



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DE
RELÂMPAGOS NO ESTADO DE MINAS GERAIS**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Guilherme Batista Preisser

Itajubá, MG, Brasil

2019

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DE RELÂMPAGOS NO ESTADO DE MINAS GERAIS

por

Guilherme Batista Preisser

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas.

Orientador: Enrique Vieira Mattos

**Itajubá, MG, Brasil
2019**

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

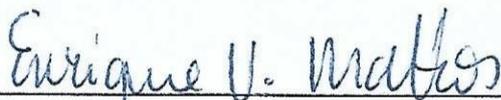
**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE RELÂMPAGOS NO ESTADO DE
MINAS GERAIS**

elaborada por

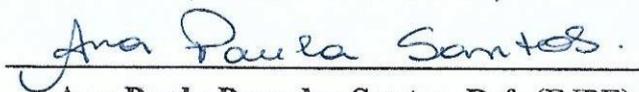
Guilherme Batista Preisser

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:



Enrique Vieira Mattos, Dr. (UNIFEI)
(Presidente/Orientador)



Ana Paula Paes dos Santos, Dr^a. (INPE)



Arcilan Trevenzoli Assireu, Dr. (UNIFEI)

Itajubá, 13 de novembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a empresa Climatempo por fornecer os dados e a todos que colaboraram de alguma forma para a realização deste estudo e para a minha graduação.

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DE RELÂMPAGOS NO ESTADO DE MINAS GERAIS.

AUTOR: Guilherme Batista Preisser
ORIENTADOR: Enrique Vieira Mattos
Local e Data da Defesa: Itajubá, 13 de novembro de 2019.

Minas Gerais é um estado que está situado na região sudeste do Brasil. Devido a sua localização, é comum a passagem de frentes frias e a ocorrência de tempestades convectivas com atividade de relâmpagos que podem afetar os setores de energia e telefonia. Nesse contexto, esse trabalho tem o objetivo de avaliar a distribuição espacial e temporal dos relâmpagos no estado de MG. Para tanto foram utilizados dados de relâmpagos da Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT) de 2013 a 2018. Os relâmpagos foram separados em: i) intra-nuvem (IN); ii) nuvem-solo negativo (-NS); iii) nuvem-solo positivo (+NS); iv) pico de corrente de relâmpago nuvem-solo negativo (-PC) e v) pico de corrente de relâmpago nuvem-solo positivo (+PC). Em MG ocorre aproximadamente 171.397 relâmpagos IN, 48.725 relâmpagos -NS e 2.597 relâmpagos +NS anualmente. Os resultados sobre a média anual de ocorrência de relâmpagos IN e -NS indicaram alta incidência na região da zona da mata, alta incidência de +NS ocorre na região do triângulo mineiro, o -PC tem maior intensidade no triângulo e o +PC tem maior intensidade na região norte e Vale do Jequitinhonha. O ciclo mensal evidenciou que os relâmpagos são mais frequentes no verão e menos frequentes no inverno. O ciclo diurno apresentou máximo e mínimo de ocorrência de relâmpagos às 19 horas UTC e 12 horas UTC respectivamente. Esses resultados indicam que a distribuição dos relâmpagos IN, -NS e +NS e do -PC e +PC varia de acordo com a região do Estado e com os horários do dia.

Palavras-chave: Distribuição. Relâmpagos. Minas Gerais.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Localização dos sensores da rede BrasilDAT. Fonte: Adaptado de Naccarato et al., 2014.....4
- Figura 2 – Regiões de Planejamento adotada atualmente pelo Governo do estado de Minas Gerais. Fonte: Instituto de Geoinformação e Tecnologia (IGTEC).....7
- Figura 3 – Média anual de relâmpagos: densidade de relâmpagos (relâmpagos por ano por km²) a) Intra-nuvem, b) Nuvem-solo negativo e c) Nuvem-solo positivo e pico de corrente (kA) para relâmpagos nuvem-solo d) negativo e e) positivo utilizando dados da BrasilDAT de 2013 a 2018. Fonte: Do Autor.10
- Figura 4 – Mapa de elevação (em metros) do estado de Minas Gerais fornecido pelo SRTM com resolução espacial de 30 metros. Fonte: Do Autor.....11
- Figura 5 – Média anual de relâmpagos totais (IN+NS) para 2018 estimados pela: a) BrasilDAT e b) GLM a bordo do GOES-16. Fonte: Do Autor.13
- Figura 6 – Ciclo médio anual entre 2013 e 2018 de relâmpagos intra-nuvem (linha preta), nuvem-solo negativo (linha azul) e nuvem-solo positivo (linha vermelha) e do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativos (linha laranja contínua) e positivos (linha laranja tracejada). Fonte: Do Autor.15
- Figura 7 – Distribuição anual da densidade de relâmpagos (relâmpagos ano⁻¹ km⁻²) intra-nuvem para os anos de a) 2013, b) 2014, c)2015, d) 2016, e) 2017 e f) 2018. Fonte: Do Autor.....17
- Figura 8 – Distribuição anual da densidade de relâmpagos (relâmpagos ano⁻¹ km⁻²) nuvem-solo negativo para os anos de a) 2013, b) 2014, c) 2015, d) 2016, e) 2017 e f) 2018. Fonte: Do Autor.17
- Figura 9 – Distribuição anual da densidade de relâmpagos (relâmpagos ano⁻¹ km⁻²) nuvem solo positivo para os anos de a) 2013, b) 2014, c) 2015, d) 2016, e) 2017 e f) 2018. Fonte: Do Autor.....18
- Figura 10 – Distribuição anual da densidade de pico de corrente (kA) de relâmpagos nuvem-solo negativo para os anos de a) 2013, b) 2014, c) 2015, d) 2016, e) 2017 e f) 2018. Fonte: Do Autor.19
- Figura 11 – Distribuição anual da densidade de pico de corrente (kA) de relâmpagos nuvem-solo positivo para os anos de a) 2013, b) 2014, c)2015, d) 2016, e) 2017 e f) 2018. Fonte: Do Autor.....20
- Figura 12 – Distribuição sazonal de relâmpagos intra-nuvem (relâmpagos estação⁻¹ km⁻²): a) verão, b) outono, c) inverno e d) primavera. Fonte: Do Autor.....21
- Figura 13 – Distribuição sazonal de relâmpagos nuvem-solo negativo (relâmpagos estação⁻¹ km⁻²): a) verão, b) outono, c) inverno e d) primavera. Fonte: Do Autor.22

- Figura 14 – Distribuição sazonal de relâmpagos nuvem-solo positivo (relâmpagos estação⁻¹ km⁻²): a) verão, b) outono, c) inverno e d) primavera. Fonte: Do Autor.23
- Figura 15 – Distribuição sazonal do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativo (kA): a) verão, b) outono, c) inverno e d) primavera. Fonte: Do Autor.24
- Figura 16 – Distribuição sazonal do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo positivo (kA): a) verão, b) outono, c) inverno e d) primavera. Fonte: Do Autor.....25
- Figura 17 – Ciclo mensal médio de relâmpagos intra-nuvem (linha preta), nuvem-solo negativo (linha azul) e nuvem-solo positivo (linha vermelha) e do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativos (linha laranja contínua) e positivos (linha laranja tracejada). Fonte: Do Autor.....26
- Figura 18 – Mês de máxima ocorrência de relâmpagos: a) intra-nuvem; b) nuvem-solo negativo; c) nuvem-solo positivo. Fonte: Do Autor.29
- Figura 19 – Ciclo diurno médio de relâmpagos intra-nuvem (linha preta), nuvem-solo negativo (linha azul) e nuvem-solo positivo (linha vermelha) e do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativos (linha laranja contínua) e positivos (linha laranja tracejada). Fonte: Do Autor.....30
- Figura 20 – Horário de máxima ocorrência de relâmpagos: a) intra-nuvem; b) nuvem-solo negativo; c) nuvem-solo positivo. Fonte: Do Autor.31
- Figura 21 – Municípios *hotspots* de: densidade de relâmpagos a) intra-nuvem, b) nuvem-solo negativo e c) nuvem-solo positivo e pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo d) negativo e e) solo positivo. Fonte: Do Autor.....33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Total de relâmpagos intra-nuvem, nuvem-solo negativo e positivos médios (eventos*ano ⁻¹ *km ⁻²) e a mediana do pico de corrente (kA) para relâmpagos nuvem-solo negativo e positivo para o estado de MG para os anos de 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 e 2018.....	15
Tabela 2 – Total médio mensal de relâmpagos intra-nuvem, nuvem-solo negativo e nuvem-solo positivo e do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo positivo e negativo.....	27

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ELAT	- Grupo de Eletricidade Atmosférica
BrasilDAT	- Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas
MG	- Minas Gerais
IN	- Intra-nuvem
-NS	- Relâmpago Nuvem-solo negativo
+NS	- Relâmpago Nuvem-solo positivo
-PC	- Pico de corrente de relâmpago nuvem-solo negativo
+PC	- Pico de corrente de relâmpago nuvem-solo positivo
kA	- Quiloampere
GLM	- Global Lightning Mapper

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3
3. MATERIAIS E MÉTODOS	6
4.1 CARACTERIZAÇÃO ANUAL MÉDIA DOS RELÂMPAGOS.....	7
4.1.1 RELÂMPAGOS BRASILDAT E GOES-16.....	12
4.2 CARACTERIZAÇÃO INTERANUAL DOS RELÂMPAGOS.....	13
4.3 CARACTERIZAÇÃO SAZONAL DOS RELÂMPAGOS.....	20
4.4 CARACTERIZAÇÃO MENSAL DOS RELÂMPAGOS	25
4.4 CARACTERIZAÇÃO DO CICLO DIURNO MÉDIO DOS RELÂMPAGOS	29
4.5 MAPA DOS MUNICÍPIOS <i>HOTSPOTS</i> DE RELÂMPAGOS	31
5. CONCLUSÃO.....	33
REFERÊNCIAS.....	36

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, estima-se que ocorra cerca de 77,8 milhões de relâmpagos do tipo nuvem-solo por ano, segundo o Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Cardoso et al. (2014) estimaram que aproximadamente 120 pessoas morrem anualmente no Brasil devido a ocorrência de relâmpagos, sendo que a maior parte desses casos foram registrados no verão. Devido a sua localização geográfica, fatores como a recorrente passagem de frentes frias sobre o Estado de Minas Gerais (MG) durante o ano e da intensa atividade convectiva durante a primavera e o verão, contribuem para uma grande quantidade de ocorrência de relâmpagos. Esses fatores causam transtornos para a população, como por exemplo, a interrupção no fornecimento de energia elétrica, afetando a produtividade das empresas e vendas e provocando fatalidades.

Um dos processos de eletrificação das nuvens mais aceito atualmente é o da colisão entre o *graupel* (granizo) e cristais de gelo. As correntes ascendentes e descendentes das nuvens fazem com que o *graupel* e o cristal de gelo em conjunto com a água super-resfriada colidam, criando uma separação de cargas negativas (*graupel*) e cargas positivas (cristal de gelo). Essa separação de cargas origina um dipolo no interior da nuvem, com cargas elétricas positivas na parte superior e carga negativas na base da nuvem (SIMPSON e ROBINSON, 1940; REYNOLDS; BROOK; GOURLEY, 1957). Com o aumento da diferença de potencial dentro da nuvem, a rigidez dielétrica do ar pode ser rompida, propiciando assim a formação dos relâmpagos.

Os relâmpagos podem ser classificados de acordo com o seu tipo. Os relâmpagos que atingem o solo são conhecidos como nuvem-solo (NS), e relâmpagos que ocorrem no interior da nuvem são definidos como intra-nuvem (IN). Os relâmpagos NS ainda podem ser classificados de acordo com a polaridade das cargas transferidas para o solo, em relâmpagos NS negativos (-NS) e positivos (+NS) (WALLACE e HOBBS, 2006). De acordo o ELAT, 70 % dos relâmpagos são do tipo intra-nuvem e 90 % dos relâmpagos NS são negativos.

Estudos sobre relâmpagos são importantes, pois contribuem para o entendimento da sua formação e podem propiciar o desenvolvimento de ferramentas de previsão de tempo, além de ajudar a identificar as regiões de maiores ocorrências, com o intuito de mitigar os problemas associados a esse fenômeno. Alguns autores

utilizaram dados de relâmpagos obtidos por rede de sensores em solo, como por exemplo, Pinto Jr et al. (1999), Pinto Jr et al. (2003), Naccarato (2006); Pinto et al. (2006); Pinto Jr, Pinto e Naccarato (2007), Naccarato e Pinto Jr (2009), Santos et al. (2016), Mazetti e Fuelberd, (2017) e Santos (2017) enquanto que outros autores utilizaram relâmpagos detectados por sensores a bordo de satélites (BOCCIPPIO; GOODMAN e HECKMAN, 2000; CHRISTIAN et al., 2003; PINTO JR; PINTO; FARIA, 2003; CECIL; BUECHLER; BLASKESLEE, 2012; PETERSON e LIU, 2013; BEIRLE et al., 2014; ANSELMO, 2015; ALBRECCHT et al., 2016; PETERSON; RUDLOSKY e DEIERLING, 2017; MEDICI et al. 2017; ABREU, 2018; RUDLOSKY et al., 2019; YOU et al., 2019).

Atualmente no Brasil, existem três redes de detecção de relâmpagos que utilizam sensores em solo. A Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT) que teve seu início nos anos 80 e possui atualmente 24 sensores distribuídos pelos estados do Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Espírito Santo, Bahia, Goiás e Distrito Federal. Outra rede de detecção existente é a *Sferics Timing And Ranging NETWORK* (STARNET) que iniciou em 1997 e atualmente possui 12 sensores, sendo que 8 deles estão no Brasil nos estados do Rio Grande do Sul, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Bahia, Ceará, Pará e Amazonas. Mais recentemente, em 2011, foi criada a Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT), que conta com cerca de 70 sensores instalados nas regiões sul, sudeste, centro-oeste e nordeste do Brasil.

Embora existam no Brasil diversas redes de relâmpagos, ainda são escassos os estudos sobre a distribuição espacial e temporal de relâmpagos e pico de corrente no Estado de MG. Esses estudos são essenciais para o desenvolvimento mapas de vulnerabilidade para cada região em MG e como consequência podem auxiliar os setores de energia elétrica e telefonia em tomadas de decisões estratégicas. Para produzir ferramentas capazes de prever com eficiência e mitigar os prejuízos associados a esse fenômeno, precisa-se compreender a sua formação e distribuição de ocorrência dos relâmpagos. Nesse contexto, esse trabalho possui como diferencial a avaliação pela primeira vez da distribuição espacial e temporal de relâmpagos nuvem-solo e intra-nuvem e a polaridade dos relâmpagos nuvem-solo com a rede mais moderna de relâmpagos (BrasilDAT) com um período de 6 (2013 a 2018) anos de dados para o estado de Minas Gerais.

1.1 Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo analisar a distribuição espacial e temporal de relâmpagos no estado de Minas Gerais através de rede de relâmpagos em superfície.

1.2 Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos são propostos:

- 1) Avaliar a distribuição espacial anual média da ocorrência de relâmpagos e pico de corrente;
- 2) Avaliar a variação sazonal da ocorrência de relâmpagos e pico de corrente;
- 3) Analisar a variação mensal da ocorrência de relâmpagos e pico de corrente;
- 4) Caracterizar o ciclo diurno de relâmpagos e pico de corrente;
- 5) Identificar os municípios com as maiores densidades de relâmpagos intra-nuvem, nuvem-solo negativo, nuvem-solo positivo e maiores valores do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativos e positivos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os relâmpagos são detectados e identificados por sensores que captam a radiação eletromagnética que é emitida pelos relâmpagos. Quando os pulsos são detectados pelos instrumentos, informações contendo horário do evento, a intensidade do sinal, o tempo de subida e a largura do pulso da forma de onda, são enviados para uma central de processamento que analisa se essas informações correspondem ao mesmo relâmpago. Algumas das técnicas de detecção são o método da direção magnética, que é quando dois ou mais sensores detectam uma descarga e a sua localização é dada pela intersecção das retas definidas pelos azimutes dos sensores e o método do tempo de chegada, que é quando três ou mais sensores registram o mesmo horário de chegada da radiação eletromagnética (NACCARATO, 2006). No Brasil, a rede de sensores em solo mais moderna é a Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT), tendo a capacidade de detectar relâmpagos nuvem-solo e intra-nuvem (NACCARATO et al., 2014). A Figura 1 mostra a localização dos sensores da rede BrasilDAT.

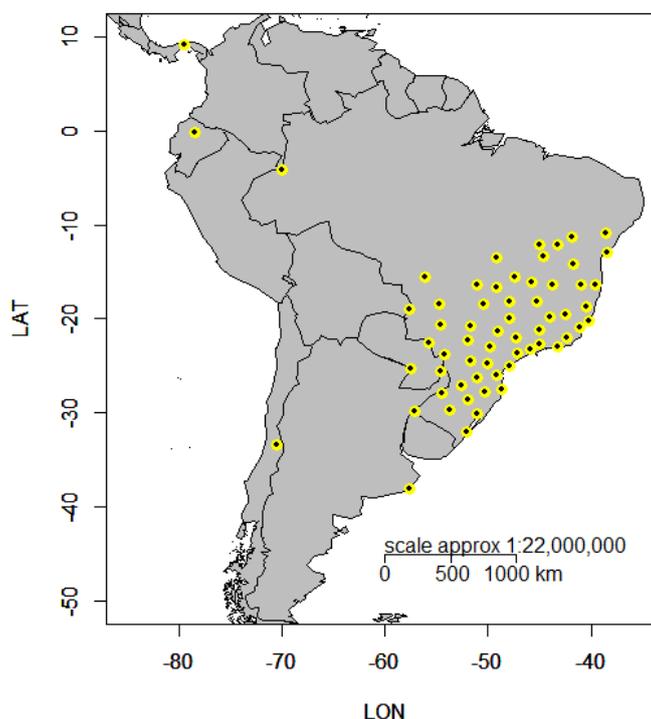


Figura 1 – Localização dos sensores da rede BrasilDAT. Fonte: Adaptado de Naccarato et al., 2014.

Um estudo (Pinto Jr et al., 1999) utilizando dados de sensores do tipo *Lightning Positioning and Tracking System* (LPATS) situado no estado de MG revelou uma alta densidade, de aproximadamente 10 a 16 relâmpagos $\text{km}^{-2} \text{ano}^{-1}$ para as regiões da Zona da Mata e do Alto Paranaíba. Além disso, encontrou-se uma densidade de relâmpagos nuvem-solo negativos variando de 6,0 a 9,6 relâmpagos $\text{km}^{-2} \text{ano}^{-1}$ na região central do Estado e uma densidade 7,2 a 8,4 relâmpagos $\text{km}^{-2} \text{ano}^{-1}$ de relâmpagos nuvem-solo positivos no Alto Paranaíba. O pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativo variou de 32 a 63 kA no norte da região central e na região norte e de 20 a 32 kA no sul da região central e na região sul do estado, enquanto que o pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo positivo oscilou de 20 a 40 kA na região norte e de 10 a 20 kA na região central e sul. Adicionalmente, Pinto Jr, Pinto e Naccarato (2007) utilizando dados da rede RINDAT identificaram que as regiões da zona da mata e parte do triângulo mineiro de do Alto Paranaíba são mais suscetíveis a ter maior incidência de relâmpagos nuvem-solo.

Posteriormente Pinto Jr et al. (2003), por meio de dados de sensores em solo observaram que na região sudeste do Brasil ocorreram em média aproximadamente 328.000 relâmpagos entre os anos de 1999 e 2000. Estima-se que no país, ocorram

de 50 a 70 milhões de relâmpagos nuvem-solo por ano, com densidade de mais de 10 eventos por $\text{km}^{-2} \text{ano}^{-1}$ nas regiões sudeste, norte e centro (PINTO e PINTO JR, 2003). Inicialmente o pico de corrente médio encontrado para a região sudeste foi de 15 kA (PINTO JR et al., 2003). Porém com o aumento do número de sensores de relâmpagos em solo, o pico de corrente encontrado foi de 15-20 kA e de 30-35 kA para a mesma região, e uma média de 4,6 a 7,6 relâmpagos $\text{km}^{-2} \text{ano}^{-1}$ (NACCARATO e PINTO JR, 2009).

Estudos utilizando dados de relâmpagos da rede de detecção RINDAT foram realizados para o estado de São Paulo também. Por exemplo, Naccarato (2006) identificou que a região leste do estado possui uma maior frequência de ocorrência de relâmpagos comparado com a região oeste e que o pico de corrente dos relâmpagos nuvem-solo positivo é mais intenso na região centro-oeste e menos intenso nas regiões nordeste, norte e leste do Vale do Paraíba. Santos (2017) encontrou uma variação sazonal nas regiões de máxima incidência de relâmpagos, onde no verão e outono existe uma concentração maior de relâmpagos na região centro-leste, deslocando-se para a região sudoeste no inverno e a primavera sendo uma estação de transição entre ambas regiões do estado. Além disso, a autora evidenciou que as maiores ocorrências de relâmpagos são concentradas no verão e na primavera, localizando-se na região centro-leste do estado, e a menor ocorrência é no inverno.

A análise da distribuição espacial dos relâmpagos apresentou também grande avanço científico com o advento dos satélites meteorológicos que possuíam a bordo sensores de relâmpagos. Por exemplo, Cristhian et al. (2003) utilizando dados do sensor *Optical Transient Detector* (OTD) identificaram uma distribuição espacial sazonal global de relâmpagos, revelando que a maior parte dos relâmpagos ocorrem nos meses de primavera e verão dos hemisférios. O mesmo padrão foi documentado por Albrecht et al. (2016) ao utilizar dados do *Lightning Imaging Sensor* (LIS). Esses autores documentaram a ocorrência de 8 a 40 relâmpagos $\text{km}^{-2} \text{ano}^{-1}$ para a região sudeste do Brasil. Mais recentemente, em 2016, foi lançado o primeiro sensor de relâmpagos a bordo de um satélite meteorológico geoestacionário. Uma análise inicial do sensor *Global Lightning Mapper* (GLM) que está a bordo do satélite *Geostationary Operational Environmental Satellite 16* (GOES-16) mostrou que 86 % dos relâmpagos detectados pelo sensor ocorreram no continente sul americano durante a estação do verão, com uma média de aproximadamente 6 relâmpagos $\text{km}^{-2} \text{mês}^{-1}$ sobre a região sudeste (RUDLOSKY et al., 2019).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados de relâmpagos utilizados neste estudo são provenientes da rede BrasilDAT e relâmpagos totais provenientes do sensor GLM que está a bordo do satélite GOES-16. Os dados da BrasilDAT pertencem ao período de 2013 a 2018 para o estado de MG e são arquivos no formato *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII), que contém informações em escala diária de ocorrência de descargas de retorno (denominado relâmpagos) como, data, hora, latitude, longitude, tipo de relâmpago (nuvem-solo ou intra-nuvem), polaridade e pico de corrente (kA). Os parâmetros analisados neste estudo foram: i) densidade de relâmpago intra-nuvem (IN), ii) nuvem-solo negativo (-NS), iii) nuvem-solo positivo (+NS) e pico de corrente de relâmpago iv) nuvem-solo negativo (-PC) e v) nuvem-solo positivo (+PC). Os dados originais foram interpolados para uma grade com resolução espacial horizontal de 4 km centrada em MG. Inicialmente cada tipo de relâmpago foi agrupado por ano, por mês e horário. A partir desse agrupamento temporal foram calculados a média da distribuição espacial anual, mensal e do ciclo diurno.

Os dados do sensor GLM pertencem ao ano de 2018 e consistem em arquivos no formato *Network Common Data Form* (NetCDF) que contém dados horários de relâmpagos no intervalo temporal de 5 minutos. Estes dados correspondem a informações de relâmpagos totais, isto é, relâmpagos NS somados com relâmpagos IN. Estes dados foram agrupados para obter o total anual e foram interpolados para a grade com resolução espacial horizontal de 4 km. A partir desses dados realizou-se uma comparação entre a distribuição espacial dos relâmpagos totais de 2018 estimados pelo sensor GLM e pela rede BrasilDAT. Essa comparação é importante pois é uma maneira preliminar de assegurar de que a distribuição de relâmpagos da BrasilDAT é semelhante aos do GLM.

Neste estudo também foi desenvolvido um *ranking* de cidades com as maiores densidades de relâmpagos (definido como *hotspot*). A partir da distribuição média anual de relâmpagos foram extraídos os dez maiores valores dos parâmetros analisados (como densidade de relâmpagos -NS, +NS e IN e -PC e +PC) contendo a latitude e a longitude. Utilizando o *software* Excel, as coordenadas foram organizadas de forma decrescente com base no número de relâmpagos e no valor do pico de corrente. Por meio do *software* Google Earth e utilizando um arquivo *shapefile* com as delimitações de todos os municípios de MG foi averiguado quais coordenadas

pertenciam ao estado. Nos casos da existência de latitudes e longitudes de máxima ocorrência de relâmpagos que se localizavam numa mesma cidade, foi considerado o ponto que continha o maior valor do número de relâmpagos ou pico de corrente.

Para verificar a influência da topografia na incidência de relâmpagos um mapa do relevo do estado de MG foi gerado a partir dos dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), que tem resolução de grade de 30 metros.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão discutidos os resultados obtidos no estudo. A identificação dos locais com as maiores ocorrências de relâmpagos e maiores valores de pico de corrente, serão realizadas seguindo como referência o mapa de Regiões de Planejamento que é adotado pelo Governo de MG atualmente.

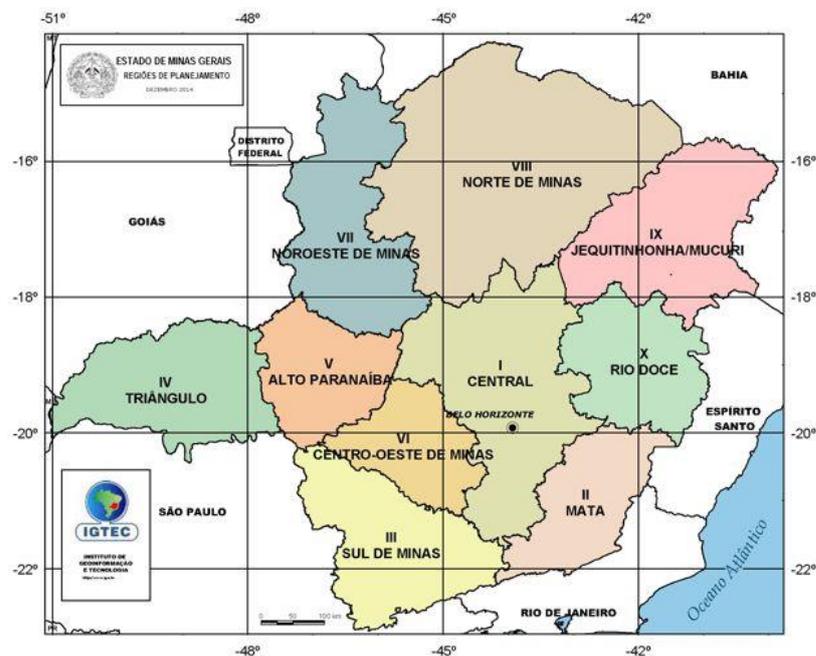


Figura 2 – Regiões de Planejamento adotada atualmente pelo Governo do estado de Minas Gerais. Fonte: Instituto de Geoinformação e Tecnologia (IGTEC)

4.1 Caracterização anual média dos relâmpagos

A Figura 2 mostra a média anual da densidade de relâmpagos intra-nuvem (IN), nuvem-solo negativo (-NS), nuvem-solo positivo (+NS) e a média anual do pico de

corrente de relâmpagos nuvem-solo negativos (-PC) e positivos (+PC) para o período de 2013 a 2018. Para os relâmpagos IN (Figura 2a) verifica-se uma maior densidade de relâmpagos na região da zona da mata e parte da região central do Estado, com mais de 16 relâmpagos por ano em uma área de 16 km². Alguns locais da região do Alto Paranaíba, do triângulo mineiro e da região sul, também apresentaram a mesma incidência de relâmpagos citada anteriormente. As regiões norte e do Jequitinhonha obtiveram os menores casos de ocorrência de relâmpagos (cerca de 3 relâmpagos ano⁻¹ km⁻²).

Os relâmpagos -NS (Figura 2b) mostram um padrão semelhante à dos relâmpagos IN, porém com menor intensidade. Regiões próxima a cidade de Belo Horizonte e próximo à fronteira dos estados do Rio de Janeiro e de São Paulo registram uma média de mais de 10 relâmpagos ano⁻¹ km⁻² e entre essas regiões a média de ocorrência de relâmpagos encontrada foi de 5 a 8 relâmpagos ano⁻¹ km⁻². Para parte da região do triângulo mineiro e do Alto Paranaíba o número de relâmpagos encontrado foi de 5 relâmpagos ano⁻¹ km⁻², caracterizando uma região secundária de ocorrência de relâmpagos -NS. Estas regiões de maior densidade de relâmpagos no estado são as mesmas regiões encontradas por Pinto Jr et al. (1999) e por Pinto Jr, Pinto e Naccarato (2007), porém com valor um pouco mais elevado em relação a esses estudos. Esta diferença está associada ao fato de que os sensores da BrasilDAT são mais modernos, garantindo uma melhor detecção dos relâmpagos. Para as regiões norte do estado de MG e do Jequitinhonha, o total de incidência de relâmpagos não ultrapassa 2 relâmpagos ano⁻¹ km⁻².

A Figura 2(c) mostra a incidência de relâmpagos +NS. Percebe-se uma grande concentração de ocorrência desse tipo de relâmpago na região do triângulo mineiro, com uma média de 0,6 relâmpagos ano⁻¹ km⁻². Os relâmpagos +NS são pouco frequentes e por isso o número de incidência é baixo. Regiões em branco no mapa indicam que a incidência é bastante baixa, sendo inferior a 0,1 relâmpagos ano⁻¹ km⁻².

A média anual do pico de corrente de relâmpagos -NS (Figura 2d) mostra que as regiões do triângulo, parte da região central, norte e do Jequitinhonha, apresentaram os maiores valores de pico de corrente, com valores médios maiores e iguais a 30 kA. Este elevado valor deve-se ao fato dessas regiões registrarem os menores casos de incidência de relâmpagos -NS. Os menores valores do pico de corrente podem ser encontrados na região centro-sul do Estado, com um valor médio

de 13 kA nas regiões central e na zona da mata e 5 kA na região sul. Este mesmo padrão de intensidade do -PC é semelhante ao que foi encontrado por Pinto Jr et al. (1999).

A Figura 2(e) mostra o pico de corrente médio dos relâmpagos +NS. O triângulo mineiro, o Alto Paranaíba, e partes da região sul e noroeste obtiveram uma média do valor do pico de corrente próximo de 28 kA. O padrão de maior intensidade do +PC para a região noroeste e menor para a região central encontrado no presente estudo, também foi documentado por Pinto Jr et al. (1999). A região de maior incidência de relâmpagos -NS também apresentou valor do pico de corrente de aproximadamente 28 kA. As regiões do Jequitinhonha e do Rio Doce registraram um pico de corrente médio em torno de 5 kA.

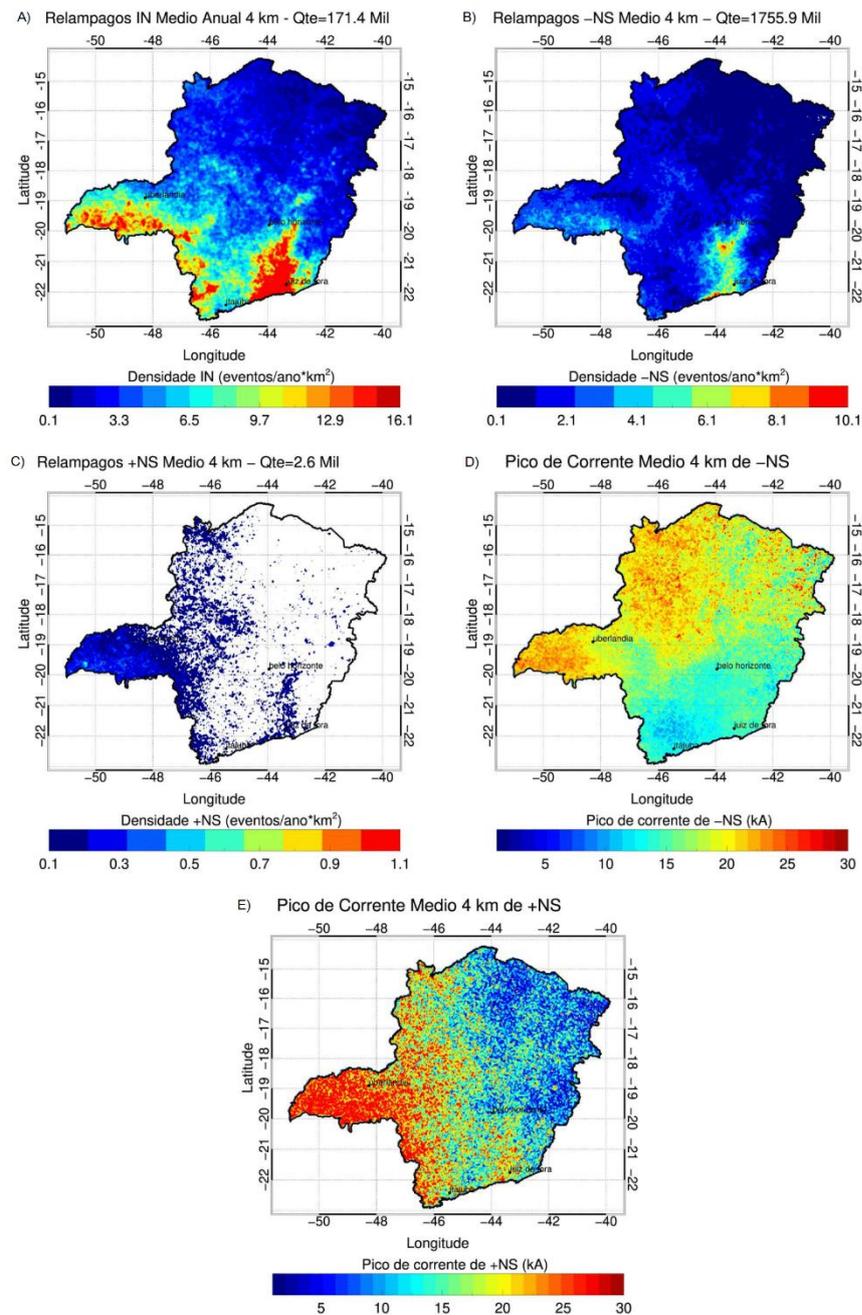


Figura 3 – Média anual de relâmpagos: densidade de relâmpagos (relâmpagos por ano por km^2) a) Intra-nuvem, b) Nuvem-solo negativo e c) Nuvem-solo positivo e pico de corrente (kA) para relâmpagos nuvem-solo d) negativo e e) positivo utilizando dados da BrasilDAT de 2013 a 2018. Fonte: Do Autor.

A Figura 3 mostra o mapa de relevo do estado de MG. A região sul do Estado, próximo à fronteira entre os estados de São Paulo e Rio de Janeiro, possui uma cadeia montanhosa com altitude média de aproximadamente 2.500 m de altura, que se estende por parte da Zona da Mata chegando até a região central do estado de MG, com sua altitude variando entre 1.500 e 2.000 m de altura. O triângulo mineiro possui um relevo que tem entre 600 e 1.200 m de altura. O Alto Paranaíba, assim como a

região central e sul do Estado, é caracterizado por uma cadeia montanhosa em que sua altitude varia entre 1.300 e 2.000 m de altura.

Esses resultados sugerem que regiões com maiores elevações (1200 a 2000 m de altura), correspondem via de regra com as regiões de maior densidade de relâmpagos intra-nuvem e nuvem-solo negativo (Figuras 2a e 2b). A influência da orografia na incidência de relâmpagos nuvem-solo negativos também foi encontrada por Bourscheidt et al. (2009), revelando que quanto maior for o relevo, maior é a ocorrência deste tipo de relâmpago. O relevo também é um fator que influencia na formação de nuvens isso faz com que nesses locais ocorram diversas tempestades, e combinados com sistemas sinóticos atuantes no Estado, como por exemplo, Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), frentes frias, Linhas de Instabilidade (LI), e sistemas locais, como a convecção, contribui para um elevado número de relâmpagos.

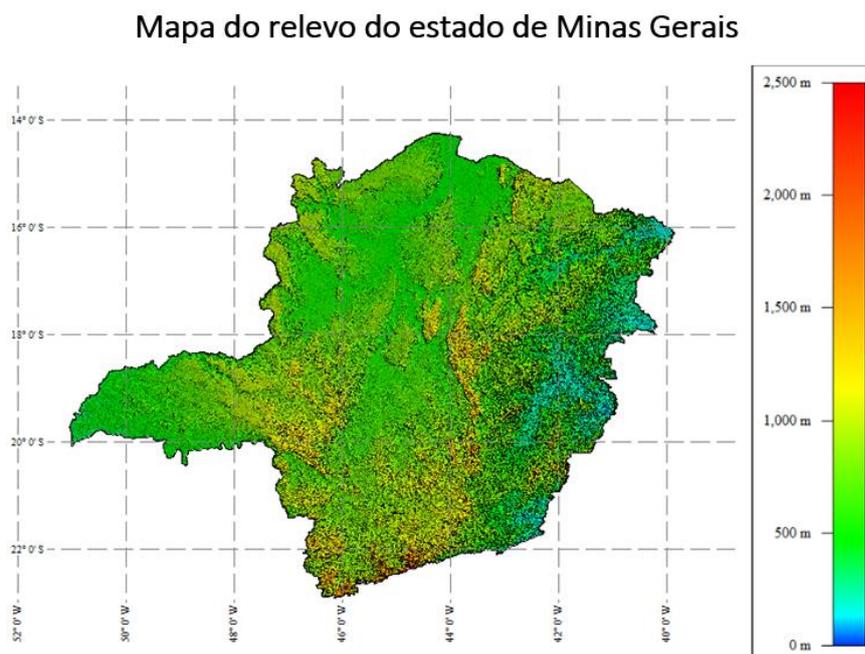


Figura 4 – Mapa de elevação (em metros) do estado de Minas Gerais fornecido pelo SRTM com resolução espacial de 30 metros. Fonte: Do Autor.

Em contrapartida, o relevo parece não possuir uma relação direta com os relâmpagos de polaridade positiva (+NS), pois eles se formam na região mais estratiforme da nuvem Cumulonimbus. A ocorrência dos relâmpagos positivos está mais relacionada com a altura das cargas positivas no interior da nuvem que é diretamente influenciado pela latitude (quanto maior a latitude, maior a probabilidade

de acontecer um relâmpago +NS), com o cisalhamento do vento no topo da tempestade (quanto maior o cisalhamento, mais fácil de ocorrer o relâmpago nuvem-solo positivo) e com a eliminação dos centros de cargas negativas das nuvens, fazendo com que permaneça apenas os centros de cargas positivas, aumentando a possibilidade de ocorrência deste tipo de relâmpago (NACCARATO, 2001).

4.1.1 Relâmpagos BrasilDAT e GOES-16

A Figuras 4a e 4b mostram uma comparação dos relâmpagos totais (intra-nuvem mais nuvem-solo) detectados pelos sensores em solo da BrasilDAT e GLM para 2018, respectivamente. A intercomparação mostra uma consistência qualitativa espacial entre ambos os dados. Porém, ao analisar em termos de valores, observa-se uma notória diferença no total de relâmpagos detectados pelos sensores. A BrasilDAT detectou 250,8 mil relâmpagos, enquanto que, o GLM detectou apenas 76,8 mil. Uma adicional diferença encontra-se no total de relâmpagos nas regiões do Jequitinhonha, norte e norte da região central do Estado. Em grande parte dessas regiões o GLM registrou aproximadamente $13 \text{ relâmpagos ano}^{-1} \text{ km}^{-2}$, com algumas localidades registrando até $24 \text{ relâmpagos ano}^{-1} \text{ km}^{-2}$, enquanto que os sensores da BrasilDAT registraram, no máximo, aproximadamente $7 \text{ relâmpagos ano}^{-1} \text{ km}^{-2}$, com demais localidades registrando em média $12 \text{ relâmpagos ano}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Essa discrepância de relâmpagos pode ser devido ao fato de que a maioria dos sensores em solo estão concentrados nas regiões sudeste, centro-oeste e sul do país, favorecendo para uma boa eficiência de detecção de relâmpagos em Minas Gerais nas regiões sul, central e do Rio Doce e desfavorecendo a detecção na região norte e no Jequitinhonha. Adicionalmente, essas diferenças podem estar relacionadas a existência de fatores externos como a posição dos sensores, interferência eletromagnética, a orografia e a condutividade do solo que podem interferir na detecção dos relâmpagos (NACCARATO et al. 2014). Essa comparação preliminar deveria ser aprofundada para maior detalhamento e torna-se importante salientar que essas diferenças devem-se também ao fato que são metodologias diferentes e que usam técnicas diferentes para a detecção dos relâmpagos.

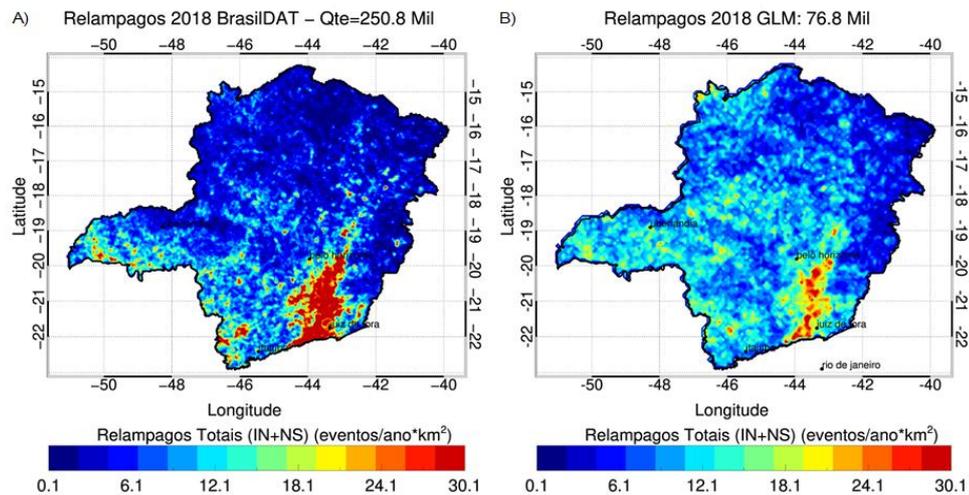


Figura 5 – Média anual de relâmpagos totais (IN+NS) para 2018 estimados pela: a) BrasilDAT e b) GLM a bordo do GOES-16. Fonte: Do Autor.

4.2 Caracterização Interanual dos relâmpagos

A Tabela 1 mostra a quantidade de cada tipo de relâmpago por ano e a mediana dos valores do pico de corrente. A Figura 5 mostra a média anual de relâmpagos intra-nuvem (linha preta), nuvem-solo negativo (linha azul) e nuvem-solo positivo (linha vermelha) e do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativos (linha laranja contínua) e positivos (linha laranja tracejada).

Analisando em conjunto a Figura 5 e a Tabela 1 observa-se que para os relâmpagos do tipo IN o ano de 2013 teve o menor número de relâmpagos, com cerca de 91.015. Nos anos seguintes, o total de relâmpagos foi aumentando, registrando 101.396 casos em 2014 e 209.847 casos para o ano de 2015, atingindo o maior valor do período em estudo no ano de 2016 (244.462 relâmpagos). Os anos de 2017 e 2018 são caracterizados por uma diminuição no total de ocorrência deste tipo de relâmpago, registrando cerca de 201.252 e 180.409 relâmpagos respectivamente. De 2013 a 2018, a média de relâmpagos intra-nuvem no estado de Minas Gerais, foi de 171.396 relâmpagos. Os relâmpagos nuvem-solo negativos no ano de 2013 tiveram um total de 31.816 casos. Em 2014 foi encontrado o menor valor desse tipo de relâmpago, registrando apenas 19.329 relâmpagos. Os anos de 2015 e 2016 caracterizaram um aumento no número de relâmpagos, tendo 45.487 e 65.417 ocorrências respectivamente. No ano de 2017 o total de relâmpagos teve um leve decaimento acumulando 62.577 casos. O ano de 2018 foi ano de maior incidência de relâmpagos

-NS, com um total de 67.722 relâmpagos. No período de 6 anos, a média de relâmpagos no Estado foi de 48.725 casos. Em relação aos relâmpagos nuvem-solo positivos o ano de 2013 foi o que registrou o maior número de casos, com 5.202 relâmpagos, enquanto em 2014 foi o ano de menor número de ocorrência com apenas 1.388 relâmpagos. Os anos seguintes são caracterizados por um aumento gradativo a cada ano, ocorrendo 1.893 relâmpagos em 2015, 1.919 relâmpagos em 2016, 2.564 relâmpagos em 2017 e 2.618 relâmpagos em 2018. A média de incidência de relâmpagos +NS em Minas Gerais é de 2.597 casos.

Ao analisarmos o pico de corrente percebe-se que o ano de maior ou menor intensidade, tanto para os relâmpagos -NS quanto para os relâmpagos +NS, não correspondem com os anos de menor ou maior ocorrência de cada tipo de relâmpago. O -PC foi mais intenso no ano de 2013 e menos intenso no ano de 2016, enquanto o menor número de relâmpagos -NS foi no ano de 2014 e maior no ano de 2018. O +PC foi mais intenso no ano de 2017 e menos intenso no ano de 2013, enquanto o menor número de relâmpagos +NS foi no ano de 2014 e maior no ano de 2013. Apesar do ano de 2013 ser o ano de menor intensidade do +PC e maior incidência de relâmpagos +NS, não há dados suficientes para afirmar que o total de relâmpagos é inversamente proporcional ao pico de corrente, caracterizando-se um caso isolado. Adicionalmente, observa-se que na média os relâmpagos +NS são mais intensos que os -NS (30,4 kA versus 19,4 kA), o que concorda com a literatura.

Tabela 1 – Total de relâmpagos intra-nuvem, nuvem-solo negativo e positivos médios (eventos*ano⁻¹*km⁻²) e a mediana do pico de corrente (kA) para relâmpagos nuvem-solo negativo e positivo para o estado de MG para os anos de 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 e 2018.

Quantidade de relâmpagos e pico de corrente (kA)					
ANO	IN	-NS	+NS	-PC	+PC
2013	91.015	31.816	5.202	23,3	20,6
2014	101.396	19.329	1.388	21,8	32,3
2015	209.847	45.487	1.893	16,9	31
2016	244.462	65.417	1.919	15,9	31,9
2017	201.252	62.577	2.564	17,9	33,4
2018	180.409	67.722	2.618	20,3	33,3
Média	171397	48725	2597	19,4	30,4

Fonte: Do Autor.

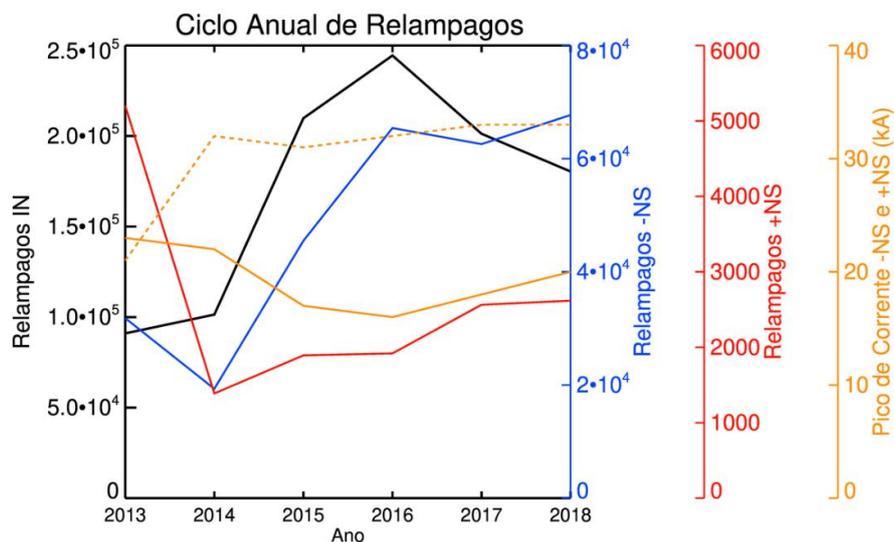


Figura 6 – Ciclo médio anual entre 2013 e 2018 de relâmpagos intra-nuvem (linha preta), nuvem-solo negativo (linha azul) e nuvem-solo positivo (linha vermelha) e do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativos (linha laranja contínua) e positivos (linha laranja tracejada). Fonte: Do Autor.

A Figura 6 mostra a variação anual entre 2013 e 2018 para os relâmpagos IN e observa-se que o ano de 2013 teve a menor ocorrência de relâmpagos IN, cerca de 91 mil, aumentando anualmente até 2016, ano em que teve cerca de 201 mil

relâmpagos (com valores máximos de aproximadamente $16 \text{ relâmpagos ano}^{-1} \text{ km}^{-2}$ sofrendo uma leve queda até o ano de 2018. Para todos os anos, percebe-se que a região de maior ocorrência de relâmpago é a zona da mata, seguida pelo triângulo mineiro e Alto Paranaíba, correspondendo com as mesmas regiões encontradas na Figura 2(a), exceto pelos anos de 2016 e 2017, no qual a região sul teve valores mais elevados em relação à média de todo o período.

O baixo número de relâmpagos no ano de 2014 é resultante de um sistema anômalo de alta pressão que situou próximo ao continente entre janeiro e março impedindo a formação de tempestades convectivas e a ocorrência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (COELHO et al., 2016). Já o elevado número de relâmpagos no ano de 2016 pode estar associado a uma anomalia positiva de precipitação no mês de janeiro provocado pela ocorrência de um forte El Niño (OSCAR JÚNIOR e NUNES, 2017).

A variação anual de relâmpagos –NS (Figura 7) revela que o total de relâmpagos por ano teve uma grande variação durante os anos em estudo. Nota-se que a menor ocorrência de relâmpagos foi em 2014, com aproximadamente 31 mil relâmpagos, e a maior foi no ano de 2018, com aproximadamente 67 mil relâmpagos. No geral, regiões de maior densidade deste tipo de relâmpago correspondem com as mesmas identificadas na Figura 2b, mesmo com os anos de 2013 e 2014 apresentarem um número de ocorrência menor em relação aos outros anos.

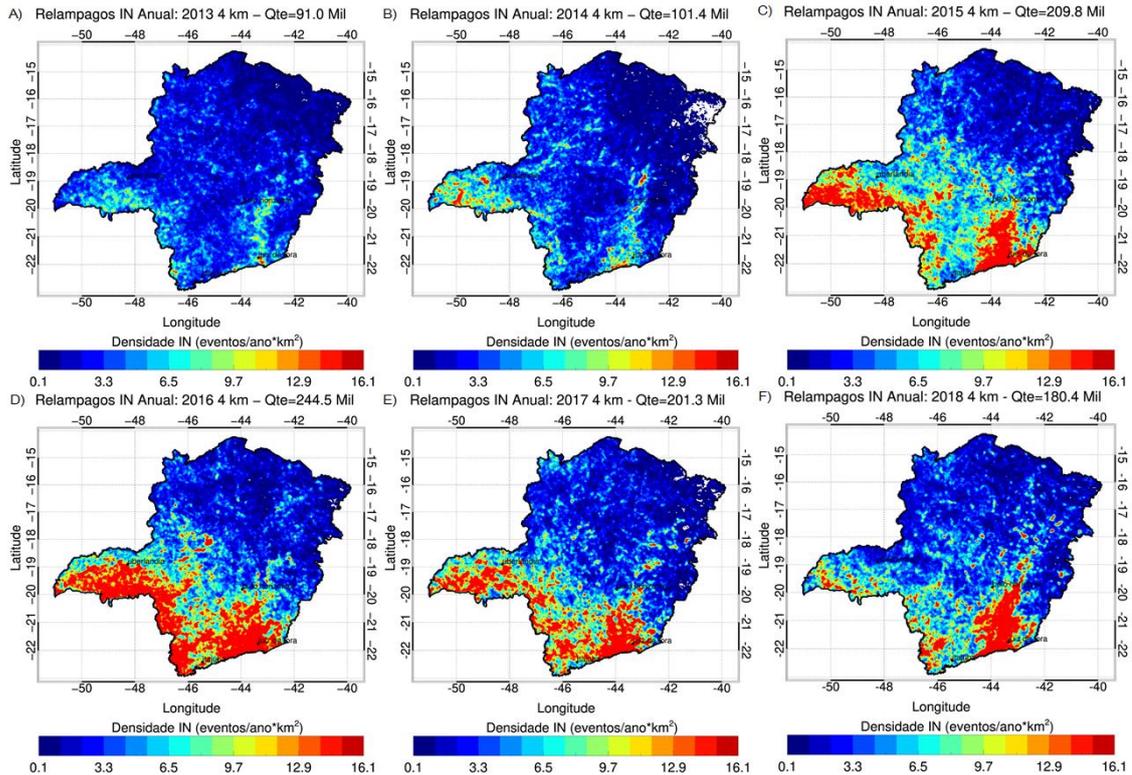


Figura 7 – Distribuição anual da densidade de relâmpagos (relâmpagos ano⁻¹ km⁻²) intra-nuvem para os anos de a) 2013, b) 2014, c) 2015, d) 2016, e) 2017 e f) 2018. Fonte: Do Autor.

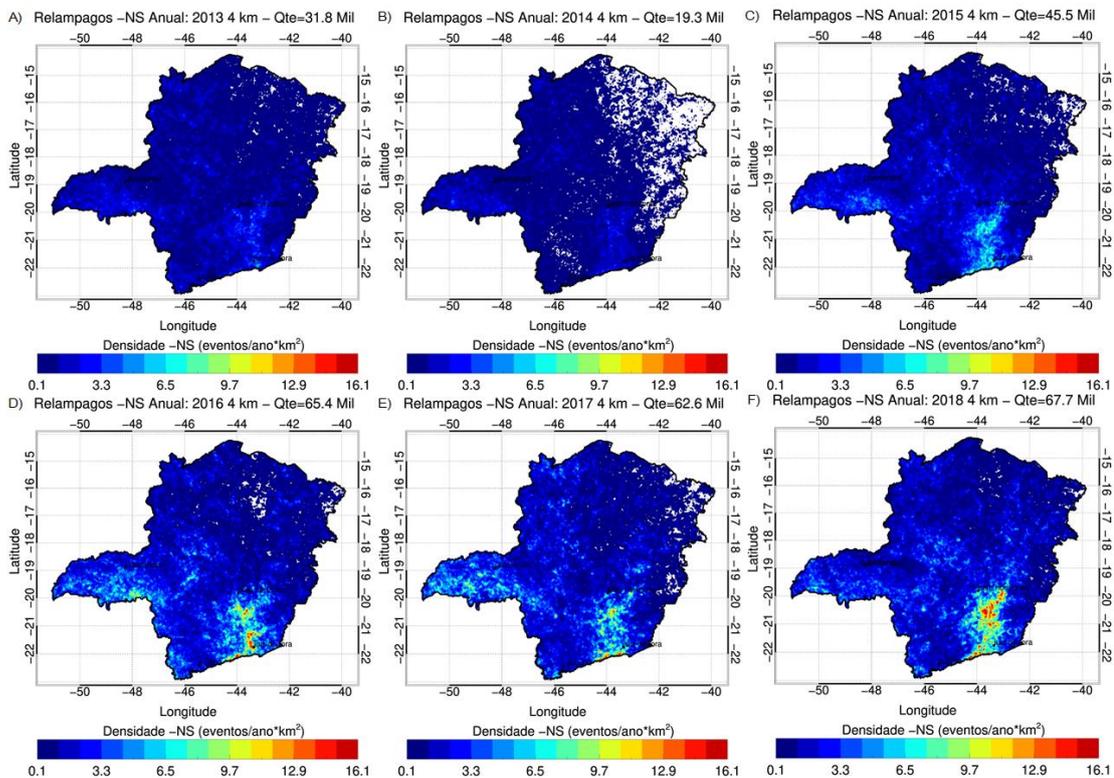


Figura 8 – Distribuição anual da densidade de relâmpagos (relâmpagos ano⁻¹ km⁻²) nuvem-solo negativo para os anos de a) 2013, b) 2014, c) 2015, d) 2016, e) 2017 e f) 2018. Fonte: Do Autor.

A Figura 8 representa a variação anual dos relâmpagos +NS. O ano de 2013 foi o que teve a maior incidência desse tipo de relâmpago (cerca de 5 mil) com maior concentração na região do triângulo mineiro, assim como os demais anos. Neste mesmo ano, a quantidade de +NS ficou mais bem distribuído se comparado com a média (Figura 2c) e com os outros anos. O ano de 2018 foi o que mais se aproximou do padrão obtido pela média de relâmpagos +NS.

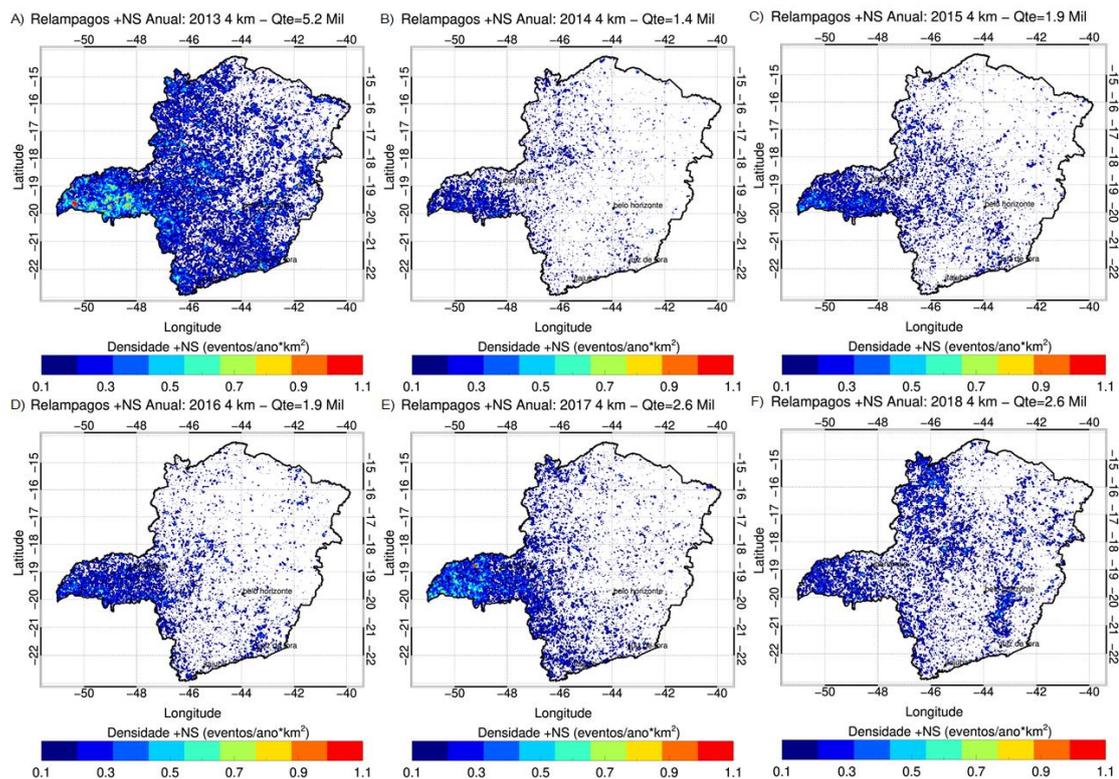


Figura 9 – Distribuição anual da densidade de relâmpagos (relâmpagos ano⁻¹ km⁻²) nuvem solo positivo para os anos de a) 2013, b) 2014, c) 2015, d) 2016, e) 2017 e f) 2018. Fonte: Do Autor.

A Figura 9 mostra os valores de pico de corrente para os relâmpagos –NS. Ao analisar essa figura observa-se que em todos os anos, as regiões onde os relâmpagos são mais intensos correspondem com as mesmas identificadas na Figura 2d. O ano que mais se aproxima do padrão médio do pico de corrente de –NS é o de 2017. O ano de 2013 foi o ano em que os relâmpagos foram os mais intensos em todo o estado, se comparado com a média anual, podendo ser associado a baixa ocorrência de relâmpagos –NS. Para o ano de 2016, os valores do pico de corrente ficaram abaixo da média nas regiões onde eles tendem a ser mais intensos, como identificado na Figura 2(d). Para todos os anos a região sul do Estado teve os menores valores do pico de corrente.

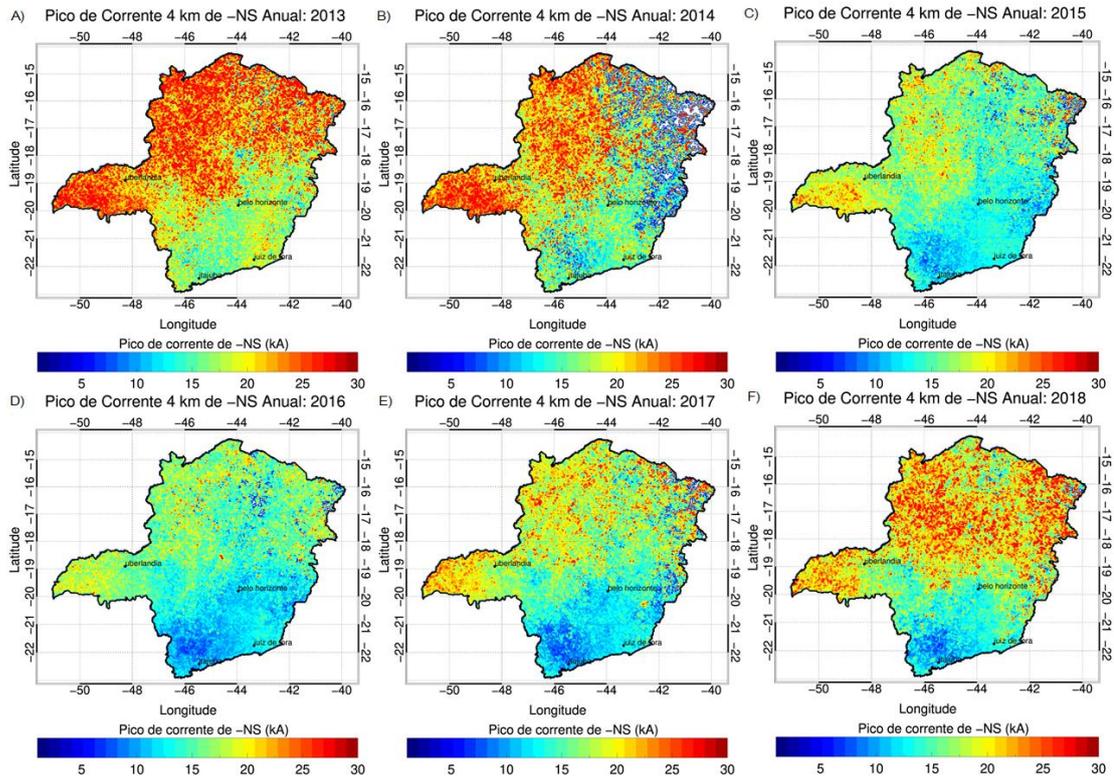


Figura 10 – Distribuição anual da densidade de pico de corrente (kA) de relâmpagos nuvem-solo negativo para os anos de a) 2013, b) 2014, c) 2015, d) 2016, e) 2017 e f) 2018. Fonte: Do Autor.

Analisando a Figura 10 percebe-se que em nenhum dos anos, os valores do pico de corrente dos relâmpagos +NS não apresentaram o padrão encontrado na Figura 2e. O ano de 2013 é o que mais se aproxima da média anual, exceto pela região do triângulo mineiro, onde o valor do pico de corrente, em sua maioria, ficou abaixo do valor médio encontrado. Para os demais anos, o pico de corrente apresentou valores em torno de 26 kA ou valores próximos de 10 kA, chegando até a não registrar valor nenhum em regiões como a norte e o Jequitinhonha.

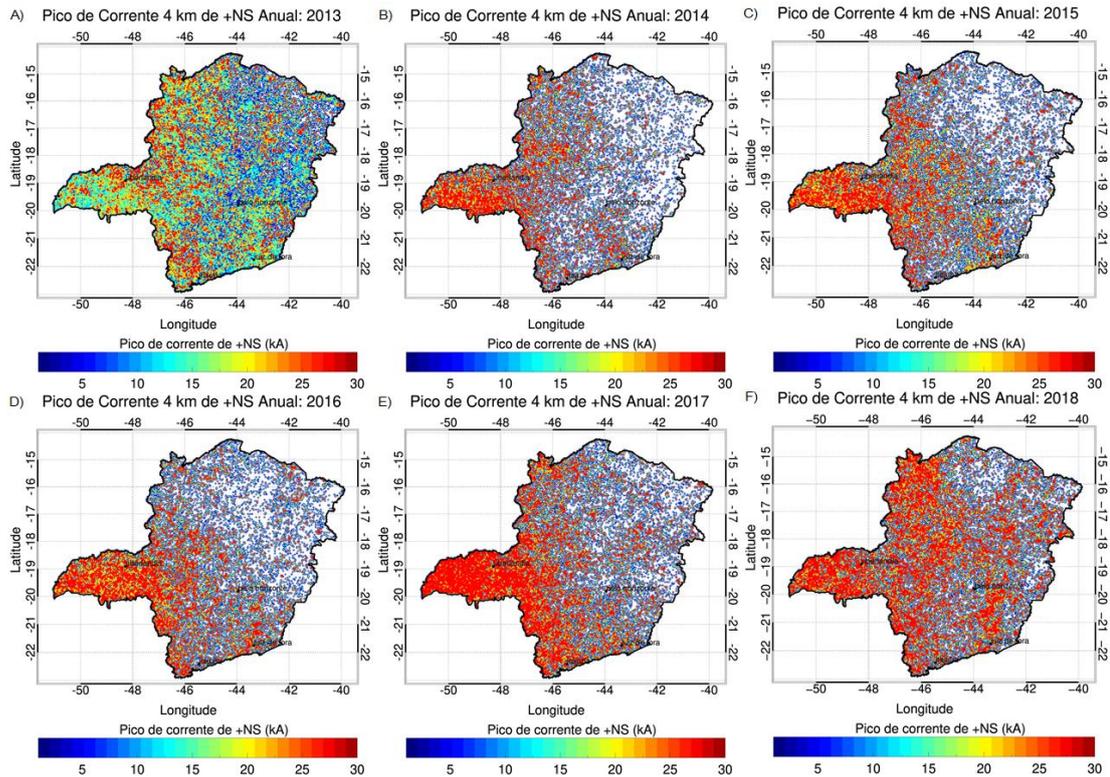


Figura 11 – Distribuição anual da densidade de pico de corrente (kA) de relâmpagos nuvem-solo positivo para os anos de a) 2013, b) 2014, c) 2015, d) 2016, e) 2017 e f) 2018. Fonte: Do Autor.

4.3 Caracterização Sazonal dos Relâmpagos

A Figura 11 mostra a variação sazonal de relâmpagos intra-nuvem. Observa-se que a estação do verão (Figura 11a) é a que possui maior incidência desse tipo de relâmpago, sendo que em partes das regiões do triângulo mineiro, sul, Alto Paranaíba e central e a região da zona da mata ocorre em média 10 relâmpagos estação⁻¹ km⁻², apresentando um padrão de regiões de maior incidência semelhante ao da Figura 2a. No outono (Figura 11b), a média de ocorrência de relâmpagos diminui em relação ao verão, com um valor de aproximadamente 5 relâmpagos estação⁻¹ km⁻² para as regiões do triângulo, Alto Paranaíba, central e zona da mata, exceto para uma pequena região situada na fronteira entre os estados de São Paulo e Rio de Janeiro que registrou uma média de 10 relâmpagos estação⁻¹ km⁻². As outras regiões do estado obtiveram uma média de 1 relâmpago estação⁻¹ km⁻². Para o inverno (Figura 11c), apenas as regiões do triângulo mineiro, sul, zona da mata e pequenos locais das regiões do Rio Doce e Jequitinhonha registraram incidência de relâmpagos (cerca de 1 relâmpago estação⁻¹ km⁻²). Por fim, a primavera (Figura 11d) apresentou um padrão de regiões de maior ocorrência de relâmpagos parecido com a estação do outono.

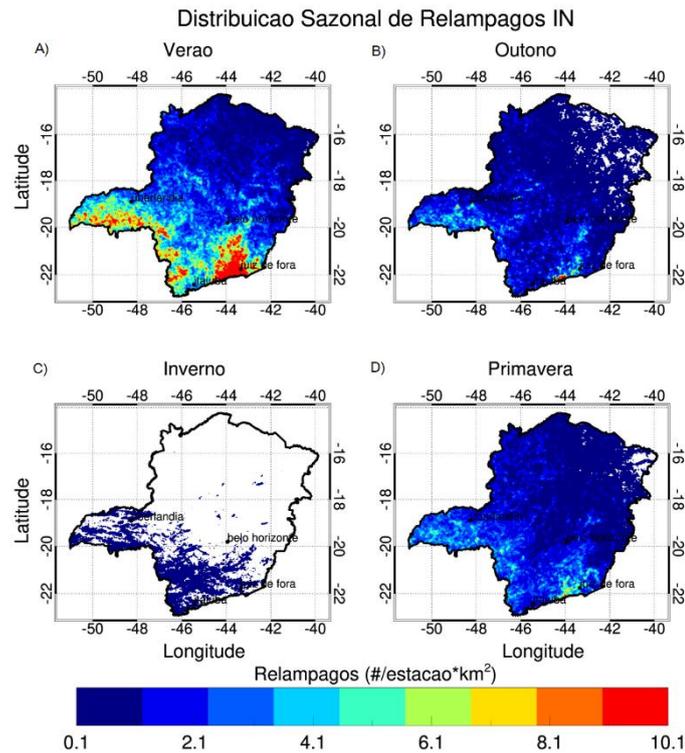


Figura 12 – Distribuição sazonal de relâmpagos intra-nuvem (relâmpagos estação⁻¹ km⁻²): a) verão, b) outono, c) inverno e d) primavera. Fonte: Do Autor.

A Figura 12 mostra a variação sazonal dos relâmpagos nuvem-solo negativos. Os resultados mostram que no verão (Figura 12a), as regiões de maior ocorrência desse tipo de relâmpago são na zona da mata e em partes das regiões central e do triângulo mineiro com densidade de relâmpagos variando entre 2 relâmpagos estação⁻¹ km⁻² e 5 relâmpagos estação⁻¹ km⁻². Estas regiões de maior incidência de relâmpagos –NS também foi encontrado na Figura 2b. Para o inverno (Figura 12c), o número de casos desse tipo de relâmpago não ultrapassou 1 relâmpago estação⁻¹ km⁻², sendo registrado apenas nas regiões sul, zona da mata, central e no triângulo mineiro. A distribuição de relâmpagos para as estações da primavera e do outono (Figuras 12d e c, respectivamente) é bastante parecido, com as regiões da zona da mata, triângulo e parte da região central com média de aproximadamente 2 relâmpagos estação⁻¹ km⁻² e o restante das regiões do estado com média de 1 relâmpagos estação⁻¹ km⁻². O que diferencia essas duas estações é que na primavera, o número de relâmpagos nas regiões do Rio Doce, Do Jequitinhonha e no norte do estado é um pouco maior do que no outono.

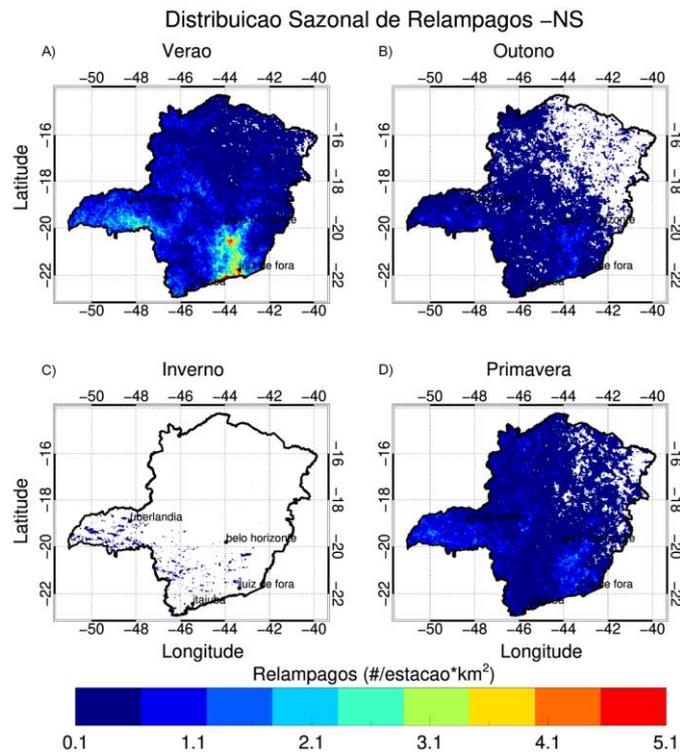


Figura 13 – Distribuição sazonal de relâmpagos nuvem-solo negativo (relâmpagos estação⁻¹ km⁻²): a) verão, b) outono, c) inverno e d) primavera. Fonte: Do Autor.

A Figura 13 mostra a variação sazonal dos relâmpagos nuvem-solo positivos. Nota-se que em todas as estações os relâmpagos estão concentrados mais na região do triângulo mineiro, sendo semelhante à Figura 2, exceto no inverno (Figura 13c), no qual a densidade desse tipo de relâmpagos foi inferior a 0,1 relâmpagos estação⁻¹ km⁻², impossibilitando de identificar as regiões de maior incidência. Para as outras estações, o número de ocorrência desse tipo de relâmpago não foi superior a 0,4 relâmpagos estação⁻¹ km⁻².

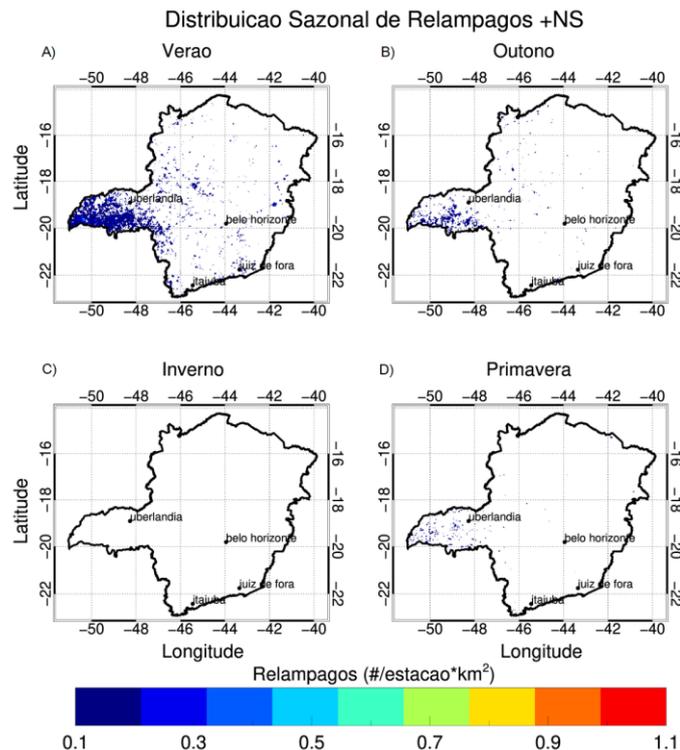


Figura 14 – Distribuição sazonal de relâmpagos nuvem-solo positivo (relâmpagos estação⁻¹ km⁻²): a) verão, b) outono, c) inverno e d) primavera. Fonte: Do Autor.

A Figura 14 mostra a variação sazonal do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativos. No verão (Figura 14a), a maioria das regiões do estado registraram uma média de pico de corrente de 45 kA. No outono (Figura 14b), houve uma pequena redução, exceto no triângulo e em parte da região noroeste, que registrou picos de corrente de mesmo valor em relação ao verão. Na primavera (Figura 14d) a distribuição de relâmpagos é bastante parecida com a do outono, com um leve aumento da área onde o pico de corrente corresponde a 45 kA. No inverno (Figura 14c) os relâmpagos ficam menos intensos, com valor de pico de corrente próximos de 5 kA e concentram no triângulo mineiro, região sul e zona da mata e alguns locais do Alto Paranaíba e região central. A menor intensidade dos -NS no inverno deve-se que essa estação há um predomínio de nuvens de pouca profundidade, que acarreta na existência de pouca carga elétrica dentro dessas nuvens e como consequência, relâmpagos de pouca intensidade.

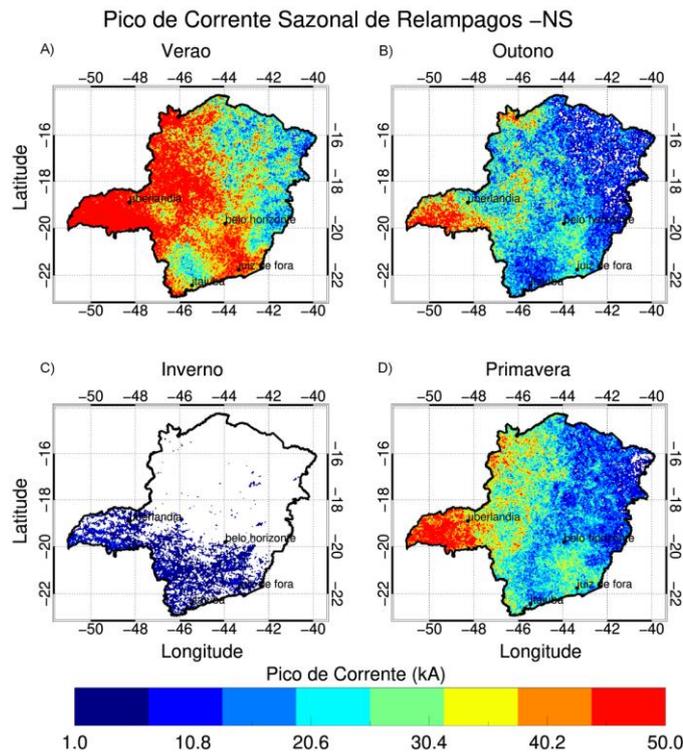


Figura 15 – Distribuição sazonal do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativo (kA): a) verão, b) outono, c) inverno e d) primavera. Fonte: Do Autor.

A variação sazonal do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo positivo é mostrado na Figura 15. No verão (Figura 15a) o pico de corrente é mais intenso no triângulo mineiro, parte do Alto Paranaíba e zona da mata, variando entre 30 e 50 kA. Nas demais regiões do estado, o pico de corrente médio é de aproximadamente de 15 kA. No outono (Figura 15b) a intensidade dos relâmpagos diminui, atingindo valores entre 15 a 30 kA no triângulo mineiro e 10 kA nas demais regiões. Em alguns locais da região norte, do Jequitinhonha, do Rio Doce e do sul, o pico de corrente médio foi inferior a 1 kA. Para a estação do inverno (Figura 15c), o +PC só é notado em pequenos locais do triângulo mineiro, na região sul, zona da mata e na região central do estado com valor médio de 1 kA. No restante do estado, o pico de corrente para essa estação foi inferior a 1 kA. Na primavera (Figura 15d) o +PC começa a ficar mais intenso em todo o estado, com valor médio variando entre 15 e 50 kA no triângulo mineiro, e 10 kA nas demais regiões, concentrando mais no Alto Paranaíba e no leste das regiões sul e noroeste de Minas Gerais. Parte das regiões norte, do Jequitinhonha e do Rio Doce continuam registrando um pico de corrente inferior a 1 kA.

A variação sazonal dos relâmpagos IN, –NS, +NS e do –PC e +PC mostraram que a incidência e intensidade é maior no verão, pois essa estação no Estado de MG é caracterizada pela alta ocorrência de tempestades convectivas e a eventos sinóticos

como Linha de Instabilidade e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). O inverno possui menos relâmpagos pois, é caracterizado por ser um período do ano mais seco, com baixo volume de precipitação, e a maioria das ocorrências de relâmpagos é provocada pela passagem de frentes frias. As estações do outono/primavera evidenciam uma diminuição/aumento dos relâmpagos e do pico de corrente. A distribuição espacial de cada tipo de relâmpago não varia de acordo com a estação, no qual as regiões de maiores incidências são semelhantes a aquelas identificadas na média anual (Figura 2), diferente da variação sazonal dos locais de máxima ocorrência encontrado para o estado de São Paulo (SANTOS, 2017).

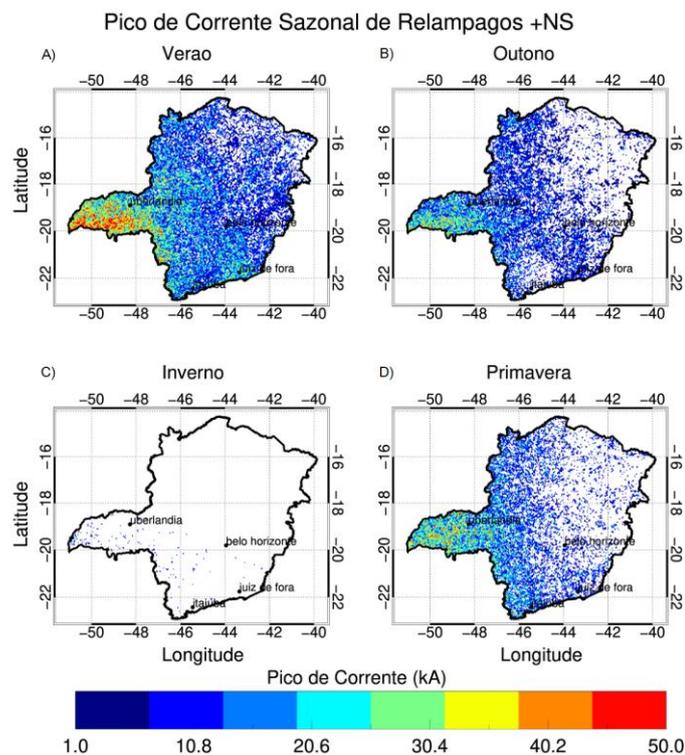


Figura 16 – Distribuição sazonal do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo positivo (kA): a) verão, b) outono, c) inverno e d) primavera. Fonte: Do Autor.

4.4 Caracterização mensal dos relâmpagos

A Figura 16 apresenta o ciclo médio mensal dos relâmpagos intra-nuvem (linha preta), nuvem-solo negativo (linha azul) e nuvem-solo positivo (linha vermelha) e do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativos (linha laranja contínua) e positivos (linha laranja tracejada). A Tabela 2 mostra o total médio mensal dos relâmpagos intra-nuvem nuvem-solo negativo e nuvem-solo positivo e do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativos e positivos.

Analisando em conjunto a Figura 16 com a Tabela 2 é possível perceber que existe uma variação mensal na incidência de relâmpagos. Os primeiros sete meses são caracterizados por uma diminuição no número de relâmpagos. O mês de janeiro possui em média 30.968 relâmpagos do tipo IN, 7.807 relâmpagos do tipo –NS e 477 relâmpagos do tipo +NS. No mês de fevereiro a média de relâmpagos intra-nuvem, nuvem-solo negativo e nuvem solo positivo foi de 26.608, 7.011 e 444 casos respectivamente. Em março, o número de relâmpagos IN diminuiu, tendo em média 26.150 ocorrências. Porém para os relâmpagos –NS e +NS houve um leve aumento com valor médio de 7.664 e 475 relâmpagos respectivamente. No mês de abril o número de relâmpagos diminuiu consideravelmente com valor médio de 7.135 relâmpagos intra-nuvem, 1.727 relâmpagos nuvem-solo negativo e 188 relâmpagos nuvem-solo positivo. Os meses de maio e junho evidenciam a contínua diminuição no total de relâmpagos até o mês de julho, que registrou os menores valores de ocorrência de relâmpagos IN (115 casos), –NS (19 casos) e +NS (2 casos).

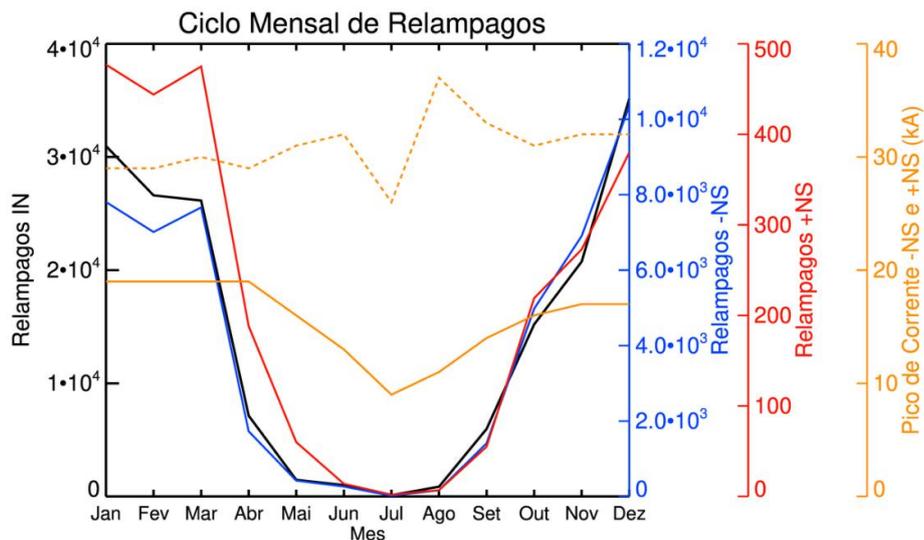


Figura 17 – Ciclo mensal médio de relâmpagos intra-nuvem (linha preta), nuvem-solo negativo (linha azul) e nuvem-solo positivo (linha vermelha) e do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativos (linha laranja contínua) e positivos (linha laranja tracejada). Fonte: Do Autor.

Tabela 2 – Total médio mensal de relâmpagos intra-nuvem, nuvem-solo negativo e nuvem-solo positivo e do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo positivo e negativo.

MÉDIA MENSAL DE RELÂMPAGOS E PICO DE CORRENTE												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
IN	30968	26608	26150	7135	1469	1006	115	864	5966	15206	20757	35150
-NS	7807	7011	7664	1727	421	264	19	166	1410	4976	6908	10348
+NS	477	444	475	188	60	14	2	7	55	219	273	380
-PC	18,7	18,8	19,2	19,0	16,3	12,8	9,5	10,9	14,0	15,9	16,8	17,3
+PC	29,1	28,9	29,6	29,0	31,4	31,5	25,9	37,2	32,9	30,9	32,4	31,5

Fonte: Do Autor.

Os cinco meses restantes marcam um aumento na ocorrência de relâmpagos. No mês de agosto ocorre em média 864 relâmpagos intra-nuvem, 166 relâmpagos nuvem-solo negativo e 7 relâmpagos nuvem-solo positivo. O mês de setembro revela um salto na incidência de relâmpagos IN (5.966 casos) e -NS (1.410 casos). Para os relâmpagos +NS esse aumento não é tão considerável pois o valor médio encontrado de ocorrência desse tipo de relâmpagos é de cerca de 55 casos. Em outubro a ocorrência de relâmpagos intra-nuvem/nuvem-solo negativo é quase três/quatro vezes maior do que no mês anterior. Este mês também evidencia um crescimento considerável na incidência de relâmpagos nuvem-solo positivo (219 casos). O aumento do número dos relâmpagos persiste durante o mês de novembro até o mês de dezembro, que é o mês de maior ocorrência de relâmpagos intra-nuvem (35.150 casos) e nuvem-solo (10.348 casos). Mesmo este mês registrando um valor médio de 380 relâmpagos nuvem-solo positivo, este tipo de relâmpago é mais comum de ocorrer durante o mês de janeiro.

O padrão de variação no número de incidência de relâmpagos entre os meses mostra que dezembro, janeiro e fevereiro são os que registraram as maiores quantidades de relâmpagos. Março, abril e maio/setembro, outubro e novembro foram os meses que caracterizaram uma diminuição/aumento gradativo, no total do número de relâmpagos, sendo denominados como meses de transição. Junho, julho e agosto foram os meses que tiveram os menores casos de ocorrência de relâmpagos. Esta

variação mensal deve-se ao fato de que as estações do ano são bem definidas para o estado de Minas Gerais, com o verão chuvoso, e inverno seco. O outono marca o fim do ano hidrológico enquanto a primavera marca o início.

O ciclo médio mensal do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativos e positivos não apresentou um padrão de variação marcante, assim como o ciclo médio mensal de relâmpagos. De janeiro a junho, o +PC não teve muita oscilação, permanecendo entre 29,1 e 31,5 kA. O mês de julho foi o que teve o menor valor do pico de corrente, com uma média de 25,9 kA. Agosto foi o que teve o maior valor, com um pico de corrente médio de 37,2 kA. Nos meses seguintes, o pico de corrente manteve-se quase que uniforme. O -PC apresentou uma amplitude maior em relação ao +PC, com uma variação de cerca de 9kA entre os meses. De janeiro a abril o pico de corrente se manteve constante em 19 kA. Nos meses seguintes, teve uma diminuição até o mês de julho, que registrou uma média de 9,5 kA. De agosto a dezembro houve um aumento gradual no valor do pico de corrente, atingindo 17,3 kA no último mês.

A Figura 17 mostra o mês de maior incidência de relâmpagos IN (Figura 17a), -NS (Figura 17b) e +NS (Figura 17c). A ocorrência de relâmpagos intra-nuvem, na maior parte do Estado, é mais comum no mês de dezembro nas regiões norte, do Jequitinhonha, do Rio Doce e na zona da mata e parte da região noroeste, enquanto nas regiões sul, central, triângulo mineiro e Alto Paranaíba é mais comum no mês de janeiro. Em algumas pequenas regiões de Minas Gerais, esse tipo de relâmpago é mais comum no mês de abril, ou no mês de maio, ou no mês de outubro. Os relâmpagos nuvem-solo negativos são mais predominantes no mês de dezembro nas regiões do Rio Doce, do Jequitinhonha, noroeste, norte e parte do Alto Paranaíba ou no mês de janeiro, nas regiões central, sul e do triângulo mineiro, seguindo um padrão semelhante ao dos relâmpagos IN. Em algumas localidades do Estado, os relâmpagos -NS ocorrem no mês de maio ou no mês de outubro. Os relâmpagos do tipo +NS ocorrem mais em janeiro nas regiões sul, zona da mata, central e triângulo mineiro e ocorrem mais no mês de março nas regiões norte, noroeste e do Rio Doce, sendo que em determinadas regiões, este tipo de relâmpago é mais comum de ocorrer no mês de abril, ou junho, ou agosto ou dezembro.

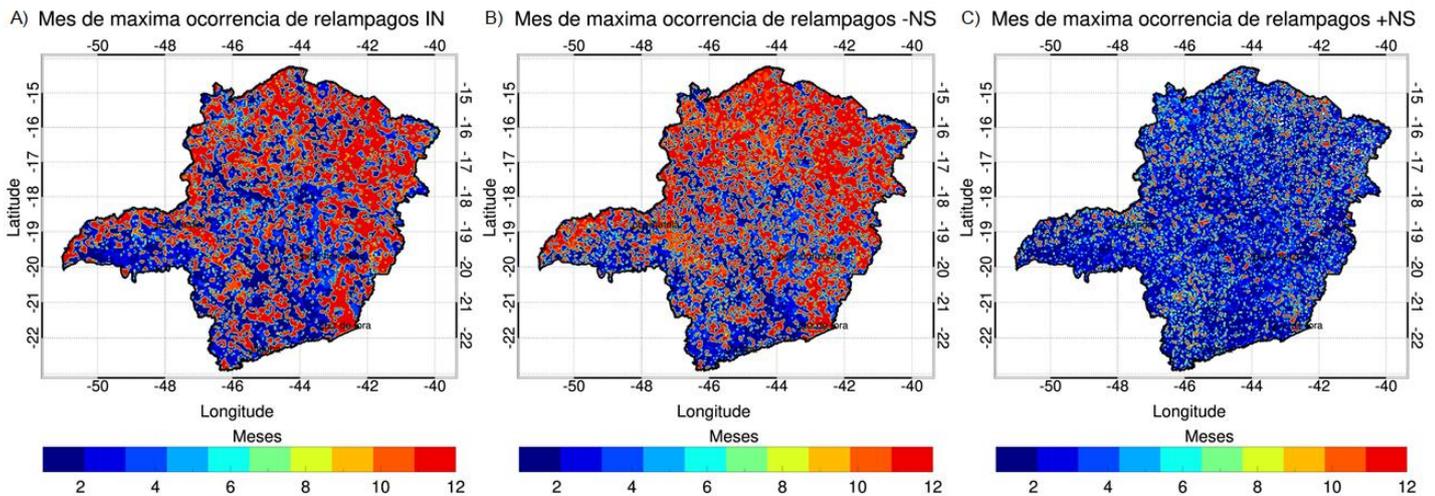


Figura 18 – Mês de máxima ocorrência de relâmpagos: a) intra-nuvem; b) nuvem-solo negativo; c) nuvem-solo positivo. Fonte: Do Autor.

4.4 Caracterização do ciclo diurno médio dos relâmpagos

A Figura 18 representa o ciclo diurno médio de relâmpagos intra-nuvem (linha preta), nuvem-solo negativo (linha azul), nuvem-solo positivo (linha vermelha) e pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativo (linha laranja contínua) e positivo (linha laranja tracejada). Observa-se que para todos os tipos de relâmpagos o horário de máxima incidência é às 19 horas UTC (17 horas local), que por ser o horário de máximo aquecimento diurno, contribui para a formação de tempestades convectivas. O horário de menor ocorrência de relâmpagos é às 12 horas UTC (10 horas local), pois este é o horário de menor aquecimento diurno, o que desfavorece a formação de tempestades convectivas. O pico de corrente de $-NS$ não apresentou uma grande variação diurna, no qual os horários que os relâmpagos desse tipo são mais intensos é das 05 às 07 horas UTC (03 às 05 horas local) com pico de corrente próximo de 22 kA e menos intensos das 20 às 21 horas UTC (18 às 19 horas local) com o pico de corrente próximo de 19 kA. O pico de corrente de $+NS$ apresentou uma variação maior em relação ao pico de corrente de relâmpago nuvem-solo negativo, onde o horário de máxima intensidade é as 10 horas UTC (08 horas local) e pico de corrente com valor próximo de 41 kA e o horário de menor intensidade é das 15 às 17 horas UTC (13 às 15 horas local) com o pico de corrente com valor de 32 kA.

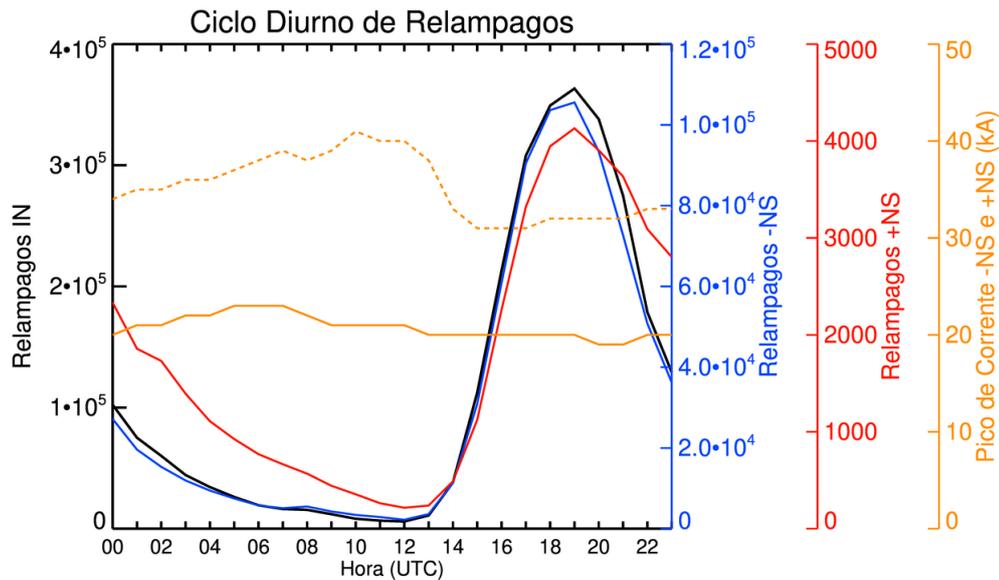


Figura 19 – Ciclo diurno médio de relâmpagos intra-nuvem (linha preta), nuvem-solo negativo (linha azul) e nuvem-solo positivo (linha vermelha) e do pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativos (linha laranja contínua) e positivos (linha laranja tracejada). Fonte: Do Autor.

A Figura 19 mostra o horário de maior ocorrência de relâmpagos intra-nuvem (Figura 19a), nuvem-solo negativo (Figura 19b) e nuvem-solo positivo (Figura 19c). Os relâmpagos IN, na maior parte do estado, ocorrem às 19 horas UTC, sendo que em algumas regiões, o horário de máxima ocorrência é às 00h, ou às 11h, ou às 15h, ou às 20h ou às 21 horas UTC. Os relâmpagos –NS, assim como os relâmpagos intra-nuvem, é mais comum de ocorrer às 19 horas UTC. Em determinados locais do Estado, o horário de máxima incidência desse tipo de relâmpago é às 00 horas UTC, ou às 01 horas UTC, ou às 09 horas UTC, ou às 12 horas UTC, ou às 20 horas UTC. Em relação aos relâmpagos +NS, não existe um horário predominante no Estado para a ocorrência desse tipo de relâmpago assim como identificado para os relâmpagos intra-nuvem e nuvem-solo negativo. Os horários mais comuns de incidência são às 5 horas UTC, ou às 15 horas UTC ou às 19 horas UTC, sendo que em alguns locais, os relâmpagos ocorrem às 00h, ou às 01h, ou às 10h, ou às 21h, ou às 23 horas UTC.

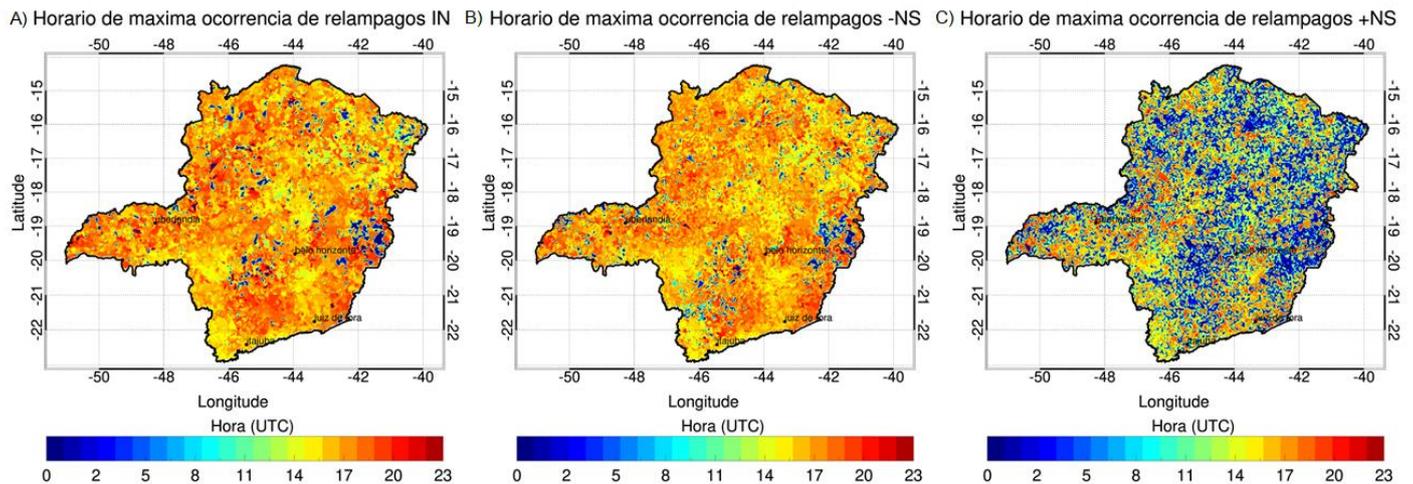


Figura 20 – Horário de máxima ocorrência de relâmpagos: a) intra-nuvem; b) nuvem-solo negativo; c) nuvem-solo positivo. Fonte: Do Autor

4.5 Mapa dos municípios *Hotspots* de relâmpagos

A Figura 20 mostra os dez municípios, definidos como *hotspots*, que registraram as maiores médias de relâmpagos IN (Figura 20a), –NS (Figura 20b) e +NS (Figura 20c) e maiores valores médios do –PC (Figura 20d) e +PC (Figura 20e), entre os anos de 2013 a 2018 para o estado de Minas Gerais.

O município com o maior número de relâmpagos IN (Figura 20a) é Rio Preto, que teve em média 76,8 relâmpagos ano⁻¹ km⁻². Em segundo lugar está o município de Santa Rita de Jacutinga, com valor médio de 75,2 relâmpagos ano⁻¹ km⁻². O terceiro município com maior densidade desse tipo de relâmpagos é Passa Vinte, com cerca de 74,6 relâmpagos ano⁻¹ km⁻². Observa-se que esses municípios registraram uma densidade de relâmpagos superior a 70 relâmpagos ano⁻¹ km⁻², valor que é bastante elevado. A décima cidade com maior ocorrência de relâmpagos intra-nuvem é Bias Fortes, que registrou um valor médio de 36,3 relâmpagos ano⁻¹ km⁻². Além disso é possível ver que todos os municípios fazem divisa uns com os outros.

Em relação a densidade de relâmpagos –NS (Figura 20b) Rio Preto foi o município que obteve o maior número de relâmpagos, cerca de 12,2 relâmpagos ano⁻¹ km⁻². O segundo e o terceiro município, que é Passa Vinte (11,1 relâmpagos ano⁻¹ km⁻²) e Santa Rita de Jacutinga (11 relâmpagos ano⁻¹ km⁻²) tiveram valores bem próximos de incidência de relâmpagos, com uma diferença de 0,1 relâmpagos ano⁻¹ km⁻². Os restantes dos municípios também não tiveram uma distância tão significativa

no total de ocorrência de relâmpagos, sendo que a diferença entre o quarto colocado (Catas Altas) e o décimo colocado (Paiva) é de 1,5 relâmpagos ano⁻¹ km⁻².

Para os relâmpagos do tipo +NS (Figura 20c), Iturama foi o município que mais se destacou, registrando uma média de 12,4 relâmpagos ano⁻¹ km⁻². Os demais municípios tiveram uma densidade de relâmpagos bem próxima, com a diferença entre o 2º colocado e o 10º de apenas 1 relâmpago ano⁻¹ km⁻². Houve o caso de localidades como Santa Vitória e União de Minas, Monte Alegre de Minas e Itapagipe e Prata e Uberaba que tiveram as mesmas densidades de relâmpagos de 8,8 relâmpagos ano⁻¹ km⁻², 8,4 relâmpagos ano⁻¹ km⁻² e 8,2 relâmpagos ano⁻¹ km⁻², respectivamente.

O pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativo é mais intenso no município de Matias Cardoso, que obteve uma média de 56,3 kA, enquanto a cidade com menor é Brasilândia de Minas, com 43,9 kA. A diferença do -PC entre o 1º e o 10º foi de apenas 12,4 kA. Para o pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo positivo os municípios com os maiores e menores +PC são Guarda Mor e Carmo do Rio Claro, que tiveram uma média de 92,5 e 68,0 kA, respectivamente. A diferença entre as cidades é de apenas 24,5 kA.

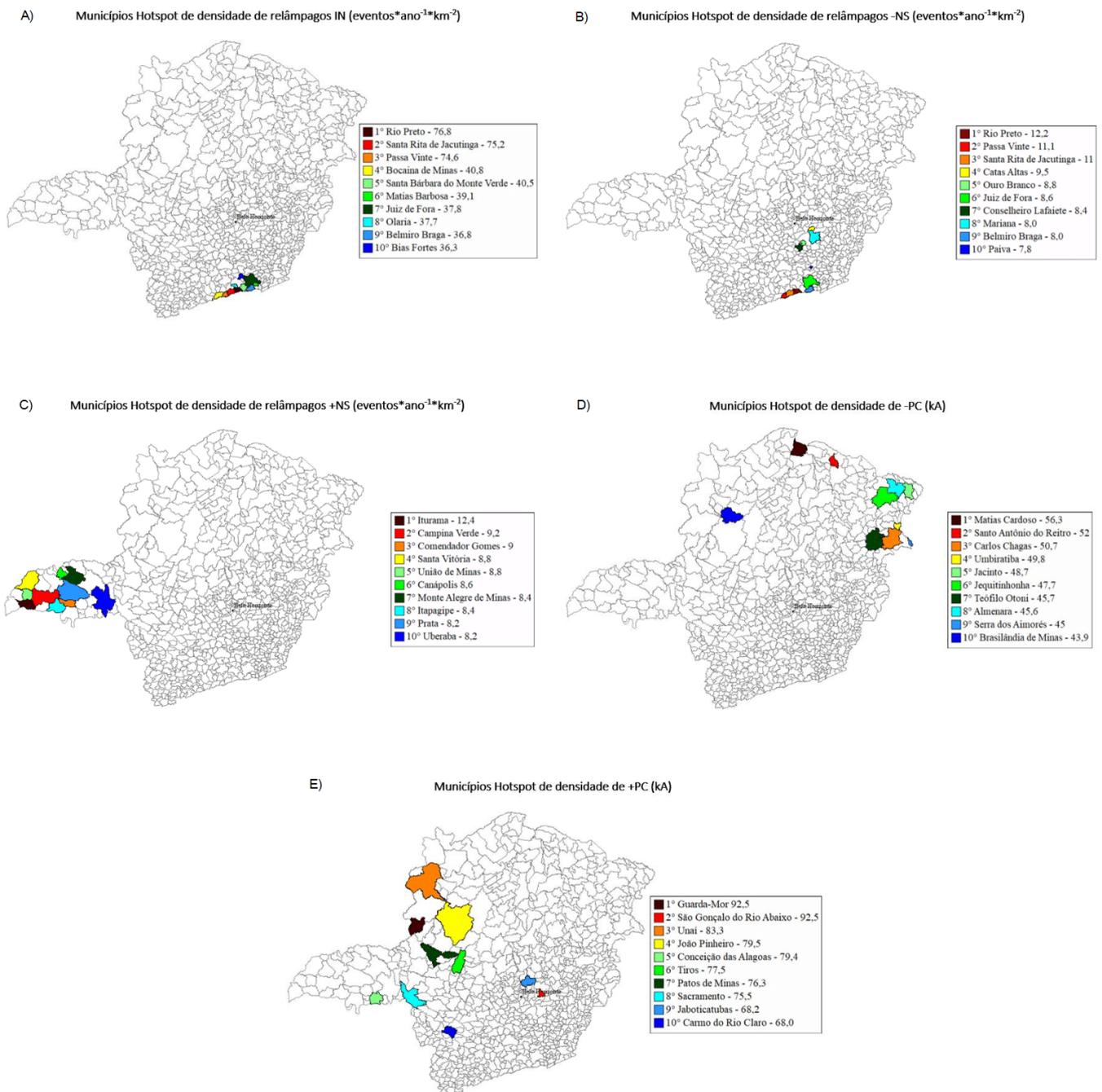


Figura 21 – Municípios *hotspots* de: densidade de relâmpagos a) intra-nuvem, b) nuvem-solo negativo e c) nuvem-solo positivo e pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo d) negativo e e) solo positivo. Fonte: Do Autor.

5. CONCLUSÃO

A realização desse estudo permitiu avaliar a distribuição espacial e temporal de relâmpagos para o estado de Minas Gerais por meio dos dados da rede de detecção BrasilDAT. O mapa médio anual mostrou que a distribuição espacial de relâmpagos

varia de acordo com o seu tipo. Os relâmpagos do tipo IN são mais frequentes na região da zona da mata, no triângulo mineiro e em parte da região sul do estado. Os relâmpagos –NS ocorrem mais no triângulo mineiro, em partes da região central e do triângulo mineiro. Os relâmpagos do tipo +NS possui maior incidência no triângulo mineiro e menor incidência em partes do alto Paranaíba, noroeste, central, zona da mata e sul. O –PC é mais intenso no triângulo mineiro, norte, noroeste e Vale do Jequitinhonha enquanto o +PC é mais intenso no triângulo mineiro e em partes da região noroeste, alto Paranaíba, central, zona da mata e sul. O relevo de Minas Gerais apresenta uma cadeia montanhosa que se estende da zona da mata até a região central. Os locais de maior densidade de relâmpagos IN e –NS encontra-se onde essas montanhas têm maior altitude, evidenciando a influência do relevo na ocorrência de relâmpagos.

A ocorrência de relâmpagos para regiões central, zona da mata e triângulo mineiro encontrada por meio dos dados do GLM para o ano de 2018 foi correspondente com os dados da BrasilDAT. Porém para as regiões norte, do Jequitinhonha e parte do norte da região central do estado, o número de incidência de relâmpagos foi diferente.

O ciclo médio anual de relâmpagos revelou que para os relâmpagos IN, os anos de maior ocorrência e menor ocorrência foram 2016 e 2013, respectivamente com média de 171.397 relâmpagos. Para os relâmpagos –NS, o ano de maior incidência foi 2018 e o de menor incidência foi o de 2014 com média de 48.725 eventos. Os casos de relâmpagos +NS foi maior no ano de 2013 e menor no ano de 2014 e sua média foi de 2.597 relâmpagos. O pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo positivo é mais intenso que o pico de corrente dos relâmpagos nuvem-solo negativo.

O mapa anual revelou que o baixo número de ocorrências de relâmpagos intra-nuvem e nuvem-solo negativos favoreceu a ocorrência de relâmpagos nuvem-solo positivo para o ano de 2013. Na maioria dos anos, a distribuição anual de relâmpagos e pico de corrente correspondeu com a distribuição média anual encontrada. O baixo número de relâmpagos nos anos de 2013 e 2014 está relacionado com a seca que atingiu a região sudeste enquanto que o elevado número de relâmpagos nos anos de 2015 e 2016 podem estar associados a intensidade forte do El Niño.

A variação sazonal e o ciclo médio mensal evidenciaram que nos meses de verão tem maior ocorrência de relâmpagos enquanto nos meses de inverno tem menor ocorrência. Os meses de primavera e de outono caracterizam um aumento e

uma diminuição na incidência de relâmpagos respectivamente. O –PC e o +PC não apresentaram uma variação sazonal. O mês de dezembro foi o de maior incidência dos relâmpagos IN e –NS e o mês de janeiro foi o mês de maior incidência dos relâmpagos do tipo +NS.

O ciclo médio diurno mostrou que 19 horas UTC (17 horas local) e 12 horas UTC (10 horas local) são horários de maior e menor ocorrência de relâmpagos, respectivamente. O pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo negativo é mais intenso entre as 05 e as 07 horas UTC (03 e 05 horas local) e menos intenso entre as 20 e 21 horas UTC (18 e 19 horas local). O pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo positivo é mais intenso às 10 horas UTC (08 horas local) e menos intenso entre as 15 e as 17 horas UTC (13 e 15 horas local). Na maior parte do estado, os relâmpagos do tipo intra-nuvem e nuvem-solo negativo ocorrem às 19 horas UTC (17 horas local). Em relação aos relâmpagos nuvem-solo positivo, os horários predominantes para a sua ocorrência são às 05 horas UTC, ou às 15 horas UTC ou às 19 horas UTC. A localização dos municípios *hotspots* corresponderam com as áreas de maior densidade de cada tipo de relâmpago e os maiores valores do pico de corrente dos relâmpagos nuvem-solo negativos e positivos.

Para trabalhos futuros sugere-se analisar e aprofundar as análises sobre os fatores que impactam a distribuição espacial dos relâmpagos no Estado de MG. Por exemplo, seria avaliar a relação entre o relevo, tipos de tempestades, poluição e densidade e polaridade dos relâmpagos. Além disso torna-se importante avaliar um período maior de dados do satélite GOES-16 para uma intercomparação mais profunda com os dados da BrasilDAT.

REFERÊNCIAS

- ABREU, L. P. Relâmpagos no nordeste do Brasil: ocorrência, variabilidade espaço-temporal e relação com a microfísica das nuvens. 127 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Climáticas) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.
- ANSELMO, E. M. Morfologia das tempestades elétricas na América do Sul. 2015. 127 f. Tese (Doutorado do curso de Ciências Atmosféricas) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- ALBRECHT, R. I.; GOODMAN, S. J.; BUECHLER, D. E.; BLAKESLEE, R. J.; CHIRSTIAN, H. J. Where are the lightning hotspots on Earth?. **American Meteorological Society**, v. 97, n. 11, p. 2051-2068, Nov. 2016.
- BEIRLE, S.; KOSHAK, W.; BLASKESLEE, R.; WAGNER, T. Global patterns of lightning properties derived by OTD and LIS. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 2, p. 2765-2787. Apr. 2014.
- BOCCIPPIO, D. J.; GOODMAN, S. J.; HECKMAN, S. Regional Differences in Tropical Lightning Distributions. **Journal Of Applied Meteorology**, v. 39, p. 2231-2248. Dec 2000.
- BOURSCHEIDT, V.; PINTO, O.; NACCARATO, K. P.; PINTO, I. R. C. A. The influence of topography on the cloud-to-ground lightning density in South Brazil. **Atmospheric Research**, v. 91, n. 2-4, p. 508-513, 2009.
- CARDOSO, I.; PINTO JR. O.; PINTO, I. R. C. A.; HOLLE, R. Lightning casualty demographics in Brazil and their implications for safety rules. **Atmospheric Research**, v.135-136, p. 374-379, Jan. 2014.
- CECIL, D.; BUECHLER, D. E.; BLASKESLEE, R. J. Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description. **Atmospheric Research**, v. 135-136, p. 404-414. Jun. 2012.
- COELHO, C.A.S.; OLIVEIRA; C.P.; AMBRIZZI, T.; REBOITA; M.S.; CARPENEDO; C.B. et al. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 11, p. 3737-3752, Jun. 2016.
- ELAT. Grupo de Eletricidade Atmosférica – Instituto de Pesquisas Espaciais. **Ocorrência na Terra**. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/ocorrencia.na.terra.php>>. Acesso em: 14 jun. 2019.
- ELAT. Grupo de Eletricidade Atmosférica – Instituto de Pesquisas Espaciais. **Tipos de Relâmpagos**. Disponível em: <www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/tipos.php>. Acesso em: 06 jun. 2019.

ELAT. Grupo de Eletricidade Atmosférica. Centro de Ciência do Sistema Terrestre – Instituto de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.ccst.inpe.br/projetos/brasildat/>>. Acesso em: 25 set. 2019.

HOGH, C. J.; BLAKESLEE, R. J.; BOCCIPPIO, D. J.; BOECK, W. L.; BUECHLER, D. E.; DRISCOOL, K. T.; GOODMAN, S. J.; HALL, J.M.; KOSHAK, W. J.; MACH, D.M.; STEWART, M. F. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. **Journal of Geophysycal Reseach**, v.101, n. D1, p. 4-1–4-15. Jan. 2003.

MAZZETTI, T. O.; FUELBERD, H. E. An Analysis of Total Lightning Flash Rates Over Florida. **Journal of Geophysycal Reseach: Atmospheres**, v. 122, p. 12812-12826. Dec. 2017.

MEDICI, G.; CUMMINS, K. L.; CECIL, D. J.; KOSHAK, W. J.; RUDLOSKY, S. D. The Intracloud Lightning Fraction in the Contiguous United States. **Monthly Weather Review**, v. 145, p. 4481-4499. Nov. 2017.

NACCARATO, K. P. **Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do Sistema de Localização de Tempestades**, 2001. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

NACCARATO, K. P. Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil. 2006. 362f. Tese (Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006.

NACCARATO, K. P.; PINTO JR, O. Improvements in the detection efficiency model for the Brazilian lightning detection network (BrasilDAT). **Atmospheric Research**, v. 91, p. 546-563, 2009.

NACCARATO, K. P.; PINTO JR, O.; SLOOP, C. D.; HECKMAN, S.; LIU, C. Evaluation of BrasilDAT relative detection efficiency based on LIS observations and a numeric model. International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2014, Shanghai.

OSCAR JÚNIOR, A. C.; NUNES L. H. Repercussão da Oscilação Sul na precipitação do sudeste brasileiro: análise para os anos de 2015 e 2016. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 17., 2017, Campinas. **Anais...** Campinas: UNICAMP, 2017. p. 1756-1767.

PETERSON, M.; LIU, C. Characteristics of lightning flashes with exceptional illuminated areas, durations, and optical powers and surrounding storm properties in the tropics and inner subtropics. **Journal of Geophysycal Reseach: Atmospheres**, v. 118, p. 11727-1740. Oct. 2013.

PETERSON, M.; RUDLOSKY, S.; DEIERLING, W. The Evolution and Structure of Extreme Optical Lightning Flashes. **Journal of Geophysycal Reseach: Atmospheres**, v.122, p. 13370-13386. Dec. 2017.

PINTO, I. R. C. A.; PINTO JR, O. Cloud-to-ground lightning distribution in Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, p. 733-737, Feb. 2003.

PINTO JR, O.; PINTO, I. R. C. A.; GOMES, M. A. S. S.; VITORELLO, I.; PADILHA, A. L. Cloud-to-ground lightning in southeastern Brazil in 1993. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, p. 31369–31379, Dec, 1999.

PINTO JR, O.; PINTO, I. R. C. A.; FARIA, H. H. A comparative analysis of lightning data from lightning networks and LIS sensor in the North and Southeast of Brazil. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 2, p. 45-1 – 45-4, Jan. 2003.

PINTO JR, O.; PINTO, I. R. C. A.; DINIZ, J. H.; FILHO, A. C.; CHERCHIGLIA, L. C. L.; CARVALHO, A. M. A seven-year study about the negative cloud-to-ground lightning flash characteristics in Southeastern Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, p. 739-748, Feb. 2003.

PINTO JR, O.; NACCARATO, K. P.; PINTO, I. R. C. A.; FERNANDES, W. A.; PINTO NETO, O. Monthly distribution of cloud-to-ground lightning flashes as observed by lightning location systems. **Geophysical Research Letters**, v. 33, May 2006. doi:10.1029/2006GL026081, 2006

PINTO JR, O.; PINTO, I. R. C. A.; NACCARATO, K. P. Maximum cloud-to-ground lightning flash densities observed by lightning location systems in the tropical region: A review. **Atmospheric Research**, v.84, p. 189-200, 2007. doi:10.1016/j.atmosres.2006.11.007

REYNOLDS, S. E.; BROOK, M.; GOURLEY, M. F. THUNDERSTORM CHARGE SEPARATION. **Journal of Meteorology**, v. 14, n. 5, p. 426–436. Mar 1957.

RINDAT. Rede integrada de detecção de descargas atmosféricas - Institucional. Disponível em: <www.rindat.com.br>. Acesso em: 25 set. 2019.

RODLOSKEY, S. D.; GOODMAN, S. J.; VIRTS, K. S.; BRUNING, E. C. Initial Geostationary Lightning Mapper Observations. **Geophysical Research Letters**, v. 45, p. 1097-1104. Jan. 2019.

SANTOS, A. P. P.; LIMA, F. J. L.; SOUZA, E. B.; PINTO JR, O.; SANTOS, S. R. Q. Aplicação da análise cluster na identificação de regiões homogêneas para incidência de descargas atmosféricas do tipo nuvem-solo no estado de São Paulo, Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 09, n. 07, p. 2188-2195. out. 2010

SANTOS, A. P. P. **Eventos extremos de descargas atmosféricas no estado de São Paulo: casos observados e cenários futuros**. 2017. 193 f. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2017.

SANTOS, A. P. P.; SOUZA J. R. S.; SOUZA, E. B.; CARMO, A. M. C.; RIBEIRO, W. M. N. Electric systems failures produced by cg lightning in eastern Amazonia.

Revista Brasileira de Meteorologia, São José dos Campos, v. 29, n. esp., p. 31 - 40, Apr. 2014.

Simpson, G. C.; Robinson G. D. The distribution of electricity in thunderclouds, II. **Proc. R. Soc. London**, v. A, n. 177, p. 281-329. Sep. 1940.

STARNET. Sferics Timing And Ranging NETwork. Disponível em: <http://www.starnet.iag.usp.br/sistema.php>. Acesso em: 25 set. 2019.

YOU, J. ZHENG, D.; ZHANG, Y.; YAO, W.; MENG, Q Duration, spatial size and radiance of lightning flashes over the Asia-Pacific region based on TRMM/LIS observations. **Atmospheric Research**, v. 223, p. 98-113. Jul. 2019.