refletividade dos lagos, a cada 0,5 km de altura e 1 dBZ de refletividade, para as tempestades com áreas  $\leq Md$  km<sup>2</sup> e  $> Md$  km<sup>2</sup> no período do inverno e do verão em cada hemisfério, sendo Md a mediana. O número de perfis indica quantos perfis foram utilizados para a construção do CFAD.



Ao longo das estações, a variação da porcentagem de área convectiva não foi tão alta, tendo cerca de 25%, 25%, 23% e 31% das tempestades com predominância de área de chuva estratiforme para DJF, MAM, JJA e SON consecutivamente para o Lago Maracaibo, o Lago Vitória teve, na mesma ordem, 53%, 55%, 58% e 52% das tempestades (Figura 26).

Nas Figuras 27 e 28, tem-se os CFADS das tempestades com *flashes* para cada estação do ano. Notou-se novamente que as tempestades com áreas menores ou iguais a



mediana apresentaram refletividades e alturas menores, comumente, não atingindo 15 km e 60 dBZ. Cerca de 45 dBZ, em geral, foi observado maior frequência perto da superfície para todos os CFADs. A comparação entre os dois lagos não foi clara, resultante da pequena quantidade de PFs disponíveis e dos aspectos particulares de cada região, como sistemas meteorológicos atuantes. Em suma, o Lago Vitória mostrou predominância para valores de refletividades maiores em um nível abaixo de 5 km, mas acima de 5km padrão nem sempre continuava, como nos casos de tempestades com áreas maiores que a mediana que indicam a partir de 2% de predominância do Lago Maracaibo cerca de 30 dBZ e 13 km.

# CONCLUSÕES

Obteve-se que a formação de *flashes* sobre os lagos são instigados por vários agentes, entre eles: a área do lago para que a teoria termodinâmica fosse compatível, como visto analogamente em ilhas por Williams, Chan e Boccippio (2004), e a topografia da região que pode colaborar com a formação de nuvens (AHRENS, 2009) e circulações de brisa. Para se obter um lago com alta atividade elétrica, portanto, notou-se favorável áreas maiores que 4.000 km<sup>2</sup> e elevação da zona fora do lago em um raio de 666 km centralizado no corpo d'água com cerca de 200 m acima da altitude média do lago em aproximadamente 50% desse espaço, favorecendo a circulação de brisa e o desenvolvimento de maior atividade elétrica. Dessa maneira, o tamanho do corpo d'água e a topografia podem ser muito relevantes para a eletrificação.

Como o esperado (ALBRECHT et al., 2016; MUÑOZ et al., 2016), o Lago Maracaibo mostrou maior atividade elétrica e porcentagem de área e chuva convectiva em relação ao Lago Vitória, porém, menor taxa de chuva e menor área da tempestade. Enquanto que as tempestades sobre o Lago Vitória chegam a ultrapassar 50.000 km<sup>2</sup> e 200.000 mm km<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>, o Lago Maracaibo apresentou aproximadamente 72% das tempestades elétricas com predominância de precipitação convectiva e podendo atingir mais que 300 fl min<sup>-1</sup>. Também, cerca de 5% das tempestades sobre os lagos analisados apresentam núcleo profundo (RASMUSSEN; ZULUAGA; HOUZE JR, 2014).

A correlação entre a atividade elétrica com a chuva volumétrica e área da tempestade total, convectiva e estratiforme não foi alta obtendo coeficientes de determinação entre 0,036 e 0,48, a melhor relação entre esses termos foi da atividade elétrica com a área de precipitação convectiva, sendo compatível com o fato de que trovoadas, em geral, desenvolvem-se com o levantamento do ar (AHRENS, 2009). Por outro lado, os coeficientes de determinação para a temperatura de brilho mínima e a altura máxima são ainda mais próximos de zero, o que não condiz com Liu, Cecil e Zipser (2011). Em geral, o Lago Vitória mostrou correlações mais compatíveis com o ajuste linear do que o Lago Maracaibo, dando indícios de que o Lago Maracaibo sofre com mais efeitos externos específicos da região, com isso, não seria possível fazer uma correlação acurada sem considerar esses efeitos, como sistemas sinóticos, temperatura do lago, emissão de núcleos de condensação de nuvens, entre outros. Em vista disso, não se observou uma relação linear da atividade elétrica com a área, chuva e profundidade da tempestade, no entanto, os resultados sugerem que existe alguma correlação, em principal, para a área e precipitação convectiva.

A partir dos CFADs, notou-se a isoterma de 0 °C acima de 3,5 km de altura em ambos os lagos. As tempestades com áreas menores que 30.000 km<sup>2</sup>, chuvas volumétricas

menores que  $20.000 \text{ mm km}^2 \text{ h}^{-1}$  ou taxa de *flashes* menor que  $30 \text{ fl min}^{-1}$  tiveram amplitude da refletividade próxima da superfície maior que para as tempestades mais extensas, com maiores volumes de chuva e mais elétricas. O Lago Maracaibo mostrou um regime com maiores frequências cerca de 20 e 40 dBZ próximo da superfície, enquanto que o Lago Vitória teve a banda brilhante mais destacada devido ao fato de ter tempestades com precipitações mais estratiformes (ROSENFELD; ULBRICH, 2003). Para níveis superiores, os CFADs do Lago Maracaibo mostraram valores maiores de refletividades da tempestades, o que revelou maior presença de gelo nesses níveis em comparação ao Lago Vitória, assinalando possivelmente que as tempestades sobre o Lago Maracaibo apresentam mais relâmpagos intranuvem e em níveis mais altos, tendo alta probabilidade de detecção pelo LIS. Por conseguinte, a estrutura tridimensional da precipitação é alterada considerando diferentes casos de tempestade, indicando maior profundidade, presença de gelo e precipitação convectiva para as tempestades com *flashes*.

Observou-se que o Lago Maracaibo apresentou cerca de 3,8 tempestade hora<sup>-1</sup> com *flashes* e 37,3 tempestade hora<sup>-1</sup> sem *flashes* ao longo dos 16 anos de observação do TRMM e 7,8 tempestade hora<sup>-1</sup> com *flashes* e 93,2 tempestade hora<sup>-1</sup> sem *flashes* para o Lago Vitória. Com isso, foi visível que a alta quantidade de tempestades não impõe obrigatoriamente alta atividade elétrica, tendo apenas 10,2 e 7,7% das tempestades com presença de *flashes* que passavam pelos Lagos Maracaibo e Vitória respectivamente. À noite, as tempestades foram menores e mais elétricas em relação ao dia, consistente com Albrecht et al. (2016), Holle e Murphy (2017), tendo maior presença de precipitação convectiva. Os meses de verão (inverno) foram mais (menos) favoráveis para produção de *flashes* e precipitação convectiva, entretanto, os meses intermediários também mostraram ser favoráveis. Devido ao fato de que cada lago sofre diferentes fenômenos locais, os ciclos diurno e sazonal não são iguais (BIASUTTI et al., 2012).

Em vista das populações que usufruem diretamente desses lagos tropicais, torna-se evidente a relevância do impacto desses fenômenos na sociedade. Considerando a precipitação e as descargas atmosféricas, a segurança das comunidades poderá ser amplificada, portanto, colaborando com a diminuição de prejuízos como vistos por Cardoso et al. (2014), Holle (2016c), Holle (2016a), Cervený et al. (2017), Ferreira et al. (2017), entre outros.

Para possíveis trabalhos futuros, seria interessante determinar a quantidade de tempestades por hora sobre esses lagos, classificando pela estações do ano e pelo horário. Além disso, faz-se necessário utilizar os dados das tempestades do nível 1 do TRMM, pois o *pixel* único de tempestade provindo do nível 2 não expressa completamente o comportamento das tempestades, também, poder-se-ia verificar qual o efeito dos ventos (com satélites ou radares), aerossóis, fenômenos meteorológicos de larga escala, as mudanças climáticas nas tempestades lacustres e mudar a utilização da mínima temperatura de brilho para a área de baixas temperaturas de brilho dos PFs como indicado por Liu, Cecil

e Zipser (2011).

# REFERÊNCIAS

- AHRENS, C. D. *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 9. Citado 3 vezes nas páginas 12, 13 e 46.
- ALBRECHT, R. et al. Tropical frequency and distribution of lightning based on 10 years of observations from space by the lightning imaging sensor (lis). In: *Prepr. Fourth Conf. Meteorol. Appl. Light. Data, Phoenix, AZ, Amer. Meteor. Soc.* [S.l.: s.n.], 2009. p. 2–12. Citado 3 vezes nas páginas 2, 5 e 13.
- ALBRECHT, R. I. et al. Where are the lightning hotspots on earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 97, n. 11, p. 2051–2068, 2016. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/97/11/bams-d-14-00193.1.xml>>. Acesso em: 13 jun. 2021. Citado 7 vezes nas páginas 1, 2, 5, 13, 15, 46 e 47.
- ALBRECHT, R. I. et al. The 13 years of trmm lightning imaging sensor : From individual flash characteristics to decadal tendencies. In: *XIV International Conference on Atmospheric Electricity, Rio de Janeiro, Brazil*. [s.n.], 2011. p. 1–4. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20110015779/downloads/20110015779.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 25.
- BIASUTTI, M. et al. Very high resolution rainfall patterns measured by trmm precipitation radar: Seasonal and diurnal cycles. *Climate dynamics*, Springer, v. 39, n. 1, p. 239–258, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 2, 14, 15 e 47.
- CARDOSO, I. et al. Lightning casualty demographics in brazil and their implications for safety rules. *Atmospheric Research*, Elsevier, v. 135, p. 374–379, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016980951200436X>>. Acesso em: 13 jun. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 47.
- CECIL, D. J.; BUECHLER, D. E.; BLAKESLEE, R. J. Gridded lightning climatology from trmm-lis and otd: Dataset description. *Atmospheric Research*, Elsevier, v. 135, p. 404–414, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809512002323>>. Acesso em: 16 jun. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- CECIL, D. J.; CHRONIS, T. Polarization-corrected temperatures for 10-, 19-, 37-, and 89-ghz passive microwave frequencies. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, American Meteorological Society, v. 57, n. 10, p. 2249–2265, 2018. Citado na página 7.
- CECIL, D. J. et al. Three years of trmm precipitation features. part i: Radar, radiometric, and lightning characteristics. *Monthly Weather Review*, American Meteorological Society, v. 133, n. 3, p. 543–566, 2005. Citado na página 13.
- CERVENY, R. S. et al. Wmo assessment of weather and climate mortality extremes: lightning, tropical cyclones, tornadoes, and hail. *Weather, climate, and society*, v. 9, n. 3, p. 487–497, 2017. Disponível em: <[https://journals.ametsoc.org/view/journals/wcas/9/3/wcas-d-16-0120\\_1.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/wcas/9/3/wcas-d-16-0120_1.xml)>. Acesso em: 13 jun. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 47.

- CHRISTIAN, H. J. et al. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 108, p. 4005, 2003. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2002JD002347>>. Acesso em: 16 jun. 2021. Citado 4 vezes nas páginas 1, 2, 6 e 13.
- DANIELSON, J. J.; GESCH, D. B. *Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010)*. [S.l.]: US Department of the Interior, US Geological Survey, 2011. Citado na página 7.
- DOWNING, J.; DUARTE, C. Abundance and size distribution of lakes, ponds and impoundments. In: \_\_\_\_\_. *Encyclopedia of Inland Waters*. Elsevier Inc., 2009. p. 469–478. ISBN 9780123706263. Disponível em: <<https://experts.umn.edu/en/publications/abundance-and-size-distribution-of-lakes-ponds-and-impoundments>>. Acesso em: 16 jun. 2021. Citado 4 vezes nas páginas 2, 5, 8 e 17.
- FERREIRA, C. F. et al. Mortalidade por raio atmosférico. *Brazilian Journal of Surgery and Clinical Research*, v. 21, n. 1, p. 106–110, 2017. Disponível em: <[https://www.mastereditora.com.br/periodico/20171204\\_195220.pdf](https://www.mastereditora.com.br/periodico/20171204_195220.pdf)>. Acesso em: 13 jun. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 47.
- HOLLE, R. Lightning-caused deaths and injuries related to agriculture. In: *International Conference on Lightning Protection (ICLP 2016)*. [s.n.], 2016b. p. 1–5. Disponível em: <[http://iclp.epfl.ch/rms/modules/request.php?module=oc\\_program&action=view.php&id=60&file=data/60.pdf](http://iclp.epfl.ch/rms/modules/request.php?module=oc_program&action=view.php&id=60&file=data/60.pdf)>. Acesso em: 13 jun. 2021. Citado na página 2.
- HOLLE, R. L. Diurnal variations of nldn-reported cloud-to-ground lightning in the united states. *Monthly Weather Review*, v. 142, n. 3, p. 1037–1052, 2014. Citado na página 16.
- HOLLE, R. L. A summary of recent national-scale lightning fatality studies. *Weather, Climate, and Society*, v. 8, n. 1, p. 35–42, 2016a. Disponível em: <[https://journals.ametsoc.org/view/journals/wcas/8/1/wcas-d-15-0032\\_1.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/wcas/8/1/wcas-d-15-0032_1.xml)>. Acesso em: 13 jun. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 47.
- HOLLE, R. L. The number of documented global lightning fatalities. In: *International Conference on Lightning Protection (ICLP 2016)*. [s.n.], 2016c. p. 1–4. Disponível em: <[http://iclp.epfl.ch/rms/modules/request.php?action=view.php&file=data/59.pdf&id=59&module=oc\\_program](http://iclp.epfl.ch/rms/modules/request.php?action=view.php&file=data/59.pdf&id=59&module=oc_program)>. Acesso em: 18 jun. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 47.
- HOLLE, R. L.; COOPER, M. A. Lightning fatalities in africa from 2010-2017. In: IEEE. *2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. [S.l.], 2018. p. 1–4. Citado na página 3.
- HOLLE, R. L.; MURPHY, M. J. Lightning over three large tropical lakes and the strait of malacca: Exploratory analyses. *Monthly Weather Review*, v. 145, n. 11, p. 4559–4573, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 2, 15, 16 e 47.
- HOUZE JR, R. A. et al. The variable nature of convection in the tropics and subtropics: A legacy of 16 years of the tropical rainfall measuring mission satellite. *Reviews of Geophysics*, Wiley Online Library, v. 53, n. 3, p. 994–1021, 2015. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2015RG000488>>. Acesso em: 16 jun. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 14.

- HOUZE JR, R. A.; WILTON, D. C.; SMULL, B. F. Monsoon convection in the himalayan region as seen by the trmm precipitation radar. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, Wiley Online Library, v. 133, n. 627, p. 1389–1411, 2007. Citado na página 33.
- HOYER, S.; HAMMAN, J. xarray: N-D labeled arrays and datasets in Python. *In revision, J. Open Res. Software*, 2017. Citado na página 9.
- JONKMAN, S. N. Global perspectives on loss of human life caused by floods. *Natural hazards*, Springer, v. 34, n. 2, p. 151–175, 2005. Citado na página 3.
- KIKUCHI, K.; WANG, B. Diurnal precipitation regimes in the global tropics. *Journal of Climate*, v. 21, n. 11, p. 2680–2696, 2008. Citado na página 15.
- KOZU, T. et al. Development of precipitation radar onboard the tropical rainfall measuring mission (trmm) satellite. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, IEEE, v. 39, n. 1, p. 102–116, 2001. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/898669>>. Acesso em: 17 jun. 2021. Citado na página 5.
- KUMMEROW, C. et al. The tropical rainfall measuring mission (trmm) sensor package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v. 15, n. 3, p. 809–817, 1998. Disponível em: <[https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/15/3/1520-0426\\_1998\\_015\\_0809\\_ttrmmt\\_2\\_0\\_co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/15/3/1520-0426_1998_015_0809_ttrmmt_2_0_co_2.xml)>. Acesso em: 17 jun. 2021. Citado na página 5.
- LAMARCHE, C. et al. Compilation and validation of sar and optical data products for a complete and global map of inland/ocean water tailored to the climate modeling community. *Remote Sensing*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 1, p. 36, 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/9/1/36>>. Acesso em: 13 jun. 2021. Citado na página 7.
- LEMOALLE, J. et al. Recent changes in lake chad: Observations, simulations and management options (1973–2011). *Global and Planetary Change*, Elsevier, v. 80, p. 247–254, 2012. Acesso em: 14 dez. 2021. Citado na página 19.
- LIU, C.; CECIL, D.; ZIPSER, E. J. Relationships between lightning flash rates and passive microwave brightness temperatures at 85 and 37 ghz over the tropics and subtropics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 116, n. D23, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 15, 29, 46 e 48.
- LIU, C. et al. Relationships between lightning flash rates and radar reflectivity vertical structures in thunderstorms over the tropics and subtropics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 117, n. D6, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 15.
- LIU, C.; ZIPSER, E. J. “warm rain” in the tropics: Seasonal and regional distributions based on 9 yr of trmm data. *Journal of climate*, v. 22, n. 3, p. 767–779, 2009. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/22/3/2008jcli2641.1.xml>>. Acesso em: 16 jun. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 14.

- LIU, C. et al. A cloud and precipitation feature database from nine years of trmm observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 47, n. 10, p. 2712–2728, 2008. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/47/10/2008jamc1890.1.xml>>. Acesso em: 16 jun. 2021. Citado 3 vezes nas páginas 2, 6 e 14.
- MACHADO, L. A. et al. The chuva project: How does convection vary across brazil? *Bulletin of the American Meteorological Society*, American Meteorological Society, v. 95, n. 9, p. 1365–1380, 2014. Citado na página 1.
- MORRISSEY, A.; SCHOLZ, C. A. Paleohydrology of lake turkana and its influence on the Nile river system. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 403, p. 88–100, 2014. Acesso em: 14 dez. 2021. Citado na página 22.
- MUÑOZ, Á. et al. Seasonal prediction of lightning activity in north western venezuela: Large-scale versus local drivers. *Atmospheric Research*, Elsevier, v. 172, p. 147–162, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 2, 5, 15 e 46.
- NESBITT, S. W.; ZIPSER, E. J.; CECIL, D. J. A census of precipitation features in the tropics using trmm: Radar, ice scattering, and lightning observations. *Journal of climate*, American Meteorological Society, v. 13, n. 23, p. 4087–4106, 2000. Disponível em: <[https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/13/23/1520-0442\\_2000\\_013\\_4087\\_acopfi\\_2.0.co\\_2.xml?tab\\_body=fulltext-display](https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/13/23/1520-0442_2000_013_4087_acopfi_2.0.co_2.xml?tab_body=fulltext-display)>. Acesso em: 17 jun. 2021. Citado na página 13.
- OKONKWO, C.; DEMOZ, B.; ONYEUKWU, K. Characteristics of drought indices and rainfall in lake chad basin. *International Journal of Remote Sensing*, Taylor & Francis, v. 34, n. 22, p. 7945–7961, 2013. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431161.2013.827813>>. Acesso em: 16 dez. 2021. Citado na página 19.
- RASMUSSEN, K. L.; ZULUAGA, M. D.; HOUZE JR, R. A. Severe convection and lightning in subtropical south america. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 41, n. 20, p. 7359–7366, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 13, 26 e 46.
- ROSENFELD, D.; ULBRICH, C. W. Cloud microphysical properties, processes, and rainfall estimation opportunities. In: *Radar and Atmospheric Science: A Collection of Essays in Honor of David Atlas*. American Meteorological Society, Boston, MA, 2003. p. 237–258. Disponível em: <[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-878220-36-3\\_10](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-878220-36-3_10)>. Acesso em: 16 jun. 2021. Citado 4 vezes nas páginas 1, 13, 14 e 47.
- STEEL, R. W. et al. *Africa*. Encyclopædia Britannica, 2021. Disponível em: <<https://www.britannica.com/place/Africa>>. Acesso em: 07 dez. 2021. Citado na página 3.
- UNITED NATIONS, W. W. A. P.; UN-WATER. Water in a changing world. Earthscan, 2009. Citado na página 3.
- VIRTS, K. S.; GOODMAN, S. J. Prolific lightning and thunderstorm initiation over the lake victoria basin in east africa. *Monthly Weather Review*, v. 148, n. 5, p. 1971–1985, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 15.

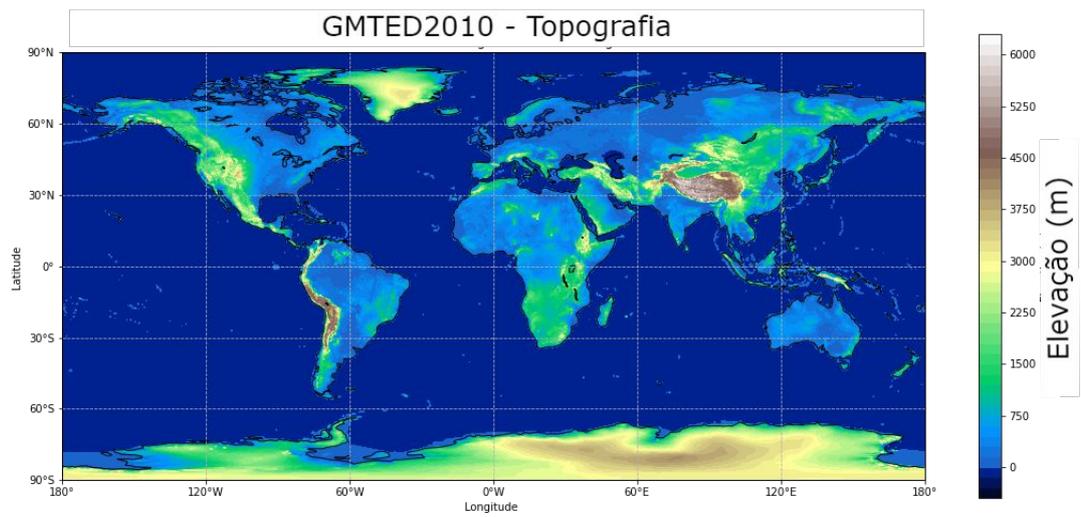
- VIRTS, K. S. et al. Highlights of a new ground-based, hourly global lightning climatology. *Bulletin of the American Meteorological Society*, American Meteorological Society, v. 94, n. 9, p. 1381–1391, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 14.
- WILLIAMS, E.; CHAN, T.; BOCCIPPIO, D. Islands as miniature continents: Another look at the land-ocean lightning contrast. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 109, n. D16, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 1, 13 e 46.
- WILLIAMS, E.; STANFILL, S. The physical origin of the land–ocean contrast in lightning activity. *Comptes Rendus Physique*, Elsevier, v. 3, n. 10, p. 1277–1292, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 12.
- YUTER, S. E.; HOUZE JR, R. A. Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of florida cumulonimbus. part ii: Frequency distributions of vertical velocity, reflectivity, and differential reflectivity. *Monthly weather review*, v. 123, n. 7, p. 1941–1963, 1995. Disponível em: <[https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/123/7/1520-0493\\_1995\\_123\\_1941\\_tdkame\\_2\\_0\\_co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/123/7/1520-0493_1995_123_1941_tdkame_2_0_co_2.xml)>. Acesso em: 13 jun. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 14.

# Apêndices

# APÊNDICE A – APÊNDICES

## A.1 Topografia

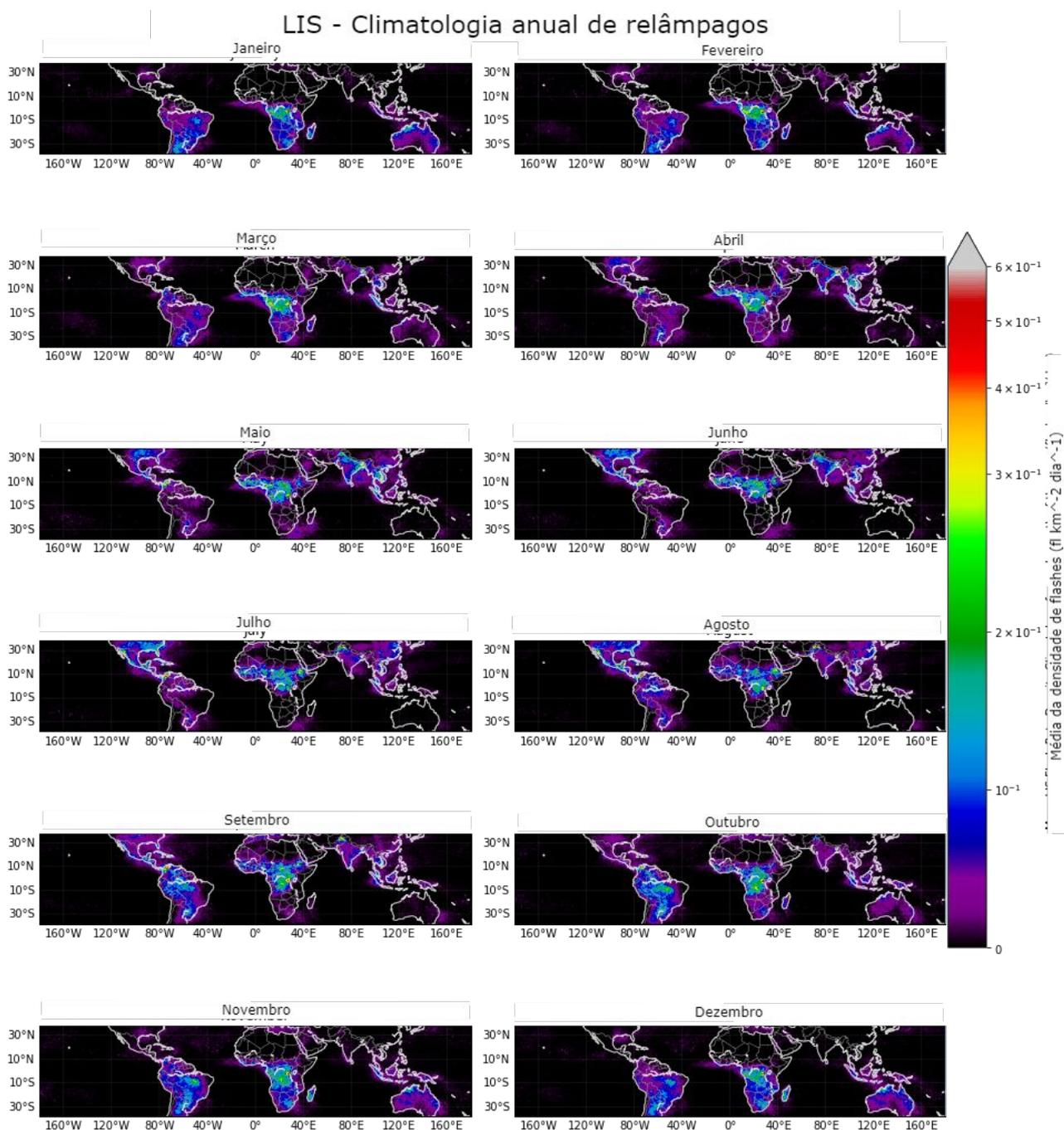
Figura (29) – Mapa da elevação topográfica sobre o globo.



Dados: GMTED2010.

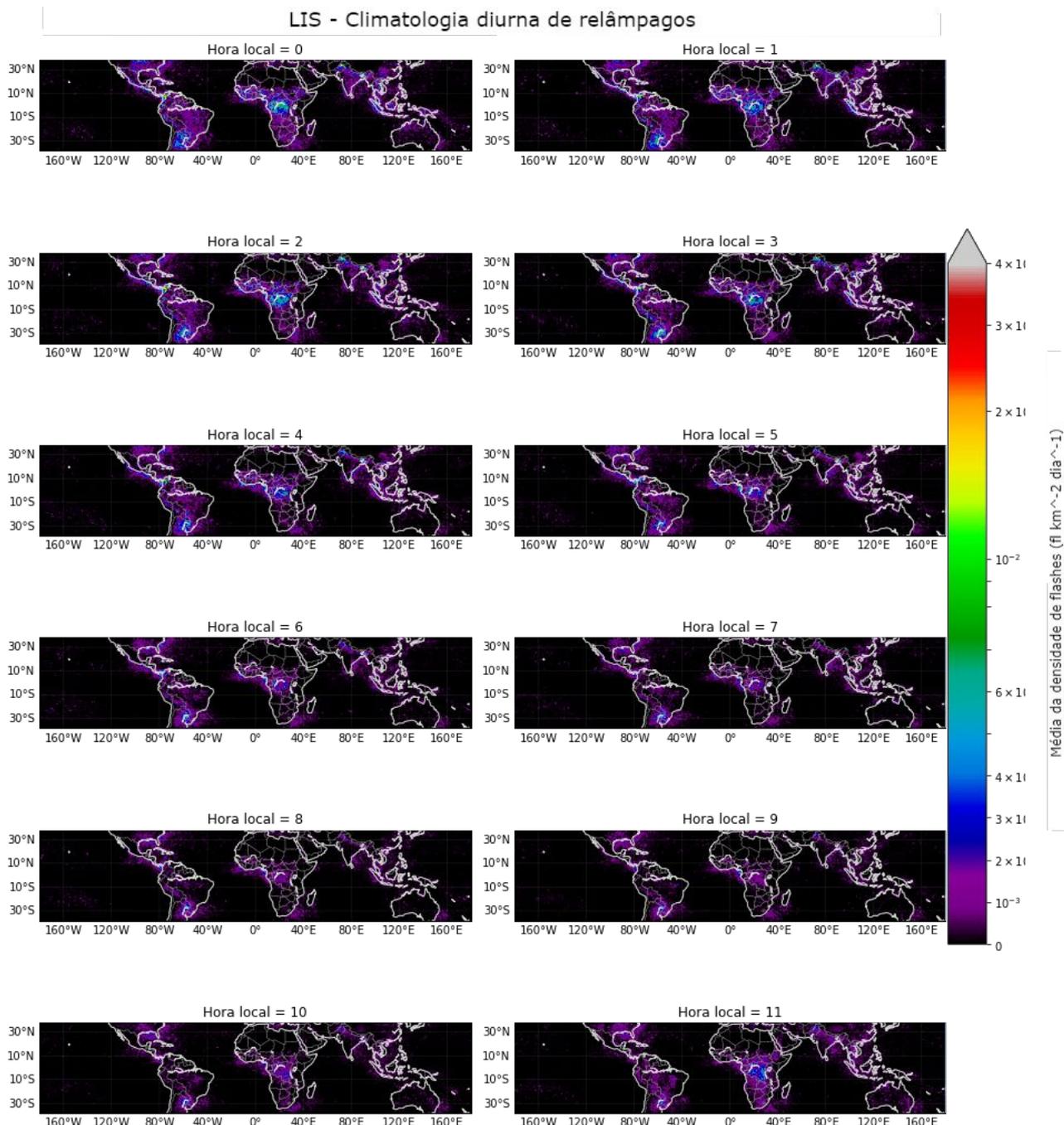
## A.2 Variação da atividade elétrica anual e diurna

Figura (30) – Mapa da densidade de raios ao longo dos meses.



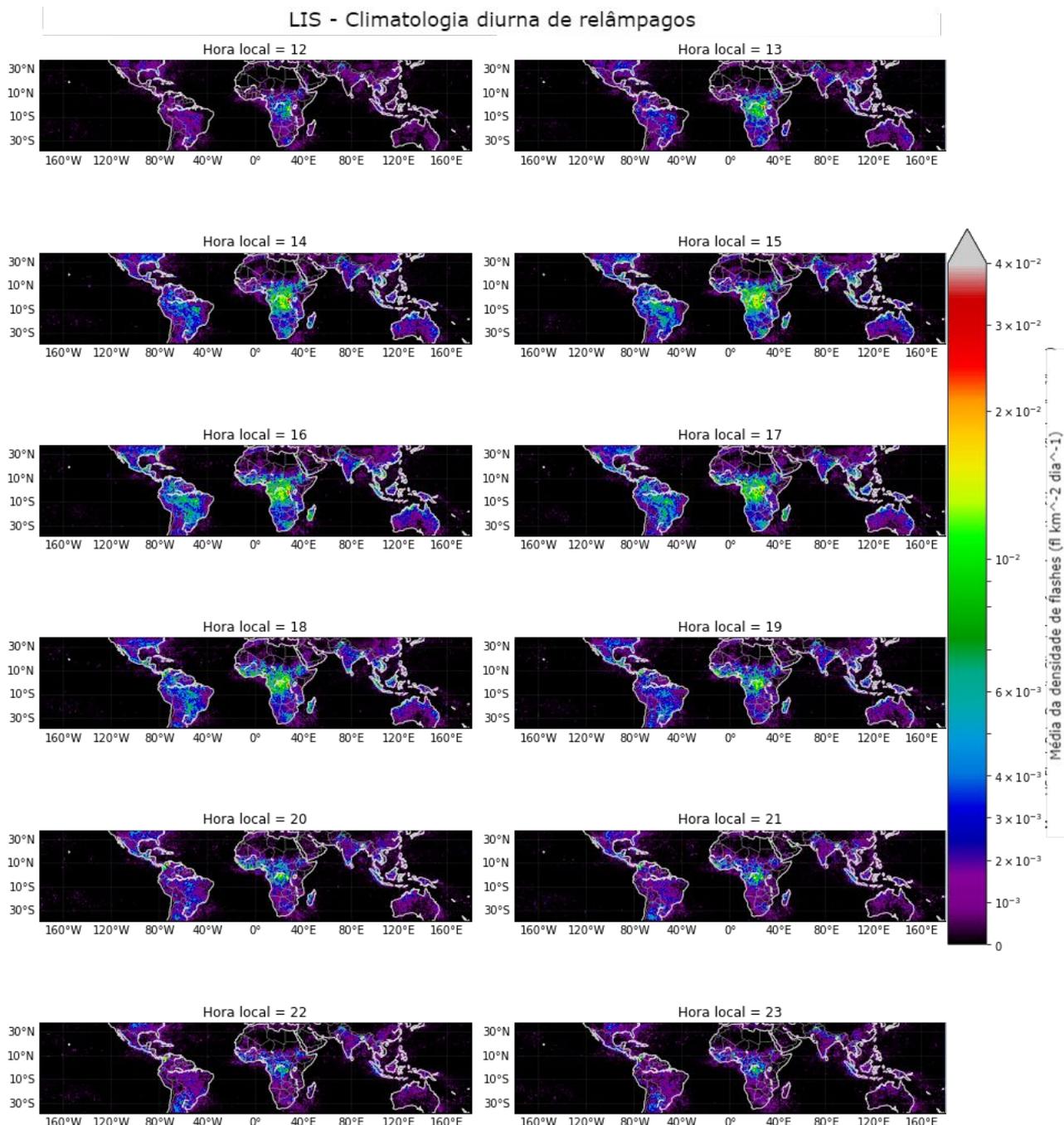
Dados: LIS.

Figura (31) – Mapa da densidade de raios ao longo do ciclo diurno (horário local entre 0 a 11 horas).



Dados: LIS.

Figura (32) – Mapa da densidade de raios ao longo do ciclo diurno (horário local entre 12 a 23 horas).



Dados: LIS.

### A.3 Análise da estrutura tridimensional dos PFs

#### A.3.1 Total

Figura (33) – CFAD das refletividades máximas (dBZ) das tempestades sobre o Lago Maracaibo e Vitória, assim como a diferença das frequências de refletividade dos lagos, a cada 0,5 km de altura e 1 dBZ de refletividade, para as tempestades com áreas de precipitação convectiva  $\leq Md$  % e  $> Md$  %, sendo  $Md$  a mediana. O número de perfis indica quantos perfis foram utilizados para a construção do CFAD.

#### TRMM (1998-2013) - Área convectiva da tempestade

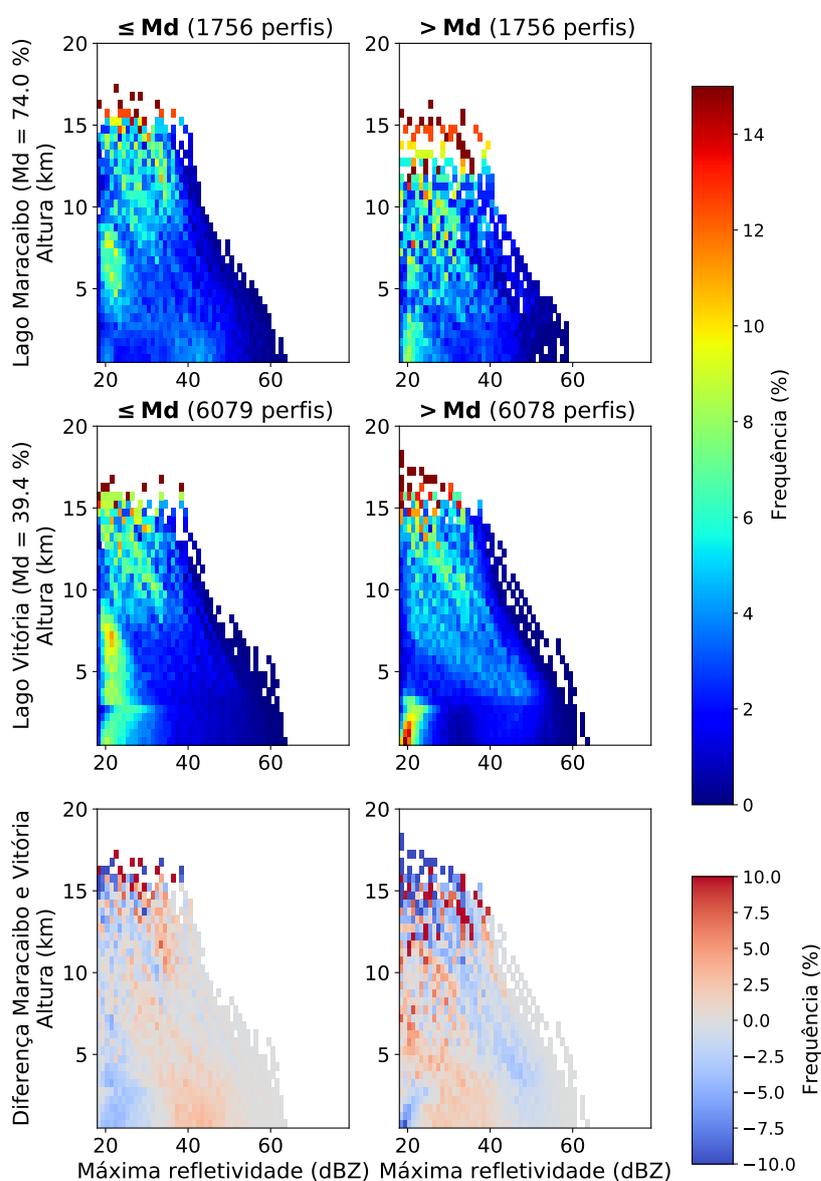


Figura (34) – CFAD das refletividades máximas (dBZ) das tempestades sobre o Lago Maracaibo e Vitória, assim como a diferença das frequências de refletividade dos lagos, a cada 0,5 km de altura e 1 dBZ de refletividade, para as tempestades com precipitação convectiva  $\leq Md$  % e  $> Md$  %, sendo  $Md$  a mediana. O número de perfis indica quantos perfis foram utilizados para a construção do CFAD.

**TRMM (1998-2013) - Precipitação convectiva da tempestade**

