

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

JESSIKA MARTINS DE SOUZA LIMA

HOTSPOTS DE RAIOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

SÃO PAULO

2022

JESSIKA MARTINS DE SOUZA LIMA

HOTSPOTS DE RAIOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Bacharelado em Meteorologia da Universidade
de São Paulo, como requisito necessário à obtenção do
título de Bacharel em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Morales
Rodriguez

SÃO PAULO
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe, por ter batalhado sozinha para me dar todo o apoio do mundo para que eu pudesse focar em meus estudos e meus sonhos. Além de sempre oferecer seu colo nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador, Carlos Augusto Morales Rodriguez, por me guiar durante esses anos, dando-me oportunidades para aprender mais.

À todos os professores do IAG, por suas dedicações e paciência em sala de aula.

Aos amigos que fiz ao longo da graduação, que foram meu ponto de apoio e descontração. Além de me ajudarem em meu aprendizado.

À minha cachorrinha Luna, por ser uma bolinha de pelos que aquece meus dias.

RESUMO

As tempestades são eventos que podem ser favorecidos por diversos fatores, como a topografia e tipo de superfície, além disso há também vários estudos que relacionam a influência da poluição de áreas urbanas na sua formação. Esse fenômeno impacta toda a sociedade, desde o cotidiano dos cidadãos, como prejudicar eventos, transporte e o trânsito, como causar interrupções nos serviços de transmissão de energia e comunicação, causando grandes prejuízos econômicos, além de fatalidades humanas. Diante disso, é importante a melhor compreensão da atividade elétrica e sua distribuição, para que assim se colabore com a criação de melhores sistemas de segurança relacionados a esse desastre natural. Portanto, este trabalho realiza um estudo sobre a distribuição de raios na Região Metropolitana de São Paulo, no qual foi feito uma climatologia da queda de raios entre os anos de 2017 e 2021, visando a identificação de hotspots na região. Para isso, foram utilizados os raios nuvem-terra (NT) acumulados em uma grade de $100 \times 100 \text{ m}^2$ que foram detectados pela rede LINET. Além de dados geográficos e de urbanização, fornecidos pelo GeoSampa, TelecoCare e Google Maps, utilizados para a visualização desses hotspots encontrados. Através deste estudo, verificou-se que a distribuição de raios na RMSP tem seu foco de intensidade sendo o centro da Cidade de São Paulo, principalmente sobre a Liberdade, se estendendo até a Zona Leste, em uma faixa de nordeste á sudoeste, com uma média de 30 a 40 raios/ km^2/ano . Locais com 6 ou mais raios, totalizaram menos de 0,2% da quantidade acumulada de queda de raios durante o período de estudo para cada área de $100 \times 100 \text{ m}^2$, portanto acumulados maiores que 6 raios NT podem ser considerados hotspots. Todavia para este estudo, foi feita a análise de todos os lugares que possuem pelo menos 10 raios NT acumulados, nos quais foram encontrados 25 locais. Os hotspots mais intensos, com um acumulado de 13 raios, se encontram no Pico do Jaraguá, local este que possui várias antenas e é o ponto mais alto de São Paulo, e em Cubatão, em uma região de mata com torres. Em geral, os locais de hotspot se tratam de áreas com arborização, ou com torres e edifícios altos, porém, com uma moda de altitude de edificações de menos de 10 m. Uma vez que em regiões onde há apenas uma concentração pequena de pontos altos, entre edificações mais baixas, a tendência é de que haja uma concentração de queda de raios nesses locais mais altos.

Palavras-Chave: climatologia, raios, hotspots, Região Metropolitana de São Paulo.

ABSTRACT

Storms are events that can be favored by several factors, such as topography and type of surface, in addition there are also several studies that relate the influence of pollution of urban areas on their formation. This phenomenon impacts the whole of society, from the daily lives of citizens, such as harming events, transport and traffic, as well as causing interruptions in energy transmission and communication services, causing great economic losses, in addition to human fatalities. Thus, it is important to better understand electrical activity and its distribution, in order to collaborate with the creation of better safety systems related to this natural disaster. Therefore, this work carries out a study on the distribution of lightning in the Metropolitan Region of São Paulo, in which a climatology of the lightning strike between the years 2017 and 2021 was made, aiming at the identification of hotspots in the region. For this, the CG (cloud to ground) accumulated in a grid of 100 x 100 m² were used, which were detected by the LINET network. In addition to geographic and urbanization data, provided by GeoSampa, TelecoCare and Google Maps, used to visualize these hotspots. Through this study, it was found that the distribution of lightning in the RMSP has its focus of intensity being the center of the City of São Paulo, mainly over Liberdade, extending to the East Zone, in a strip from northeast to southwest, with an average of 30 to 40 lightning/km²/year. Locations with 6 or more lightning strikes represented less than 0.2% of the cumulative amount of lightning strikes during the study period for each area of 100 x 100 m², therefore, accumulated amounts greater than 6 CG lightning strikes can be considered hotspots. However, for this study, an analysis was made of all places that have at least 10 accumulated CG, in which 25 places were found. The most intense hotspots, with an accumulation of 13 CG, are found in Pico do Jaraguá, which has several antennas and is the highest point in São Paulo, and in Cubatão, in a region of forest with towers. In general, hotspot locations are areas with trees, or with towers and tall buildings, however, with a building altitude mode of less than 10 m. Because in regions where there is only a small concentration of high points, among lower buildings, the tendency is for there to be a concentration of lightning strikes in these higher places.

Keywords: climatology, lightning, hotspots, Metropolitan Region of São Paulo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Localização dos sensores da rede LINET. Fonte: Morales, C. A (2017).....	20
Figura 3.2 - a) Esquema de funcionamento do TOA. b) Princípio de detecção IC em VLF/LF: sinais IC e CG do mesmo local 2D chegam com uma diferença de tempo $dT = TP - TH$ (P = centro da emissão VLF; S = local do sensor; H = altura da fonte de emissão). Fonte: Betz et al. (2004).....	20
Figura 4.1 - Acumulado de raios (raios/km ²). a) Setembro a Dezembro de 2017; b) ano inteiro de 2018; c) ano inteiro de 2019; d) ano inteiro de 2020; e) Janeiro a Outubro de 2021.....	25
Figura 4.2 - Climatologia de raios nuvem-terra detectados pela LINET (raios/km ² /ano).....	26
Figura 4.3 - Acumulado de raios nuvem-terra detectados pela LINET para cada município, durante todo o período de Setembro de 2017 até Outubro de 2021. a) raios totais, b) raios por km ²	27
Figura 4.4 - Média de raios/km ² /ano para cada distrito da cidade de São Paulo. Os números indicam as respectivas posições de cada distrito no ranking.....	32
Figura 4.5 - Histogramas das alturas das edificações dos três distritos com as maiores taxas de raios/km ² /ano.....	33
Figura 4.6 - Histogramas das alturas das edificações dos três distritos com as menores taxas de raios/km ² /ano.....	34
Figura 4.7 - Histograma do acumulado de raios em cada área 100x100 m ² , para todo o período de estudo. a) quantidade total de raios, b) zoom para o acumulado acima de 6 raios.....	36
Figura 4.8 - Hotspots com 10 raios ou mais acumulado durante o período de 2017 a 2021. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m ²	37
Figura 4.9 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para os dois hotspots no Jaraguá. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m ² , b) imagem de satélite do Google Maps.....	39
Figura 4.10 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para o hotspot no Sapopemba. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m ² , b) imagem de satélite do Google Maps.....	40
Figura 4.11 - Histograma da altura das edificações, segundo o GeoSampa, para o hotspot no Sapopemba.....	40

Figura 4.12 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para o hotspot no Campo Belo. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m ² , b) imagem de satélite do Google Maps.....	41
Figura 4.13 - Histograma da altura das edificações, segundo o GeoSampa, para o hotspot no Campo Belo.....	41
Figura 4.14 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para o hotspot no Pari. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m ² , b) imagem de satélite do Google Maps.....	42
Figura 4.15 - Histograma da altura das edificações, segundo o GeoSampa, para o hotspot no Pari.....	42
Figura 4.16 - Imagem de satélite do Google Maps, para os dois hotspots em Cubatão. a) local com 13 raios acumulados, b) local com 10 raios acumulados. A linha verde indica uma fila de torres de energia elétrica.....	43
Figura 4.17 - Imagem de satélite do Google Maps, para o hotspot em São Vicente, com 12 raios acumulados.....	44
Figura 4.18 - Imagem de satélite do Google Maps, para o hotspot em Guarulhos, com 11 raios acumulados. Os losangos indicam a localização das torres de celular.....	44
Figura 4.19 - Imagem de satélite do Google Maps, para o hotspot em Itaquaquecetuba, com 10 raios acumulados.....	45
Figura 4.20 - Resumo das características geográficas dos 25 hotspots com um acumulado de 10 ou mais raios NT.....	46
Figura 4.21 -a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para o hotspot em Itaquera. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m ² , b) histograma das alturas das edificações, para a mesma área.....	47
Figura 4.22 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para o hotspot no Jardim Paulista. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m ² , b) histograma das alturas das edificações, para a mesma área.....	47
Figura 4.23 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para uma região de Moema. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m ² , b) histograma das alturas das edificações, para a mesma área.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Ranking dos 20 primeiros municípios com o maior número acumulado de queda de raios durante todo o período de Setembro de 2017 até Outubro de 2021.....	28
Tabela 4.2 - Ranking dos 20 primeiros municípios com a maior probabilidade de queda de raios, para as médias anuais separadamente e a média ao longo dos 5 anos.....	29
Tabela 4.3 - Ranking dos 10 últimos municípios com a maior probabilidade de queda de raios, para as médias anuais separadamente e a média ao longo dos 5 anos.....	29
Tabela 4.4 - Ranking dos 20 primeiros distritos com a maior média de queda de raios por ano.....	31
Tabela 4.5 - Ranking dos 20 primeiros distritos com a maior média de queda de raios por km ² por ano.....	31
Tabela 4.6 - Ranking dos 20 primeiros municípios com a maior probabilidade de queda de raios, para as médias anuais separadamente e a média ao longo dos 5 anos.....	35
Tabela 4.7 - Ranking dos 10 últimos distritos com a maior probabilidade de queda de raios, para as médias anuais separadamente e a média ao longo dos 5 anos.....	35
Tabela 5.1 - Estatísticas dos municípios que foram identificados com as maiores tendências de queda de raios.....	49
Tabela 5.2 - Estatísticas dos distritos que foram identificados com as maiores tendências de queda de raios.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NT	Raios nuvem-terra
IN	Raios intra-nuvem
LINET	Lightning Detection Network
VLF	Very Low Frequency
LF	Low Frequency
HF	High Frequency
TOA	Time of arrival
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
ERBs	Estações Rádio Base

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. CONTEXTO	13
1.2. OBJETIVOS	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. FORMAÇÃO DA CHUVA	16
2.2. MECANISMOS DE ELETRIFICAÇÃO	17
3. METODOLOGIA	19
3.1. ÁREA DE ESTUDO	19
3.2. PERÍODO DE ESTUDO	19
3.3. DADOS	19
3.3.1 Lightning Detection Network	19
3.3.2 GeoSampa	21
3.3.3 TelecoCare	21
3.4. MÉTODOS	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
4.1. CLIMATOLOGIA DE RAIOS	24
4.2. IDENTIFICAÇÃO DOS MUNICÍPIOS COM MAIORES TAXAS	27
4.3. ESTATÍSTICAS DOS DISTRITOS	30
4.4. HOTSPOTS	36
4.4.1 Análise dos locais com 10 ou mais raios acumulados	38
4.4.1.1 Hotspots da Cidade de São Paulo	38
4.4.1.2 Hotspots de outros municípios	43
4.4.2 Discussões finais	45
5. CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS	51
APÊNDICE A	54

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO

Desde a descoberta da natureza dos raios, por Benjamim Franklin (1706-1790), em 1752 esse fenômeno tem sido objeto de estudo. A primeira estimativa da taxa global de raios foi feita por Brooks (1925), que encontrou uma taxa de 100 raios por segundos, com base em um número médio de raios por tempestade e contagens de trovoadas registradas por estações meteorológicas de superfície. Esses sistemas de superfície possuem uma cobertura espacial limitada, especialmente sobre os oceanos e os trópicos, pois os receptores estão a grandes distâncias do local da queda do raio. Portanto, foi a partir da invenção dos satélites que o monitoramento em escala planetária passou a ser aprimorado. As primeiras observações de raios do espaço ocorreram no início da década de 1960, usando sensores ópticos e de radiofrequência (ALBRECHT et al., 2016). Após isso, com a invenção de tecnologias de medição cada vez mais sofisticadas, foi possível ter um entendimento ainda melhor da distribuição global de raios.

As tempestades são eventos que podem ser favorecidos por diversos fatores, como a topografia e tipo de superfície. No estudo de Albrecht et al. (2016), foi observado o contraste entre a densidade de raios sobre os oceanos e o continente, onde a densidade é mais intensa na superfície terrestre e no período da tarde. A região com o maior número de locais com maior frequência de raios encontrada foi a África, representando 283 dos 500 lugares analisados. Em seguida, veio a Ásia com 87 pontos com alta incidência de eletricidade atmosférica, América do Sul com 67, América do Norte com 53 e por fim a Oceania com apenas 10 locais de alta incidência.

Já na climatologia do Brasil, estudos de Pinto et al. (2007) e Morales et al. (2014) mostram que a bacia Amazônica e a parte central do país são as regiões com maior atividade elétrica. Atualmente, há também várias pesquisas que relacionam a influência de áreas urbanas na formação de tempestades. Naccarato (2006) ao analisar as características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil, concluiu que aparentemente a poluição dos grandes centros urbanos interfere na frequência deste fenômeno. Em seu estudo, foi observado que há uma maior ocorrência de raios na região leste de São Paulo e no sudoeste do Rio de Janeiro, se comparado às outras regiões analisadas. Em particular em São Paulo, foi constatado uma

grande densidade de raios na área metropolitana, e nos municípios de São José dos Campos e Campinas, onde a densidade diminui gradualmente em direção ao interior.

Para Naccarato (2006), existem duas possíveis hipóteses para explicar este aumento de raios em áreas urbanas. Primeiro ele propõe que a poluição urbana aumenta a concentração de núcleos de condensação na atmosfera, provocando alterações nos processos microfísicos das nuvens de tempestade, aumentando assim a atividade elétrica. Já a sua outra hipótese é de que as ilhas de calor urbanas são responsáveis pela intensificação da convecção local, que está diretamente relacionada com o aumento das velocidades de ascensão do ar, o que intensifica a eletrificação das nuvens de tempestades.

A queda de raios pode causar grandes riscos e prejuízos para a sociedade, sendo responsável por fatalidades humanas, interrupções de serviços de transmissão de energia e comunicação e incêndios florestais. No Brasil, estima-se que morrem em média 132 pessoas por ano por causa da queda de raios (CARDOSO et al. 2014). Já os prejuízos atingem valores superiores a R\$1 bilhão por ano, sendo a maior perda vinda do setor elétrico (PINTO, 2008). Além disso, os raios também afetam os hábitos diários da população, como eventos, transporte e trânsito (HOLLE, 2014).

Por ser uma região densamente povoada, São Paulo possui o maior número de mortes registradas por queda de raios no país durante os anos de 2000 a 2019. Segundo o ELAT/INPE, durante esse período foram totalizadas 327 mortes no estado, cerca do dobro do valor que os outros estados registraram. Muitas dessas fatalidades causadas por raios estão associadas a propriedades sem sistema de proteção de raios, veículos abertos, serviços em lavouras, ausência de sistemas de detecção de raios, alertas de prevenção e resposta médica rápida (HOLLE, 2014).

Desta maneira, é importante a melhor compreensão da atividade elétrica e sua distribuição, pois isso facilita na distinção de locais que precisem de melhores sistemas de segurança contra descargas atmosféricas, diminuindo assim os problemas causados à sociedade.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é criar uma climatologia (raios/km²/ano) da distribuição de raios na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) com um sistema de detecção de raios de alta resolução e precisão, baseado nos dados de 2017 a 2021. Além disso, determinar as áreas de maior tendência de queda de raios na região e criar um ranqueamento dos municípios e distritos com as maiores taxas e probabilidades de queda.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. FORMAÇÃO DA CHUVA

A parcela de ar é formada a partir da evaporação da água através da energia solar. O ar frio e pesado que circula em volta dessas moléculas de água formam um balão de ar quente, que ascende rapidamente na atmosfera e se expande realizando um trabalho que diminui sua temperatura adiabaticamente. Com essa queda na temperatura, a pressão de vapor de saturação também decai, com isso a pressão de vapor do ambiente será maior que a pressão de saturação. Como resultado, o excesso de água que a parcela não pode reter no estado de vapor irá condensar em gotículas de água, formando uma nuvem.

Para ocorrer essa condensação a partir do vapor na atmosfera, é preciso que ocorra a nucleação heterogênea, onde a gota entra em contato com núcleos de condensação (CCN). Esses CCNs são aerossóis que têm afinidade com a água e, ao serem ativados na gotícula, eles reduzem drasticamente a pressão de vapor necessária para a condensação da mesma.

O crescimento inicial da gota é um balanço entre a tensão superficial, composição e tamanho do CCN e a saturação ambiente. Quanto maior o raio da gota, menor será a pressão necessária para o equilíbrio, logo quando o raio da gota atinge seu raio crítico (quando a pressão de vapor de saturação do ambiente é igual a pressão de vapor de saturação da água líquida), ela irá crescer através da difusão de vapor, até tender a um crescimento estacionário após atingir um raio de aproximadamente 20 μm . A partir desse tamanho, o processo de colisão e coalescência passa a ser mais eficiente. Esse processo ocorre através do efeito gravitacional, elétrico e aerodinâmico dentro da nuvem que produz colisões entre as gotas, além disso a eficiência dele depende do raio das gotículas a serem coletadas e da gota coletora.

Tanto as gotículas como a gota coletora são carregadas pela corrente ascendente dentro da nuvem. Quando a gota coletora atinge um tamanho grande o suficiente e sua velocidade terminal de queda atinge um valor maior que a velocidade vertical da corrente ascendente, ela começa a precipitar, formando assim a chuva.

Se a nuvem exceder altitudes onde as temperaturas são mais baixas que 0°C , existe uma grande possibilidade de se formar cristais de gelo. Assim como na nucleação de gotículas de nuvem, a formação de gelo é feita através da nucleação heterogênea, estando associada à presença de núcleos de gelo (IN), que são análogos ao CCN. A taxa de crescimento desses cristais de gelo através da difusão de vapor será dependente da capacitância do cristal, estando

relacionado a forma dos mesmos e também dependente da temperatura e da pressão de vapor de saturação em relação ao gelo, assim como no crescimento das gotículas.

Os cristais de gelo também sofrem colisão, podendo estas serem do tipo riming, onde cristais de gelo coletam gotículas de nuvem formando cristais rimed e graupel, ou do tipo acreção, onde há a captura de gotas líquidas por partículas de gelo, formando granizo, ou do tipo agregação, que é a ocorrência de colisão entre os cristais, formando flocos de neve. Da mesma forma que as gotículas de água, esses hidrometeoros são carregados pela corrente ascendente e precipitam quando se atinge uma velocidade terminal de queda maior do que a corrente. No caso do granizo, precipitará granizo, no caso do graupel, ele pode derreter e virar chuva ou precipitar o graupel e, no caso da neve, ela irá derreter e virar uma chuva leve ou garoa, precipitando neve apenas no caso onde o solo estiver com uma temperatura próxima a da nuvem.

A intensidade da chuva depende da região da nuvem em que ela ocorre. Precipitações na região convectiva geradas pela corrente ascendente resultam em uma chuva forte e rápida, com gotas grandes, podendo conter graupel ou granizo. Precipitações na área da zona de transição resultam em chuvas moderadas com gotas médias e pequenas. Já nas precipitações da região estratiforme, há a ocorrência de chuvas fracas e moderadas com gotas menores, porém com um maior tempo de duração.

2.2. MECANISMOS DE ELETRIFICAÇÃO

A colisão e distribuição de hidrometeoros dentro da nuvem geram cargas que produzem um campo elétrico. Quando esse campo elétrico excede a capacidade isolante do ar, há o início de um rápido movimento de elétrons de uma região de cargas negativas para uma região de cargas positivas, formando assim as descargas elétricas.

Essa descarga elétrica é iniciada pela propagação de líderes escalonados bidirecionais dentro da nuvem, que ao se aproximarem do solo, aumentam o campo elétrico induzindo uma descarga conectiva ascendente que se conectará a esse líder escalonado, criando assim a descarga de retorno. Quando essa descarga de retorno não descarrega a região da nuvem em que está se formando a descarga, há uma sequência de líderes descendentes e descargas de retorno subsequentes até que seja zerado o excesso de cargas elétricas.

As descargas que ocorrem em nuvens de tempestade podem se propagar de várias maneiras, sendo estas da nuvem para o solo, do solo para a nuvem, dentro da nuvem, entre nuvens, entre a nuvem e o ar e, entre a nuvem e a ionosfera. Sendo as descargas mais frequentes as nuvem-terra e intra-nuvem.

3. METODOLOGIA

3.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a Região Metropolitana de São Paulo, que abriga cerca de 21,9 milhões de habitantes distribuídos em 44 municípios.

3.2. PERÍODO DE ESTUDO

Nesse projeto serão analisados dados coletados entre Setembro de 2017 e Outubro de 2021.

3.3. DADOS

3.3.1 Lightning Detection Network

Foram utilizados os raios detectados pela rede *Lightning Detection Network* (LINET - Betz et. al, 2007), que utiliza da metodologia *time-of-arrival* (TOA) para inferir a posição e detecta fontes em VLF e LF, além de estimar o pico de corrente. A rede LINET detecta raios intra-nuvem (IN) e nuvem-terra (NT) no estado de São Paulo a partir de 9 antenas de LF instaladas nos estados de São Paulo, Paraná e Minas Gerais (Figura 3.1). Esses raios são definidos como os *strokes*, nos quais cada ponto de contato é contabilizado como um raio, portanto, por exemplo, se houver a queda de um raio líder e mais três descargas subsequentes, a LINET contará como quatro raios.

A sensibilidade dessa rede diminui gradualmente com a distância, em um limite de detecção de 10 kA e uma distância radial de aproximadamente 200 km. Segundo Betz et al. (2009), a LINET tem acurácia de localização melhor que 500 m e eficiência de detecção superior a 70-90% dos raios.

A metodologia TOA consiste na diferença entre o tempo de chegada entre dois sensores, sendo assim possível definir regiões sobre o globo com a mesma diferença de tempo (hipérbolas na Figura 3.2a). A intersecção entre as hipérbolas define a localização do raio.

Uma vez que as ondas têm propagação direta (HF) e por chão (LF), é possível identificar os raios IN e NT (Figura 3.2b), pois para os raios IN teremos as duas ondas e para NT somente as ondas de chão. Através disso, os dados da LINET são classificados

separadamente entre os raios intra-nuvem e nuvem-terra. Neste estudo, foram utilizados apenas os raios nuvem-terra, com o intuito de analisar a queda de raios. Vale ressaltar também que a rede não faz distinção entre os raios ascendentes e descendentes, sendo os dois classificados como nuvem-terra.

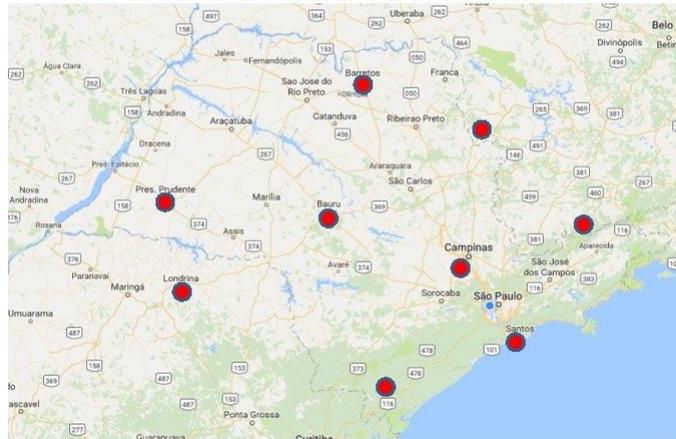


Figura 3.1 - Localização dos sensores da rede LINET. Fonte: Morales, C. A (2017).

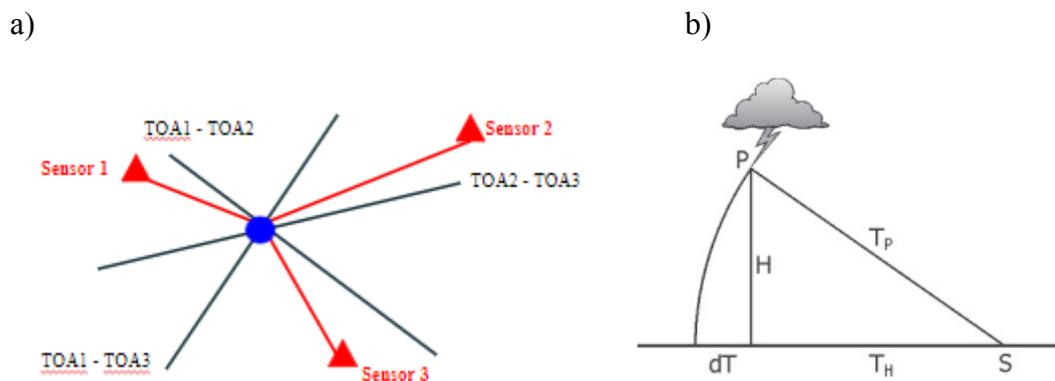


Figura 3.2 - a) Esquema de funcionamento do TOA. b) Princípio de detecção IN em VLF/LF: sinais IN e NT do mesmo local 2D chegam com uma diferença de tempo $dT = TP - TH$ (P = centro da emissão VLF; S = local do sensor; H = altura da fonte de emissão). Fonte: Betz et al. (2004).

A localização dos raios NT detectados (latitude e longitude) foram gridados em uma grade com uma resolução espacial de $100 \times 100 \text{ m}^2$ durante o período analisado, nos quais foram fornecidos esses valores diários. Essa grade se trata de uma matriz de dimensões 750×701 , no qual cada posição linha-coluna é a estimativa de raios em uma área de $100 \times 100 \text{ m}^2$, cobrindo assim toda a região de estudo, entre $-47,0^\circ$ e $-46,3^\circ$ de longitude e entre $-24,09^\circ$ e

-23.34° aproximadamente. Para uma melhor acurácia da identificação desses hotspots, é necessário a utilização de uma grade pequena como resolução espacial, por isso foi escolhido essa alta resolução espacial.

3.3.2 GeoSampa

Para os dados geográficos, foram utilizados os dados fornecidos pelo portal GeoSampa da Prefeitura de São Paulo (http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx#). Esse portal reúne bancos de dados de instituições como das secretarias municipais, equipamentos e transportes públicos. São disponibilizadas várias camadas temáticas com informações cadastrais de áreas de educação, saúde, esportes, lazer, entre outras, além dos perímetros de zoneamento da cidade.

Esses dados são providos através de shapefiles, que fornecem todas as informações de distritos, construções, parques, entre outros locais usados nessa pesquisa.

3.3.3 TelecoCare

Para os dados de ERBs, foi utilizado os dados organizados pelo portal TelecoCare (<https://www.telecocare.com.br/mapaerbs/index.php>). Esse portal utiliza como fonte os dados da Anatel de 2022 e, através deles, foi fornecido todas as informações de antenas de celulares distribuídas por todo o país. Tendo esses dados sido filtrados para o Estado de São Paulo, foi obtida a localização de cada antena existente. Informações essas que foram utilizados na análise das regiões de hotspots.

3.4. MÉTODOS

Como a região do estudo engloba uma grande área, primeiramente para uma melhor visualização da distribuição de raios, foi obtido por ano o número de raios detectados por km² e a partir disso foi calculada a climatologia de raios/km²/ano.

Como uma segunda análise, utilizando dos dados iniciais com resolução de 100 x 100 m², foi feito um ranqueamento dos municípios da RMSP com os maiores acumulados de raios

durante todo o período de estudo. Todavia, essa quantidade acumulada em todo o território leva bastante em consideração a extensão territorial do município. Por isso, também foi calculado esse acumulado dividido pela área do município, encontrando assim a densidade de raios/km² de cada um. Após este ranqueamento, também foi feito o cálculo da probabilidade simples de queda de raios, no qual foi calculado a quantidade de dias com atividade elétrica na RMSF e a quantidade de dias com queda de raios em cada um dos municípios, sendo assim calculado a razão entre esses dois valores. Determinando qual a probabilidade de cair um raio no local, caso esteja ocorrendo uma tempestade.

Esse cálculo de probabilidade foi feito através da média de dias de tempestade para cada ano separadamente e para a média ao longo dos 5 anos. Tal que:

$$Prob(Anual) = \frac{Med_m}{Med_t} * 100\%$$

onde:

Med_m = média de dia com atividade elétrica no município/distrito;

Med_t = média de dias com atividade elétrica dentro da região de estudo.

Com essas probabilidades encontradas para cada município, também foi feito o ranqueamento dos municípios com maiores probabilidades de queda de raios. Possibilitando assim a distinção dos municípios com as maiores taxas de raios NT, através da análise desses ranqueamentos.

Em seguida, também foi feito um ranqueamento entre os distritos da Cidade de São Paulo. No qual primeiramente foi feito através da média de raios/ano, junto de seu desvio padrão e conseguinte, foi calculado esses mesmos valores mas para raios/km²/ano, após dividir pela área de cada distrito, neste caso sendo utilizada a resolução de raios em 1 x 1 km² que foi calculada anteriormente. Por fim, para uma melhor análise dos distritos com as maiores taxas, foi aplicado o mesmo cálculo de probabilidade utilizado nos municípios.

Por fim para os hotspots, primeiramente foi feito um histograma com todos os acumulados de raios nesses 4 anos, dentro de cada área 100 x 100 m², para assim ser encontrado os valores de acumulados que mais se adequam como locais de alta queda de raios. Consequentemente, escolhendo assim os locais com esse intervalo de acumulado como os hotspots a serem analisados.

Esses hotspots foram separados entre os contidos na Cidade de São Paulo e os de outros municípios, já que os dados do GeoSampa apenas contém as informações da Cidade de São Paulo. Com isso, utilizando dos dados do GeoSampa e TelecoCare, foram gerados figuras para cada um dos hotspots que fazem parte da Cidade de São Paulo, mostrando todas as informações geográficas de ruas, edificações, arborizações, parques, torres de celular, entre outros, junto de todos os pontos de queda de raios na área de 200 x 200 m² ao redor do ponto de hotspot.

Além disso, foram feitos histogramas com as alturas das edificações de cada uma dessas mesmas áreas de 200 x 200 m², através dos dados de alturas fornecidos pelo GeoSampa. Para assim se ter um melhor conhecimento da distribuição de alturas das casas na região. Também foi utilizado imagens de satélite do Google Maps para uma melhor visualização da cobertura vegetal, além de esse ter sido utilizado como uma alternativa para a análise dos hotspots contidos nos outros municípios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CLIMATOLOGIA DE RAIOS

Primeiramente, para uma melhor visualização da distribuição da quantidade de raios na área de estudo, foi calculado o acumulado de raios com uma resolução de $1 \times 1 \text{ km}^2$, para cada ano do período entre Setembro de 2017 e Outubro de 2021.

Na Figura 4.1 é mostrado esse acumulado de raios nuvem-terra por km^2 para cada ano. No geral, é observado uma linha de maior intensidade bem definida indo de nordeste a sudoeste, área esta onde está concentrado os maiores centros urbanos da região.

No ano de 2017 (Figura 4.1 a), foi observado uma pequena quantidade de queda de raios sobre a região leste da cidade de São Paulo, principalmente sobre os distritos de Itaquera e Parque do Carmo. Além de um pequeno centro de intensidade sobre o município de Arujá e Grajaú. Regiões essas quatro que são bastante arborizadas.

No ano de 2018 (Figura 4.1 b), teve uma grande região de alta intensidade de queda entre os distritos de Santo Amaro, Campo Grande e Socorro, chegando a cerca de 90 raios, além de aparecer uma boa concentração entre 40 e 80 raios na região central da Cidade de São Paulo, área essa que se manteve com uma maior taxa nos anos seguintes também.

Já em 2019 (Figura 4.1 c), há novamente uma maior intensidade sobre a divisa entre Arujá, Guarulhos e Itaquaquecetuba, e um aumento na área com maior concentração no centro da Cidade de São Paulo. O número de raios máximos encontrados neste ano é o maior durante o período de estudo, chegando a cerca de 140 raios, enquanto os outros anos se mantiveram em menos de 100.

Em 2020 (Figura 4.1 d), as regiões com maiores taxas se tornaram bem pequenas, e também esse máximo chegou a ser menos da metade do número de queda de raios do ano anterior, se concentrando mais na região norte e nordeste.

Por fim, em 2021 (Figura 4.1 e), a taxa máxima voltou a aumentar um pouco, porém apenas ocorreu em uma pequena área de Taboão da Serra, Guarulhos, Tatuapé e Penha.

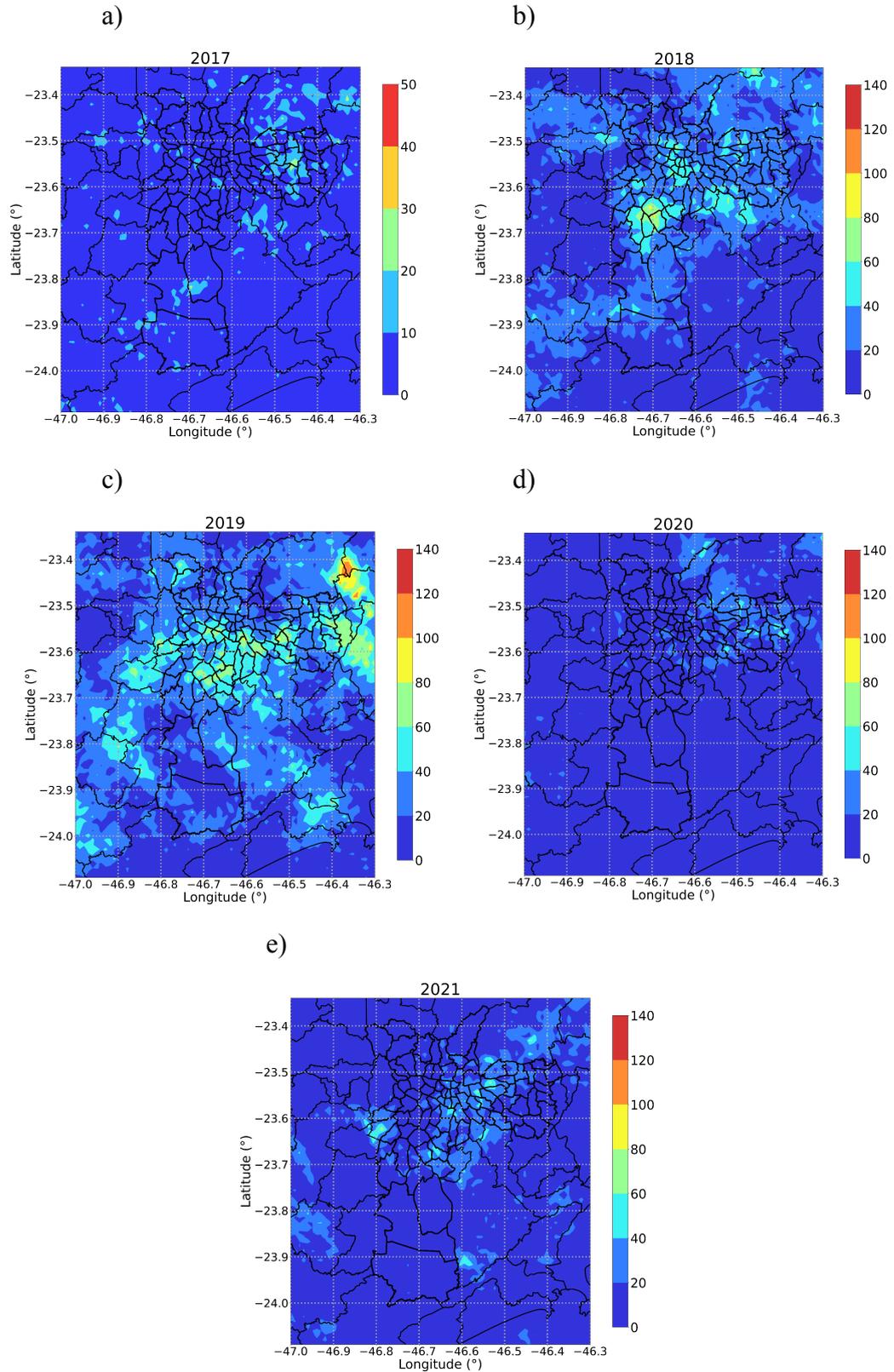


Figura 4.1 - Acumulado de raios (raios/km²). a) Setembro a Dezembro de 2017; b) ano inteiro de 2018; c) ano inteiro de 2019; d) ano inteiro de 2020; e) Janeiro a Outubro de 2021.

A partir desses dados anuais, foi feita a climatologia desse período, no qual foi calculado a quantidade de total de raios por km² durante todo o período e dividido pelos 4 anos de dados, obtendo assim a quantidade de raios/km²/ano que é mostrado na Figura 4.2. Nela é observado uma maior concentração sobre o centro da cidade de São Paulo, que se estende até a Zona Leste e os municípios que fazem fronteira com ela ao norte, pega parte Santo André, São Bernardo do Campo e São Caetano do Sul e desce para o início da Zona Sul.

Há um grande foco entre a Vila Mariana e Liberdade, na região onde fica o parque da Aclimação e o cemitério da Vila Mariana. Além de também haver um outro foco no Jardim Paulista e em Santo Amaro, em uma região onde também há um parque nos dois locais, e um foco sobre o Pico do Jaraguá, região essa de mata com várias torres. Enquanto que a fronteira entre Guarulhos, Arujá e Itaquaquecetuba possuem o maior foco fora da cidade de São Paulo.

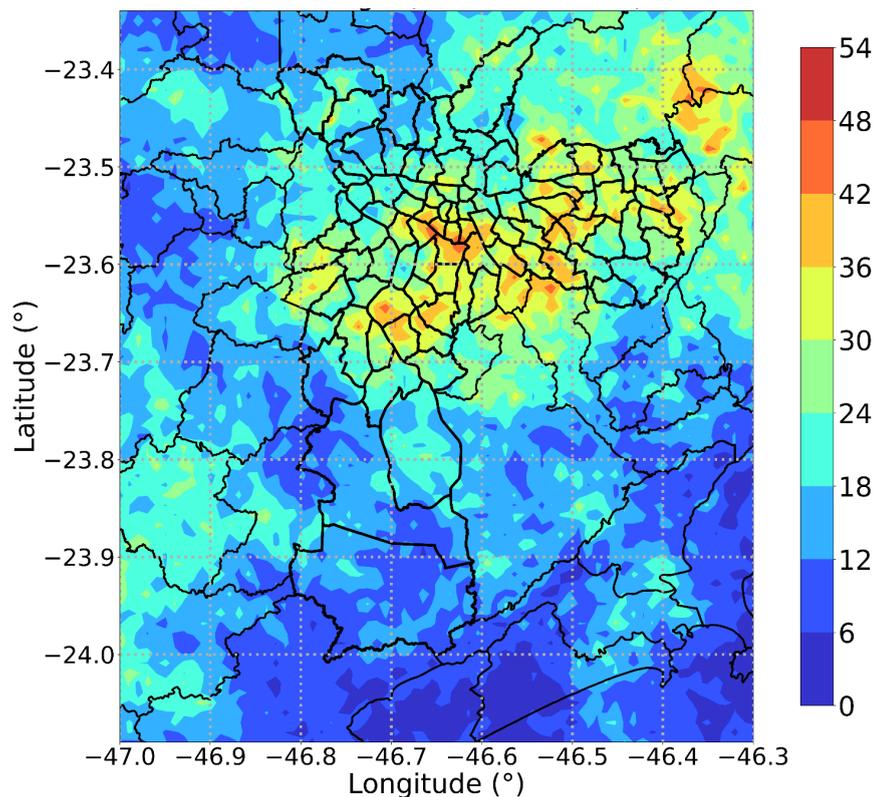


Figura 4.2 - Climatologia de raios nuvem-terra detectados pela LINET (raios/km²/ano).

4.2. IDENTIFICAÇÃO DOS MUNICÍPIOS COM MAIORES TAXAS

Com o intuito de analisar a diferença da taxa de queda de raios entre os municípios, foi calculado o acumulado ocorrido em cada um deles, sendo este mostrado na Figura 4.3a. Nesta figura, fica bem claro o quanto São Paulo se destaca em relação ao redor. Enquanto os outros municípios possuem uma queda inferior a 30000 raios, São Paulo passa dos 100000 raios. Nela também é possível ver que São Bernardo do Campo e Guarulhos possuem uma taxa um pouco maior em relação aos outros locais. Na Tabela 4.1 é mostrado esses mesmos acumulados de cada município, em um ranking com os vinte primeiros municípios com maiores acumulados.

Entretanto, nessa comparação também é preciso levar em consideração a extensão territorial, que favorece a quantidade ao ser calculado esse acumulado. Por isso na Figura 4.3b é mostrado esse mesmo acumulado, porém dividido pela área de cada município. Nessa figura a Cidade de São Paulo tem uma menor intensidade de raios. Já o município mais intenso é São Caetano do Sul, que inclusive é bem mais intenso que ao redor, chegando a 128 raios/km², e conseguinte vem Taboão da Serra, Ferraz de Vasconcelos, Itaquaquecetuba e Poá, nos quais possuem entre 112 e 93 raios/km².

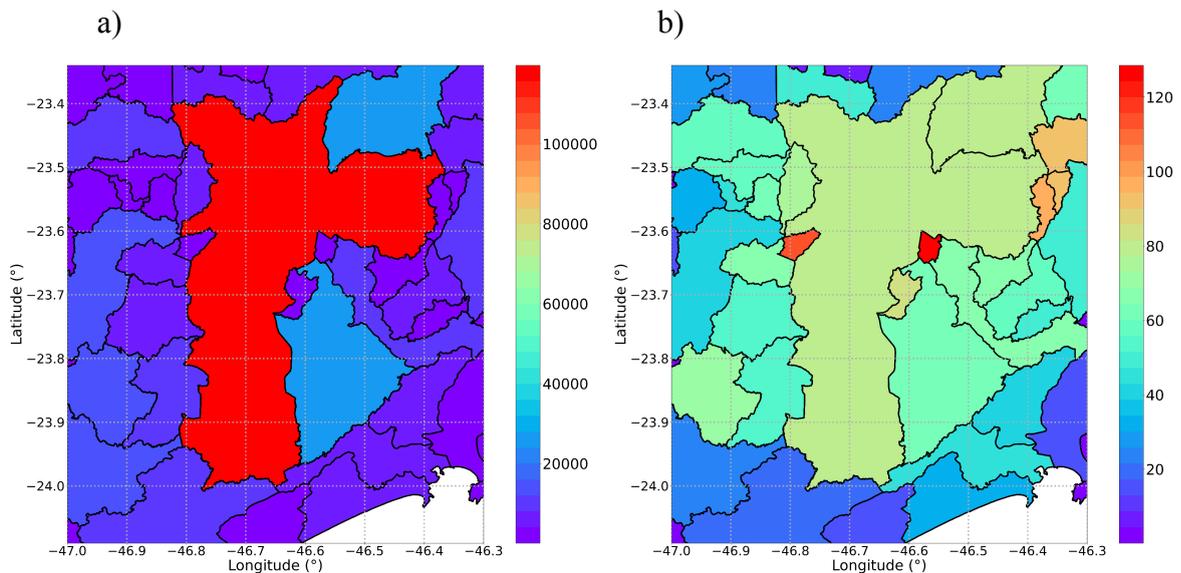


Figura 4.3 - Acumulado de raios nuvem-terra detectados pela LINET para cada município, durante todo o período de Setembro de 2017 até Outubro de 2021. a) raios totais, b) raios por km².

Tabela 4.1 - Ranking dos 20 primeiros municípios com o maior número acumulado de queda de raios durante todo o período de Setembro de 2017 até Outubro de 2021.

Ranking	Município	Acumulado de raios NT
1	SÃO PAULO	119653
2	SÃO BERNARDO DO CAMPO	24467
3	GUARULHOS	24267
4	COTIA	13053
5	SÃO LOURENÇO DA SERRA	12872
6	JUQUITIBA	12720
7	SANTO ANDRÉ	11446
8	ITANHAÉM	10463
9	SUZANO	10264
10	SANTANA DE PARNAÍBA	10040
11	EMBU-GUAÇU	8339
12	ITAPECERICA DA SERRA	8017
13	ITAQUAQUECETUBA	7574
14	MAIRIPORÃ	6973
15	SÃO VICENTE	6307
16	ARUJÁ	6035
17	CUBATÃO	5985
18	RIBEIRÃO PIRES	5486
19	OSASCO	4699
20	CAIEIRAS	4538

A seguir, foi feito o cálculo da probabilidade simples de queda de raios, no qual foi calculado a quantidade de dias com atividade elétrica na RMSP e a quantidade de dias com queda de raios em cada um dos municípios. Sendo feito a razão entre esses dois valores.

Na Tabela 4.2 é mostrado essas probabilidades encontradas, na qual a cidade de São Paulo possui uma chance de quase 78% de ocorrer queda de raio caso haja uma tempestade na RMSP, ou seja uma chance bem alta se comparado aos outros municípios. Guarulhos vem em segundo lugar com uma probabilidade de cerca de 51%, logo cerca de 27% menor que São Paulo. Sendo estas as probabilidades feitas através da média de dias com atividade elétrica para todo o período de estudo.

Também foi feito esse mesmo cálculo para a quantidade média anual de dias com atividade elétrica, sendo esta também mostrada nessa tabela. Nela é observado que essa probabilidade possui uma pequena variação de ano para ano, que pode chegar a 20% de diferença. Sendo observado essa maior incidência de queda de raios durante o ano de 2019, como visto na Figura 4.1.

Tabela 4.2 - Ranking dos 20 primeiros municípios com a maior probabilidade de queda de raios, para as médias anuais separadamente e a média ao longo dos 5 anos.

Ranking	Município	Probabilidade (%)					
		Média dos 5 anos	2017	2018	2019	2020	2021
1	SÃO PAULO	77,94	78,57	69,23	83,94	80,65	81,61
2	GUARULHOS	52,47	46,43	42,01	58,39	56,99	54,02
3	SÃO BERNARDO DO CAMPO	50,06	46,43	43,79	56,93	49,46	59,77
4	SANTO ANDRÉ	48,37	41,07	42,01	52,55	50,54	51,72
5	SUZANO	47,51	42,86	37,28	52,55	52,69	42,53
6	MAIRIPORÃ	44,26	42,86	36,69	42,34	53,76	43,68
7	COTIA	44,26	50,00	37,28	48,18	47,31	55,17
8	SANTANA DE PARNAÍBA	43,32	46,43	38,46	45,26	46,24	42,53
9	SÃO LOURENÇO DA SERRA	41,13	32,14	42,01	41,61	39,78	49,43
10	JUQUITIBA	40,56	28,57	36,69	43,07	41,94	41,38
11	RIBEIRÃO PIRES	40,27	33,93	32,54	45,26	43,01	34,48
12	SANTOS	39,84	37,50	42,01	45,26	32,26	34,48
13	CAIEIRAS	39,49	55,36	33,14	42,34	43,01	36,78
14	ITANHAÉM	38,93	32,14	36,09	43,07	37,63	42,53
15	CUBATÃO	37,79	30,36	35,50	44,53	33,33	40,23
16	SÃO VICENTE	37,05	28,57	37,28	41,61	32,26	32,18
17	ITAQUAQUECETUBA	36,40	39,29	30,77	36,50	41,94	37,93
18	EMBU-GUAÇU	36,29	32,14	42,01	31,39	35,48	41,38
19	OSASCO	36,00	41,07	31,36	35,77	40,86	39,08
20	CAJAMAR	34,83	39,29	29,59	39,42	35,48	27,59

Algo que se destacou também nesse ranqueamento, é o fato de as últimas posições terem uma probabilidade muito baixa se comparada aos municípios das outras posições. Em particular, Mogi das Cruzes, Ibiúna e São Roque, que obtiveram uma probabilidade de menos de 8% de cair um raio, como mostrado na Tabela 4.3. Isso se deve ao fato de estes municípios serem bem menores do que os outros, sendo que os últimos três citados, tinham apenas uma pequena parte de sua extensão dentro da área de estudo. Logo, estes cálculos de probabilidade variam bastante de acordo com a extensão territorial.

Tabela 4.3 - Ranking dos 10 últimos municípios com a maior probabilidade de queda de raios, para as médias anuais separadamente e a média ao longo dos 5 anos.

Ranking	Município	Probabilidade (%)					
		Média dos 5 anos	2017	2018	2019	2020	2021
34	POÁ	25,71	23,21	20,71	28,47	27,96	26,44
35	SÃO CAETANO DO SUL	25,50	25,00	21,89	27,74	26,88	29,89
36	TABOÃO DA SERRA	23,92	21,43	18,93	27,01	25,81	31,03
37	MONGAGUÁ	20,15	23,21	24,26	18,98	17,20	24,14
38	JANDIRA	17,41	25,00	18,93	18,25	15,05	20,69
39	VARGEM GRANDE PAULISTA	15,87	19,64	17,16	19,71	10,75	20,69
40	PEDRO DE TOLEDO	12,13	8,93	12,43	17,52	6,45	13,79
41	GUARUJÁ	12,06	12,50	14,79	13,87	7,53	13,79
42	MOGI DAS CRUZES	7,95	8,93	5,33	13,14	5,38	6,90
43	IBIÚNA	6,19	3,57	4,14	5,84	8,60	13,79
44	SÃO ROQUE	5,49	8,93	4,14	8,03	4,30	3,45

Comparando com os dados da Figura 4.3, é observado que esses ranqueamentos possuem as mesmas tendências de municípios com os maiores acumulados. Apesar de estes terem ficado em posições diferentes em cada um, as 20 primeiras posições são ocupadas em sua maior parte pelos mesmos municípios. Ou seja, São Paulo, São Bernardo do Campo, Guarulhos, Santo André, Santana de Parnaíba, São Lourenço da Serra, Ribeirão Pires, Embu-Guaçu, Osasco e Itaquaquecetuba são os municípios com a maior tendência de queda de raios. Esses municípios ocupam as 20 primeiras posições tanto no ranqueamento de probabilidade como no acumulado geral de queda e no acumulado de raios/km².

4.3. ESTATÍSTICAS DOS DISTRITOS

Para avaliar melhor a distribuição da queda de raios entre os distritos da cidade de São Paulo, foi calculado a média de raios por ano e seu desvio padrão, para cada um desses distritos.

Na Tabela 4.4, é mostrado os primeiros 20 lugares do ranking de queda de raios por ano. Nela fica bem claro a questão da extensão territorial, assim como comentado no ranking de municípios, sendo os primeiros lugares justamente os maiores distritos da cidade. Pensando em como fazer um ranqueamento que não levasse em conta a extensão territorial, na Tabela 4.5 foi calculado a densidade média de raios/km²/ano para cada um desses distritos. Nessa tabela é observado agora os distritos com a maior tendência de intensidade de raios NT, onde a Liberdade se destaca um pouco em relação aos outros distritos, possuindo uma média de raios de cerca de 3 raios/km² maior do que a República que está em segundo lugar. Devido a grande variação anual na quantidade de raios, o desvio padrão é bem alto, o que mostra que a tendência dos distritos pode variar bastante de ano para ano.

Tabela 4.4 - Ranking dos 20 primeiros distritos com a maior média de queda de raios por ano.

Ranking	Distrito	Raios/ano	Desvio Padrão
1	MARSILAC	2127,00	1190,20
2	PARELHEIROS	1692,25	974,46
3	GRAJAU	1510,50	886,27
4	TREMEMBE	1105,50	467,13
5	JARDIM SAO LUIS	650,50	429,28
6	ANHANGUERA	580,50	313,87
7	CIDADE DUTRA	542,75	334,41
8	SANTO AMARO	515,75	376,32
9	JABAQUARA	476,75	292,71
10	JARDIM ANGELA	468,25	265,02
11	JARAGUA	467,75	247,74
12	CANGAIBA	453,00	167,94
13	ITAQUERA	451,75	126,24
14	PEDREIRA	416,50	238,34
15	SAPOEMBA	406,25	183,30
16	PERUS	391,50	255,52
17	CAMPO GRANDE	383,00	281,82
18	IGUATEMI	360,50	213,49
19	CURSINO	346,25	182,57
20	IPIRANGA	339,75	204,12

Tabela 4.5 - Ranking dos 20 primeiros distritos com a maior média de queda de raios por km² por ano.

Ranking	Distrito	Raios/km ² /ano	Desvio Padrão
1	LIBERDADE	42,57	41,48
2	REPUBLICA	39,17	38,51
3	PARI	39,06	38,31
4	CONSOLACAO	38,34	37,32
5	JARDIM PAULISTA	37,63	36,00
6	JABAQUARA	34,60	31,27
7	ERMELINO MATARAZZO	34,32	32,06
8	VILA MARIANA	32,78	30,81
9	SANTO AMARO	32,71	29,18
10	CARRAO	32,39	30,59
11	BRAS	32,04	31,22
12	SAO LUCAS	31,91	29,74
13	LAJEADO	31,83	29,89
14	IPIRANGA	31,40	29,01
15	ITAQUERA	31,19	27,96
16	SAO MIGUEL	30,78	28,91
17	SAPOEMBA	30,33	27,45
18	VILA FORMOSA	30,13	28,55
19	CAMPO GRANDE	30,07	27,42
20	CIDADE LIDER	29,52	27,39

Para uma melhor visualização geográfica desses resultados, eles foram organizados no mapa da cidade, como mostrado na Figura 4.4. Nela é observado que a maior concentração de raios está no centro da cidade e se estende até a zona leste em uma média entre 30 e 40 raios/km²/ano, sendo a Liberdade, República, Pari, Consolação e Jardim Paulista um grande foco de queda. Com a menor intensidade, estão Jardim Ângela, Parelheiros e Marsilac (da maior intensidade para a menor, respectivamente), que possuem uma média de menos de 13 raios/km²/ano, evidenciando assim a importância da extensão da área territorial, como visto na Tabela 4.4, na qual Marsilac e Parelheiros eram os distritos com a maior intensidade.

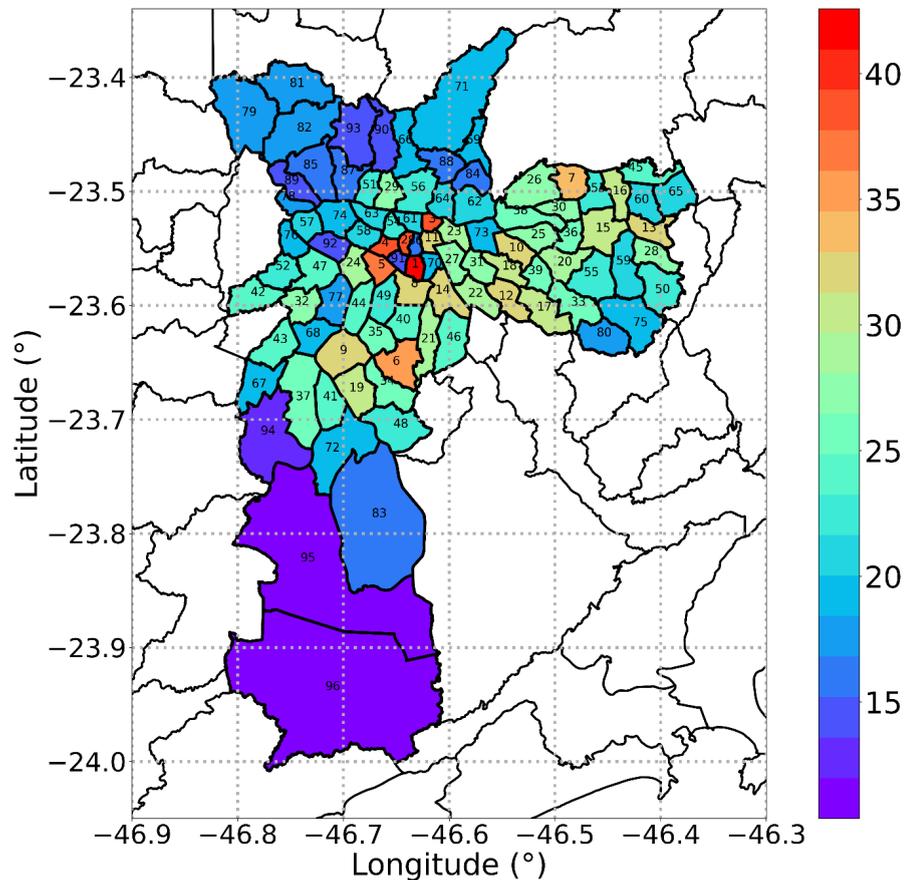


Figura 4.4 - Média de raios/km²/ano para cada distrito da cidade de São Paulo. Os números indicam as respectivas posições de cada distrito no ranking.

Para analisar a diferença entre os locais que tiveram as maiores e menores taxas, na Figura 4.5 e Figura 4.6 são mostrados os histogramas de todas as edificações contidas nos distritos, no qual a Liberdade, República e Pari são os três distritos com as maiores taxas, e Jardim Ângela, Parelheiros e Marsilac os três últimos distritos do ranking mostrado na Figura

4.4. Neles é observado que os distritos com as maiores taxas de raios, possuem mais edificações com alturas maiores, enquanto os três outros distritos não passam de alturas de mais de 20 metros, principalmente Marsilac que não tem quase nada de edificação. Dessa forma é possível concluir que os distritos mais urbanizados e com mais prédios possuem taxas bem maiores do que os locais que são mais regiões de mata.

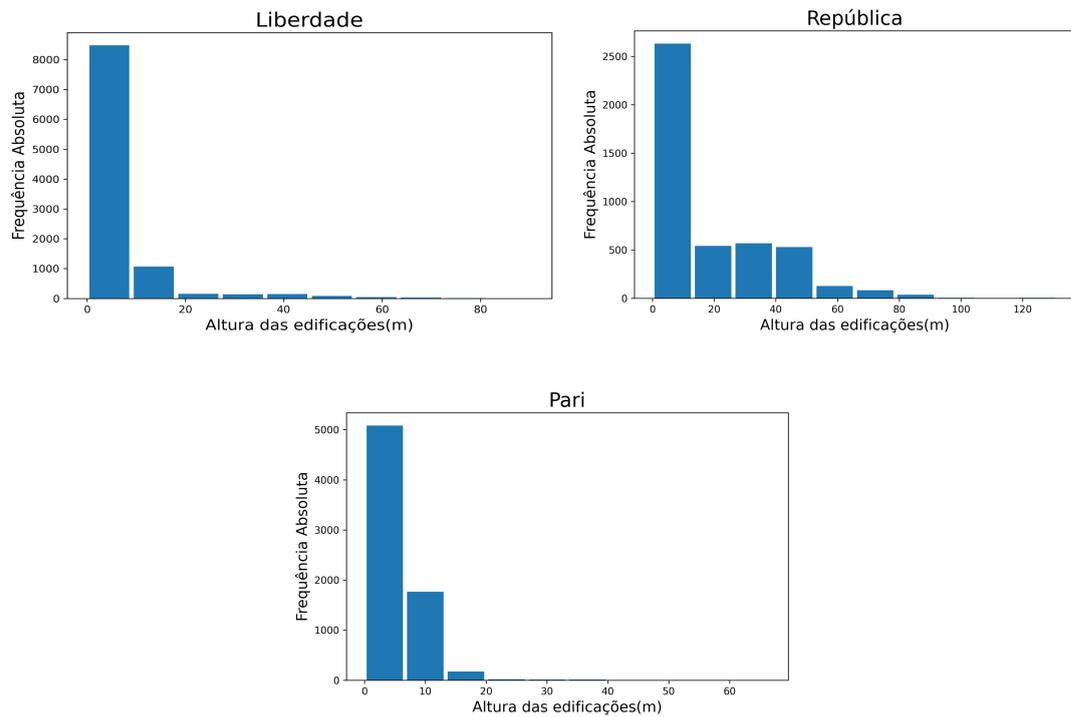


Figura 4.5 - Histogramas das alturas das edificações dos três distritos com as maiores taxas de raios/km²/ano.

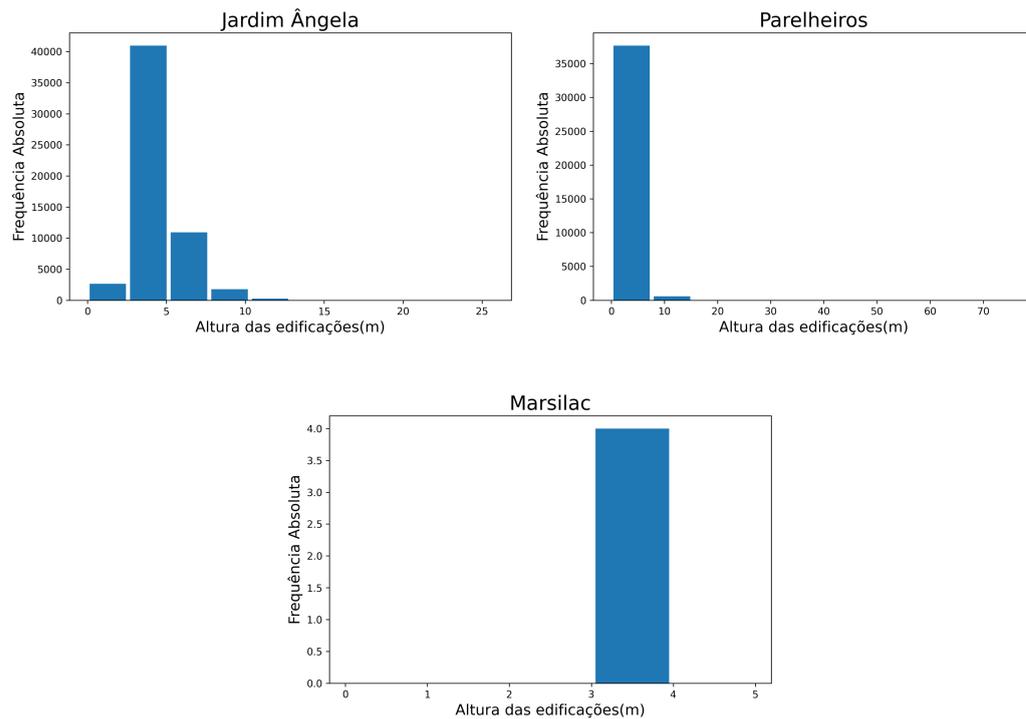


Figura 4.6 - Histogramas das alturas das edificações dos três distritos com as menores taxas de raios/km²/ano.

Na Tabela 4.6 é mostrado o ranking das probabilidades encontradas, no qual Parelheiros se encontra em primeiro lugar, com uma probabilidade de cerca de 38% de cair raios. Diferente da análise das probabilidades dos municípios, a diferença de valores entre as posições desse ranqueamento não é muita, onde o primeiro lugar (Parelheiros) tem uma probabilidade 25% maior que o último lugar (Sé). Enquanto que nos municípios essa diferença era de cerca de 72%.

Tabela 4.6 - Ranking dos 20 primeiros distritos com a maior probabilidade de queda de raios, para as médias anuais separadamente e a média ao longo dos 5 anos.

Ranking	Distrito	Probabilidade (%)					
		Média dos 5 anos	2017	2018	2019	2020	2021
1	PARELHEIROS	38,19	37,50	37,87	37,96	34,41	42,53
2	GRAJAU	35,85	23,21	33,73	39,42	31,18	39,08
3	TREMEMBE	35,18	39,29	28,40	37,96	38,71	35,63
4	MARSILAC	34,07	35,71	37,28	32,12	30,11	36,78
5	JARDIM ANGELA	30,60	21,43	28,40	33,58	23,66	36,78
6	JARDIM SAO LUIS	30,49	23,21	23,67	35,77	26,88	35,63
7	CIDADE DUTRA	29,86	25,00	28,99	35,77	23,66	31,03
8	JARAGUA	27,11	37,50	21,30	30,66	31,18	25,29
9	CANGAIBA	26,55	25,00	22,49	28,47	32,26	22,99
10	IGUATEMI	26,52	23,21	21,89	34,31	26,88	22,99
11	BRASILANDIA	26,41	35,71	20,12	29,20	33,33	22,99
12	SACOMA	26,36	30,36	18,93	27,74	31,18	27,59
13	CURSINO	26,14	28,57	17,75	27,74	26,88	32,18
14	ITAQUERA	26,12	25,00	24,26	24,82	30,11	25,29
15	PENHA	25,89	25,00	16,57	26,28	36,56	24,14
16	ANHANGUERA	25,48	28,57	20,71	29,20	29,03	22,99
17	PARQUE DO CARMO	25,45	25,00	18,34	29,20	30,11	24,14
18	SAOPEMBA	25,42	23,21	19,53	25,55	29,03	27,59
19	SAO LUCAS	25,31	17,86	23,67	25,55	29,03	22,99
20	IPIRANGA	25,24	21,43	18,34	26,28	33,33	22,99

Tabela 4.7 - Ranking dos 10 últimos distritos com a maior probabilidade de queda de raios, para as médias anuais separadamente e a média ao longo dos 5 anos.

Ranking	Distrito	Probabilidade (%)					
		Média dos 5 anos	2017	2018	2019	2020	2021
86	JAGUARA	16,47	14,29	14,20	18,25	15,05	18,39
87	BRAS	16,11	8,93	13,02	16,06	20,43	14,94
88	BOM RETIRO	15,76	12,50	10,06	17,52	19,35	16,09
89	PARI	15,40	8,93	9,47	14,60	22,58	14,94
90	CAMBUCI	15,11	10,71	11,24	11,68	22,58	14,94
91	BELA VISTA	14,88	12,50	9,47	14,60	19,35	16,09
92	CONSOLACAO	14,64	16,07	10,06	17,52	17,20	13,79
93	LIMAO	14,25	14,29	8,88	20,44	15,05	12,64
94	REPUBLICA	13,75	10,71	9,47	14,60	18,28	12,64
95	SANTA CECILIA	13,54	12,50	10,65	14,60	13,98	14,94
96	SE	13,10	3,57	11,24	8,03	19,35	13,79

Comparando esses ranqueamentos, é observado que o ranking de probabilidades ficou bem parecido com o ranking de raios/ano (Tabela 4.4), logo ela também leva bastante em questão a extensão territorial do distrito. Dos distritos que se destacaram por estar em boas posições nesses três métodos de ranqueamento, estão Santo Amaro, Jabaquara, Cangaíba, Itaquera, Sapopemba e Cursino.

4.4. HOTSPOTS

Se a atividade elétrica não possuísse fatores que a intensificasse, a distribuição de raios seria algo uniforme sobre todas as regiões. Entretanto, como existem diversos fatores que a favorecem, as regiões que contêm esses aspectos favorecidos possuem uma maior concentração de número de raios, sendo assim possível ver picos de densidades de raios sobre algumas regiões, enquanto outras possuem menores quantidades. Essas regiões com maiores densidades são denominadas hotspots.

Primeiramente, para mostrar essa tendência de existência de hotspots, foi gerado um histograma com o total acumulado de raios NT durante os 4 anos de dados, em cada área de $100 \times 100 \text{ m}^2$ dentro da RMSP, sendo este mostrado na Figura 4.7. Nota-se nela que mais de 50% dos dados estão dentro de menos de 1 raio por área, e essa frequência diminui rapidamente conforme o número de raios aumenta. Para uma melhor visualização dessa frequência, na Figura 4.7b é mostrado esse mesmo histograma para uma quantidade maior que 6 raios. Nele é observado que menos de 0,2% dos dados se tratam de áreas com mais de 6 raios NT acumulados. Logo, locais com um acumulado de queda de mais de 6 raios, podem ser considerados um hotspot.

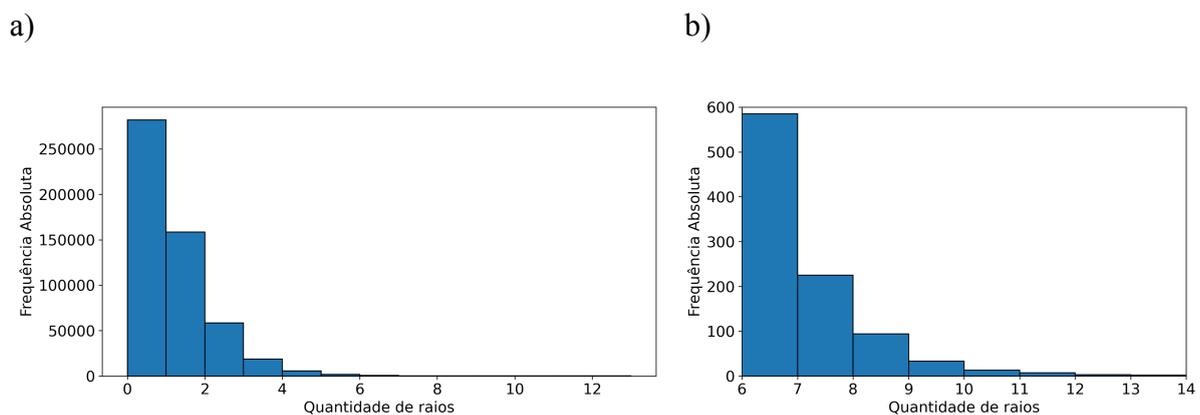


Figura 4.7 - Histograma do acumulado de raios em cada área $100 \times 100 \text{ m}^2$, para todo o período de estudo. a) quantidade total de raios, b) zoom para o acumulado acima de 6 raios.

Com isso, foi feito um ranking desses hotspots, no qual foram escolhidos os locais de $100 \times 100 \text{ m}^2$ que possuem 10 ou mais raios, totalizando 25 hotspots. Sendo essa escolha por conveniência de quantidade de áreas a serem analisadas, pois quanto menor fosse o valor de

acumulado de raios, maior seria a quantidade de locais, por exemplo os locais com no mínimo 9 raios passavam de 60 hotspots.

Na Figura 4.8, é mostrado todos esses 25 lugares junto da quantidade acumulada de raios. O maior acumulado é de 13 raios e fica no Jaraguá e em Cubatão, em seguida vêm um local no Jardim São Luís, Sapopemba e São Vicente com 12 raios. Com o menor número de raios desse ranking, estão Embu-Guaçu, Santana de Parnaíba, Jardim Paulista, Pari, Penha, Santo André, Guarulhos, Ferraz de Vasconcelos, Suzano e mais um local no Jaraguá e em Cubatão, com um acumulado de 10 raios. Também vale ressaltar o fato de que nesse ranking, há 2 locais de hotspot no Jaraguá, Itaquaquecetuba, Suzano e Guarulhos. Além disso, desses 25 locais que foram encontrados, 11 deles estão na Cidade de São Paulo.

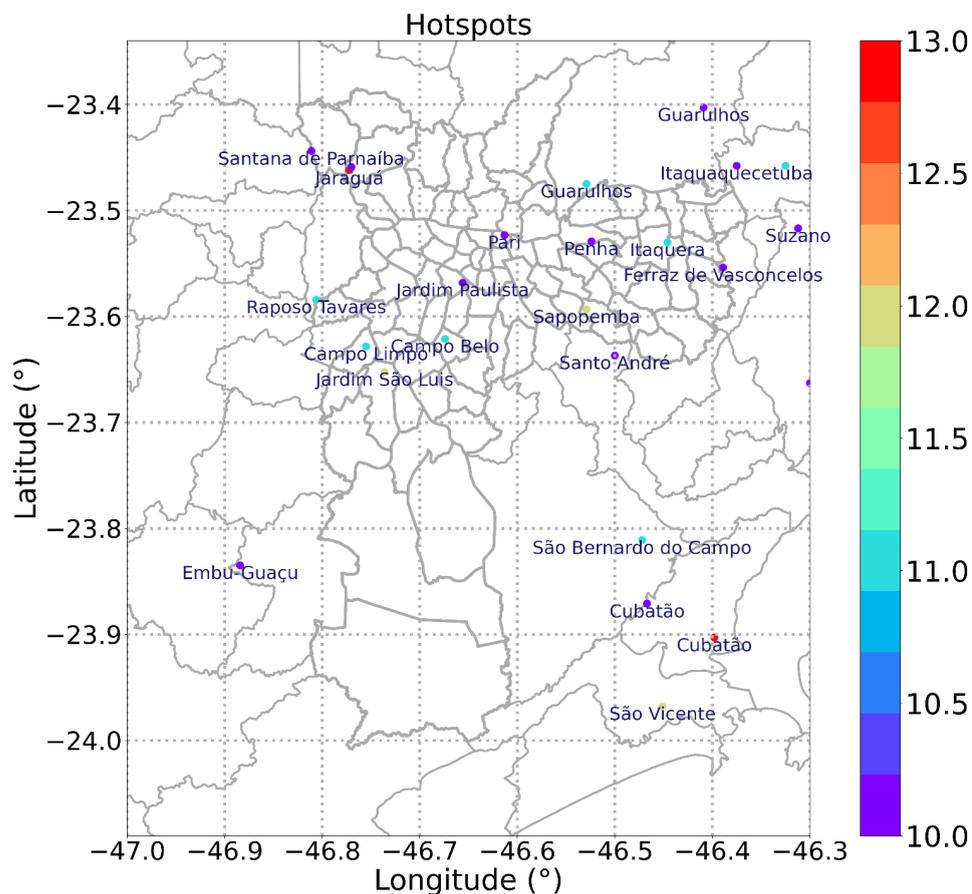


Figura 4.8 - Hotspots com 10 raios ou mais acumulado durante o período de 2017 a 2021. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m².

4.4.1 Análise dos locais com 10 ou mais raios acumulados

Utilizando dos dados do GeoSampa e TelecoCare, foram gerados figuras para cada um dos hotspots dessa análise que fazem parte da Cidade de São Paulo, já que os dados do GeoSampa se limitam à essa área. Nessas figuras foram adicionados os pontos de acumulados de queda de raios, sendo estes pontos áreas de 100 x 100 m². Este acumulado se trata da soma de todos os raios que caíram em cada uma dessas áreas, durante o período contido em 2017 e 2021. Além disso, foram feitos histogramas com as alturas das edificações de cada uma dessas mesmas áreas mostradas nas figuras. Também foi utilizado imagens de satélite do Google Maps para uma melhor visualização da região, principalmente para os outros municípios nos quais não há dados do GeoSampa.

4.4.1.1 Hotspots da Cidade de São Paulo

A seguir, são mostrados alguns desses hotspots que estão dentro da Cidade de São Paulo. Na Figura 4.9, é visto os dois hotspots no Pico do Jaraguá, onde um possui um acumulado de 13 raios e o outro de 10 raios. Há também vários outros pontos de queda ao redor das duas regiões, nos quais as cores indicam esse acumulado de raios durante o período de estudo, como observado na Figura 4.9a. Nessa figura, a linha cinza indica a posição de uma rua que passa pela área.

Na imagem de satélite da Figura 4.9b é observado que se trata de uma região de mata sem construções ao redor e o TelecoCare não identificou nenhuma torre de celular, apesar de haver muitas torres de transmissões. Além disso, nota-se também que mesmo sendo uma área de mata, os dados do GeoSampa não identificaram nenhuma árvore ou local de conservação, o que mostra certa imprecisão desses dados, e a necessidade do reforço das imagens de satélite para uma melhor análise.

O Pico do Jaraguá possui nove pontos (áreas de 100 x 100 m²) onde houve um acumulado de queda de mais de 6 raios, sendo este o maior foco de hotspot na região. O que já era esperado, por ser o local mais alto de São Paulo, possuindo 1135 metros de altura, além de se encontrar isolado de outras montanhas e possuir várias antenas em seu topo.

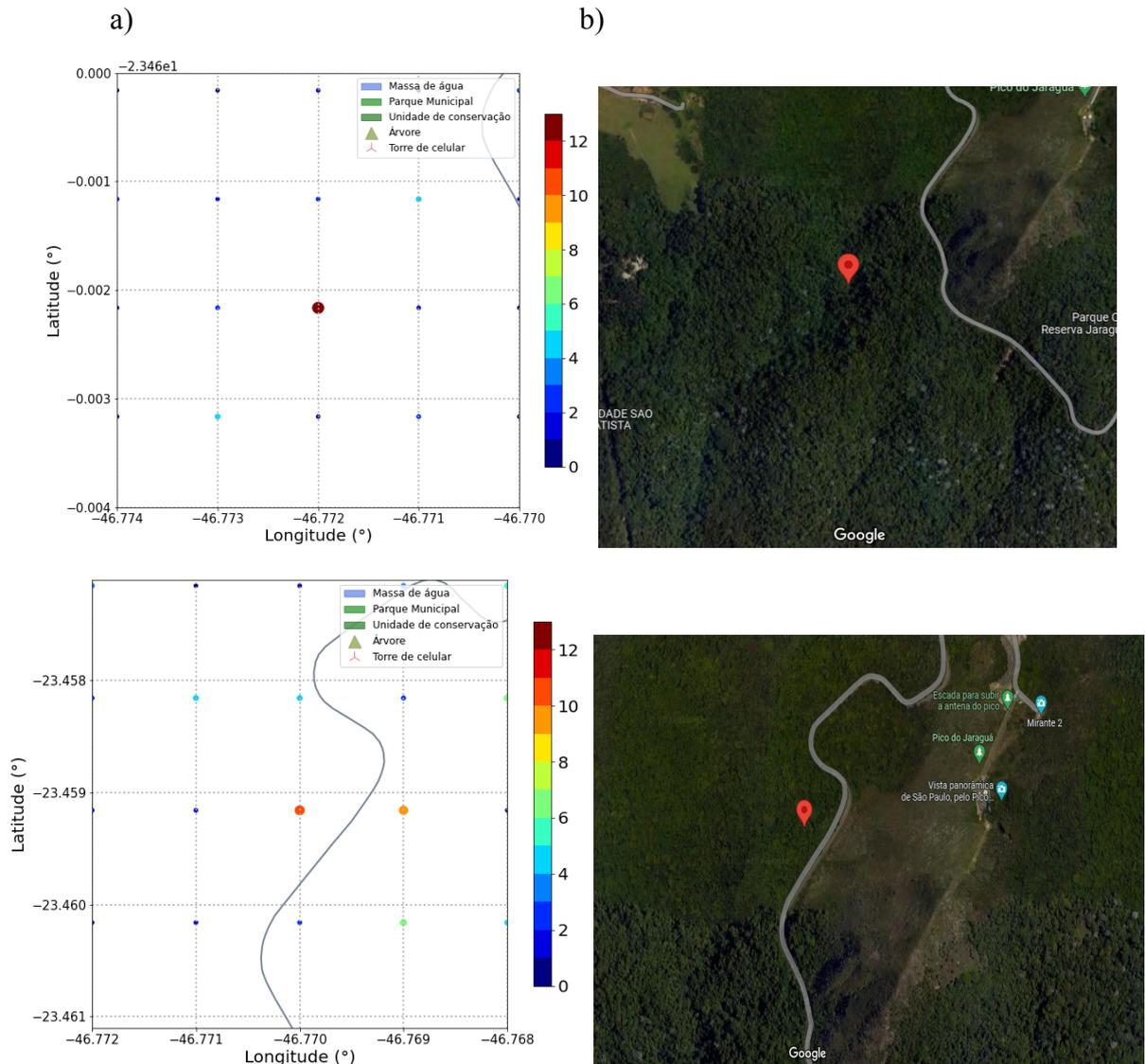


Figura 4.9 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para os dois hotspots no Jaraguá. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m², b) imagem de satélite do Google Maps.

Já no Sapopemba (Figura 4.10 e 4.11), o hotspot de 12 raios está ao lado do que o GeoSampa identificou como um parque, apesar de ser apenas uma fila estreita de árvores. O local se trata apenas de uma área normal de edificações baixas no geral, como visto no histograma feito para essa mesma área da Figura 4.10a. Já o ponto em questão de queda, é uma casa de apenas um andar.

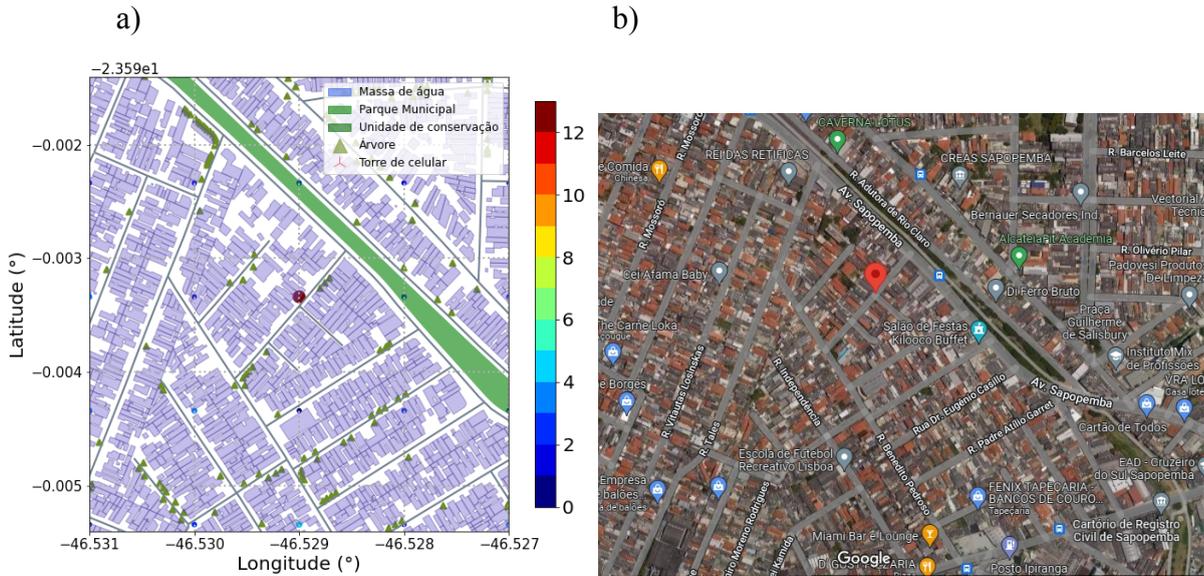


Figura 4.10 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para o hotspot no Sapopemba. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m², b) imagem de satélite do Google Maps.

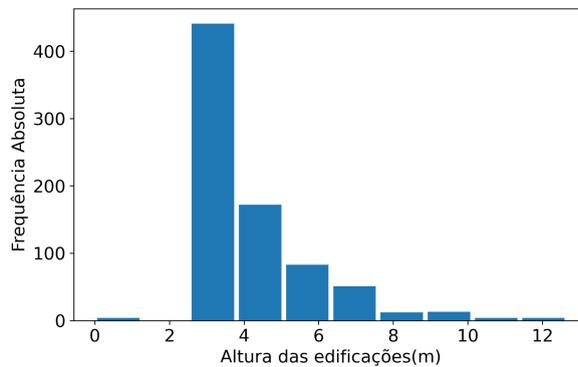


Figura 4.11 - Histograma da altura das edificações, segundo o GeoSampa, para o hotspot no Sapopemba.

No local em Campo Belo (Figura 4.12 e 4.13), houve um acumulado de 11 raios. A região possui vários condomínios altos, com bastante arborização, quadras esportivas e várias torres de celular, o que possivelmente justificam a grande queda de raios na região. Sendo que o ponto das quedas de raios provavelmente se trata de um para-raios no topo do edifício.

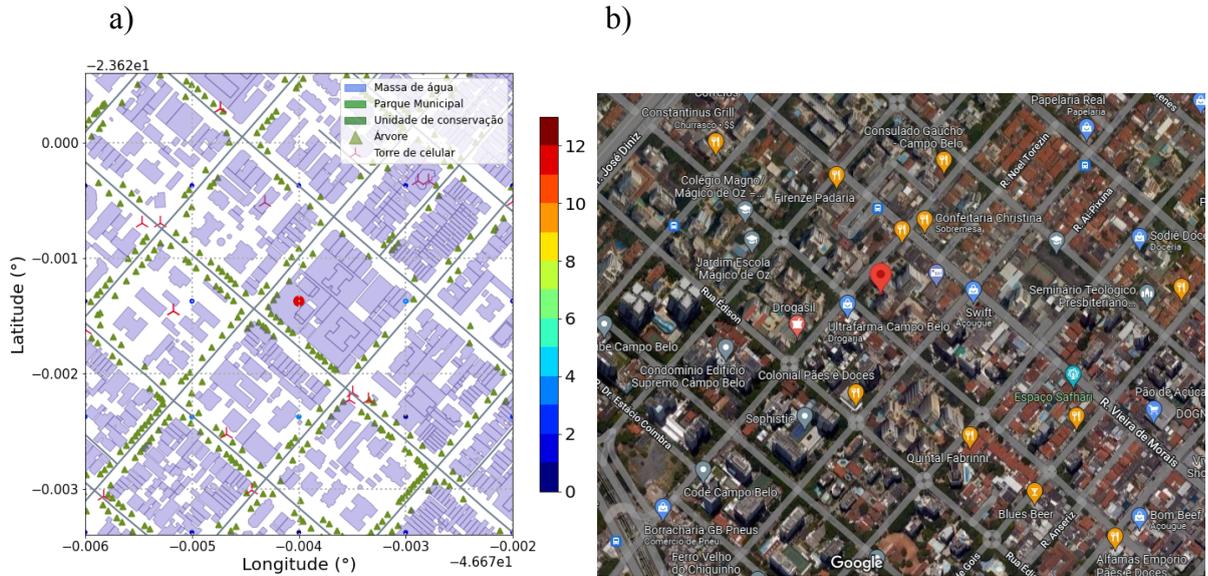


Figura 4.12 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para o hotspot no Campo Belo. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m², b) imagem de satélite do Google Maps.

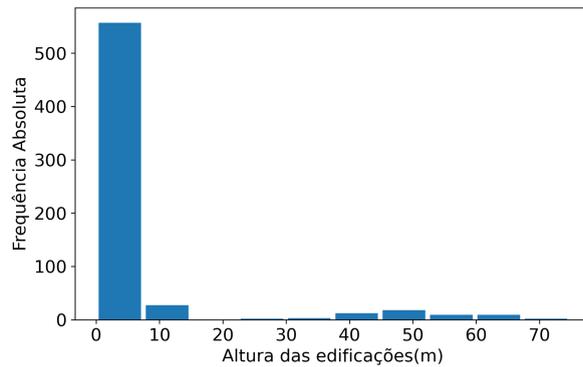


Figura 4.13 - Histograma da altura das edificações, segundo o GeoSampa, para o hotspot no Campo Belo.

Por fim, para o hotspot em Pari, (Figura 4.14 e 4.15), houve uma queda de 10 raios. A região fica bem na beira do Rio Tietê e possui várias árvores ao redor, além de ter algumas edificações um pouco mais altas espalhadas e duas torres de celular. Já o ponto de hotspot em questão, se trata de um petshop de três andares.

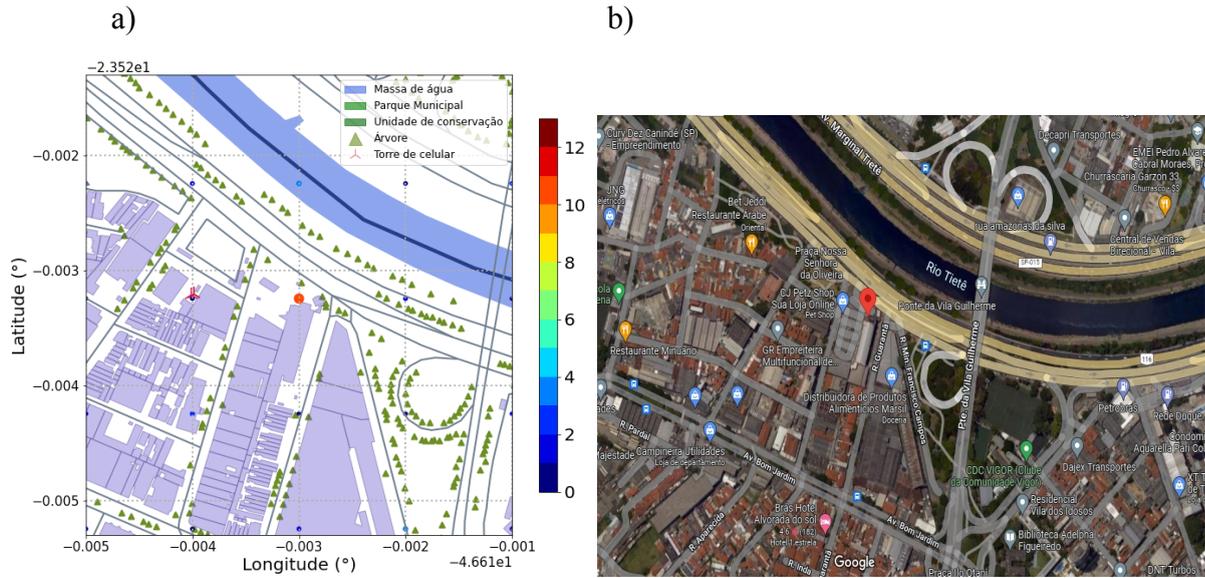


Figura 4.14 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para o hotspot no Pari. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m², b) imagem de satélite do Google Maps.

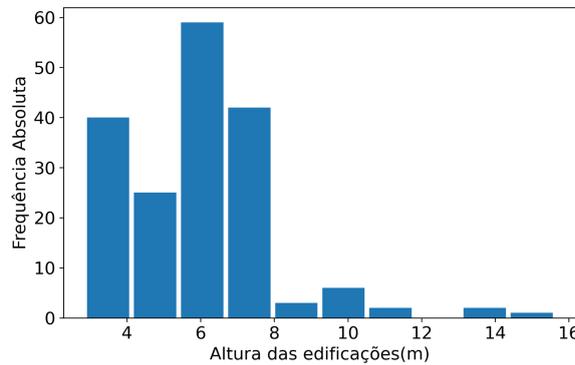


Figura 4.15 - Histograma da altura das edificações, segundo o GeoSampa, para o hotspot no Pari.

Em geral para os outros seis hotspots contidos na Cidade de São Paulo, que foram mostrados na Figura 4.8 e estão contidos no Apêndice A. Em quatro deles se tratava de uma região com torres de celular ao redor, com algumas edificações mais altas espalhadas e arborização, onde um deles também era uma região de condomínios, assim como o hotspot em Campo Belo. Já os outros dois hotspots, possuíam bastante arborização próxima, e também algumas construções um pouco mais altas dispersas pela área.

Ao observar os histogramas de alturas, foi constatado que em sua maioria, as regiões não passavam de edificações com mais de 20 m de altitude, onde a moda é baixa, sendo menor que 6 m. Com exceção do hotspot em Campo Belo e no Jardim Paulista, onde as

altitudes passaram de 70 m. Todavia, mesmo nesses dois locais, a moda era de menos de 10 m de altitude.

4.4.1.2 Hotspots de outros municípios

A seguir, são mostrados alguns dos hotspots encontrados nos outros municípios da RMSP. em primeiro lugar empatado com o Jaraguá no maior acumulado de raios está o hotspot de Cubatão, mostrado na Figura 4.16a, que também teve a ocorrência de 13 raios. Sendo uma região de mangue à beira de um rio, não foi identificado nenhuma torre de celular. Já na Figura 4.16b, que fica em um local próximo ao primeiro hotspot, porém em uma região com mais elevações topográficas e de mata mais alta, foram encontradas algumas torres de energia elétrica, através das imagens de satélite.

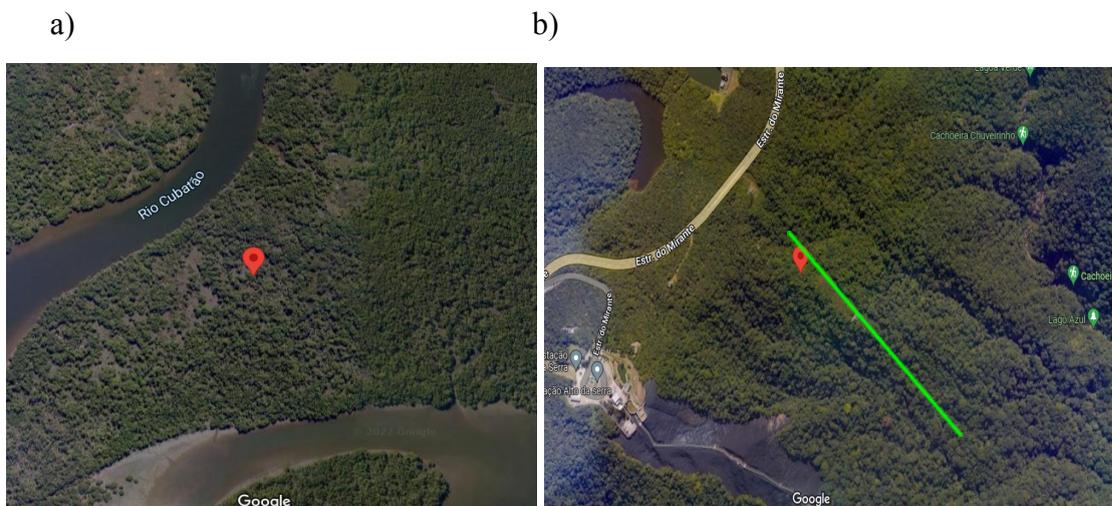


Figura 4.16 - Imagem de satélite do Google Maps, para os dois hotspots em Cubatão.

a) local com 13 raios acumulados, b) local com 10 raios acumulados. A linha verde indica uma fila de torres de energia elétrica.

Na Figura 4.17, é mostrado o segundo maior hotspot fora da cidade de São Paulo, tendo um acumulado de queda de 12 raios. Também sendo uma região de mata na beira de um rio, ele está sobre uma torre de energia elétrica.

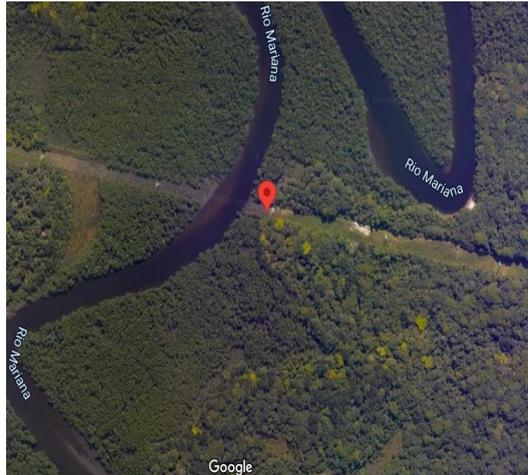


Figura 4.17 - Imagem de satélite do Google Maps, para o hotspot em São Vicente, com 12 raios acumulados.

Já em Guarulhos, na Figura 4.18, se trata de um local urbanizado, entre um parque e uma rodovia, onde há alguns edifícios mais altos próximos e a presença de 4 torres de celular. Enquanto que o ponto de queda em questão é um restaurante. Por fim, na Figura 4.19 é mostrado o local em Itaquaquecetuba, com uma queda de 10 raios. Também se tratando de uma região urbanizada, ao seu redor há tanto áreas arborizadas como áreas descampadas, com alguns galpões.

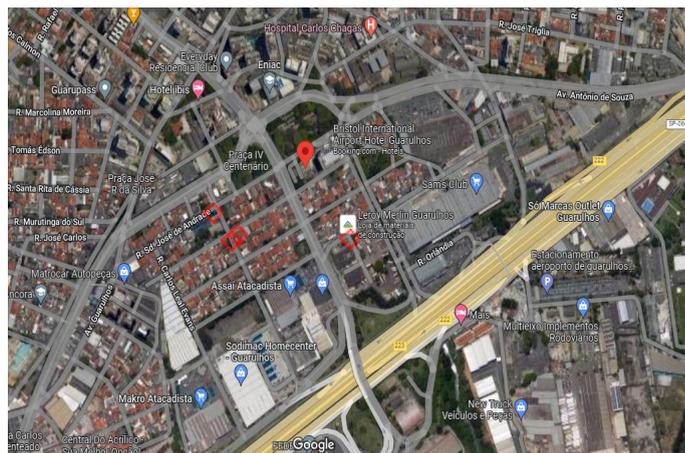


Figura 4.18 - Imagem de satélite do Google Maps, para o hotspot em Guarulhos, com 11 raios acumulados. Os losangos indicam a localização das torres de celular.

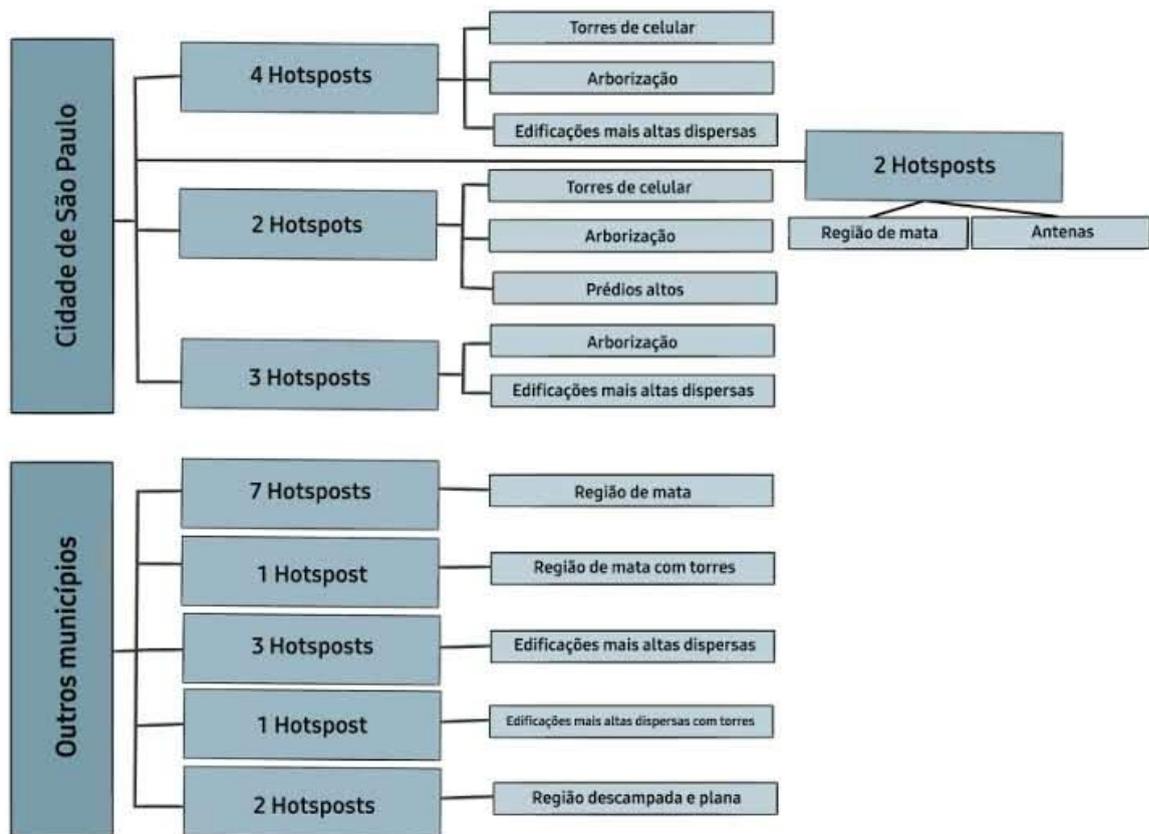


Figura 4.20 - Resumo das características geográficas dos 25 hotspots com um acumulado de 10 ou mais raios NT.

A queda de raios depende bastante das características da área. Locais baixos com menos arborização possuem uma queda de raios mais aleatória, assim como locais com uma grande concentração de edificações altas, ou áreas densas de mata. Essas áreas têm uma competição maior de locais de queda, por serem mais homogêneas, enquanto que regiões onde há apenas uma concentração pequena de pontos altos, entre edificações mais baixas, a tendência é de que os raios caiam nesses locais mais altos.

Assim como mostrado na Figura 4.21, que contém o hotspot que ocorreu em Itaquera com 11 raios acumulados. Para uma melhor visualização da distribuição dos raios e da região, nessas figuras seguintes não foram colocadas as edificações, além de ser mostrada uma região de 1 km ao redor. Nela é observado ser uma região de edificações mais baixas e nas imagens de satélite havia bem pouca arborização. Sendo assim, o maior ponto de queda foi justamente próximo a uma torre de celular, por ser o local mais alto ao redor. Enquanto que na Figura 4.22, mostra o hotspot do Jardim Paulista, sendo este um local formado apenas por prédios

altos, logo há um quantidade de raios com maiores acumulados distribuídos por toda a região, por conta desta competição.

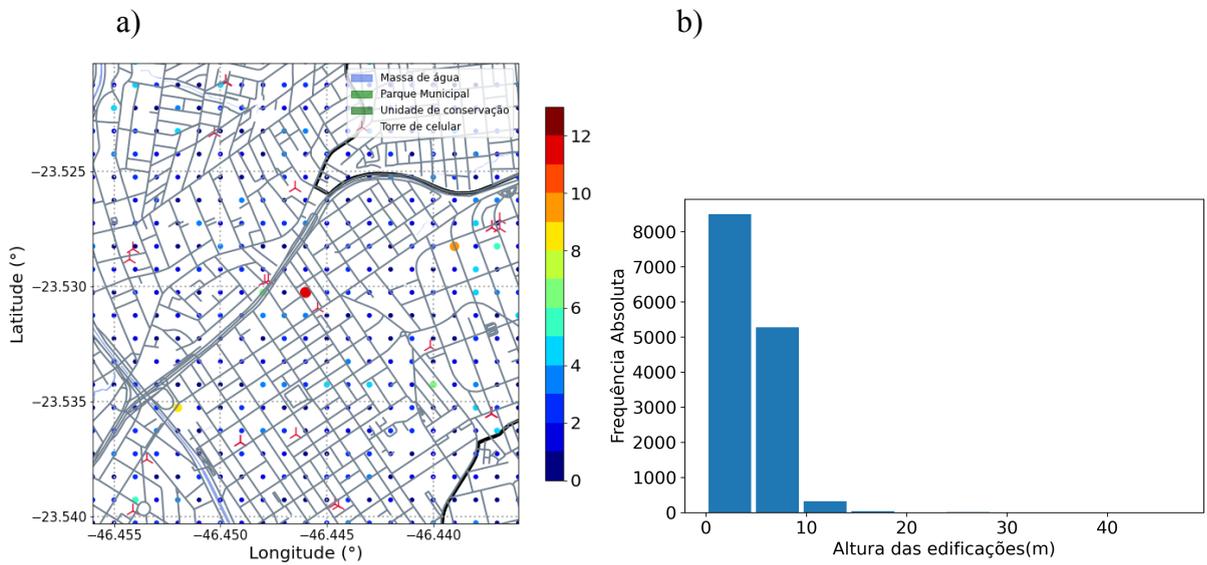


Figura 4.21 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para o hotspot em Itaquera. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m², b) histograma das alturas das edificações, para a mesma área.

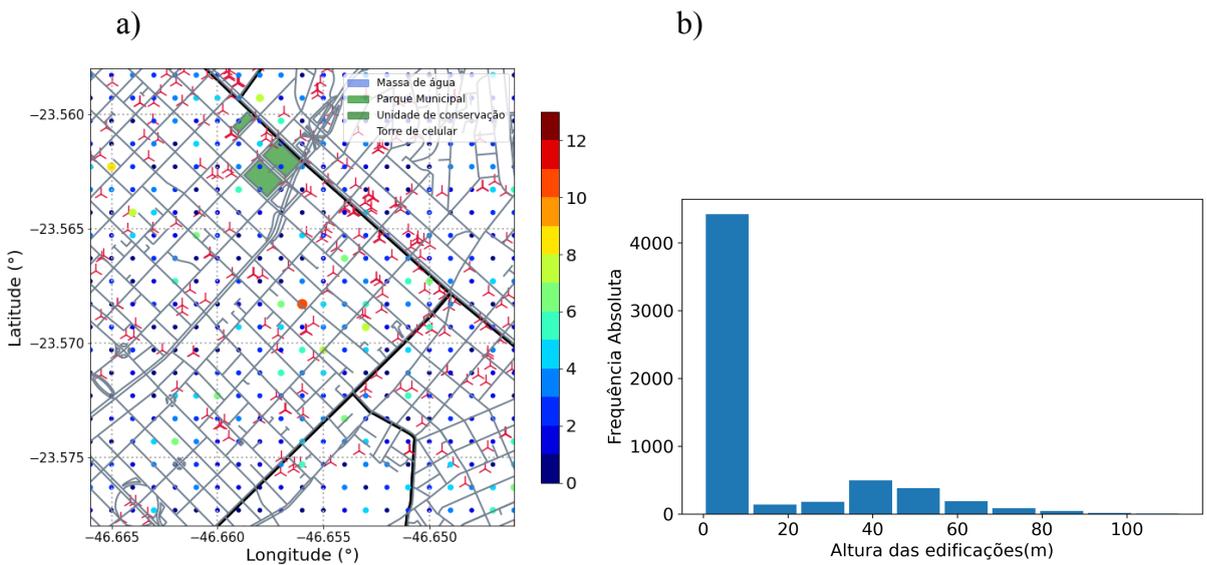


Figura 4.22 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para o hotspot no Jardim Paulista. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m², b) histograma das alturas das edificações, para a mesma área.

Todavia, nem todos os lugares seguem esse padrão, como por exemplo a região em Moema mostrada na Figura 4.23. Ao lado do parque Ibirapuera, também se trata de uma área de prédios, com várias torres de celular, porém, a maior parte dos pontos de raios no local é de menos que dois raios acumulados, tendo apenas alguns poucos pontos esparsos com de 4 a 7 acumulados. Isso mostra que também há outros fatores que influenciam nessas quedas, mas que não foram levados em consideração nessa análise.

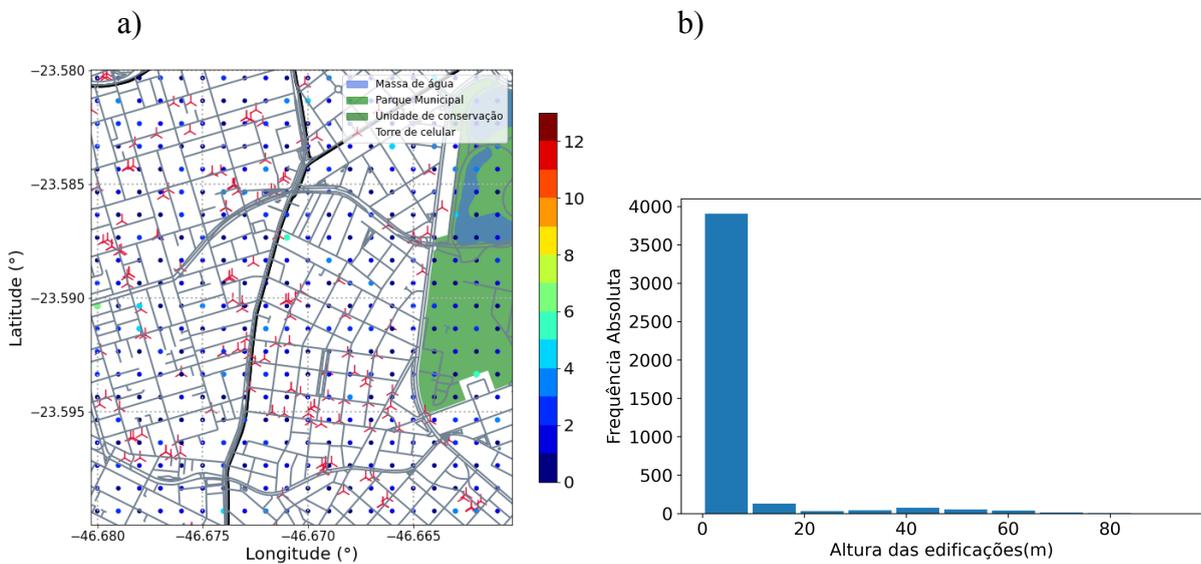


Figura 4.23 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para uma região de Moema. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m², b) histograma das alturas das edificações, para a mesma área.

5. CONCLUSÃO

A distribuição de raios na RMSP tem seu foco de intensidade sendo o centro da Cidade de São Paulo, se estendendo até a Zona Leste, em uma faixa de nordeste á sudoeste, em uma média de 30 a 40 raios/km²/ano. Em questão dos municípios, São Paulo, São Bernardo do Campo, Guarulhos, Santo André, Santana de Parnaíba, São Lourenço da Serra, Ribeirão Pires, Embu-Guaçu, Osasco e Itaquaquecetuba são os municípios com a maior tendência de queda de raios na região. Na Tabela 5.1 é mostrado um resumo das estatísticas encontradas de cada um deles.

Ao analisar a distribuição nos distritos da Cidade de São Paulo, a Liberdade, República, Pari, Consolação e Jardim Paulista obtiveram o maior foco de queda de raios por área. Todavia, ao comparar esses valores com o acumulado de raios e a probabilidade de queda, Santo Amaro, Jabaquara, Cangaíba, Itaquera, Sapopemba e Cursino, se destacaram mais por estar em boas posições nos três métodos utilizados. As estatísticas desses distritos são mostradas na Tabela 5.2.

Tabela 5.1 - Estatísticas dos municípios que foram identificados com as maiores tendências de queda de raios.

Municípios	Acumulado total	Acumulado raios/km ²	Probabilidade média (%)
São Paulo	119653	79,65	77,94
Bernardo do Campo	24467	60,75	50,06
Guarulhos	24267	78,28	52,47
Santo André	11446	66,19	48,37
São Lourenço da Serra	12872	70,15	41,13
Santana de Parnaíba	10040	56,84	43,32
Embu-Guaçu	8339	54,60	36,29
Itaquaquecetuba	7574	93,37	36,40
Ribeirão Pires	5486	56,27	40,27
Osasco	4699	74,46	36,00

Tabela 5.2 - Estatísticas dos distritos que foram identificados com as maiores tendências de queda de raios.

Distritos	Raios/ano	Raios/km ² /ano	Probabilidade média (%)
Liberdade	152,75	42,57	17,36
República	92,25	39,17	13,75
Pari	104,75	39,06	15,40
Consolação	143,75	38,34	14,64
Jardim Paulista	228,75	37,63	20,60
Santo Amaro	515,75	32,71	23,92
Jabaquara	476,75	34,60	23,38
Cangaíba	453,00	27,79	26,55
Itaquera	451,75	31,19	26,12
Sapopemba	406,25	30,33	25,42
Cursino	346,25	29,29	26,14

Foi comprovado a existência de hotspots, onde locais com acumulados de 6 raios ou mais, em uma área de 100 x 100 m², podem ser considerados. Por essa quantidade totalizar menos de 0,2% da quantidade total de dados de acumulados de raios ao longo desses 4 anos de estudo.

Os hotspots mais intensos estão no Pico do Jaraguá, local este que possui várias antenas e é o ponto mais alto de São Paulo, e em Cubatão, em uma região de mata com torres. Nos quais os dois obtiveram um acumulado de 13 raios durante o período. Em geral, os locais de hotspot se tratam de áreas com arborização, ou com torres e edifícios altos, porém, com uma moda de altitude de edificações de menos de 10 m, pois em regiões onde há apenas uma concentração pequena de pontos altos, entre edificações mais baixas, a tendência é de que haja uma concentração de queda de raios nesses locais mais altos.

Entretanto nem todos os lugares seguem esse padrão, podendo existir outros fatores que influenciam na distribuição de raios nessas regiões, como o relevo ou sistemas meteorológicos. Fatores estes que não foram levados em consideração neste estudo. Portanto, recomenda-se em estudos futuros uma análise mais minuciosa das características desses locais. Além de que, um período de estudo de 4 anos é pequeno para se confirmar essa regularidade na tendência.

REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, R. I. et al. Where are the lightning hotspots on earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 97, n. 11, p. 2051–2068, 1 nov. 2016.
- AREITIO, J.; EZCURRA, A.; HERRERO, I. Cloud-to-ground lightning characteristics in the Spanish Basque Country area during the period 1992-1996. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, v.63, n. 10, p. 1005-1015, July. 2001.
- BETZ, H.D. et al. Cloud lightning: detection and utilization for total lightning measured in the VLF/LF regime. *J. Light. Rese.* v. 2, p. 1–17, 2007.
- BETZ, H.D.; SCHMIDT K.; OETTINGER W.P. LINET – An International VLF/LF Lightning Detection Network in Europe. *Lightning: Principles, Instruments and Applications*, p 115-14, 2009.
- BORNSTEIN, R.; LIN, Q. L. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: three case studies. *Atmospheric Environment*, v. 34, n. 3, p. 507-516, 2000.
- BOURSCHEIDT V.; PINTO O.; NACCARATO K. High Resolution Lightning Density Maps to Study Elevation Effects at Microscale. Vienna, Austria: *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2012.
- CARDOSO, I. et al. Lightning casualty demographics in Brazil and their implications for safety rules. *Atmospheric Research*, v. 135–136, p. 374–379, jan. 2014.
- CAREY, L. D.; RUTLEDGE, S. A. Characteristics of cloud-to-ground lightning in severe and nonsevere storms over the central United States from 1989-1998. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, n.D15, 4483, Aug. 2003.
- CHANGNON, S. A. Evidence of urban and lake influences on precipitation in the Chicago area. *Journal of Applied Meteorology*, v. 19, n. 10, p. 1137-1159, 1980.
- CONCEIÇÃO, R. Algumas considerações geográficas sobre as descargas elétricas atmosféricas no Estado de São Paulo. 2009. Trabalho de conclusão de curso em Geografia- Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro.
- ELAT/INPE. Mortes por raios - Infográfico. 2019. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/el.atm/mortes.por.raios.-.infografico.php>>. Acesso em: 27 maio. 2022
- ELAT/INPE. Levantamento inédito sobre mortes por raios no Brasil resulta em segunda melhor matéria de divulgação científica em 2020. 2021. Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=5770#:~:text=Quanto%20ao%20n%C3%BAmero%20de%20mortes,casos%20por%20ano%20no%20per%C3%ADodo>. Acesso em: 27 maio. 2022

GeoSampa Mapa, Prefeitura de São Paulo. Mapa digital da Cidade de São Paulo. Acesso em: <http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx#>. Consulta realizada em 27 maio. 2022.

GOOGLE EARTH-MAPAS. Acesso em: <<http://https://www.google.com.br/maps>>. Consulta realizada em 27 maio. 2022.

HOLLE, R. L. Some aspects of global lightning impacts. *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, China pp. 1390-1395, 2014.

IEC 62859-2019- Lightning density based on lightning location systems - General principles, 2019.

MORALES, C. A. et al. Sferics Timing And Ranging NETWORK-STARNET: 8 Years of Measurements in South of America. *In Proceedings XV Int. Conf. on Atmospheric Electricity*, pp. 1-8, 2014.

MORALES, C. A. Results of GV measurements of STARNET and LINET in Brazil. 2017 *GLM Annual Science Team Meeting*, GLM Post Launch Test Results and the Path to Provisional Validation Maturity, The University of Alabama in Huntsville, 12-14 September, 2017.

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

NOVÁK, P.; KYZNAROVÁ H. Climatology of lightning in the Czech Republic. *Atmospheric Research*, pp. 318-333, 2011

PINTO, I. R. C. A. et al. Urban effect on the characteristics of cloud-to-ground lightning over Belo Horizonte – Brazil. *Annales Geophysicae, European Geosciences Union*, v. 22, n. 2, p. 697-700, 2004.

PINTO, O. JR. et al. Lightning activity in Brazil in 2005 and 2006 based on the World Wide Lightning Location Network (WWLLN). *IX International Symposium on Lightning Protection*. American Geophysical Union, 26 nov. 2007.

PINTO, O. et al. Climatology of large peak current cloud-to-ground lightning flashes in southeastern Brazil. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 114, n. 16, 2009.

PINTO, O. JR. Verão eletrizante. *Agência FAPESP*, São Paulo, 28 jan. 2008. Depoimento a Thiago Romero. Disponível em: < <http://agencia.fapesp.br/verao-eletrizante/8341/> >. Acesso em: 27 maio. 2022

SCHULZ, W. et al. Cloud-to-ground lightning in Austria: a 10-year study using data from a lightning location system. *Journal of Geophysical Research*, v.110, n.D9, 9101, May 2005.

SHEPHARD, M. W. et al. A high-resolution canadian lightning climatology. *Atmosphere - Ocean*, v. 51, n. 1, p. 50–59, 2013.

TelecoCare, Teleco. Mapa de ERBs. Acesso em: <<https://www.telecocare.com.br/mapaerbs/index.php>>. Consulta realizada em AGO 2022.

VOGT, B. J.; HODANISH, S. J. A high-resolution lightning map of the State of Colorado. *Monthly Weather Review*, v. 142, n. 7, p. 2353–2360, 2014.

WAPLER, K. High-resolution climatology of lightning characteristics within Central Europe. *Meteorol Atmos Phys*, v. 122, n. 7, pp. 175-184, 2013.

WESTCOTT, N. E. Summertime cloud-to-ground lightning activity around major midwestern urban areas. *Journal of Applied Meteorology*, v. 34, n 7, p. 1633-1642, 1995.

APÊNDICE A

Neste apêndice estão presentes as figuras geradas através dos dados do Geosampa e TelecoCare e as imagens de satélite do Google Maps, para cada um dos locais restantes destacados na Figura 4.6.

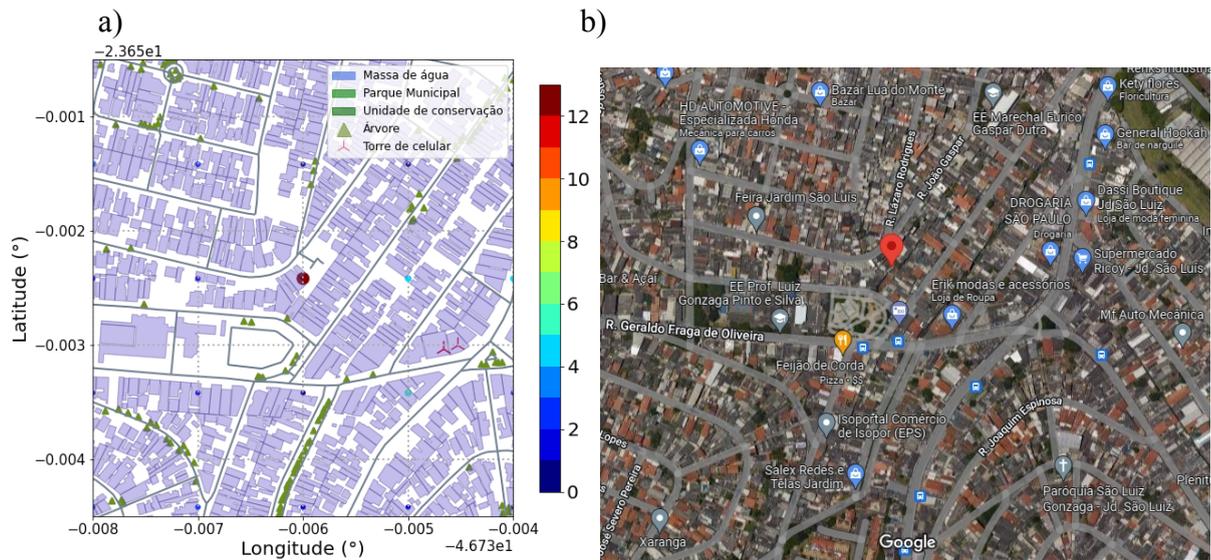


Figura A.1 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para o hotspot no Jardim São Luís. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m², b) imagem de satélite do Google Maps.

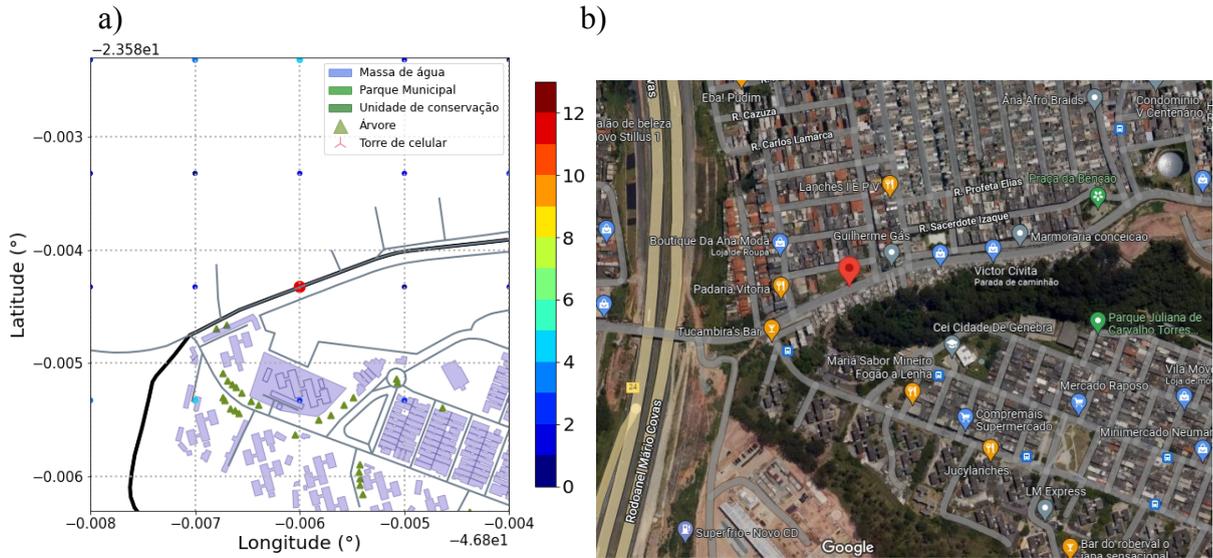


Figura A.2 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para o hotspot na Raposo Tavares. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m², b) imagem de satélite do Google Maps.

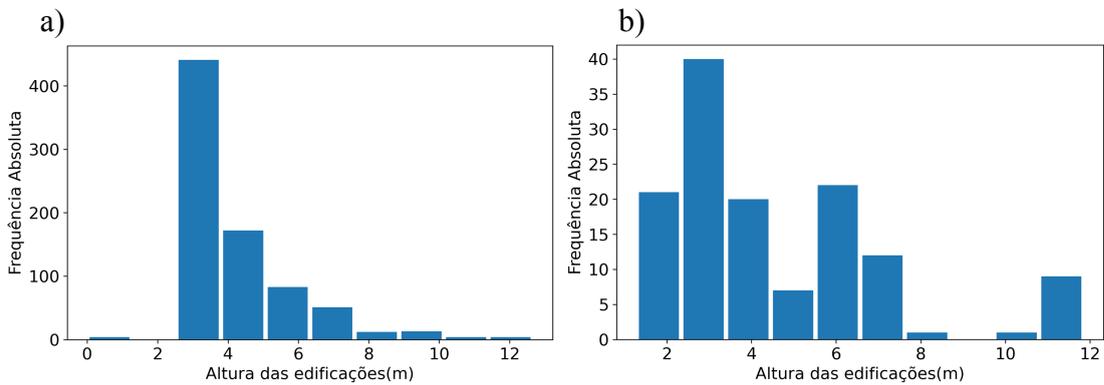


Figura A.3 - Histograma de altitude das edificações, segundo o GeoSampa. Para o hotspot em: a) Jardim São Luís, b) Raposo Tavares. Estes são mostrados na Figura A.1 e A.2, respectivamente.

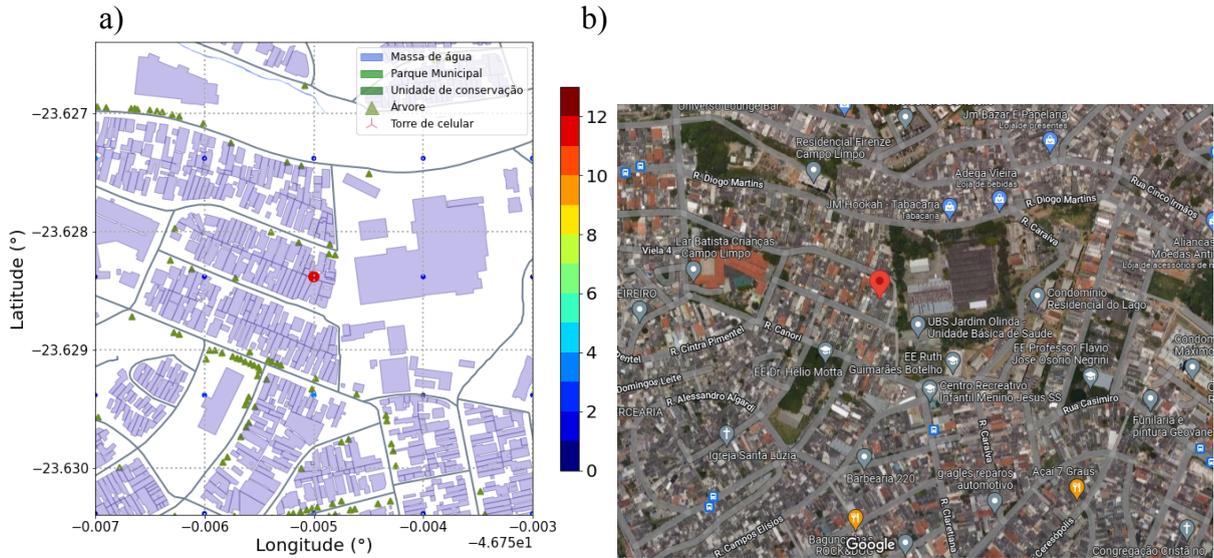


Figura A.4 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para o hotspot em Campo Limpo. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m², b) imagem de satélite do Google Maps.

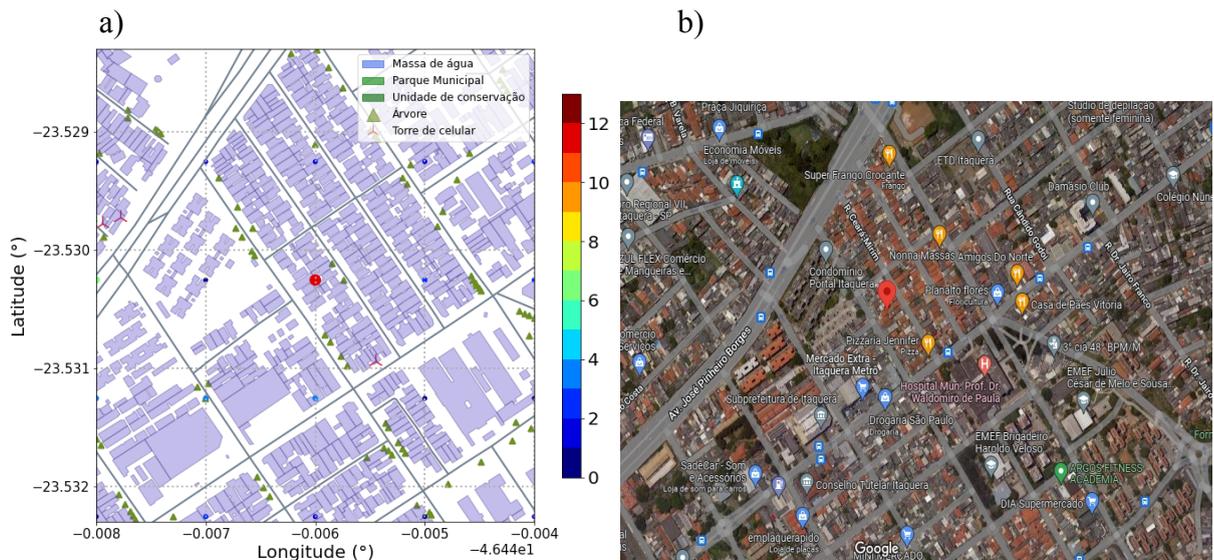


Figura A.5 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para o hotspot em Itaquera. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m², b) imagem de satélite do Google Maps.

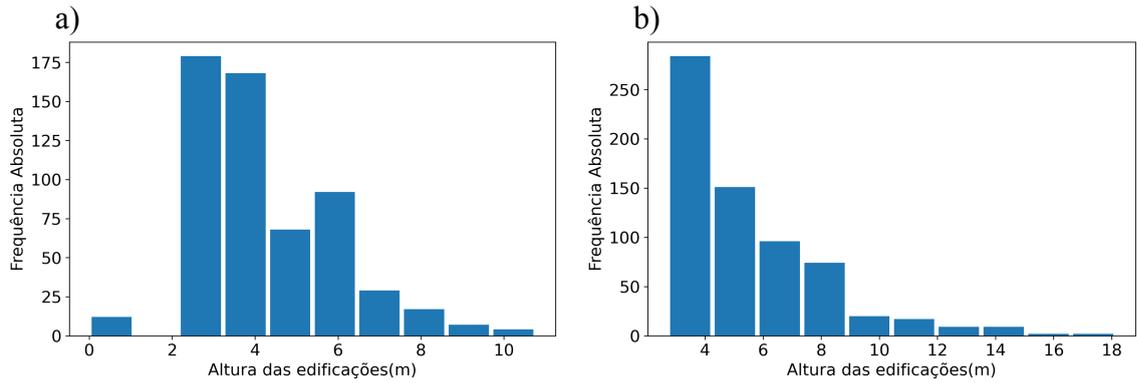


Figura A.6 - Histograma de altitude das edificações, segundo o GeoSampa. Para o hotspot em: a) Campo Limpo, b) Itaquera. Estes são mostrados na Figura A.4 e A.5, respectivamente.

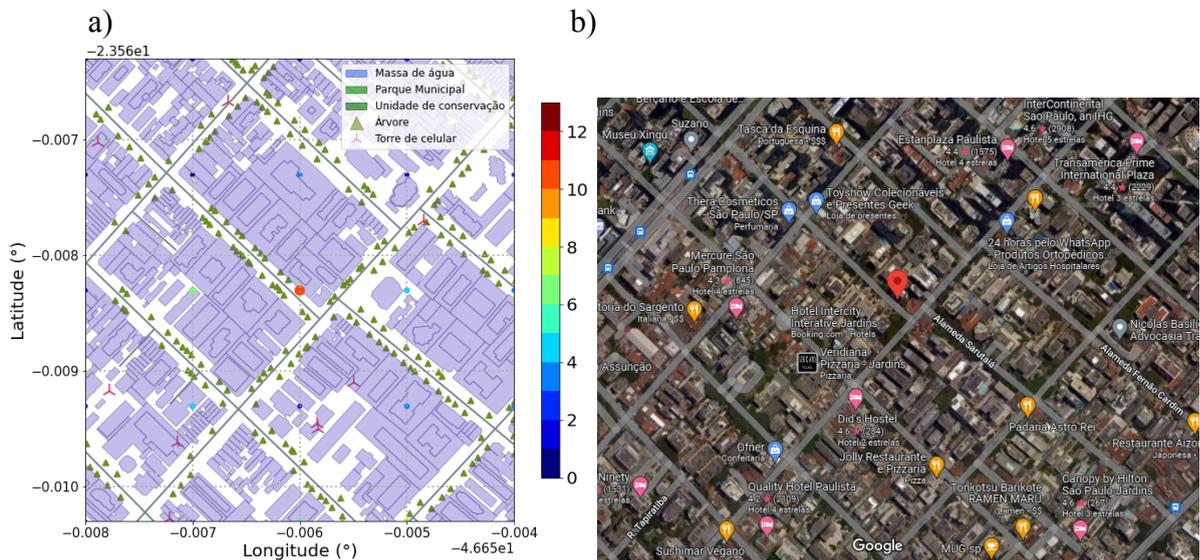


Figura A.7 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para o hotspot no Jardim Paulista. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m², b) imagem de satélite do Google Maps.

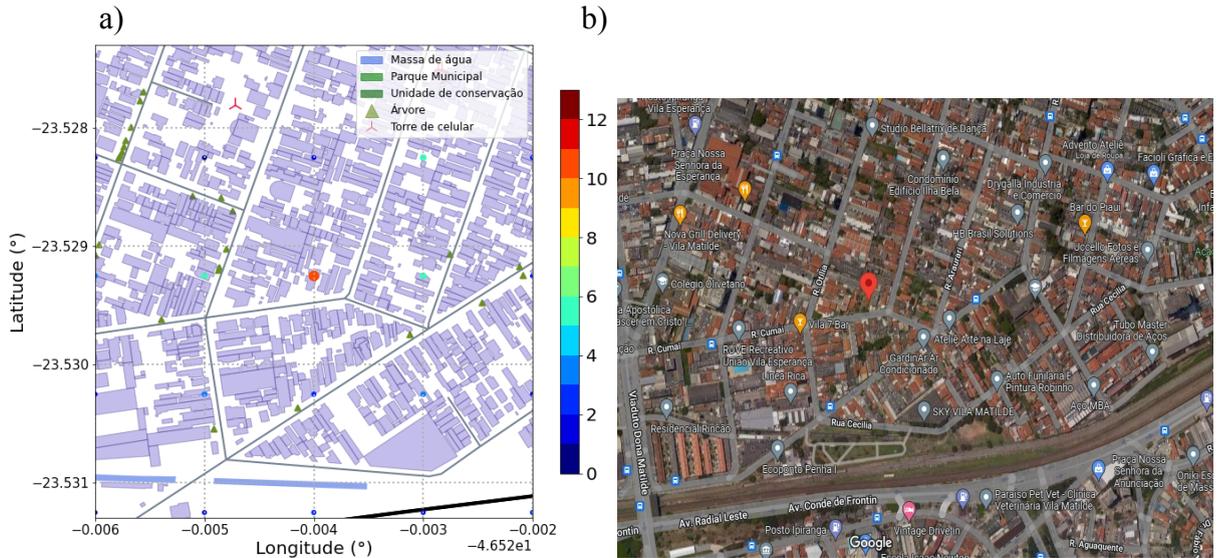


Figura A.8 - a) Figura gerada através dos dados do GeoSampa e TelecoCare, para o hotspot na Penha. As cores indicam a quantidade de raios que caiu na área de 100 x 100 m², b) imagem de satélite do Google Maps.

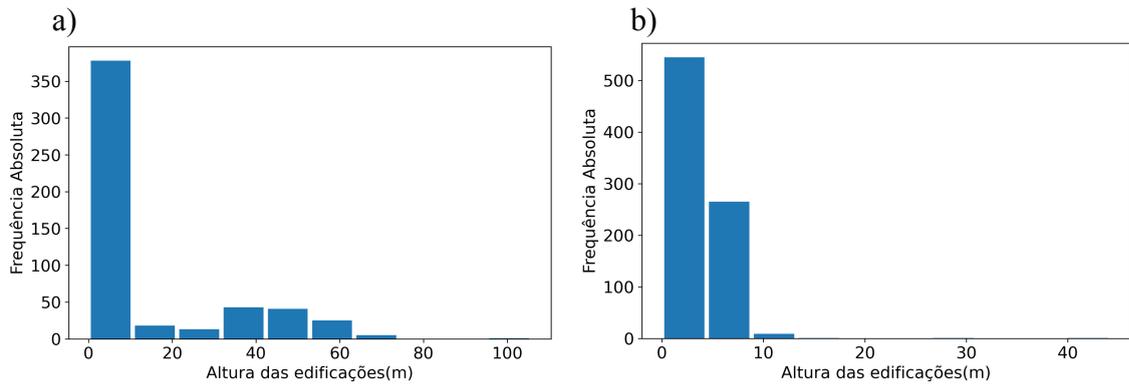
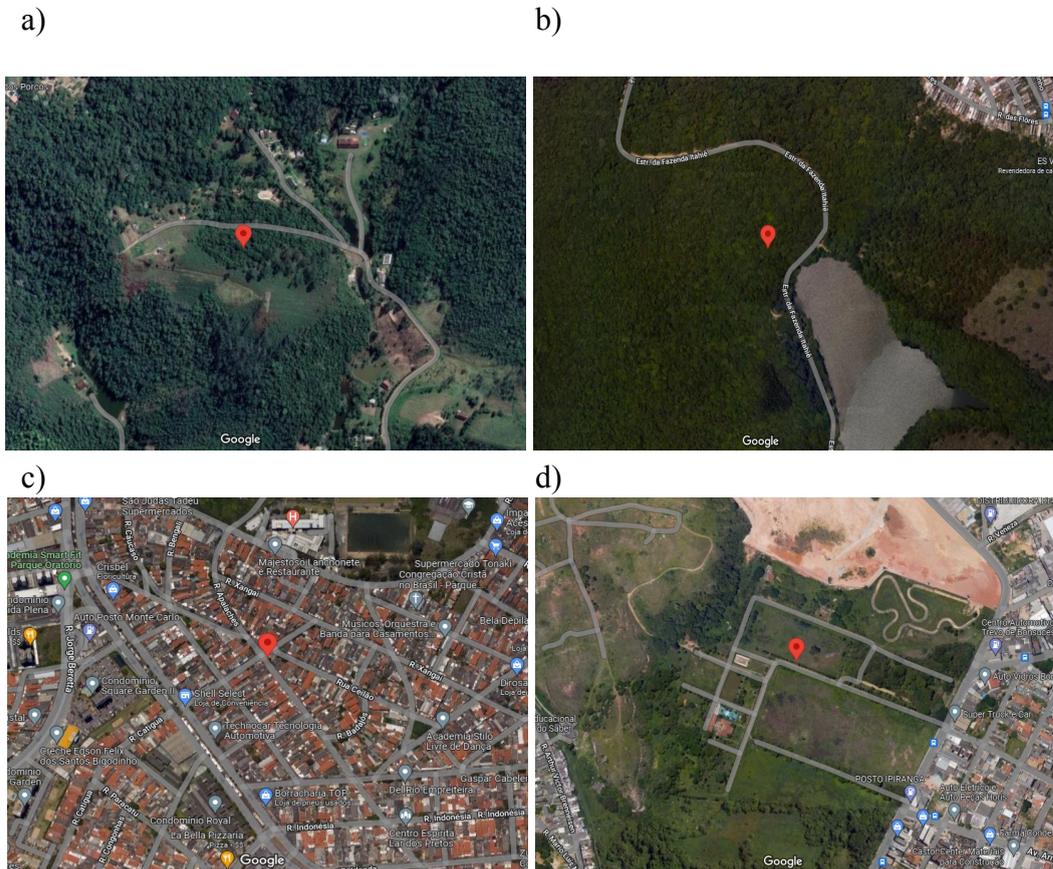


Figura A.9 - Histograma de altitude das edificações, segundo o GeoSampa. Para o hotspot em: a) Jardim Paulista, b) Penha. Estes são mostrados na Figura A.7 e A.8, respectivamente.



Figura A.10 - Imagem de satélite do Google Maps. Para o hotspot em: a) São Bernardo do Campo, b) Itaquaquecetuba. Com 11 raios NT acumulados em cada.



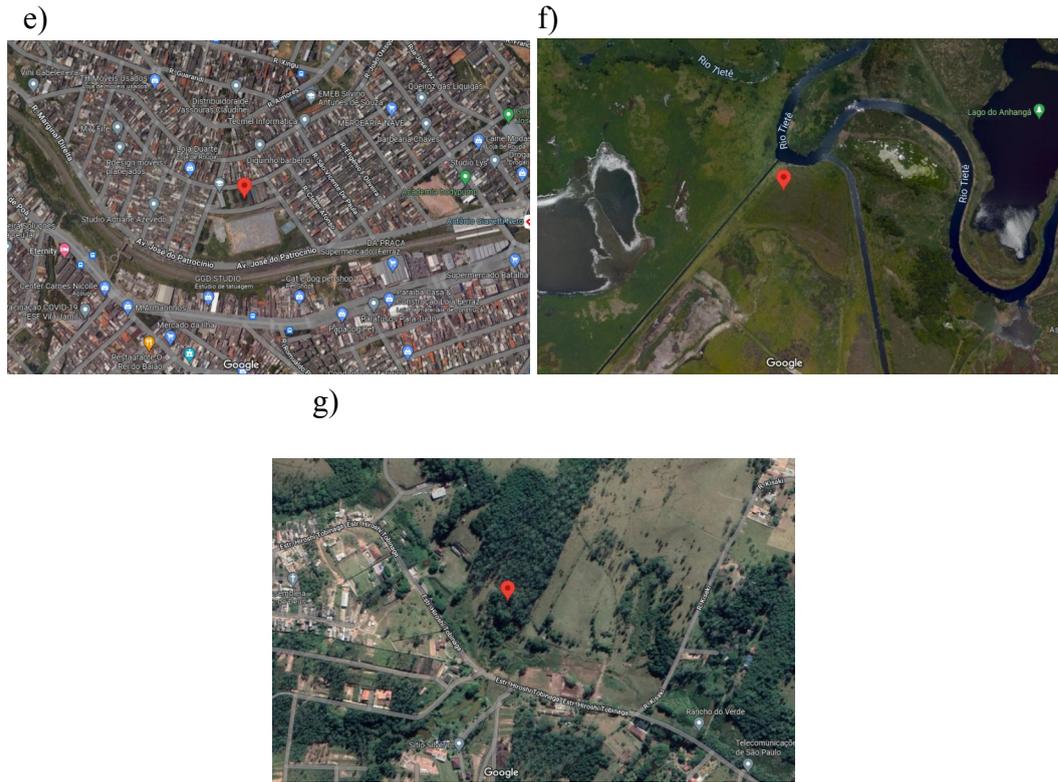


Figura A.11 - Imagem de satélite do Google Maps. Para o hotspot em: a) Embu-Guaçu. b) Santana de Parnaíba, c) Santo André, d) Guarulhos, e) Ferraz de Vasconcelos, f) Suzano, g) Suzano. Com 10 raios NT acumulados em cada.