

Evandro Moimaz Anselmo

# **Morfologia das tempestades elétricas na América do Sul**

São Paulo - SP

2014

Evandro Moimaz Anselmo

# **Morfologia das tempestades elétricas na América do Sul**

Tese ao departamento de Ciências Atmosféricas, realizada como pré-requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador:  
Prof. Dr. Carlos Augusto Morales Rodriguez

INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS DA  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

São Paulo - SP

2014

*Tese*

## **AGRADECIMENTOS**

## **RESUMO**

Resumo

Palavras-chave: relâmpagos, tempestades, monitoramento.

## **ABSTRACT**

Abstract

Key-words: lightning, storms, tracking.

## LISTA DE FIGURAS

1	Ciclo diurno das tempestades elétricas observadas em hora local. Os valores de probabilidade foram normalizados pelo total dos 157,592 sistemas identificados. . . . .	18
2	Ciclo diurno em hora local para as tempestades elétricas observadas em cada região de 10 por 10 graus. Os valores de probabilidade são mostrados em porcentagem e foram normalizados pelo total de 157,592 sistemas observados. . . . .	19
3	Ciclo anual das tempestades elétricas observadas em hora local. Os valores de probabilidade foram normalizados pelo total dos 157,592 sistemas identificados. . . . .	21
4	Ciclo anual em hora local para as tempestades elétricas observadas em cada região de 10 por 10 graus. Os valores de probabilidade são mostrados em porcentagem e foram normalizados pelo total de 157,592 sistemas observados. As linhas horizontais cortam o valor de 0.7 do máximo de probabilidade, utilizado como limiar para definir o início e fim das estações de tempestades elétricas. . . . .	22
5	Perfil anual de precipitação e incidência de raios (MORALES, 2010). . . .	25
6	Densidade espacial total de tempestades elétricas. Os valores correspondem ao número de sistemas por ano por quilômetro quadrado em cada pronto da grade de 0.25 graus. . . . .	26
7	Densidade espacial total de raios. Os valores correspondem ao número de raios por ano por quilômetro quadrado em cada pronto da grade de 0.25 graus. . . . .	27
8	Densidade espacial sazonal de raios. . . . .	28
9	Densidade espacial sazonal das tempestades elétricas. . . . .	31
10	Eficiencia de tempestade . . . . .	32

## **LISTA DE TABELAS**

3	Principais características do ciclo anual de probabilidade de ocorrência de tempestades elétricas observadas entre 1998-2011, em cada região de 10 por 10 graus. . . . .	23
4	Total de tempestades elétricas observadas entre 1998-2011, para cada período de três meses associados as estações do ano. . . . .	29

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>11</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.0.1 Estrutura tridimensional da precipitação na óptica dos processos microfísicos . . . . .	16
<b>2 MARCO DAS TEMPESTADES ELÉTRICAS NA AMÉRICA DO SUL</b>	<b>18</b>
2.1 CICLO DIURNO . . . . .	18
2.2 CICLO ANUAL . . . . .	21
2.3 SISTEMA DE MONÇÃO E AS ESTAÇÕES DE TEMPESTADES ELÉTRICAS	24
2.4 DENSIDADES GEOGRÁFICAS . . . . .	26
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>33</b>

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CCFAD	Diagramas de Contorno de Frequência Cumulativa por Altitude
CCFTD	Diagramas de Contorno de Frequência Cumulativa por Temperatura
CFAD	Diagrama de Contorno de Frequência por Altitude
CFTD	Diagrama de Contorno de Frequência por Temperatura
DJF	Dezembro, janeiro e fevereiro
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
JBN	Jato de Baixos Níveis
JJA	Junho, julho e agosto
LIS	<i>Lightning Imaging Sensor</i>
MAM	Março, abril e maio
MCS	Sistemas Convectivos de Meso-escala
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NCEP–DOE	<i>National Centers for Environmental Prediction – Department of Energy</i>
NCEP–NCAR	<i>National Centers for Environmental Prediction – National Center for Atmospheric Research</i>
PR	<i>Precipitation Radar</i>

R1	Reanálises do NCEP-NCAR
R2	Reanálises 2 do NCEP-DOE
SACZ	Zona de Convergência do Atlântico Sul
SAMS	Sistema de Monção da América do Sul
SIRT	<i>Sferics Infrared Rainfall Technique</i>
SON	Setembro, outubro e novembro
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
VIRS	<i>Visible and InfraRed Scanner</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_t$	Área da tempestade elétrica
$FT$	Taxa de raios por tempo [ <i>raios minuto</i> <sup>-1</sup> ]
$FTA$	Taxa de raios por tempo por área [ <i>raios dia</i> <sup>-1</sup> <i>km</i> <sup>-2</sup> ]
$N_{fl}$	Número de flashes
$VT_m$	Tempo médio de visada do LIS
$Z_m$	Refletividade do radar medida
$\mathbf{VT}_{lis}$	Matriz do tempo total da visada do sensor LIS sobre a superfície
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celcius
$f(x) = y$	Função de uma variável
$f_{cdf}(x, y)$	Função densidade de probabilidade cumulativa com duas variáveis
$f_{pdf}(x, y)$	Função densidade de probabilidade com duas variáveis
%	Nos diagramas, CFAD, CCFAD, CFTD e CCFTD, representam: a porcentagem de perfis convectivos, estratiformes e outros, respectivamente
H	Nos diagramas, CFAD, CCFAD, CFTD e CCFTD, representam: o nível de altitude, em quilômetros, aonde ocorreu o máximo de ocorrências de $Z_c$
L	Nos diagramas, CFAD, CCFAD, CFTD e CCFTD, representam: o número de ocorrência de $Z_c$ no nível de altitude de máxima ocorrência

P Nos diagramas, CFAD, CCFAD, CFTD e CCFTD, representam: número de perfis do PR computados

## 1 INTRODUÇÃO

As tempestades elétricas são observadas em regiões aonde ocorre levantamento de ar por convecção, pela topografia elevada, propagação de frentes quando combinados com mecanismos de suporte de umidade como aumento da temperatura superficial de oceanos, brisa marítima, brisa de rio e evapotranspiração de florestas.

Observando a climatologia da ocorrência de descargas elétricas atmosféricas sobre a Terra pelos diversos sistemas de detecção de descargas em operação, STARNET, WWLN, WSI, LIS-TRMM, ... é evidente que as tempestades elétricas concentram-se sobre os continentes, indicando que a convecção e a topografia são fatores dominantes que contornam a problemática da microfísica da eletrificação atmosférica.

A região tropical da América do Sul, África e Continente Marítimo são também conhecidas como chaminés globais de descargas elétricas atmosféricas. Whipple, F.J.W., (1929) já observava que a América do Sul é a chaminé dominante para a manutenção do Circuito Elétrico Atmosférico Global.

Estando o Brasil em uma das regiões de maior incidência de raios do planeta, os estudos das tempestades elétricas tornar-se necessário para garantir segurança no tráfego aéreo, fluvial, terrestre, nas linhas de transmissão de dados e de energia elétrica e melhor lidar com problemas como enchentes rápidas, chuvas de granizo, tornados e visar uma melhor forma de gerir recursos naturais.

Williams E. R. e Sátori G., (2004) buscaram entender a maior resposta da Curva de Carnegie associada a atividade de tempestades na América do Sul fazendo um estudo comparativo entre as regiões da bacia Amazônica e bacia do Congo. Sobre a maior bacia hidrográfica do Continente Africano, as taxas de raios por  $\text{km}^2$  por ano são maiores enquanto que os sistemas precipitantes sobre a bacia Amazônica, observa-se menor densidade de raios porém maior volume de chuva, indicando que as formações estratiformes no continente sul-americano também funcionam como baterias do Circuito Elétrico Global, em que carga negativa é transferida para a Terra por meio das gotas de chuva carregadas

(SOULA et al., 2003).

Com o experimento de campo LBA (Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia) realizado na região de Rondônia entre janeiro e fevereiro de 1999, foi possível identificar alguns fatores importantes que regulam a precipitação na região Amazônica. Além disso o LBA foi importante para validação de dados do satélite TRMM que são amplamente utilizados nesta pesquisa (Silva Dias et al., 2002; WILLIAMS et al., 2002; ALBRECHT et al., 2011).

Silva Dias M. A. F. et al, (2002), fazem uma síntese dos principais resultados e objetivos do LBA, entre estes destaco os estudos de Anagnostou e Morales, (2002), Carvalho et al. (2002b) que mostram dois regimes de vento em 700 mb, de Leste e de Oeste, em que observou-se maior precipitação convectiva e atividade elétrica durante o regime de ventos de Leste. Petersen W. A. et al, (2002), investigaram como que esses dois regimes de vento (Leste-Oeste) observados durante o LBA em Rondônia, influenciam no número de descargas elétricas observadas pelo LIS (Lighning Image Sensor), não apenas para região Amazônica mas para toda a América do Sul durante 4 verões entre 1997 e 2000.

A variação intra-sazonal da atividade elétrica durante o período chuvoso mostrou-se evidente. Petersen et al. (2002), identificaram regiões de extremos opostos de atividade elétrica que devem estar associados ao mecanismos de manutenção da monção na América do Sul, principalmente com a dinâmica que envolve Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (JONES; CARVALHO, 2002; CARVALHO et al., 2002b).

Esta pesquisa investiga a morfologia das tempestades elétricas sobre a América do Sul, os sistemas que são as baterias do Circuito Elétrico Atmosférico Global.

Cecil et al. (2005) investigou o subconjunto de dados do TRMM composto por sistemas precipitantes denominado como Precipitation Features (PF), desenvolvido por Nesbitt et al, (2000). As PF classificadas como as mais severas da AS concentraram-se no sul da região tropical, associadas aos mecanismos dinâmicas de formação de Sistemas Convectivos de Meso-escala (VELASCO; FRITSCH, 1987; DURKEE; MOTE, 2009).

Um estudo sobre a morfologia de sistemas individualmente, para a região Sul- amazônia para os regimes de Leste-Oeste, é mostrado também em Petersen W. A. et al, (2002) com base nas PF. Observou-se que apesar da atividade elétrica indicar extremos opostos durante a estação úmida, o volume de chuva produzido pelos sistemas foram iguais, porém os fluxos de calor latente na coluna atmosférica não. No regime de Leste a precipitação associa-se com vigorosas regiões de mistura, enquanto no de Oeste os sistemas possuem

maior área de chuva e são mais estratificados.

Além das PF, identifica-se diversos estudos que definiram clusters de nuvens fazendo o agrupamento regiões com temperatura de brilho mais baixas, observadas por sensores de radiação infravermelha em satélites. Mapes and House, (1993), utilizaram esta metodologia e também fazem uma síntese de trabalhos que buscaram selecionar clusters de nuvens a partir de limiares de temperatura em infravermelho, como por exemplo Maddox R. A., (1980) que observou a ocorrência de duas regiões, uma com temperatura de brilho  $\leq -32^{\circ}\text{C}$  (241K) e área  $\geq 100000 \text{ km}^2$  e outra região menor, no interior da região maior, com temperatura de brilho  $\leq -52^{\circ}\text{C}$  (221K) e área  $\geq 50000 \text{ km}^2$  em Sistemas Convectivos de Meso-escala (SCM) nos Estados Unidos.

Morales C. A. e Anagnostou E. M., (2002) desenvolveram um algoritmo hidro-estimador estudando regiões de temperatura de brilho em infravermelho e a precipitação observada pelo radar a bordo do satélite TRMM. Dados da Sferics Timing and Ranging Network (STARNET) foram utilizados e clusters com raios e sem raios foram identificados. Foi observado que as descargas localizadas pela STARNET, em 90% dos casos, estiveram associados a regiões com temperatura de brilho menores do que 258K.

Porém a radiação infravermelha observada por satélites, corresponde apenas a irradiação do topo das nuvens. Nuvens finas, com formação acima da isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$ , como por exemplo as nuvem cirrus, podem cobrir grandes extensões e não estar associadas a precipitação nem descargas elétricas.

Houze R. A. Jr, (1993) define SCM, por exemplo linhas de instabilidades observando extensões com chuva contínua observada por radar. Em Mohr and Zipser (1996) SCMs sobre os trópicos foram observados a partir do espalhamento radiativo em micro-ondas (85-GHz PCT), em que regiões contínuas  $\geq 2000 \text{ km}^2$  com PCT  $\leq 250 \text{ K}$  foram principais critérios na identificação dos sistemas.

Combinando dados do PR e TMI abordo do TRMM, Nesbitt et. al. (2000) desenvolveu uma metodologia para selecionar sistemas precipitantes, os quais foram definidos com Precipitation Features. Desta forma ....

...A Rachel já fez uma boa discussão sobre a microfísica dos sistemas da amazônia, períodos seco úmido e de transição. As tempestades foram organizadas em clusters, estudou-se o ciclo de vida, a ocorrência de raios em áreas desmatadas e com floresta/outras, e foi explicado a microfísica dos sistemas basicamente com: taxa de raios positivos e negativos, eco tops, VIL, CAPE, CINE. Falta explotar a os CFADS para essa região.

Como varia a probabilidade de ocorrência por altitude dos perfis de refletividade nos períodos seco de transição e úmido.

Em desenvolvimento ...

### 1.0.1 Estrutura tridimensional da precipitação na óptica dos processos microfísicos

Em Fabry e Zawadzki (1995), é mostrado que processos como a agregação, acreção e colisão coalescência, podem ser estudados em função da espessura da camada de derretimento e flutuações nos valores do fator de refletividade no perfil atmosférico.

Pois, sendo o fator de refletividade do radar proporcional ao diâmetro das gotas no volume iluminado elevado a 6 potência, os processos de crescimento de flocos de neves, granizo e gotas, são marcados por aumentos abruptos no fator de refletividade do radar.

E considerando um regime de precipitação estratiforme, o qual é muito mais governado por processos de agregação do que acreção, será observado um aumento acentuado no fator de refletividade do radar em torno da isotermia de 0 °C associado ao derretimento de flocos de neve. Como o índice de refração de micro-ondas no gelo é de ~0,1 e na água líquida de ~0,9, a transição de fase sólida para líquida representa um aumento de 7 dBZ na potência do sinal do radar.

Em um ambiente de precipitação convectiva a transição de fase é perturbada por correntes ascendentes e os processos de agregação, acreção e colisão coalescência, os quais são os maiores responsáveis pelo aumento do diâmetro dos hidrometeoros de nuvem, tornam-se mais eficientes.

A mudança do índice de refração da água não ocorre em torno de 0 °C, pois no ambiente convectivo teremos água super-resfriada em temperaturas de -15 °C, o que intensifica o processo de acreção podendo gerar gelo sólido que cai até a superfície.

Portanto, quanto maior a espessura da camada de derretimento, podemos pressupor que, o ambiente terá maior intensidade convectiva, pois terá processos de crescimento de granizo mais ativos.

Consequentemente, a taxa de raios associa-se com a intensidade convectiva devido a acreção<sup>1</sup> ser o processo mais eficiente de eletrificação de nuvens, principalmente quando há presença de flocos de neve embebidos na região de fase mista (TAKAHASHI, 1978;

---

<sup>1</sup>A acreção é o processo de *rimming* descrito no trabalho de Takahashi (1978).

TAKAHASHI; MIYAWAKI, 2002).

## 2 MARCO DAS TEMPESTADES ELÉTRICAS NA AMÉRICA DO SUL

O Marco das tempestades elétricas descreve os locais e quando estes sistemas ocorrem na América do Sul. Para tanto, determina-se a sazonalidade, o ciclo diurno, o ciclo anual e a densidade geográfica de raios e das tempestades elétricas.

### 2.1 CICLO DIURNO

Utilizando a base de dados de tempestades elétricas construída nesta pesquisa, determinou-se a frequência de ocorrências dos sistemas no decorrer das horas do dia, figura 1. Deste modo, obtivemos o ciclo diurno das tempestades elétricas por meio da distribuição de probabilidade de ocorrências.

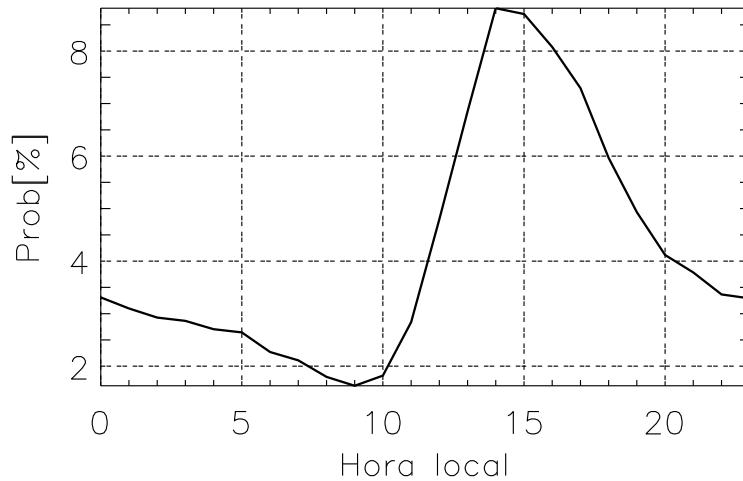


Figura 1: Ciclo diurno das tempestades elétricas observadas em hora local. Os valores de probabilidade foram normalizados pelo total dos 157,592 sistemas identificados.

Observa-se que 40% das tempestades elétricas observadas pelo TRMM ocorrem entre 13h e 17h, indicando que o aquecimento da superfície do continente e o aumento da camada limite planetária no decorrer do dia são ingredientes que podem aumentar a probabilidade de ocorrência em relação aos horários de menor fluxo de calor sensível para a atmosfera.

Por exemplo, às 9h a probabilidade de tempestade elétrica é de 1.6% e às 14h é de 8.8%, portanto às 14h a probabilidade de ocorrência de tempestade tempestade elétrica é 5.4 vezes maior do que às 9h.

O ciclo diurno também foi estudado para cada região de 10 por 10 graus, como mostra a figura 2.

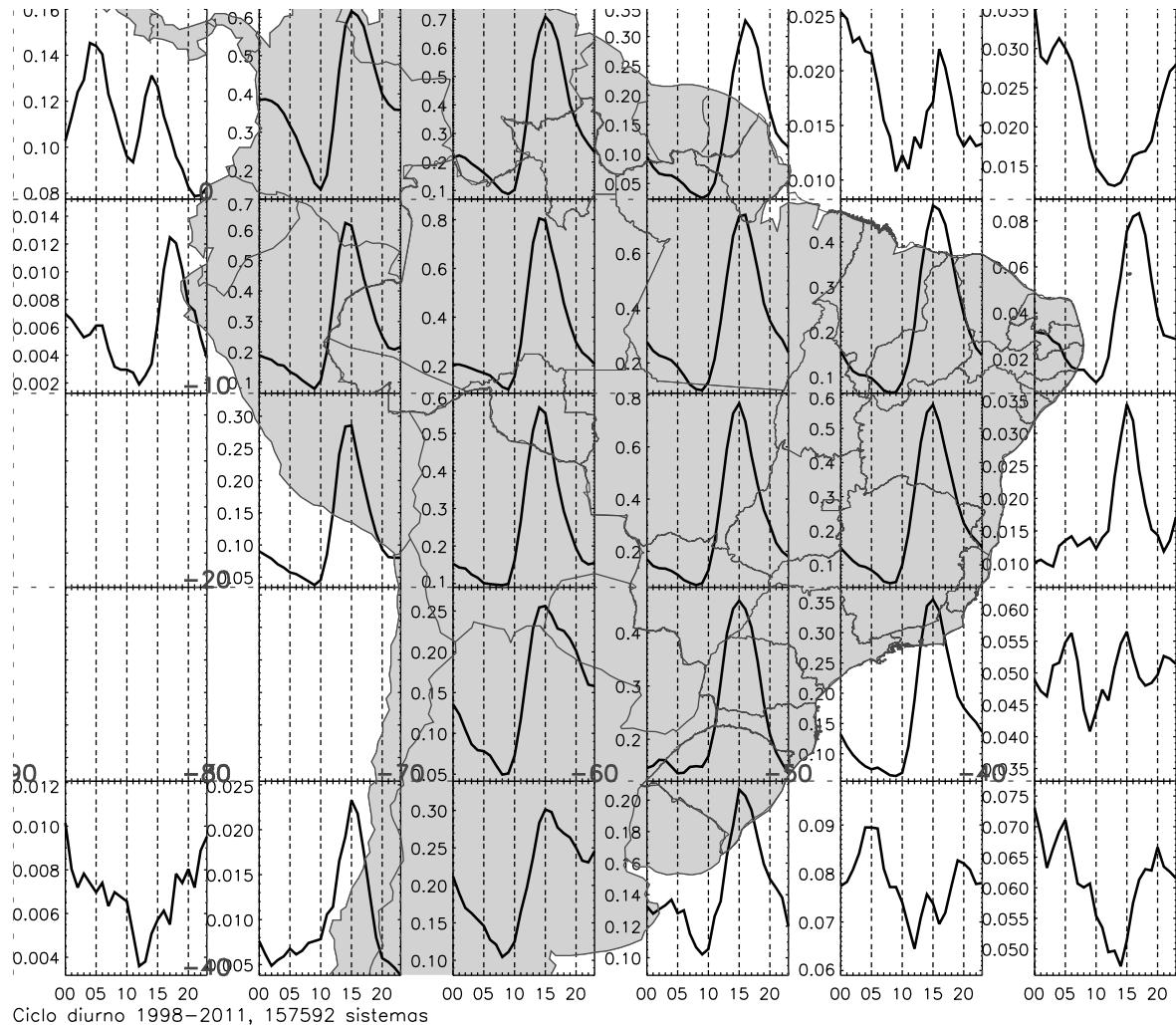


Figura 2: Ciclo diurno em hora local para as tempestades elétricas observadas em cada região de 10 por 10 graus. Os valores de probabilidade são mostrados em porcentagem e foram normalizados pelo total de 157,592 sistemas observados.

Pode-se observar que existe um predomínio de ocorrências de tempestades elétricas entre 13h e 17h sobre o continente. Sobre o oceano observa-se uma distribuição bimodal, com pico no começo da noite e durante a madruga.

Sobre os oceanos, os processos de formação de nuvens e consequentemente de formação de tempestades elétricas se mostram mais ativo no horário em que a temperatura superficial e a probabilidade de ocorrência de sistemas sobre o continente diminui. Neste horário a superfície do oceano pode estar com temperaturas maiores do que as temperaturas sobre

a superfície do continente, aumentando a convergência sobre o oceano. A atividade convectiva intensa entre 13-17h sobre o continente também aumenta a cobertura de nuvens do tipo cirrus sobre o oceano inibindo a formação de nuvens (NESBITT; ZIPSER, 2003).

Entre  $0^{\circ}$ - $10^{\circ}$  Norte e  $80^{\circ}$ - $70^{\circ}$  Oeste e às 0h, observou-se a maior probabilidade ( $\approx 0.4\%$ ) de tempestades elétricas noturnas da América do Sul, o que representou um número de 630 sistemas observados em 14 anos, apenas entre 0h e 00:59h. A circulação de vale e montanha associada com a topografia elevada na Colômbia, principalmente a região do Parque Nacional Natural Paramillo, e o Lago Maracaibo na Venezuela, e a atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), promovem condições para o desenvolvimento de tempestades elétricas noturnas de maneira mais eficiente do que as demais regiões (BÜRGESSER et al., 2012).

Entre  $0^{\circ}$ - $10^{\circ}$  Norte e  $90^{\circ}$ - $80^{\circ}$  Oeste, abrangendo o Panamá e parte Sul da Costa Rica, e a região do Oceano Pacífico que engloba o Parque Nacional da Ilha do Coco na Costa Rica e parte das ilhas Galápagos no Equador, foi a mais extensa região oceânica e costeira com a maior probabilidade de ocorrência de tempestades elétricas. Observe os valores de densidade de tempestades elétricas neste quadrante geográfico, na próxima seção, em 2.4 na figura 6. O ciclo diurno das tempestades elétricas nesta região revelam uma distribuição bimodal, com um pico às 4h e outro às 14h. O pico das 14h, provavelmente está associado as tempestades elétricas da região do Panamá e Costa Rica suas regiões costeiras adjacentes, as quais sofrem maior aquecimento superficial durante o dia, enquanto o maior pico que ocorreu às 4h, provavelmente corresponde com as trocas de calor entre o oceano e atmosfera.

Entre  $30^{\circ}$ - $10^{\circ}$  Sul e  $90^{\circ}$ - $80^{\circ}$  Oeste e entre  $30^{\circ}$ - $20^{\circ}$  Sul e  $80^{\circ}$ - $70^{\circ}$  Oeste, região do Pacífico, as tempestades elétricas são mais raras do que as demais regiões devido a atuação permanente da subsidênci da Célula de Hadley que modula a Alta Subtropical do Pacífico Sul, responsável também por regiões como o Deserto do Atacama e parte do semi-árido Argentino (REBOITA et al., 2010).

Na região do Atlântico Subtropical, a probabilidade de tempestades elétricas é maior do que no Atlântico Norte. A passagem de sistemas transientes entre  $40^{\circ}$ - $30^{\circ}$  Sul e  $50^{\circ}$ - $30^{\circ}$  Oeste e  $30^{\circ}$ - $20^{\circ}$  Sul e  $40^{\circ}$ - $30^{\circ}$  Oeste, gera maior número de tempestades elétricas oceânicas do que com a atuação da ITCZ no Atlântico Tropical. Observa-se também que nas regiões oceânicas o ciclo diurno das tempestades elétricas indica maior atividade noturna.

A maior atividade horária de tempestades elétricas, ocorreu entre  $10^{\circ}$ - $0^{\circ}$  Sul e  $70^{\circ}$ -

50° Oeste e 20°–10° Sul e 60°–50° Oeste. Em cada uma destas três regiões observou-se a probabilidade de aproximadamente 0.8% entre as 14h e 16h, mostrando que em toda esta área o TRMM observou 3 tempestades elétricas a cada 2 dias, apenas durante estas duas horas.

Entre 30°–20° Sul e 60°–50° Oeste, região de grande atividade de Sistemas Convectivos de Meso-escala (MCS) conforme descrevem Durkee e Mote (2009), encontra-se um máximo durante a tarde e os sistemas noturnos tiveram probabilidade de ocorrência 2.7 vezes menor do que os valores encontrados sobre os vales na Colômbia e Venezuela, mostrando que a ocorrência dos MCS ao Sul da América do Sul com ciclo de vida maior do que 9h ou com formação noturna, não possuem probabilidade de ocorrência que destaca-se em relação as demais regiões continentais, mesmo neste banco de dados composto apenas por tempestades elétricas.

## 2.2 CICLO ANUAL

Quando se analisa a sazonalidade, observa-se que a estação de tempestades elétricas na América do Sul se configura entre outubro e março e possui dois picos: de janeiro, durante o verão austral; e outubro, período de transição entre a estação seca e chuvosa.

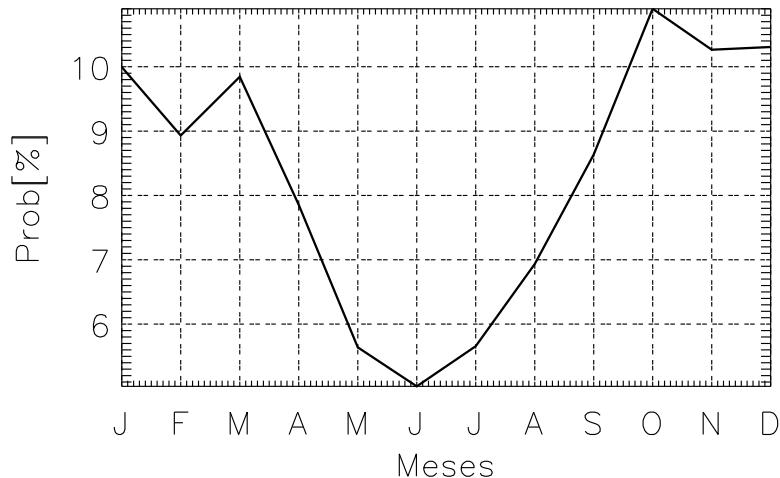


Figura 3: Ciclo anual das tempestades elétricas observadas em hora local. Os valores de probabilidade foram normalizados pelo total dos 157,592 sistemas identificados.

A maior probabilidade foi de 10.9% no mês de outubro, conforme mostra a figura 3. De outubro até março foram observadas 60.2% das tempestades elétricas. Em junho observou-se a mínima probabilidade de tempestades elétricas com valor de 5.1%. Portanto, entre

o período de máximo e mínimo anual o número de ocorrência de tempestades elétricas reduz aproximadamente pela metade.

O ciclo anual das tempestades elétricas também foi estudado para cada região de 10 por 10 graus. O valor de 70 por cento da máxima probabilidade de tempestade elétrica em cada região foi definido como limiar para considerar que a ocorrência de tempestades elétricas aumentou o suficiente para definir uma estação e este valor é representado pela linha horizontal que corta cada gráfico em cada ponto da grade de  $10^\circ \times 10^\circ$  da figura 4.

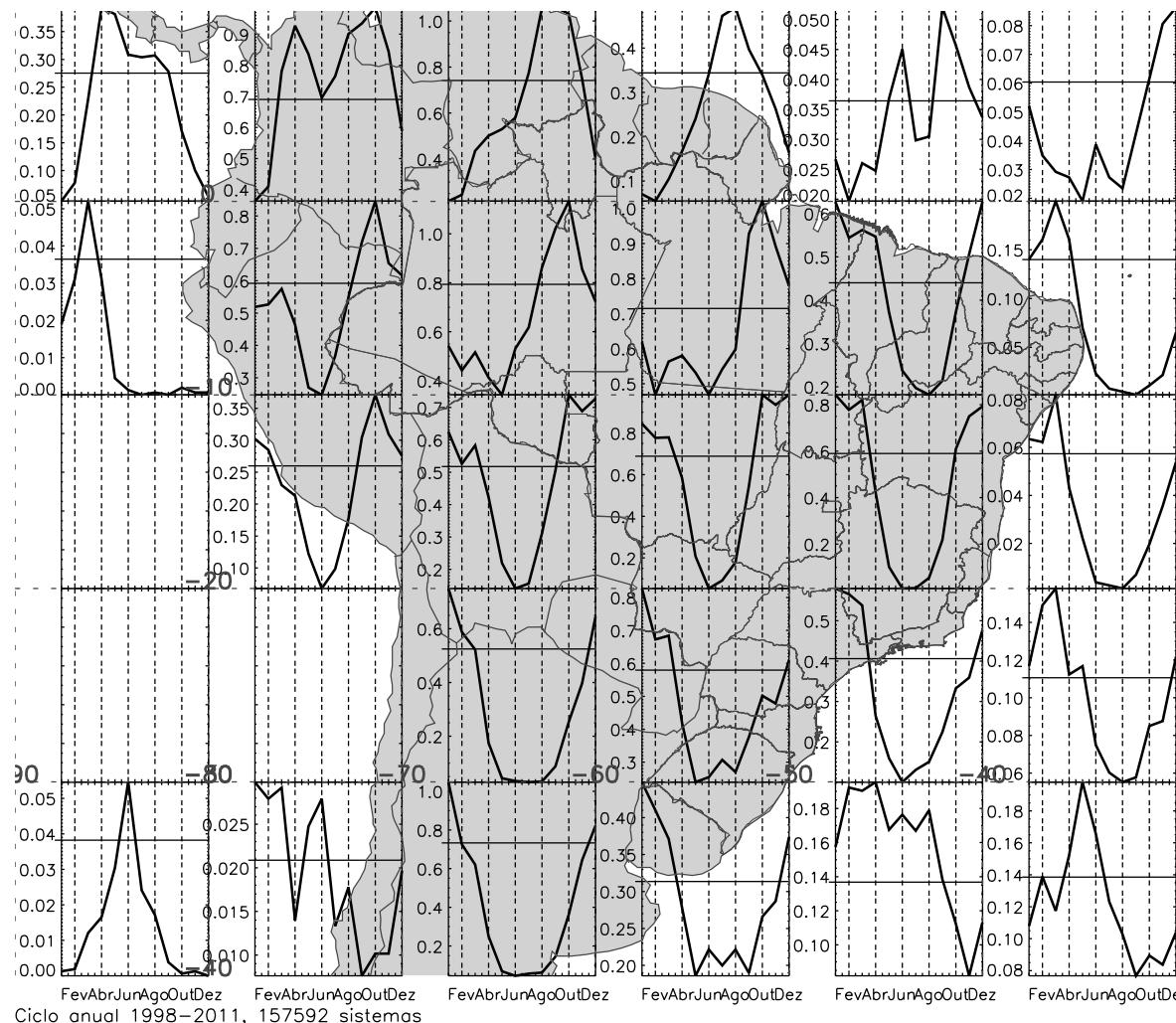


Figura 4: Ciclo anual em hora local para as tempestades elétricas observadas em cada região de 10 por 10 graus. Os valores de probabilidade são mostrados em porcentagem e foram normalizados pelo total de 157,592 sistemas observados. As linhas horizontais cortam o valor de 0.7 do máximo de probabilidade, utilizado como limiar para definir o início e fim das estações de tempestades elétricas.

A tabela 3 mostra os meses de duração das estações de tempestades elétricas de acordo com cada região conforme mostra a figura 4. Considerando o ciclo anual em cada ponto da grade de  $10^\circ \times 10^\circ$ , observa-se em média uma estação de tempestades elétricas com duração de 4.5 meses.

Tabela 3: Principais características do ciclo anual de probabilidade de ocorrência de tempestades elétricas observadas entre 1998-2011, em cada região de 10 por 10 graus.

	Localização	Número de sistemas	Estação (meses)	Duração (meses)	Máximo
1	0°–10°N, 90°–80°O	4173	Abr–Set	6	Abr
2	0°–10°N, 80°–70°O	14,232	Mar–Nov	9	Out
3	0°–10°N, 70°–60°O	11,946	Jul–Nov	5	Ago–Set
4	0°–10°N, 60°–50°O	4895	Jul–Set	3	Ago
5	0°–10°N, 50°–40°O	645	Mai–Jun, Set–Nov	5	Set
6	0°–10°N, 40°–30°O	824	Out–Dez	3	Dez
7	10°–0°S, 90°–80°O	225	Mar	1	Mar
8	10°–0°S, 80°–70°O	10,014	Set–Dez	4	Out
9	10°–0°S, 70°–60°O	12,605	Ago–Nov	4	Out
10	10°–0°S, 60°–50°O	12,590	Set–Dez	4	Out
11	10°–0°S, 50°–40°O	7863	Jan–Abr, Nov–Dez	6	Jan
12	10°–0°S, 40°–30°O	1363	Fev–Abr	3	Mar
13	20°–10°S, 90°–80°O	1	–0–	–0–	–0–
14	20°–10°S, 80°–70°O	4344	Jan–Fev, Set–Dez	6	Out
15	20°–10°S, 70°–60°O	8895	Jan–Mar, Out–Dez	6	Out
16	20°–10°S, 60°–50°O	10,973	Jan–Mar, Out–Dez	6	Out
17	20°–10°S, 50°–40°O	8524	Jan–Mar, Out–Dez	6	Jan
18	20°–10°S, 40°–30°O	625	Jan–Mar	3	Mar
19	30°–20°S, 90°–80°O	32	–0–	–0–	–0–
20	30°–20°S, 80°–70°O	32	–0–	–0–	–0–
21	30°–20°S, 70°–60°O	5607	Dez–Mar	4	Jan
22	30°–20°S, 60°–50°O	8885	Dez–Mar	4	Jan
23	30°–20°S, 50°–40°O	6121	Dez–Mar	4	Jan
24	30°–20°S, 40°–30°O	1884	Dez–Mai	4	Mar
25	40°–30°S, 90°–80°O	258	Jun	1	Jun
26	40°–30°S, 80°–70°O	366	Jan–Mar, Mai–Jun	5	Jan
27	40°–30°S, 70°–60°O	7652	Dez–Jan	2	Jan
28	40°–30°S, 60°–50°O	5440	Dez–Mar	4	Jan
29	40°–30°S, 50°–40°O	2949	Jan–Set	9	Abr
30	40°–30°S, 40°–30°O	2301	Abr–Jun	3	Mai

Na região referente as linhas 21 e 27 da tabela 3 (40°–20° Sul e 70°–60° Norte), entre o clima semi-árido na Argentina e parte da Bacia do Prata, local das tempestades mais severas e convecção mais profunda da América do Sul como apontam Cecil et al. (2005), Romatschke e Houze (2010), foi encontrada uma estação de tempestades elétricas

bastante definida entre dezembro e janeiro, sendo que entre maio e agosto, a probabilidade de ocorrência de sistemas fica inferior à 0.1%.

Na região Nordeste da AS, referente as linhas 6 e 11 da tabela 3 e regiões Sul e Sudeste da América do Sul, referentes as linhas 17, 21, 22, 23, 27 e 28 da tabela 3, os máximos de atividade elétrica de nuvem ocorreram entre dezembro e janeiro e os mínimos entre maio e julho, principalmente junho.

Na parte central tropical da AS, referentes as regiões correspondentes as linhas 2, 3, 4, 8, 9, 10, 14, 15, 16 da tabela 3, as tempestades elétricas ocorrem com maior frequência entre agosto e outubro, principalmente no mês de outubro.

Na região da costa Nordeste da AS, referente as linhas 12 e 18 da tabela 3, e região no Atlântico Subtropical, referente a linha 24 da tabela 3, a estação de tempestades elétricas possui máxima atividade em março e mínimo em torno de agosto.

As regiões de 10 por 10 graus situadas nas regiões oceânicas, referentes as linhas, 1, 5, 7, 25, 29 e 30, o pico de atividade de tempestades elétricas não ocorre entre outubro e março como mostra o ciclo anual total da figura 3, porém entre março e setembro. Provavelmente, no inverno austral, devido a queda de temperatura no continente a convergência aumenta no oceano.

## 2.3 SISTEMA DE MONÇÃO E AS ESTAÇÕES DE TEMPESTADES ELÉTRICAS

Na literatura, os estudos sobre a circulação atmosférica do Brasil identificam os principais sistemas responsáveis pelo ciclo de precipitação no país. Em SHI et al. (2009), foi elaborado um atlas da precipitação na América do Sul, que sintetizou as pesquisa sobre o tema, mostrando os principais fenômenos que a modulam nas diferentes regiões do Brasil.

Porém, a distribuição da precipitação não relaciona-se diretamente com distribuição das tempestades. A figura 5 temos a região de estudo também dividida em regiões de 10 por 10 graus, sendo os histogramas da figura 5a correspondentes à incidência de raios por  $\text{km}^2$  por dia ( $\text{raios } \text{km}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) em cada região da grade. A figura 5b possui histogramas referentes à precipitação em milímetros por dia ( $\text{mm dia}^{-2}$ ) em cada divisão.

Assim como as estações chuvosas nas diferentes localidades da América do Sul, as estações de tempestades elétricas se configuram conforme o Sistema de Monção da América do Sul (SAMS) . Na região central da América do Sul, observa-se que com o aumento da temperatura da superfície entre julho e setembro, o máximo de precipitação começa a

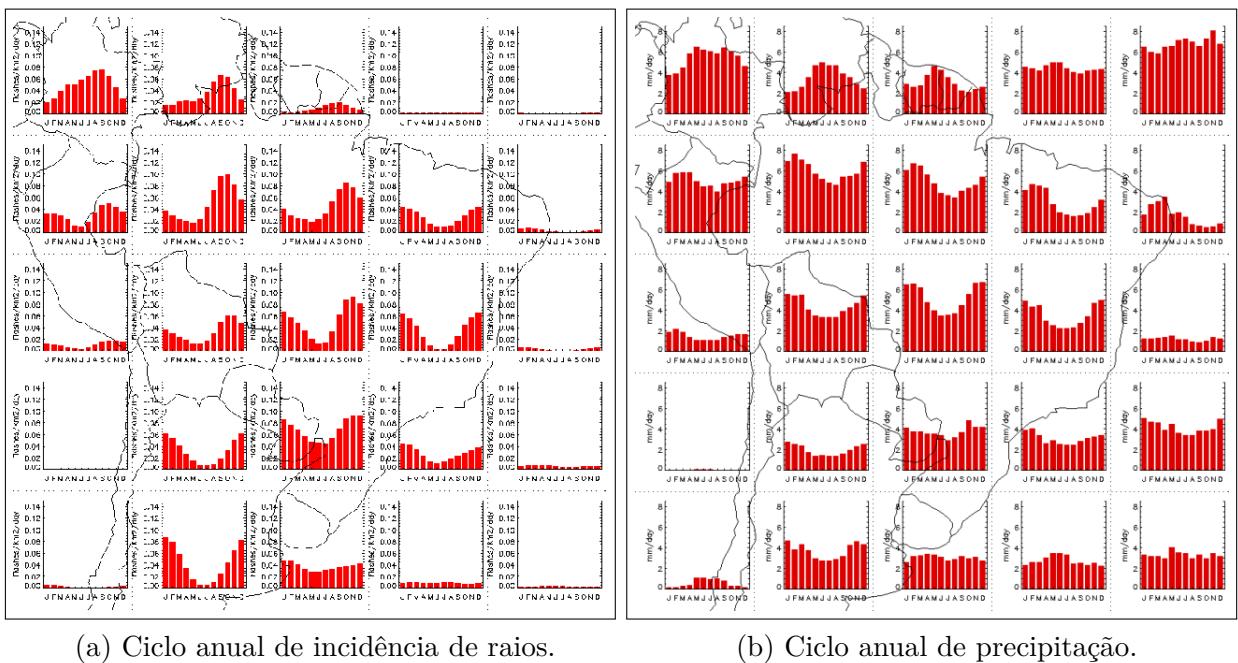


Figura 5: Perfil anual de precipitação e incidência de raios (MORALES, 2010).

se deslocar do Hemisfério Norte para o Hemisfério Sul e desta forma iniciando a estação chuvosa meridional pela região Oeste da Bacia Amazônica (ZHOU; LAU, 1998; GRIMM, 2003; REBOITA et al., 2010; MARENGO et al., 2012; BOMBARDI, 2008).

Entre  $10^{\circ}$ – $0^{\circ}$  Sul e  $80^{\circ}$ – $60^{\circ}$  Norte, na figura 4, observa-se que o pico da estação de tempestades elétricas ocorreu em outubro, nos primeiros passos da estação chuvosa da América do Sul. Porém o máximo de precipitação nesta região ocorre depois de 4 ou 5 meses.

Em Petersen e Rutledge (2001), o estudo realizado referente a estrutura tridimensional da precipitação observada pelo TRMM sobre a região Central da Amazônia, mostrou que a convecção mais profunda ocorre também na transição do período seco para o chuvoso, exatamente quando começa a reversão sazonal do vento em baixos níveis associado ao SAMS conforme apontam Zhou e Lau (1998).

Com o início do verão austral, o máximo de precipitação caminha até a região Centro Oeste e Sudeste do Brasil. Em janeiro, o SAMS se configura mais ativamente com a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (SACZ) e intensificação do Jato de Baixos Níveis (JBN). A atuação do JBN, principalmente nas regiões abaixo de  $20^{\circ}$  Sul, ativa a estação chuvosa e de tempestades elétricas em sincronismo.

Durante abril e maio, o SAMS vai se desconfigurando e o máximo de chuva começa a retornar para o Hemisfério Norte caminhando de Sudeste para o Nordeste do Brasil e

subindo pelo lado Leste da Bacia Amazônica. Neste retorno é que ocorrem os máximos de precipitação em toda a região da Bacia Amazônica, porém o máximo de ocorrência de tempestades elétricas ocorreu na vinda da estação chuvosa para o Hemisfério Sul.

Na região Nordeste do Brasil, entre  $10^{\circ}$ – $0^{\circ}$  Sul e  $40^{\circ}$ – $30^{\circ}$  Norte, o máximo de chuva ocorre juntamente com o máximo de ocorrência de tempestades elétricas, depois da atuação da SACZ no continente.

## 2.4 DENSIDADES GEOGRÁFICAS

Considerando o método descrito em ??, referente ao cálculo da densidade espacial de tempestades elétricas, equação ??, e densidade espacial de raios, equação ??, nesta seção será possível avaliar se as regiões aonde ocorrem o maior número de sistemas, correspondem as regiões com maior número de raios.

Na figura 6, observa-se que as regiões de máxima ocorrência de tempestades elétricas estão situadas sobre a Colômbia e região central da Bacia Amazônica, abrangendo a parte brasileira, colombiana, venezuelana e peruana.

Mesmo que os sistemas com as maiores taxas de raios no tempo observados pelo TRMM, estejam mais concentrados no Sul da América do Sul conforme mostram Cecil et al. (2005), Zipser et al. (2006), as tempestades elétricas são bem mais frequentes à Noroeste da AS.

A atuação da ITCZ combinada com a convergência de umidade e liberação de calor latente e sensível na Floresta Amazônica, além que regular o SAMS, são os principais propulsores de tempestades elétricas da América do Sul.

No entanto, os mecanismos de eletrificação são bem mais eficientes nas tempestades elétricas no Sul da AS, sobe a Bacia do Prata. Na figura ??, observa-se que na Amazônia, as regiões com taxa de raios superiores  $30$  ( $\text{ano}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ), possuíram taxa de sistemas acima de  $120$  ( $\text{ano}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ), enquanto na região da Argentina e Paraguai, as mesmas taxas de raios são atingidas com uma taxa de sistemas em torno de  $40$  ( $\text{ano}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ).

Nas figuras 8 e 9, a densidade espacial de raios e de tempestades elétricas, foi calculada para os períodos associados a cada estação do ano: dezembro, janeiro e fevereiro (DJF), março, abril e maio (MAM), junho, julho e agosto (JJA) e setembro, outubro e novembro (SON). A tabela 4 mostra o acumulado de sistemas observados em cada estação do ano.

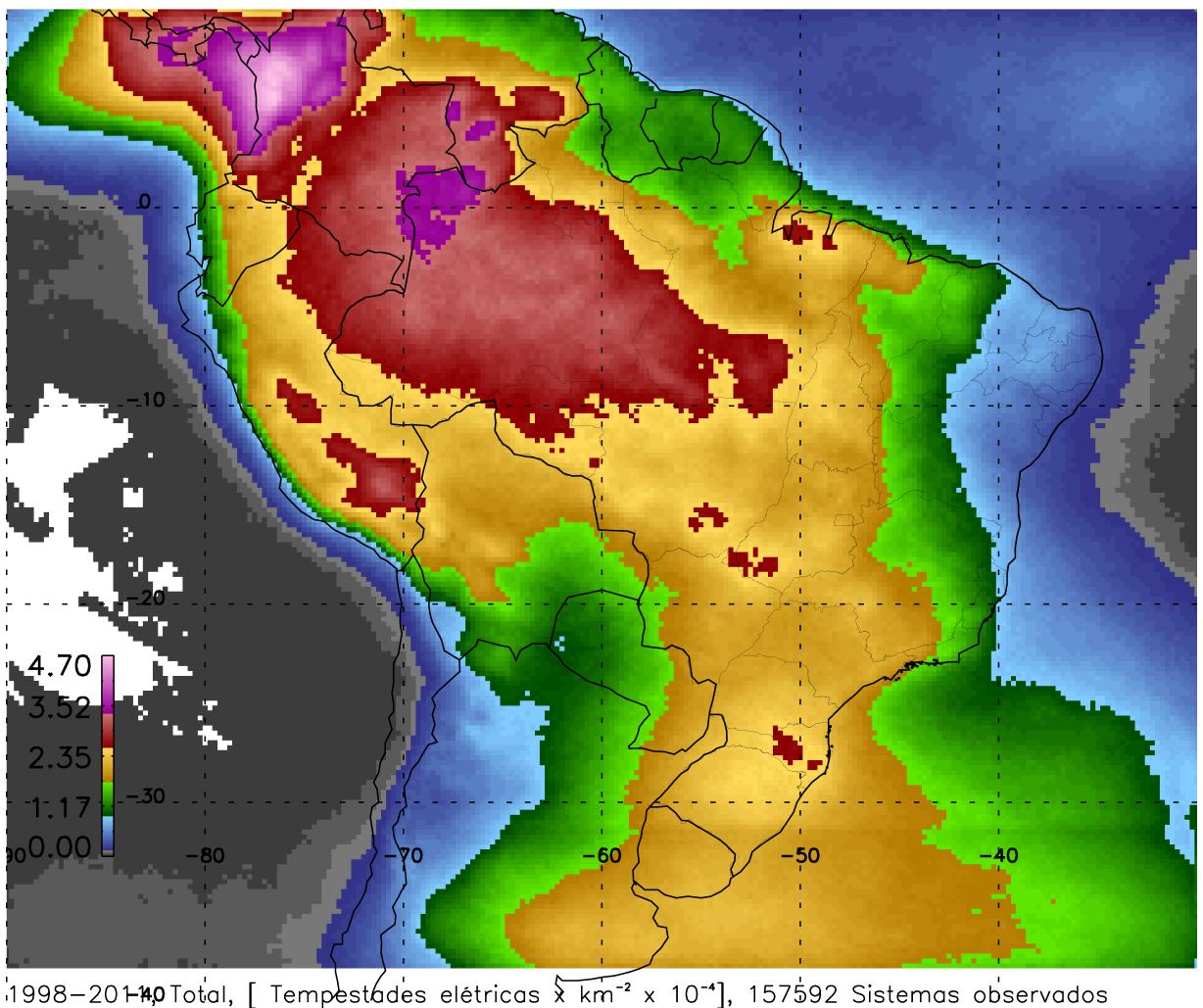


Figura 6: Densidade espacial total de tempestades elétricas. Os valores correspondem ao número de sistemas por ano por quilômetro quadrado em cada ponto da grade de 0.25 graus.

Na primavera austral (SON), início do SAMS, a intensificação dos alísios vindos do Atlântico Norte, e o aumento gradativo da evapotranspiração na Floresta Amazônica vão intensificando o transporte de umidade da bacia do Amazônia para a bacia do Prata (MARENGO et al., 2004). Esse processo de início da configuração do SAMS provoca a estação com a maior taxa de raios do continente Sul Americano, e esta, ocorre em regiões no centro no continente principalmente a Leste da Cordilheira dos Andes: na Amazônia Central, Argentina, Paraguai e Sul do Brasil.

Neste período destaca-se a taxa de raios sobre o Lago Maracaibo durante SON, na Venezuela, que no acumulado dos 14 anos atingiu o valor de 30 raios por mês de observação por quilômetro quadrado em cada ponto da grade de 0.25 graus. Em Albrecht et al. (2009), a região do Lago Maracaibo foi apontada como o máximo global das observações do TRMM.

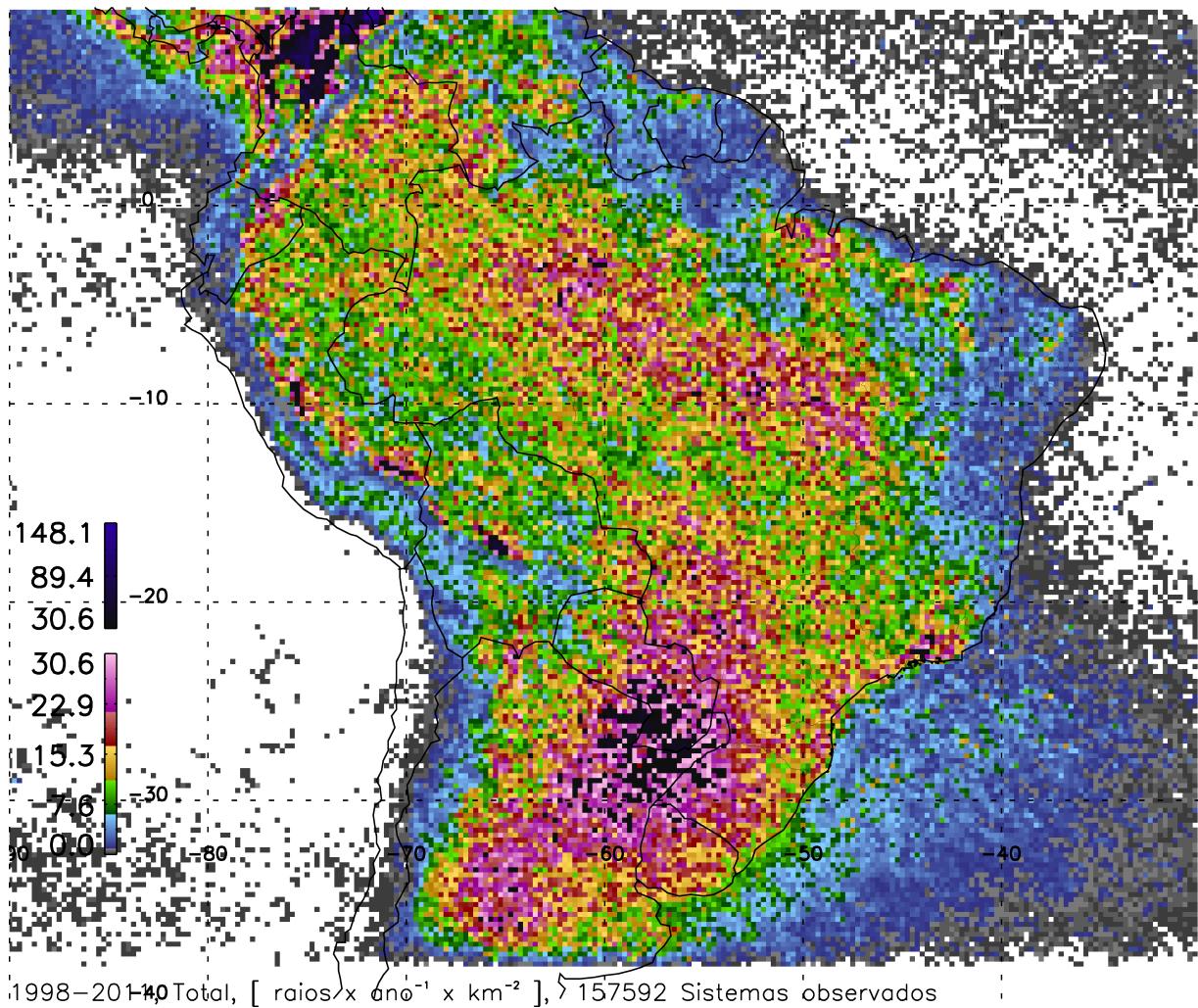


Figura 7: Densidade espacial total de raios. Os valores correspondem ao número de raios por ano por quilômetro quadrado em cada pronto da grade de 0.25 graus.

Tabela 4: Total de tempestades elétricas observadas entre 1998-2011, para cada período de três meses associados as estações do ano.

Estação	Número de sistemas
DJF	46,077
MAM	36,804
JJA	16,850
SON	57,861

Durante DJF, os máximos de raios são observados em Mato Grosso do Sul; Sul de Mato Grosso; Sudeste Brasileiro, entre costa de Santa Catarina e o Vale do Ribeira em São Paulo, região de fronteira entre São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, aonde localiza-se o Parque Nacional Itatiaia e o Pico das Agulhas Negras; interior de São Paulo; Goias; e na Bacia do Rio Tocantis. Apesar de observarmos o maior número de raios durante a estação de transição entre seca e chuvosa, essas regiões Centrais e Sudeste da

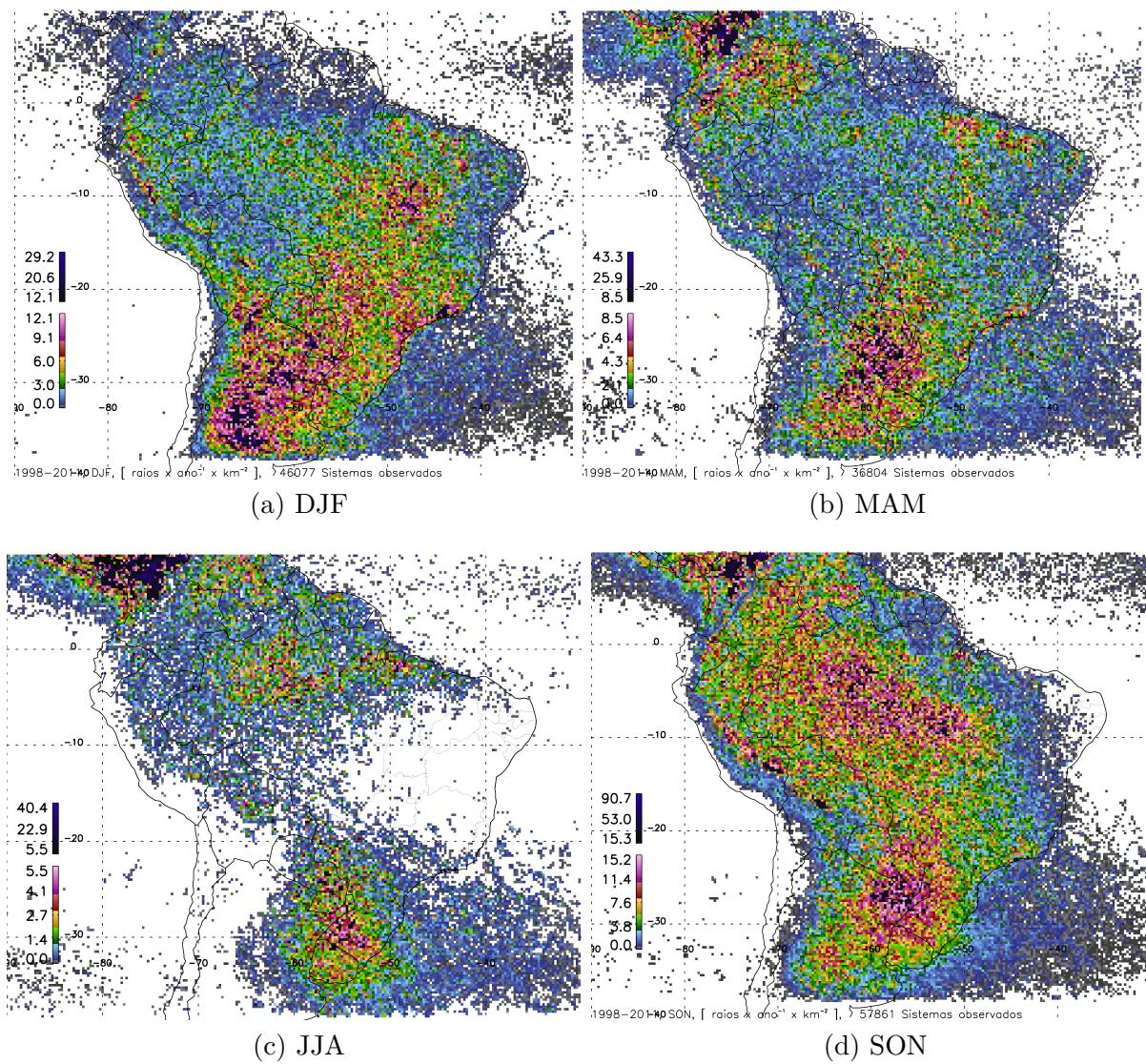


Figura 8: Densidade espacial sazonal de raios.

AS possuem os processos de eletrificação regulados durante a estação chuvosa.

Em Petersen et al. (2002), é mostrado que mesmo que se tenha observado diminuição na taxa de raios e redução da intensidade convectiva durante o regime de vento de Oeste no experimento TRMM *Large-scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia* (LBA), em outras regiões da AS durante o período chuvoso, há um aumento da taxa de raios.

Considerando que o regime de ventos de Leste e Oeste identificado no LBA está associado com as fases ativas e inativas do SAMS conforme descrevem Carvalho et al. (2002a), pode-se considerar que as máximas taxas de raios apresentadas na figura 8a são moduladas pelas variações na circulação sinóptica associadas com o processos de formação e dissipaçāo da SACZ (PETERSEN et al., 2002; ALBRECHT et al., 2011; Silva Dias et al., 2002).

Durante MAM, quando o máximo de chuvas começa a retornar para o Hemisfério Norte, observamos as tempestades elétricas bastante concentradas na região Norte e Nordeste da AS, como mostra a figura 9b. Neste período, principalmente nas regiões das cidades de Belém, estado do Maranhão, Piauí, Rio Grande do Norte e Paraíba, ocorrem: os máximos de chuva, os máximos de densidade de raios e os máximos de densidade de tempestades elétricas. Esse sincronismo não é comum.

Ao comparar as figuras 8 e 9 observa-se que as regiões de máxima densidade espacial de raios não são as regiões de máxima densidade de tempestades elétricas. Os máximos de raios ficam situados em regiões de transição, deslocados dos máximos de sistemas, reforçando a hipótese de Williams et al. (2002), em que se espera maior atividade elétrica de nuvem em um ambiente de transição entre seco e úmido.

Por exemplo, a maior área continua da América do Sul com taxas anuais de raios superiores a 20 raios por ano por quilômetro quadrado, como mostra a figura 7, ocorre na região Sul da AS. Tanto na figura 6 quanto na figura 9, podemos observar um forte gradiente de sistemas nesta região, que marca a transição entre o clima Desértico no Deserto do Atacama e Semi-árido na Argentina para o clima Subtropical úmido, promovendo um ambiente de transição seco/úmido permanente para os sistemas que iniciam-se principalmente na região da Serra de Córdoba na Argentina e se propagam para Noroeste.

A partir do estudo das densidades de tempestades elétricas e raios, a figura 10, representa as regiões em que as tempestades elétricas são mais eficientes na produção de raios. Foi calculada a taxa de raios por tempestade elétrica por ano por quilômetro quadrado. Os maiores valores desta dimensão que associa-se com eficiência espacial que cada região de 0.25 graus tem em produzir raios, representam os locais em que se tem menor número de sistemas em relação ao número de raios durante os 14 anos de dados.

A região da bacia do Prata é a maior extensão contínua com os maiores valores de eficiência espacial de produção de raios. Porém destacam-se regiões menores como no Vale do Ribeira em São Paulo, Pico das Agulhas Negras em Minas Gerais, região serrana do Rio de Janeiro, parte Sul do Tocantis, parte Leste e Norte do Pará e Leste do estado do Amazonas. Estas regiões podem estar associadas com regiões de tempo severo. Locais em que a topografia ou a circulação local intensifica os sistemas.

Na região do Parque Nacional Natural Paramillo na Colômbia e no Lago Maracaibo na Venezuela, a taxa de raios por em cada área de tempestade de 0.25 graus mostra valores com a mesma magnitude de regiões na Bacia do Prata, mesmo que o número de raios e de sistemas produzidos ao Norte sejam maiores.

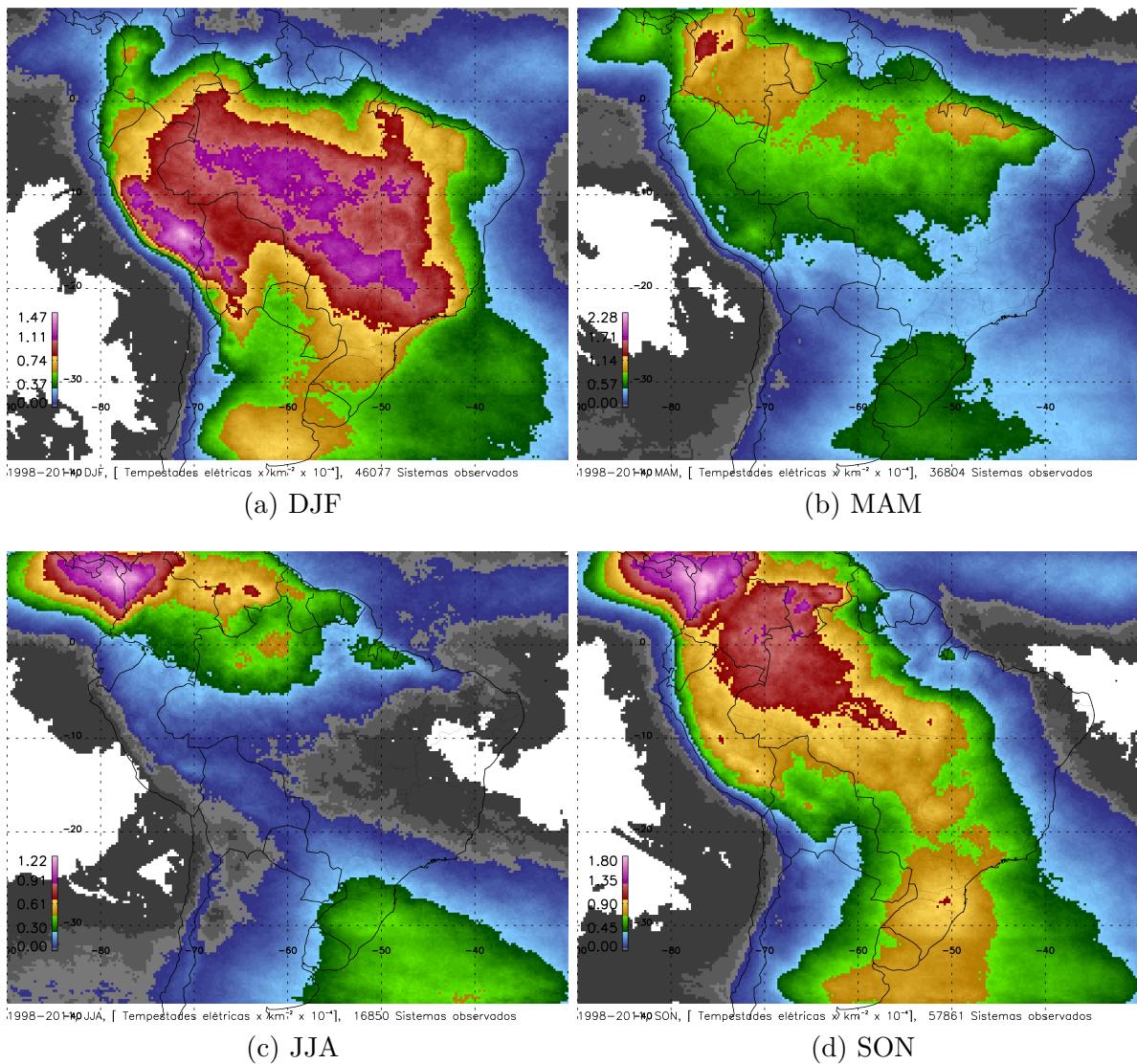


Figura 9: Densidade espacial sazonal das tempestades elétricas.

Algumas regiões no pico da Cordilheira dos Andes são bastante eficientes, principalmente na região da cidade de Cochabamba na Bolívia.

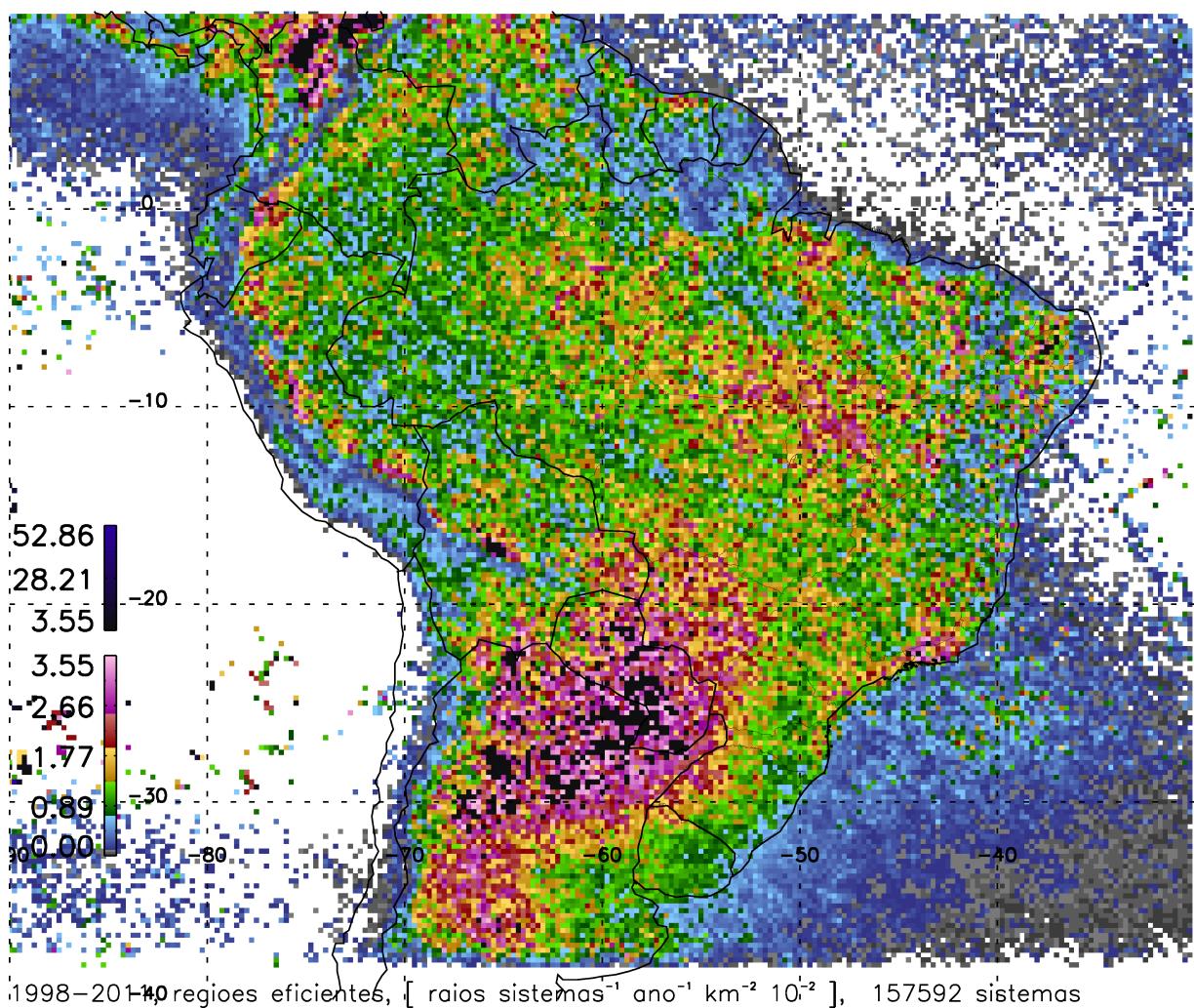


Figura 10: Eficiencia de tempestade

## REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, R.; GOODMAN, S.; BUECHLER, D.; CHRONIS, T. Tropical frequency and distribution of lightning based on 10 years of observations from space by the lightning imaging sensor (lis). In: **Conference on the meteorological applications of lightning data.** [S.l.: s.n.], 2009.
- ALBRECHT, R. I.; MORALES, C. A.; DIAS, M. A. S. Electrification of precipitating systems over the amazon: Physical processes of thunderstorm development. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 116, n. D8, 2011.
- BOMBARDI, R. J. **Variabilidade do regime de monções da América do Sul: o clima presente e projeções para o século XXI.** Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo (USP). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, 2008.
- BÜRGESSER, R. E.; NICORA, M. G.; AVILA, E. E. Characterization of the lightning activity of “relámpago del catatumbo”. **Journal Of Atmospheric And Solar-Terrestrial Physics**, Elsevier, v. 77, p. 241–247, 2012.
- CARVALHO, L.; JONES, C.; Silva Dias, M. A. Intraseasonal large-scale circulations and mesoscale convective activity in tropical south america during the trmm-lba campaign. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 107, n. D20, p. LBA–9, 2002a.
- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; Silva Dias, M. A. F. Intraseasonal large-scale circulations and mesoscale convective activity in tropical South America during the TRMM-LBA campaign. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 107, n. 20, 2002b.
- CECIL, D.; GOODMAN, S.; BOCCIPPIO, D.; ZIPSER, E.; NESBITT, S. Three years of trmm precipitation features. part i: Radar, radiometric, and lightning characteristics. **Mon. Wea. Rev.**, v. 133, p. 543–566, 2005.
- DURKEE, J. D.; MOTE, T. L. A climatology of warm-season mesoscale convective complexes in subtropical South America. **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 30, n. 3, p. 418–431, 2009. ISSN 08998418. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1893/abstract>>.
- FABRY, F.; ZAWADZKI, I. Long-Term Radar Observations of the Melting Layer of Precipitation and Their Interpretation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, n. 7, p. 838–851, 1995. ISSN 0022-4928.
- GRIMM, A. M. The el niño impact on the summer monsoon in brazil: regional processes versus remote influences. **Journal of Climate**, v. 16, n. 2, p. 263–280, 2003.

- JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. Active and break phases in the South American monsoon system. **Journal of Climate**, v. 15, n. 8, p. 905–914, 2002.
- MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; GRIMM, A. M.; MISRA, V.; Silva Dias, P. L.; CAVALCANTI, I. F. A.; CARVALHO, L. M. V.; BERBERY, E. H.; AMBRIZZI, T.; VERA, C. S.; SAULO, A. C.; NOGUES-PAEGLE, J.; ZIPSER, E.; SETH, A.; ALVES, L. M. Recent developments on the South American monsoon system. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 1, p. 1–21, 2012.
- MARENGO, J. A.; SOARES, W. R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the low-level jet east of the andes as derived from the ncep-ncar reanalyses: Characteristics and temporal variability. **Journal of climate**, v. 17, n. 12, p. 2261–2280, 2004.
- MORALES, C. A. **Comunicação Pessoal**. São Paulo: [s.n.], 2010.
- NESBITT, S. W.; ZIPSER, E. J. The diurnal cycle of rainfall and convective intensity according to three years of trmm measurements. **Journal of Climate**, v. 16, n. 10, p. 1456–1475, 2003.
- PETERSEN, W. A.; NESBITT, S. W.; BLAKESLEE, R. J.; CIFELLI, R.; HEIN, P.; RUTLEDGE, S. A. Trmm observations of intraseasonal variability in convective regimes over the amazon. **Journal of Climate**, v. 15, n. 11, p. 1278–1294, 2002.
- PETERSEN, W. A.; RUTLEDGE, S. A. Regional variability in tropical convection: Observations from trmm. **Journal of Climate**, v. 14, n. 17, p. 3566–3586, 2001.
- REBOITA, M.; GAN, M.; ROCHA, R. d.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na américa do sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010.
- ROMATSCHKE, U.; HOUZE, R. A. Extreme Summer Convection in South America. **Journal of Climate**, AMER METEOROLOGICAL SOC, v. 23, n. 14, p. 3761–3791, 2010. ISSN 08948755. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2010JCLI3465.1>>.
- SHI, W.; HIGGINS, R. W.; YAROSH, E.; KOUSKY, V. E. **The Annual Cycle and Variability of Precipitation in Brazil**. 2009. Disponível em: <[http://www.cpc.noaa.gov/products/outreach/research\\_papers/ncep\\_cpc\\_atlas/9](http://www.cpc.noaa.gov/products/outreach/research_papers/ncep_cpc_atlas/9)>. Acesso em: 17 set. 2010.
- Silva Dias, M. A. F. d.; RUTLEDGE, S.; KABAT, P.; DIAS, P. d. S.; NOBRE, C.; FISCH, G.; DOLMAN, A.; ZIPSER, E.; GARSTANG, M.; MANZI, A. et al. Cloud and rain processes in a biosphere-atmosphere interaction context in the amazon region. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 107, n. D20, p. LBA–39, 2002.
- TAKAHASHI, T. Rimming electrification as a charging generation mechanism in thunderstorms. **J. Atmos. Sci.**, v. 35, p. 1536–1548, 1978.
- TAKAHASHI, T.; MIYAWAKI, K. NOTES AND CORRESPONDENCE Reexamination of Riming Electrification in a Wind Tunnel. n. 1980, p. 1018–1025, 2002.

- VELASCO, I.; FRITSCH, J. M. Mesoscale convective complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, n. D8, p. 9591, 1987. ISSN 0148-0227.
- WILLIAMS, E.; ROSENFELD, D.; MADDEN, N.; GERLACH, J.; GEARS, N.; ATKINSON, L.; DUNNEMANN, N.; FROSTROM, G.; ANTONIO, M.; BIAZON, B. et al. Contrasting convective regimes over the amazon: Implications for cloud electrification. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 107, n. D20, p. LBA-50, 2002.
- ZHOU, J.; LAU, K.-M. Does a Monsoon Climate Exist over South America? **Journal of Climate**, v. 11, n. 5, p. 1020–1040, 1998. ISSN 0894-8755.
- ZIPSER, E.; CECIL, D.; LIU, C.; NESBITT, S.; YORTY, D. Where are the most intense thunderstorms on earth? **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 87, p. 1057–1071, 2006.