



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

## DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS FOCOS DE CALOR NO BIOMA AMAZÔNIA

Nathália Silva de Carvalho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil

[nathalia.carvalho@inpe.br](mailto:nathalia.carvalho@inpe.br)

**RESUMO:** O fogo consiste em uma grande ameaça aos sistemas florestais, causando impactos no âmbito ambiental, social e econômico. As mudanças na cobertura da terra no bioma Amazônia correspondem a recentes incentivos governamentais para a expansão da fronteira agrícola, e nestas áreas o fogo consiste em uma das principais práticas utilizadas para o manejo da terra. Dessa maneira, o conhecimento da distribuição espacial das queimadas neste bioma, é fundamental para identificar as áreas mais vulneráveis a ocorrência destes eventos. Considerando que a ocorrência dos focos de queimadas pode ser explicada pelas diferenças na área florestal, o objetivo deste trabalho foi avaliar a relação entre a cobertura florestal e o padrão espaço-temporal dos focos de calor no bioma Amazônia. As análises foram realizadas para o período de 2003 a 2016. Para identificação dos focos de calor foi utilizado o produto MCD14ML/MODIS, e a delimitação das áreas florestais foi extraída a partir do mapeamento anual disponibilizado pelo MapBiomas. Para analisar o padrão de distribuição espacial dos focos de calor, foi utilizado o Índice de Moran Local. Os resultados evidenciaram uma dicotomia no padrão das queimadas na Amazônia, as quais ocorrem em áreas florestais altamente degradadas (cobertura florestal inferior a 20%) situadas no Arco do Desmatamento ou em áreas florestais densas (cobertura florestal superior a 80%), localização nas regiões mais centrais do bioma. O conhecimento do padrão de agrupamento dos focos de calor no Amazônia, pode contribuir para a aplicação de medidas de atenuação e mitigação ao fogo, para áreas específicas no bioma.

**Palavras-chave:** floresta tropical, distribuição espacial, sensoriamento remoto, geoprocessamento.

### 1. INTRODUÇÃO

Em uma escala global, as florestas tropicais correspondem aos domínios que apresentaram a maior redução florestal na última década (HANSEN *et al.*, 2013). Considerando a importância destes ecossistemas para a regulação climática, estabilidade de ciclos biogeoquímicos e serviços ecossistêmicos (MYERS *et al.*, 2000), o



monitoramento destes ecossistemas é fundamental para identificar alterações na estabilidade destes processos.

O uso do fogo para o manejo da terra consiste em uma das principais atividades antrópicas que têm conduzido ao empobrecimento das florestas tropicais (DE MENDONÇA *et al.*, 2004). Ao longo do processo evolutivo, a capacidade humana de manipulação do fogo transitou do uso para subsistência para o uso econômico. Esta trajetória culminou em impactos sobre os ecossistemas devido a alterações na frequência, sazonalidade e localização das queimadas (ARCHIBALD; STAVER; LEVIN, 2012; BOWMAN *et al.*, 2009), assim como, na introdução da queima em ecossistemas como as florestas tropicais, as quais possuem pouca adaptação ao fogo (CHUVIECO *et al.*, 2014).

A Bacia Amazônica consiste na região do planeta mais vulnerável ao fogo (CHUVIECO *et al.*, 2014). Atualmente a prática da queima na Amazônia tem principalmente o intuito de reduzir os custos da produção agropecuária (DE MENDONÇA *et al.*, 2004). As queimadas intencionais são utilizadas em áreas agrícolas para limpeza e preparação da terra (DIAZ *et al.*, 2002), bem como, para a remoção da biomassa restante após a ocorrência de desmatamentos (ARAGÃO *et al.*, 2007). O fogo também consiste no mecanismo utilizado para a manutenção de pastagens e controle de plantas lenhosas invasoras, estimulando o crescimento de gramíneas forrageiras de pastagens (DIAZ *et al.*, 2002).

Apesar da capacidade de utilizar o fogo como ferramenta para o manejo da terra, é proeminente o pequeno controle que ainda existe sobre este processo. A ocorrência de queimadas intencionais e/ou acidentais podem resultar em uma propagação descontrolada do fogo, e os prejuízos podem incluir danos socioeconômicos e ambientais.

Em termos econômicos, a queima fora de controle gera custos para o produtor, o qual pode sofrer com a perda da sua área produtiva devido, por exemplo, ao tempo de espera necessário para a regeneração das gramíneas, bem como, a necessidade do arrendamento de outras pastagens neste período (DE MENDONÇA *et al.*, 2004). Em termos sociais, a ocorrência do fogo na fronteira entre ambientes naturais e urbanos pode causar mortes e destruição de propriedades (CHUVIECO *et al.*, 2014), além disso, também há impactos na saúde das populações locais, uma vez que a fumaça pode conduzir a ocorrência de doenças respiratórias (DE MENDONÇA *et al.*, 2004).



Em termos ambientais, os impactos do fogo afetam a prestação de serviços ecossistêmicos, como o fornecimento de água, alimento, qualidade do solo, absorção de CO<sub>2</sub>, entre outros serviços (CHUVIECO *et al.*, 2014). Quanto ao valor ecológico, o fogo pode afetar os ecossistemas quanto a sua importância para abrigo e conservação da biodiversidade (CHUVIECO *et al.*, 2014). Já em um contexto de impactos ambientais globais, a alteração no uso e cobertura da terra devido ao uso do fogo é responsável pela emissão de gases do efeito estufa como o gás carbônico (CO<sub>2</sub>), os quais são liberados durante diferentes estágios da queima da biomassa vegetal (ARAGÃO *et al.*, 2018).

Por isso, o conhecimento da distribuição espacial do fogo em florestas tropicais é fundamental para auxiliar na tomada de decisão e definição de estratégias de fiscalização, prevenção e controle destes eventos. Nesta perspectiva, dados de sensoriamento remoto podem auxiliar na detecção de focos de queimada e no combate à expansão de incêndios (TOMZHINSKI; COURA; FERNANDES, 2011). Para isso, dados provenientes de sensores como o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), têm sido utilizados para o monitoramento de focos de queimadas (ANDERSON *et al.*, 2015).

Diante deste contexto, este trabalho fundamenta-se na hipótese que a ocorrência dos focos de queimadas, no Bioma Amazônia, pode ser explicada pelas diferenças no percentual de área florestal. A partir disso, esta proposta pretende fornecer informações sobre padrão espacial do fogo no bioma Amazônia e auxiliar nas diretrizes para a tomada de decisão, quanto a escolha de estratégias de fiscalização e combate ao fogo nesta floresta tropical.

## **2. OBJETIVO**

Este trabalho foi realizado no intuito de auxiliar na tomada de decisão para a gestão pública e ambiental do Bioma Amazônia. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar a relação entre a cobertura florestal e o padrão espaço-temporal dos focos de queimadas na Amazônia. Por isso, este estudo foi desenvolvido a fim de responder às seguintes questões científicas:

1. Há uma relação espacial entre os focos de queimadas e o percentual de floresta no bioma Amazônia?



2. Qual é o padrão da distribuição espacial das áreas com ocorrência de focos de queimada, no bioma Amazônia?

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Representação computacional do problema de pesquisa**

Com o intuito de representar computacionalmente a relação entre os focos de calor e o percentual de floresta no Bioma Amazônia, inicialmente foram feitas abstrações do mundo real com o intuito de reduzir a complexidade dos componentes que integram o problema abordado. Diante disso, este processo considerou os níveis de abstração ontológico, formal, estrutura de dados e implementação computacional (CÂMARA & MONTEIRO, 2001).

No universo ontológico, o bioma Amazônia foi definido conforme descrito pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2014), no qual um bioma é conceituado considerando uma escala regional, a qual considera o agrupamento de tipos de vegetação contíguos que possuem condições geoclimáticas similares e um histórico semelhante de alterações, resultando em uma diversidade biológica característica daquele ambiente. Já os focos de calor foram conceituados como os dados registrados por sensores remotos, sensíveis a região do infravermelho termal do espectro-eletromagnético. A área florestal foi conceituada de acordo com a metodologia para caracterização de floresta densa, do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomias, 2017).

No nível de abstração para a formalização dos conceitos adotados, considerando o objetivo deste trabalho é relevante a precisão na localização da área de estudo e dos focos de calor, e por isso, ambos foram definidos como modelos de dados geográficos do tipo geo-objeto. Já a área florestal foi definida por um modelo de dado geográfico do tipo geo-campo, uma vez que, a sua representação como uma distribuição contínua é necessária para obter valores em todos os pontos pertencentes a região geográfica do bioma Amazônia.

No nível de abstração de estrutura dos dados foi considerado os tipos de dados e algoritmos necessários para representar os conceitos formalizados anteriormente. Diante



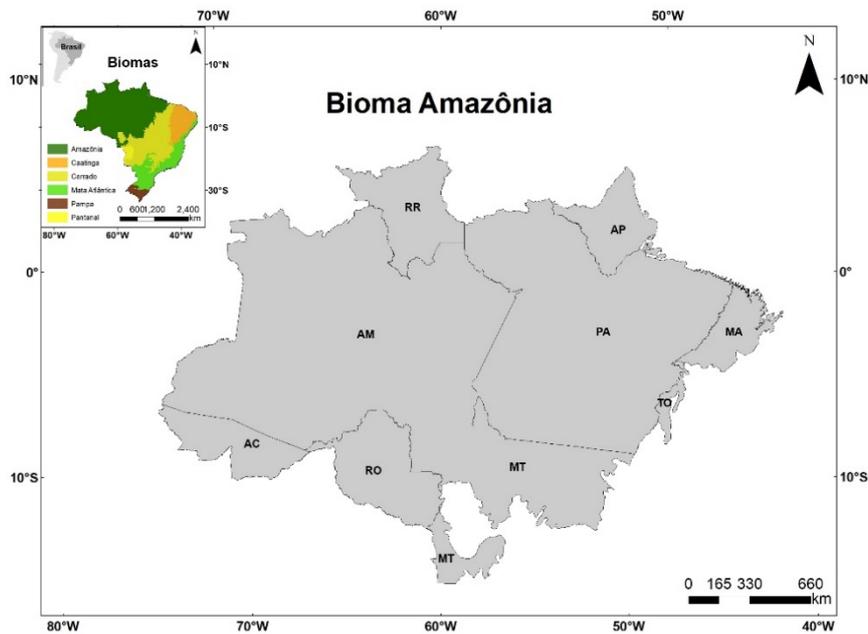
disso, considerando a importância dos limites geográficos do bioma Amazônia para o desenvolvimento deste trabalho, este geo-objeto foi definido por uma representação vetorial do tipo polígono. Já o geo-objeto focos de calor foi definido como uma estrutura vetorial pontual, uma vez que, a localização geográfica representada por um par de coordenadas e os seus atributos associados, possuem as informações necessárias para a escala de ocorrência considerada neste estudo. O geo-campo referente a área florestal foi definido com uma estrutura de dado matricial, devido a necessidade de obter o percentual de área florestal para todos os pontos da área de estudo considerando um espaçamento regular.

Para concluir o processo de representação computacional, no universo da implementação foram utilizados *softwares* de Sistemas de Informações Geográficas e linguagens de programação, a fim de auxiliar na resolução das questões científicas abordadas neste trabalho. Como será descrito nas próximas seções, nestes ambientes foram realizadas operações de geo-objetos baseadas na seleção por atributos e em restrições espaciais, bem como, álgebras pontuais e de vizinhança sobre os geo-campos.

### **3.2. Área de estudo**

A área de estudo compreende o Bioma Amazônia dentro do território brasileiro (Figura 1). Este bioma corresponde a 49,29% do território nacional e inclui totalmente os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará e Roraima, além de porções dos estados do Maranhão (34%), Mato Grosso (54%), Rondônia (99%) e Tocantins (9%), (IBGE, 2004). A Amazônia é a maior floresta tropical do mundo e abriga 10% de toda a biodiversidade global, incluindo espécies endêmicas, raras e ameaçadas de extinção (MMA, 2002). Este ecossistema tem importância mundial devido a prestação de serviços ecossistêmicos como a regulação climática e absorção de CO<sub>2</sub> (FEARNSIDE, 2006).

Essa região é caracterizada por um clima equatorial, quente e úmido, com temperaturas elevadas, apresentando média anual de 26°C. A região do bioma Amazônia possui uma alta precipitação, com uma variação média anual entre 1500mm e 38000mm.



**Figura 1.** Localização da área de estudo, incluindo todo o Bioma Amazônia dentro do território brasileiro.

### 3.3. Métodos

#### 3.3.1. Dados dos focos de calor do bioma Amazônia

Para avaliar a distribuição espacial das áreas de queimadas foram utilizados registros de focos de calor, adquiridos a partir do sistema *Fire Information for Resource Management System* (FIRMS), o qual fornece dados provenientes dos sensores MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) e VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*).

Para este estudo foi utilizada a Coleção 6 e o produto padrão MCD14ML (*Global Monthly Fire Location Product*), o qual compreende dados diários com a localização geográfica de focos de calor registrados pelo sensor MODIS, a bordo dos satélites Terra e Aqua (GIGLIO, 2015). Neste produto cada foco de calor representa o centro de um pixel com resolução espacial de 1 km.

A fim de mensurar a confiabilidade dos focos de calor detectados, para cada registro há uma estimativa variando entre 0% e 100%. Como este trabalho tem o intuito de fornecer informações que podem apoiar a tomada de decisão na gestão pública e ambiental dos ambientes florestais, foram considerados apenas os focos de calor com um nível de confiabilidade superior a 80%, reduzindo a probabilidade do erro de comissão.



Além disso, para reduzir a influência de fatores relacionados ao processo de aquisição de dados por sensores remotos, neste limite de confiança foram considerados apenas os focos de calor registrados pelo sensor Aqua, no período de 2003 a 2016.

### **3.2.3. Mapeamento da cobertura florestal**

Para avaliar a relação entre o padrão espacial dos focos de calor e a área de floresta, foi utilizado o mapeamento realizado pelo Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MAPBIOMAS, 2017). Este banco de dados matricial inclui mapas anuais do uso e cobertura da terra gerados a partir da classificação de imagens do satélite Landsat, com uma resolução espacial de 30 metros.

Para este trabalho foram utilizados os mapeamentos do bioma Amazônia da Coleção 2.3, para os anos 2003 a 2016. Considerando os objetivos deste estudo, os mapas foram reclassificados a fim de extrair apenas a área de floresta em cada ano. Para compatibilização com os dados de focos de calor, os mapeamentos foram reamostrados para 1 km, sendo o valor de cada célula correspondente ao percentual de floresta dentro desta área.

### **3.2.4. Índice de Moran Local: análise da distribuição espacial dos focos de calor**

Para a análise da distribuição espaço-temporal, para cada foco de calor foi extraído o percentual de área florestal no ano correspondente. Em seguida, conforme o percentual de floresta, os focos de calor foram classificados nas classes de 0-20%, 20%-40%, 40%-60%, 60%-80% e 80%-100%.

Esta ponderação foi feita a fim de avaliar se o percentual de área florestal influencia na distribuição espacial dos focos de calor. Para esta análise foi aplicado o Índice de Moran Local (ANSELIN, 1995). A classe de cada foco de calor foi o atributo utilizado como parâmetro para análise das relações espaciais entre estes eventos, ao longo dos anos 2003 a 2016.

O Índice de Moran Local consiste em um tipo de Índice Local de Associação Espacial (LISA), o qual deve permitir a identificação de padrões de relação espacial significativos (ANSELIN, 1995). O Índice de Moran Local é uma técnica estatística para



testar a autocorrelação espacial local, a qual explora o grau de dependência espacial a partir de estimativas de segunda ordem, ou seja, a partir da análise da covariância entre uma entidade geográfica e sua respectiva vizinhança, definida em função de uma distância específica. O Índice de Moran Local pode ser representado por:

$$I_i = z_i \cdot W_{Zi} / \sigma^2 \quad (1)$$

onde:

$I_i$  : índice local para o objeto  $i$ ;

$z_i$  : valor do desvio do objeto  $i$ ;

$W_{Zi}$  : valor médio dos desvios dos objetos vizinhos de  $i$ ;

$\sigma^2$ : variância da distribuição dos valores dos desvios.

O Índice de Moran Local identifica a ocorrência de *clusters* e *outliers* (ANSELIN, 1995). Um índice positivo sugere a existência de *clusters*, os quais podem ser formados por entidades geográficas que possuem atributos com valores altos ou baixos, circundadas por vizinhos com atributos que possuem valores altos ou baixos semelhantes. Já um índice negativo, indica a existência de *outliers*, que podem ser formados por entidades geográficas que possuem atributos com valores altos ou baixos, circundadas por vizinhos que possuem atributos com valores altos ou baixos diferentes (ANSELIN, 1995). O Índice de Moran Local deve ser interpretado considerando o valor- $p$  e o valor- $z$  associado, os quais indicam a probabilidade de aceitação da hipótese nula de total aleatoriedade espacial (MITCHELL, 2005).

Neste trabalho foi considerado um nível de significância de 5% ( $p \leq 0,05$ ). O valor de  $z$  corresponde ao desvio padrão, o qual para o nível de significância adotado neste trabalho, admite valores menores que -1,96 ou maiores 1,96. Os valores de  $z$  localizados fora destes intervalos, indicam que há uma probabilidade pequena do padrão observado ser aleatório, o que também será indicado pelo baixo valor de  $p$  (MITCHELL, 2005). Ao atender ambas as condições, a hipótese nula pode ser rejeitada e os *clusters* e *outliers* representados por valores positivos e negativos do Índice de Moran, respectivamente, são considerados significativos.



Em relação a definição dos parâmetros do índice, para análise da distribuição espacial foi considerada a ponderação do inverso da distância ao quadrado, na qual apenas os focos de calor mais próximos têm influência sobre o alvo de análise. Neste caso, a menor distância entre dois focos de calor foi calculada considerando a distância euclidiana, ou seja, a distância em linha reta entre dois pontos. Além disso, para definição da vizinhança em torno de cada alvo, foi considerado o limite de distância padrão, o qual consiste na distância mínima que garante que cada alvo tenha pelo menos um vizinho.

## **4. RESULTADOS & DISCUSSÃO**

### **4.1. Distribuição espacial dos focos de calor na Amazônia**

Considerando a ocorrência de queimadas florestais de 2003 a 2016, a fim de auxiliar na gestão pública e ambiental do Bioma Amazônia, neste estudo foi avaliada a relação entre o percentual de floresta e a distribuição espacial dos focos de calor. As classes analisadas incluíram áreas florestais variando de 0 a 20 %, 20% a 40%, 40% a 60%, 60% a 80% e 80% a 100%. Os resultados consideram a análise do Índice de Moran Local, sendo contabilizados apenas os focos de calor em que o padrão da distribuição espacial foi significativo ( $p \leq 0.05$ ).

A Tabela 1 exibe o padrão espacial dos focos de calor conforme os percentuais de área florestal. Entre 2003 a 2016 foram avaliados 872470 focos de calor e partir da análise de correlação espacial, foi identificada uma distribuição espacial agregada para 27% destes registros. Entre estes foi notável o padrão do tipo *cluster*, no qual o agrupamento de focos de calor com valores semelhantes de área florestal correspondeu a 93% do total.

O padrão HH indica uma agregação de focos de calor em áreas com alto percentual de floresta, circundados por focos de calor localizados em áreas florestais semelhantes. Já o padrão LL indica uma distribuição agrupada de focos de calor localizados em áreas com um baixo percentual de floresta, circundados por focos de calor em áreas florestais com padrão semelhante. Em uma análise geral, de 2003 a 2016 a ocorrência de queimadas predominou em áreas com baixo percentual de floresta, representando cerca de 53% do total. Contudo, o padrão HH também foi proeminente, correspondendo a cerca de 40% ao longo da série temporal.



O padrão de agrupamento do tipo *outlier* não foi representativo ao longo dos anos, correspondendo a apenas 7%. Neste caso, o agrupamento do tipo LH indica focos de calor localizados em áreas com um baixo percentual de floresta, circundados por focos de calor em áreas com alto percentual, já o padrão HL corresponde a agregação de focos de calor localizados em áreas com alto percentual de floresta circundados por áreas com padrão distinto.

O maior percentual de queimadas em áreas que possuem uma cobertura florestal inferior a 20%, sugerem o uso do fogo como ferramenta para o manejo de áreas agropecuárias. De Mendonça *et al.*, 2004, retratam como o uso do fogo na Amazônia consiste em uma prática recorrente para limpeza e preparo do solo. O fogo é utilizado em grande escala pelos produtores rurais na região, sendo uma maneira prática para a limpeza das áreas produtivas, fornecimento de nutrientes para o solo e controle de plantas invasoras (De Mendonça *et al.*, 2004).

Esse padrão espacial também corrobora com a relação entre a ocorrência de desmatamentos e queimadas. A aplicação de políticas públicas na Floresta Amazônica, tem retratado um decréscimo nas taxas de desmatamento nos últimos anos (HANSEN *et al.*, 2013). Entretanto, também já foi evidenciado que áreas que apresentaram reduções nas taxas de desmatamento, apresentaram um aumento de 59% na ocorrência de queimadas (ARAGÃO; SHIMABUKURO, 2010). Diante disso, a redução das emissões de gases do efeito estufa devido o decréscimo do desmatamento pode ser anulado pela liberação de carbono que ocorre devido a combustão direta da matéria orgânica, assim como, por meio do processo de decomposição desencadeado pela morte da vegetação após o fogo (ARAGÃO; SHIMABUKURO, 2010; ANDERSON *et al.*, 2015).

Ao longo da série temporal analisada, apesar dos focos de calor em regiões com alta cobertura florestal ocorrerem em menor proporção, 40% das queimadas ocorreram nestas áreas e, portanto, não podem ser negligenciadas. As alterações no regime de precipitação têm resultado em períodos prolongados de seca (KASISCHKE; TURETSKY, 2006), o que tem aumentado a incidência e a gravidade do fogo. Isso ocorre porque estas condições climáticas aumentam a flamabilidade da floresta e como ecossistemas tropicais possuem pouca adaptabilidade ao fogo (COCHRANE *et al.*, 1999), a associação destes fatores aumenta a sua vulnerabilidade à queima (CHUVIECO *et al.*, 2014). Dessa forma, a combinação destes fatores e a probabilidade de espalhamento do



fogo para áreas além das fronteiras agrícolas, correspondem a fatores que podem explicar a ocorrência de queimadas em áreas florestais pouco degradadas.

Em síntese, a partir destes resultados é possível observar que a distribuição espaço-temporal das queimadas na Amazônia, apresenta uma similaridade no percentual da área florestal existente entre focos de calor inseridos na mesma vizinhança. Esse padrão evidenciou uma dicotomia no padrão das queimadas, as quais ocorrem em áreas florestais altamente degradadas ou praticamente intactas.

Diante deste contexto, o conhecimento a priori dos fatores que alteram a distribuição das queimadas é relevante para contribuir como suporte a decisão. Dessa maneira, com o intuito de combater os impactos decorrentes de queimadas florestais na Amazônia, estratégias de fiscalização e prevenção ao fogo devem ser direcionadas principalmente para as áreas que apresentam os padrões anteriormente descritos. Na próxima seção será apresentada a distribuição espacial dos focos de calor ao longo da Amazônia, o que pode auxiliar na seleção de áreas para aplicação de medidas de atenuação e mitigação ao fogo.

Tabela 1. Distribuição espacial dos focos de calor considerando o percentual de floresta, ao longo dos anos 2003 a 2016.

2003	LL	LH	HL	HH	2004	LL	LH	HL	HH
0 - 20	10748	304	0	0	0 - 20	14646	412	0	0
20 - 40	2335	213	0	0	20 - 40	2956	298	0	0
40 - 60	3	1	0	0	40 - 60	10	4	0	0
60 - 80	0	0	158	305	60 - 80	0	0	283	455
80 - 100	0	0	1132	10117	80 - 100	0	0	1556	13964

2005	LL	LH	HL	HH	2006	LL	LH	HL	HH
0 - 20	14272	418	0	0	0 - 20	8063	256	0	0
20 - 40	2989	293	0	0	20 - 40	2437	232	0	0
40 - 60		0	0	0	40 - 60	70	21	0	0
60 - 80	0	0	267	392	60 - 80	0	0	98	105
80 - 100	0	0	1534	13440	80 - 100	0	0	915	7945

2007	LL	LH	HL	HH	2008	LL	LH	HL	HH
0 - 20	12283	388	0	0	0 - 20	5200	192	0	0
20 - 40	2611	312	0	0	20 - 40	1507	174	0	0
40 - 60	14	1	0	0	40 - 60	68	16	0	0
60 - 80	0	0	204	281	60 - 80	0	0	54	40
80 - 100	0	0	1223	12034	80 - 100	0	0	473	4982



<b>2009</b>	<b>LL</b>	<b>LH</b>	<b>HL</b>	<b>HH</b>
<b>0 - 20</b>	2901	109	0	0
<b>20 - 40</b>	1242	130	0	0
<b>40 - 60</b>	144	36	0	0
<b>60 - 80</b>	0	0	11	1
<b>80 - 100</b>	0	0	305	2458

<b>2010</b>	<b>LL</b>	<b>LH</b>	<b>HL</b>	<b>HH</b>
<b>0 - 20</b>	8731	297	0	0
<b>20 - 40</b>	2036	195	0	0
<b>40 - 60</b>	19	2	0	0
<b>60 - 80</b>	0	0	71	90
<b>80 - 100</b>	0	0	649	8226

<b>2011</b>	<b>LL</b>	<b>LH</b>	<b>HL</b>	<b>HH</b>
<b>0 - 20</b>	2500	89	0	0
<b>20 - 40</b>	686	84	0	0
<b>40 - 60</b>	21	8	0	0
<b>60 - 80</b>	0	0	21	6
<b>80 - 100</b>	0	0	197	1899

<b>2012</b>	<b>LL</b>	<b>LH</b>	<b>HL</b>	<b>HH</b>
<b>0 - 20</b>	3851	125	0	0
<b>20 - 40</b>	1388	145	0	0
<b>40 - 60</b>	95	16	0	0
<b>60 - 80</b>	0	0	22	14
<b>80 - 100</b>	0	0	327	3531

<b>2013</b>	<b>LL</b>	<b>LH</b>	<b>HL</b>	<b>HH</b>
<b>0 - 20</b>	2293	66	0	0
<b>20 - 40</b>	667	67	0	0
<b>40 - 60</b>	72	9	0	0
<b>60 - 80</b>	0	0	16	6
<b>80 - 100</b>	0	0	177	1842

<b>2014</b>	<b>LL</b>	<b>LH</b>	<b>HL</b>	<b>HH</b>
<b>0 - 20</b>	3683	97	0	0
<b>20 - 40</b>	1277	125	0	0
<b>40 - 60</b>	108	30	0	0
<b>60 - 80</b>	0	0	12	4
<b>80 - 100</b>	0	0	282	3048

<b>2015</b>	<b>LL</b>	<b>LH</b>	<b>HL</b>	<b>HH</b>
<b>0 - 20</b>	4643	157	0	0
<b>20 - 40</b>	1968	184	0	0
<b>40 - 60</b>	198	47	0	0
<b>60 - 80</b>	0	0	10	2
<b>80 - 100</b>	0	0	389	4275

<b>2016</b>	<b>LL</b>	<b>LH</b>	<b>HL</b>	<b>HH</b>
<b>0 - 20</b>	3249	83	0	0
<b>20 - 40</b>	1720	121	0	0
<b>40 - 60</b>	244	49	0	0
<b>60 - 80</b>	0	0	0	0
<b>80 - 100</b>	0	0	284	2838

#### **4.2. Apoio a decisão: mapeamento da distribuição espaço-temporal dos focos de calor no bioma Amazônia**

Os resultados obtidos indicam que os focos de calor apresentam uma dependência espacial, na qual há uma influência da variação da área florestal circundante. Diante disso, a fim de identificar áreas de maior risco e com maior probabilidade de ocorrência de queimadas, é fundamental conhecer a distribuição geográfica destes eventos na Amazônia. Para obter estas informações, os resultados obtidos anteriormente foram representados como mapas, indicando o padrão espaço-temporal da distribuição dos focos



de calor em relação ao percentual de área florestal, ao longo dos anos 2003 a 2016 (Figuras 2, 3 e 4).

Foi observado um contraste na distribuição geográfica dos focos de calor na Amazônia. Ao longo de toda a série temporal, os focos de calor em áreas florestais altamente degradadas concentram-se na região do Arco do Desmatamento, distribuídos principalmente em porções dos estados do Mato Grosso, Maranhão, Pará, Rondônia e Tocantins. Já os focos de calor em áreas com alta cobertura florestal localizam-se principalmente na porção central da Amazônia, em regiões dos estados do Acre, Amazonas, Pará, Maranhão e Amapá.

Com o intuito de combater os impactos decorrentes do fogo, o conhecimento desta dicotomia indica que estratégias distintas devem ser utilizadas nestas áreas. A maior ocorrência de focos de calor está relacionada a áreas com baixo percentual florestal, as quais estão localizadas principalmente no Arco do Desmatamento. Nesta região concentram-se produtores rurais de médio e grande porte, que removem a cobertura florestal para o desenvolvimento de atividades agropecuárias associadas a exploração madeireira, o cultivo da soja e a pecuária (FEARNSIDE, 2010).

Embora o desmatamento e as queimadas representem impactos distintos, há uma associação entre estas atividades no Arco do Desmatamento, uma vez que, em sequência à derrubada da área florestal é frequente a queima da biomassa vegetal restante (FEARNSIDE, 2002). Contudo, a prática do fogo em ambientes florestais é proibida por legislação federal, sendo considerada crime ambiental. O art. 38 da Lei nº 12.651/2012 (Novo Código Florestal) proíbe o uso do fogo na vegetação, com ressalva à algumas situações.

Art. 38. É proibido o uso de fogo na vegetação, exceto nas seguintes situações:

- I - em locais ou regiões que justifiquem o emprego do fogo em práticas agropastoris ou florestais, mediante prévia aprovação do órgão estadual ambiental;
- II - emprego da queima controlada em Unidades de Conservação, em conformidade com o plano de manejo, visando ao manejo



conservacionista da vegetação nativa, cujas características ecológicas estejam associadas evolutivamente à ocorrência do fogo;  
III - atividades de pesquisa científica vinculada a projeto de pesquisa devidamente aprovado pelos órgãos competentes. (BRASIL, 2012).

Apesar da legislação vigente, o elevado número de focos de calor nesta região indica uma falta de controle e baixa fiscalização ambiental destas áreas. Diante disso, medidas de combate ao fogo no Arco do Desmatamento devem considerar mecanismos para aprimorar o monitoramento das atividades em grandes e médias propriedades rurais, a fim de atenuar os impactos das queimadas.

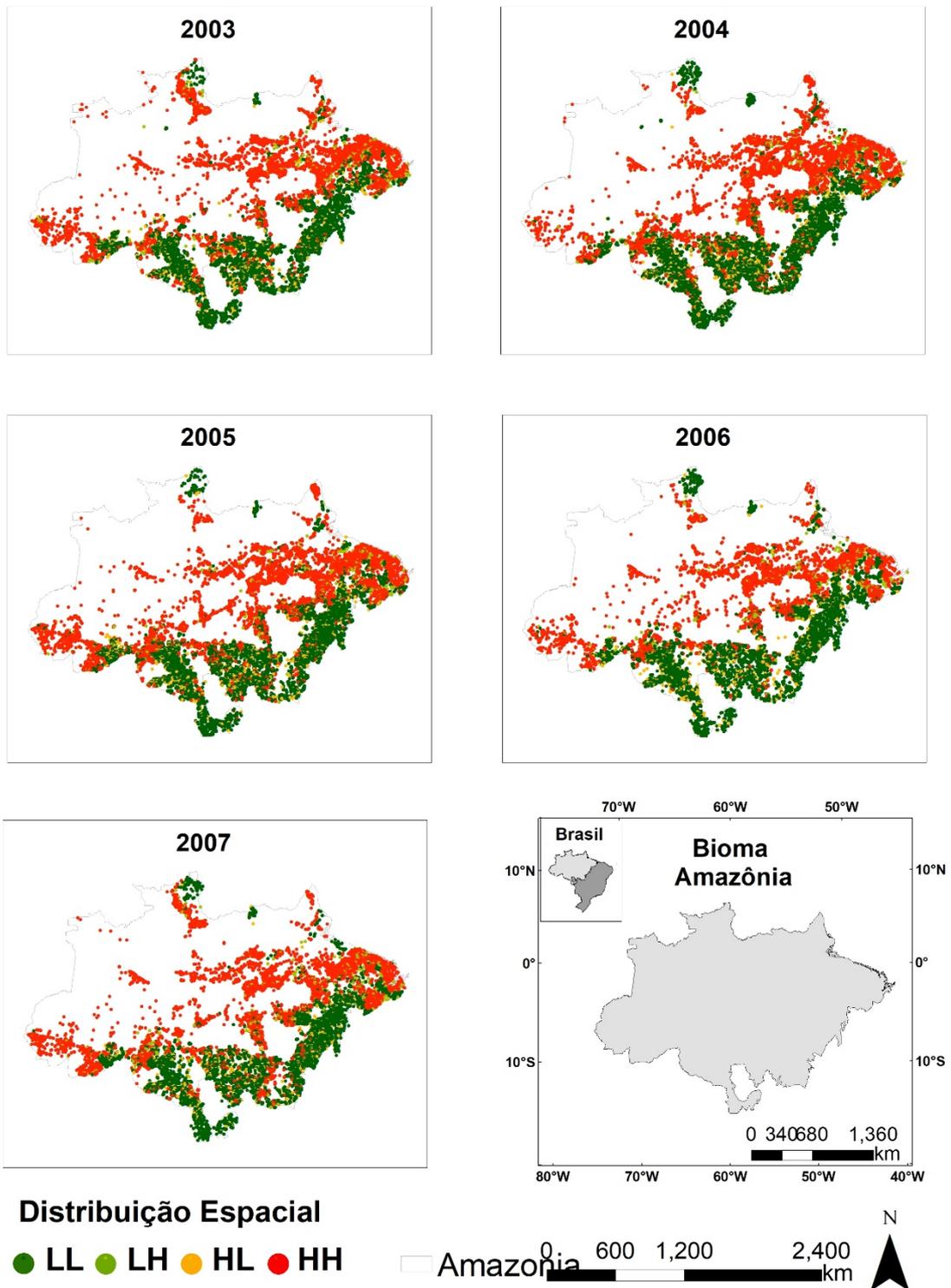
Nas regiões centrais do bioma Amazônia há uma predominância de focos de calor relacionados a áreas com percentual de cobertura florestal superior a 80%, o que sugere uma queima acidental da vegetação. Neste caso, a ocorrência de queimadas nestas áreas pode ser decorrente da propagação descontrolada do fogo, iniciado em propriedades vizinhas a estes ambientes (SCHROEDER *et al.*, 2009). Além disso, a fiscalização também deve ser relevante para estas regiões, tanto para combate do fogo ilegal quanto para o monitoramento de queimadas autorizadas. Neste último caso, o uso de práticas como a construção de aceiros pode evitar o espalhamento do fogo para áreas adjacentes, evitando impactos sobre grandes áreas florestais.

Além disso, as mudanças climáticas têm afetado a severidade das secas na Amazônia (KASISCHKE; TURETSKY, 2006). Estas condições tornam as florestas tropicais mais susceptíveis ao fogo, o que pode ser mais um condicionante para o número expressivo de focos de calor nesta região. Por isso, para compreender melhor o processo do fogo nesta região e auxiliar na gestão ambiental destes ecossistemas, é necessário avaliar também a influência de fatores climáticos, como o aquecimento global decorrentes de atividades antrópicas, a ocorrência de anos de El Niño e alterações no regime de precipitação.

Os resultados sobre a relação dos focos de calor com o percentual de floresta, bem como, o padrão de distribuição espacial destes eventos, indicaram as áreas mais impactadas pelo fogo na Amazônia. Desta maneira, este conjunto de informações pode auxiliar na definição de estratégias de prevenção ao fogo nestas florestas tropicais, auxiliando na tomada de decisão quanto a gestão pública e ambiental deste bioma.



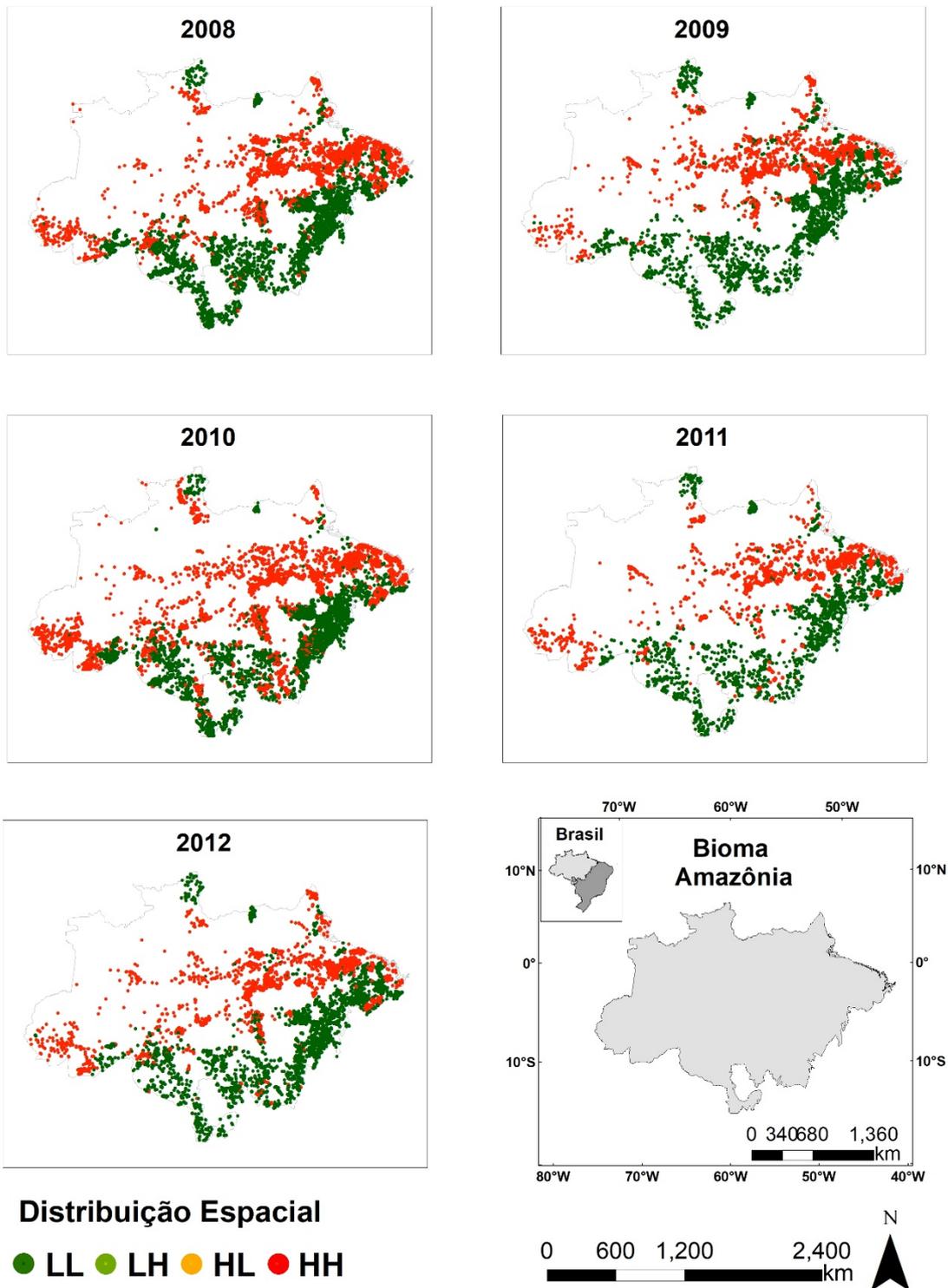
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**



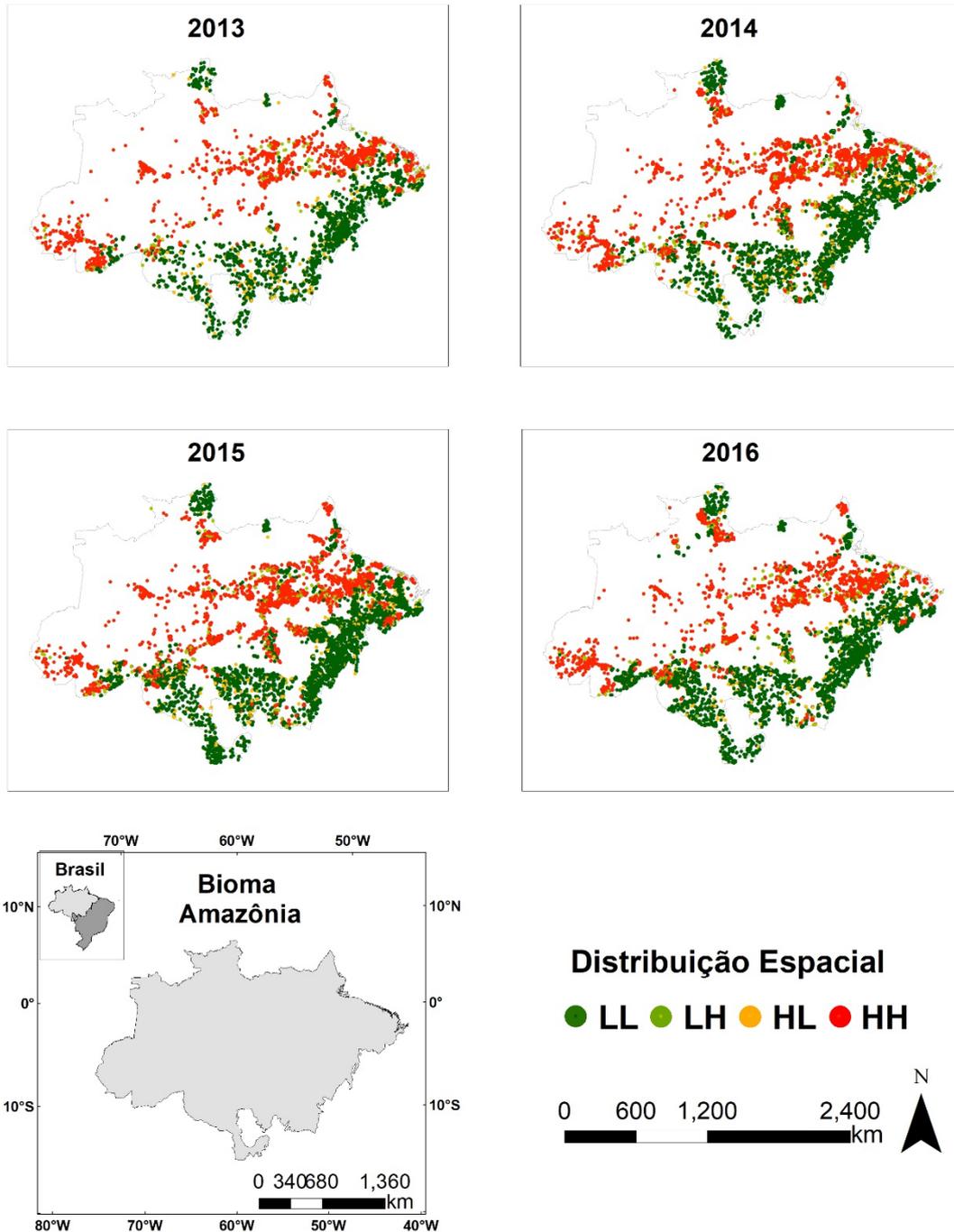
**Figura 2.** Distribuição espacial dos focos de calor conforme o percentual de área florestal, para anos de 2003 a 2007.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



**Figura 3.** Distribuição espacial dos focos de calor conforme o percentual de área florestal, para anos de 2008 a 2012.



**Figura 4.** Distribuição espacial dos focos de calor conforme o percentual de área florestal, para anos de 2013 a 2016.

## 5. CONCLUSÃO

Este estudo foi desenvolvido para investigar a relação entre a distribuição dos focos de calor na Amazônia e o percentual de área florestal. Os resultados indicaram um padrão espaço-temporal similar ao longo do período de 2003 a 2016. Diante disso, foi



possível concluir que a relação espacial foi caracterizada por uma dicotomia na distribuição destes eventos, na qual focos de calor em áreas com uma cobertura florestal inferior a 20%, são predominantes ao longo do Arco do Desmatamento, enquanto que, os focos associados a áreas com uma cobertura florestal superior a 80%, situam-se principalmente na região central do bioma.

Estes resultados sugerem que os processos que desencadeiam os eventos de queimadas nestas duas regiões podem ser distintos, os quais devem ser consideradas para a definição de estratégias de combate ao fogo. No Arco do Desmatamento há uma estreita relação com as atividades agropecuárias e extração madeireira na região, enquanto na área mais central da Amazônia eventos de queimadas podem ocorrer acidentalmente, devido ao espalhamento do fogo descontrolado de propriedades rurais vizinhas, bem como, devido a influência de fatores climáticos.

Diante deste contexto, o conhecimento sobre a distribuição espacial do fogo e a mensuração da sua relação com a área florestal pode ser útil como uma ferramenta de combate às queimadas florestais. Além disso, novos estudos utilizando outras bases de dados relacionados a distribuição dos focos de calor e da cobertura florestal devem ser realizados, a fim de tornar mais efetiva a aplicação destes resultados. Esta abordagem permitirá verificar se há uma padronização nos resultados obtidos neste estudo, e estas informações poderão ser utilizadas para gerar novos mecanismos e instrumentos para mitigação e atenuação das queimadas florestais na Amazônia.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ANDERSON, Liana Oighenstein *et al.* Disentangling the contribution of multiple land covers to fire-mediated carbon emissions in Amazonia during the 2010 drought. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 29, n. 10, p. 1739–1753, out. 2015. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/2014GB005008>>.

ANSELIN, L. Local Indicators of Spatial Association-LISA. *Geographical Analysis*, v. 27, n. 2, p. 93–115, 3 set. 2010. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>>.

ARAGÃO, Luiz Eduardo O. C.; SHIMABUKURO, Yosio E. The Incidence of Fire in Amazonian Forests with Implications for REDD. *Science*, v. 328, n. 5983, p. 1275–1278, 4 jun. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1186925>>.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

ARAGÃO, Luiz Eduardo O. C. *et al.* 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications*, v. 9, n. 1, p. 536, 13 dez. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>>.

ARAGÃO, Luiz Eduardo O. C. *et al.* Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. *Geophysical Research Letters*, v. 34, n. 7, p. L07701, 3 abr. 2007. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2006GL028946>>.

ARCHIBALD, S.; STAVER, A. C.; LEVIN, S. A. Evolution of human-driven fire regimes in Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 109, n. 3, p. 847–852, 17 jan. 2012.

Disponível em: <<http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1118648109>>.

BRASIL. Decreto Federal nº 12.651 de 25 de maio de 2012. Institui o Novo Código Florestal Brasileiro. Brasília, DF, 2012. Acesso em: 07/05/2018.

CÂMARA, G; MONTEIRO, AMV. Conceitos básicos da ciência da geoinformação. In: CÂMARA, G; DAVIS, C; MONTEIRO, AMV (Org.). *Introdução à ciência da geoinformação*. 2001. p. 1–35.

Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>.

DE MENDONÇA, Mário Jorge Cardoso *et al.* The economic cost of the use of fire in the Amazon. *Ecological Economics*, v. 49, n. 1, p. 89–105, maio 2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921800904000424>>.

BOWMAN, D. M. J. S. *et al.* Fire in the Earth System. *Science*, v. 324, n. 5926, p. 481–484, 24 abr. 2009.

Disponível em: <<http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1163886>>.

COCHRANE, Mark A. *et al.* Positive Feedbacks in the Fire Dynamic of Closed Canopy Tropical Forests. *Science*, v. 284, n. 5421, p. 1832–1835, 11 jun. 1999. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10364555>> <<http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.284.5421.1832>>.

CHUVIECO, Emilio *et al.* Integration of ecological and socio-economic factors to assess global vulnerability to wildfire. *Global Ecology and Biogeography*, v. 23, n. 2, p. 245–258, fev. 2014. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/geb.12095>>.

DIAZ, Maria del Carmen Vera *et al.* O Prejuízo Oculto do Fogo : Custos Econômicos das Queimadas e Incêndios Florestais na Amazônia. Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM); Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA); Centro de Pesquisa Woods Hole (WHRC). Disponível em:

<[http://queimadas.cptec.inpe.br/~rqueimadas/material3os/Preju\\_fogo.pdf](http://queimadas.cptec.inpe.br/~rqueimadas/material3os/Preju_fogo.pdf)>.

FEARNSIDE, Philip.M. Consequências do desmatamento da Amazônia. *Scientific American Brasil Especial Biodiversidade*, pp. 54-59. 2010.

FEARNSIDE, Philip M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

*Acta Amazonica*, v. 36, n. 3, p. 395–400, 2006. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0044-59672006000300018&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-59672006000300018&lng=pt&tlng=pt)>.

FEARNSIDE, Philip M. Fogo e emissão de gases de efeito estufa dos ecossistemas florestais da Amazônia brasileira. *Estudos avançados.*, v. 14, p. 99 – 123.

GIGLIO, Louis. MODIS collection 6 active fire product user's guide, revision A. 2015. Disponível em: <[http://modisfire.umd.edu/files/MODIS\\_C6\\_Fire\\_User\\_Guide\\_A.pdf](http://modisfire.umd.edu/files/MODIS_C6_Fire_User_Guide_A.pdf)>. Acesso em: 02 abr. 2018.

HANSEN, M. C. *et al.* High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, v. 342, n. 6160, p. 850–853, 15 nov. 2013. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24233722>>.

Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística (IBGE). Mapa de Biomas e de Vegetação. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>. Acesso em: 20 abr. 2018.

KASISCHKE, Eric S.; TURETSKY, Merritt R. Recent changes in the fire regime across the North American boreal region—Spatial and temporal patterns of burning across Canada and Alaska. *Geophysical Research Letters*, v. 33, n.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Biodiversidade Brasileira. 2002. Disponível em: [http://www.mma.gov.br/estruturas/chm/\\_arquivos/Bio5.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/chm/_arquivos/Bio5.pdf). Acesso em: 20 abr. 2018.

MITCHELL, Andy. *The ESRI Guide to GIS Analysis, Volume 2: Spatial Measurements and Statistics*. California: ESRI Press, 2005.

MYERS, Norman *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, v. 403, n. 6772, p. 853–8, 24 fev. 2000. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10706275>>.

PROJETO DE MAPEAMENTO ANUAL DA COBERTURA E USO DO SOLO NO BRASIL - MapBIOMAS. 2017. Algorithm Theoretical Basis Document & Results. Disponível em: <http://mapbiomas.org/pages/methodology>. Acesso em: 05 abr. 2018.

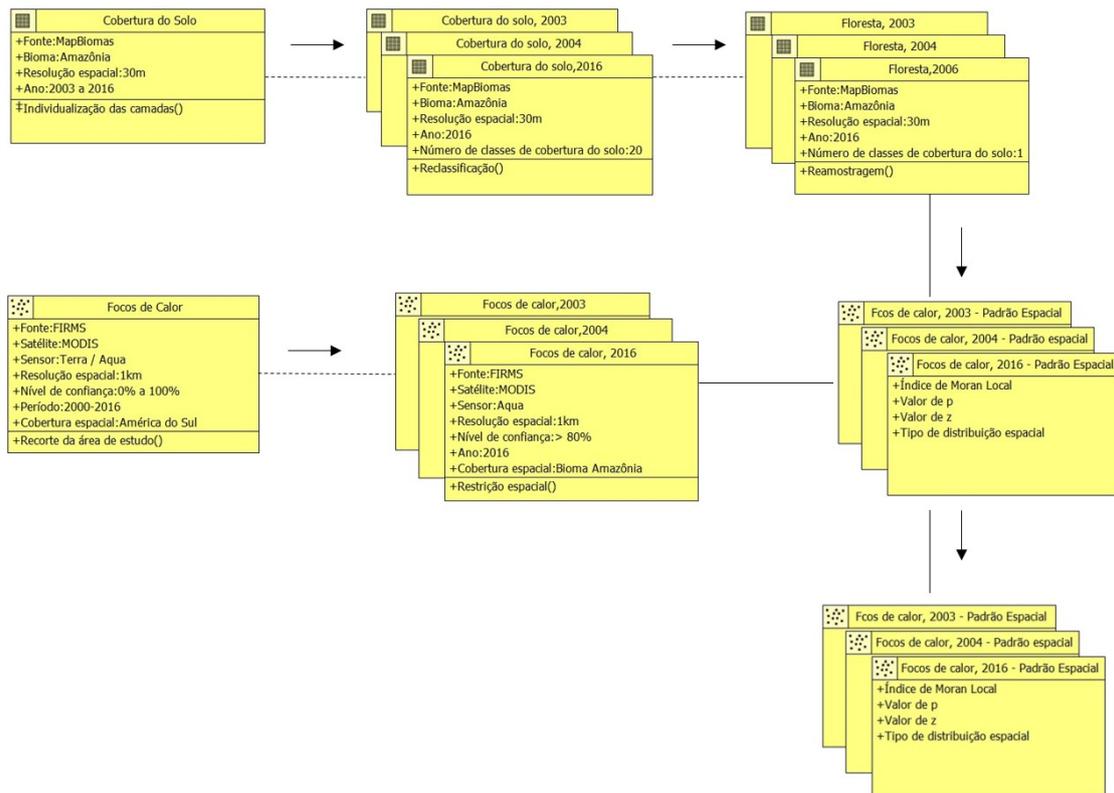
SCHROEDER, W.; ALENCAR, A.; ARIMA, E.; SETZER, A. The Spatial Distribution and Interannual Variability of Fire in Amazonia. In: Keller, M.; Bustamante, M.; Gash, J.; Silva Dias, P. (Eds). *Amazonia and Global Change*. Washington, AGU, Geophysical Monograph Series, v.186, p. 43-60. 2009.

TOMZHINSKI, Gustavo Wanderley; COURA, Pedro Henrique Ferreira; FERNANDES, Manoel do Couto. Avaliação da detecção de focos de calor por Sensoriamento Remoto para o Parque Nacional do Itatiaia. *Biodiversidade Brasileira*, v. 2, p. 201–211, 2011.



## APÊNDICE

Síntese do fluxo de etapas realizadas para analisar a relação espacial entre focos de calor e área de floresta, no bioma Amazônia. Todas as etapas foram descritas detalhadamente ao longo deste trabalho.



**Figura 5.** Fluxo das etapas de processamento e análise de dados.