



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal

**Abrangência e recorrência dos incêndios e a resiliência da
vegetação na Serra dos Pireneus - Goiás**

ANA FLOR MONTERO RIBEIRO

Orientador: Yuri Botelho Salmona
Coorientador: Eraldo A. Trondoli Matricardi

Brasília-DF, dezembro de 2016



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal

**ABRANGÊNCIA E RECORRÊNCIA DOS INCÊNDIOS E A
RESILIÊNCIA DA VEGETAÇÃO NA SERRA DOS
PIRENEUS - GOIÁS**

Discente: Ana Flor Montero Ribeiro, Matrícula: 10/0024599

Linha de pesquisa: Conservação de Recursos Naturais.

Orientador: Yuri Botelho Salmona

Coorientador: Eraldo Aparecido T. Matricardi

TCC apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheira Florestal.

Brasília-DF, dezembro de 2016



Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal

ABRANGÊNCIA E RECORRÊNCIA DE INCÊNDIOS E A RESILIÊNCIA
DA VEGETAÇÃO NA SERRA DOS PIRENEUS - GO

Estudante: Ana Flor Montero Ribeiro

Matrícula: 10/0024599

Orientador: Prof. Dr. Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi

Menção: SS

Prof. Dr. Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi
Orientador (EFL - UnB)

Prof. M.e. Yuri Botelho Salmona
Coorientador (IG - UnB)

Prof. Dr. Carlos Henke de Oliveira
Membro da Banca (ECL - UnB)

Brasília, 2016.

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço em primeiro lugar a minha mãe, Mercedes Montero, que sempre me apoiou e confiou em mim, me dando meios de realizar meus sonhos e estudos. Não menos importante, eu agradeço a Marcia Joppert, Laerte e Fernando Rimoli, que dividiram mais do que uma casa comigo, dividiram sua intimidade, família e amor, além de muita consideração e sabedoria para eu continuar meus estudos e vida. Agradeço também minhas queridas irmãs, Maria Una e Áurea, por acreditarem em mim mesmo quando era difícil para mim mesma.

Agradeço as minhas amigas, Jasmim Madueño e Talita Carvalho, pessoas que me inspiram e me enchem de orgulho para as escolhas e conquistas da vida profissional e pessoal, que nos momentos mais difíceis da minha vida me ouviram, me compreenderam e me ajudaram.

Agradeço muito ao meu querido orientador, Yuri Salmona Botelho, que tão pacientemente me aconselhou e me fez acreditar no meu trabalho, que em muitos momentos duvidei ter sentido ou valor. Agradeço meu coorientador e professor Eraldo por ser o professor mais “pai” do departamento, tão sensível e bom educador e que abriu meus olhos para uma área incrível de conhecimento e técnica aplicados neste trabalho.

RESUMO

O Cerrado é um *hotspot* devido a sua alta biodiversidade e por estar sob alto degradação. Nesse contexto, as Unidades de Conservação (UC) são fundamentais para conservação do bioma. As UC costumam ser ilhas de vegetação nativa em meio a monocultivos e pastagens. Essas áreas antropizadas costumam ser queimadas em regime anual ou bianual, no período da seca, o que representa um enorme risco às UC, pois nesta época a vegetação está altamente inflamável tornando o fogo descontrolado. Apesar do fogo ocorrer de forma natural no Cerrado, mesmo antes da presença do homem, e ser até mesmo fundamental para diversas funções do bioma, a recorrência de incêndios provocadas por ação antrópica está superior ao que os ambientes naturais toleram, sendo um risco à conservação de áreas nativas. O presente estudo visa, portanto, contribuir com conhecimento acerca de incêndios em áreas do Cerrado. Mais especificamente, identificar e mapear as cicatrizes de incêndios florestais, obtendo-se sua amplitude e frequência, bem como a resiliência da vegetação em relação a recorrência de incêndios. Utilizando imagens dos satélites Landsat 5 e 8. A área estudada compreende o Parque Estadual dos Pireneus, Área de Proteção Ambiental dos Pireneus e seu entorno (faixa de 10 km), em Goiás. O mapeamento foi feito anualmente entre 2005 e 2015, (exceto 2012, pois não há imagens do local disponível), nos meses de agosto ou setembro. As áreas atingidas pelo fogo foram detectadas a partir de interpretação visual das imagens, e classificação supervisionada, obtendo-se as áreas das cicatrizes de incêndios em cada ano, bem como áreas atingidas por fogo em mais de um ano. O mapa da cobertura do solo foi feito através da atualização de uma classificação já existente da área. O impacto sobre a fração de cobertura da vegetação foi estimado a partir do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e avaliado o efeito repetitivo do fogo para as diferentes formações vegetacionais. Para todos os anos analisados foram identificadas cicatrizes de fogo considerando a área total analisada. Os anos em que as áreas das cicatrizes foram mais amplas foram 2013, 2007 e 2010, tendo 7,84%, 7,28% e 6,52% de seus 116.604 hectares queimados, respectivamente. Na APA dos Pireneus também foram mapeadas cicatrizes de fogo todos os anos, e no Parque em 2006, 2007, 2010, 2014 e 2015. Quanto a reincidência do fogo nas mesmas áreas, dos dez anos analisados, houve regiões atingidas por fogo de 1 a 6 vezes no entorno e na APA, e de 1 a 3 vezes no Parque. As áreas mais abrangentes de cicatrizes de fogo ocorreram em média após quatro anos. Foi observada diferença significativa nos valores de NDVI de áreas não atingidas por fogo e áreas atingidas uma vez por fogo no mesmo ano para as diferentes formações vegetacionais (campo, savana e floresta). A relação entre os valores de NDVI e a recorrência de fogo se mostrou linear para as formações campestres e savânicas, mostrando o padrão de decréscimo do índice em relação ao aumento do número de reincidência do fogo. O período decorrido sem ocorrência do fogo faz diferença nos valores de NDVI; a ocorrência do fogo mais recentemente faz as formações vegetacionais terem valor de NDVI mais baixos do que aquelas atingidas por fogo há mais tempo. No entanto, a diferença do NDVI de áreas sem incidência de fogo e com, independentemente da frequência destas, só é estatisticamente significativa para formações florestais, indicando a fragilidade desta formação e a resiliência dos outros tipos vegetacionais.

Palavras-chave: Cerrado, Unidade de Conservação, fogo, índice de vegetação, imagens de satélite.

ABSTRACT

The Cerrado is a hotspot due to its high biodiversity and for being under high degradation. In this context, Conservation Units (UC) are fundamental for conservation of the biome. UC are usually islands of native vegetation amid monocultures and pastures. These anthropic areas are usually burned on an annual or biannual basis, in the drought period, which represents a great risk to the UC, because at these period the vegetation is highly flammable making the fire uncontrollable. Despite the natural occurrence of fire in Cerrado, even before the presence of man, and it being a fundamental event for various functions of the biome, the recurrence of fires caused by anthropic action is superior to the environment's tolerance, being a risk for conservation of native areas. This study aims, therefore, to contribute with the knowledge about the fires in Cerrado's areas. More specifically, to identify and map scars of forest fires, obtaining their amplitude and frequency, as well the resilience of the vegetation in relation to the recurrence of fires. Using images from the Landsat 5 and 8 satellites. The area of study is composed of the Parque Estadual do Pireneus, the Área de Proteção Ambiental dos Pireneus and its surroundings (10 km range) in Goiás. The mapping was done annually between 2005 and 2015, except for 2012 (there are no pictures for this year and place available), in the months of August or September. The areas hit by fires were detected through visual interpretation of the images, and supervised classification, obtaining the areas of fire scars each year as well the areas hit by fire in more than a year. The map of the ground cover was made updating an existing classification of the area. The impact on the vegetation cover was estimated from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and evaluated the fire effect in different vegetation formations. For all analyzed years, fire scars were identified considering the total area analyzed. The years in which the areas of scars were wider were 2013, 2007 and 2010, having 7.84%, 7.28% and 6.52% of its 116,604 hectares burned, respectively. In the APA of the Pireneus, fire scars were detected for every year. In the Park fire scars were detected in 2006, 2007, 2010, 2014 and 2015. The recurrence of fire in the same area, for the 10 years analyzed, was of 6 times in the surroundings and in the APA, and 1 to 3 times in the Parque. The greatest fire scars areas occurred in an interval of four years. A significant difference was observed in the NDVI values of areas not reached by fire and areas hit by fire once in the same year for all different vegetation formations (grassland, savanna and forest). The relationship between the NDVI values and the fire recurrence was shown to be linear for the grassland and savanna formations, presenting a decrease in the index in relation to the increase in the number of fire recurrence. The period elapsed without of fire makes difference in NDVI values; the occurrence of fire in more recent years present lower NDVI values compared to those fires happened a longer time. However, the NDVI difference of areas with and without fire incidence, regardless of their frequency, is statistically significant for forest forms, indicating the fragility of this formation and the resilience of the other vegetation types.

Keywords: Cerrado, Conservation Unit, fires, vegetation index, satellite images.

SUMÁRIO

RESUMO	4
ABSTRACT	5
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABELAS	9
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	10
INTRODUÇÃO.....	11
OBJETIVOS.....	13
HIPÓTESES	14
ÁREA DE ESTUDO	14
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
O Fogo no Cerrado	17
Monitoramento de incêndios através de sensoriamento remoto.....	19
Características espectrais das cicatrizes de fogo.....	20
Características espectrais da vegetação	22
Índice de Vegetação.....	27
Processamento das Imagens Landsat.....	28
MATERIAL E MÉTODOS.....	29
Base de Dados.....	30
Pré-processamento	31
Abrangência das cicatrizes de fogo.....	32
Recorrência do fogo.....	33
Uso e cobertura do solo	34
Resiliência da vegetação.....	34
Análises Estatísticas.....	35
RESULTADOS	36
Abrangência	36
Abrangência de acordo com o uso e cobertura do Solo.....	40
Recorrência	48
Intervalo entre incêndios.....	53
Resiliência.....	58
DISCUSSÃO.....	69
Abrangência	69

Abrangência de acordo com o uso e cobertura do solo	70
Recorrência	72
Intervalo entre incêndios.....	73
Resiliência.....	73
CONCLUSÃO.....	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Localização e delimitação do Parque e APA dos Pireneus e de seu entorno (10 km de raio).....	15
Figura 2 - Seção transversal de uma folha mostrando os possíveis caminhos da luz incidente. Os cloroplastos podem ser vistos nas células do mesófilo. Fonte: GATES et al. (1965).	24
Figura 3 - Fluxograma demonstrando os passos metodológicos utilizados.	29
Figura 4 - Imagem Landsat 5/TM com arranjo de bandas BGR 3/4/5 de 16/09/2005 (a) e imagem Landsat 8/OLI com arranjo de bandas BGR 4/5/6 de 12/09/2015 (b).....	33
Figura 5 - Cicatrizes de fogo no entorno (A), na APA (B), e no Parque dos Pireneus (C), as percentagens destas cicatrizes em relação a área total analisada.	37
Figura 6 - Áreas absolutas das cicatrizes de fogo entre 2005 e 2015 (exceto 2012) para o entorno, APA dos Pireneus, e o Parque Estadual dos Pireneus.....	38
Figura 7 - Área relativa das cicatrizes de fogo no entorno, na APA e no Parque dos Pireneus no período de 2005 a 2015.....	39
Figura 8 - Áreas absolutas (ha) de cicatrizes de fogo ao longo dos anos (2005 a 2015).39	39
Figura 9 - Áreas relativas das cicatrizes de fogo ao longo dos anos (2005 a 2015).....	40
Figura 10 - Classificação da cobertura e uso do solo (agropecuária, campestre, savânica, florestal, mineração, urbana, reflorestamento e corpos de água) da região analisada....	41
Figura 11 - Área absoluta (ha) dos diferentes usos e coberturas do solo para a região do Entorno, da APA e do Parque dos Pireneus.	42
Figura 12 - Percentual de cada tipo de uso e cobertura do solo em relação a região analisada; área total (a), área do entorno (b), área da APA (c) e área do Parque dos Pireneus (d).....	43
Figura 13 - Áreas relativas dos diferentes usos e coberturas do solo em relação a área de cada localidade em que ocorrem; entorno, APA e Parque dos Pireneus.	44
Figura 14 - Áreas absolutas das cicatrizes de fogo nos diferentes tipos de cobertura do solo entre 2005 e 2015 na área total (entorno, APA e Parque dos Pireneus).	45
Figura 15 - Áreas relativas das cicatrizes de fogo para os diferentes tipos de cobertura do solo entre 2005 e 2015 na área total (entorno, APA e Parque dos Pireneus).	45
Figura 16 - Gráficos de áreas absolutas (a) e áreas relativas (b) de cicatrizes de fogo nos diferentes usos e coberturas do solo entre 2005 e 2015 na área do entorno.....	46

Figura 17 - Gráficos de áreas absolutas (a) e áreas relativas (b) das cicatrizes de fogo nos diferentes usos e coberturas do solo entre 2005 e 2015 na área da APA dos Pireneus. .	47
Figura 18 - Gráficos de áreas absolutas (a) e áreas relativas (b) das cicatrizes de fogo nos diferentes usos e coberturas do solo entre 2005 e 2015 na área do Parque dos Pireneus.	48
Figura 19 – Cicatrizes de fogo acumuladas entre 2005 e 2015.	49
Figura 20 - Recorrência do fogo entre 2005 e 2015 e suas áreas absolutas na área total analisada.	50
Figura 21 - Recorrência de fogo entre 2005 e 2015 e suas áreas absolutas no entorno, na APA e no Parque dos Pireneus.	51
Figura 22 - Recorrência de fogo, e as áreas relativas das cicatrizes de fogo no entorno, na APA e no Parque dos Pireneus no período de 2005 a 2015.	51
Figura 23 - Área absoluta das cicatrizes de fogo para as diferentes recorrências do fogo (entre 2005 e 2015) e usos e coberturas do solo na região total estudada.	52
Figura 24 - Área relativa das cicatrizes de fogo para as diferentes recorrências de fogo (entre 2005 e 2015) e usos e coberturas do solo na região total estudada.	53
Figura 25 - Intervalo de tempo (anos) entre a primeira e segunda ocorrência de fogo e respectivas áreas das cicatrizes de fogo (hectares).	54
Figura 26 - Intervalo de tempo entre a primeira e segunda ocorrência do fogo (anos) (a), e entre a segunda e terceira ocorrência do fogo (b) e respectivas áreas das cicatrizes de fogo (ha).	55
Figura 27 - Intervalo de tempo entre o primeiro e segundo incêndio (anos) (a), entre o segundo e terceiro incêndio (b) e entre o terceiro e quarto incêndio (c) e respectivas áreas das cicatrizes de fogo (ha).	56
Figura 28 - Intervalo de tempo entre a primeira e segunda ocorrência de fogo (anos) (a), entre a segunda e terceira ocorrência de fogo (b), entre a terceira e quarta ocorrência de fogo (c) e entre a quarta e quinta ocorrência de fogo (d) e respectivas áreas das cicatrizes (ha).	57
Figura 29 - Intervalo de tempo entre a primeira e segunda ocorrência de fogo (anos) (a), entre a segunda e terceira ocorrência de fogo (b), entre a terceira e quarta ocorrência de fogo (c), entre a quarta e quinta ocorrência de fogo (d) e entre a quinta e sexta ocorrência de fogo (e) e respectivas áreas das cicatrizes.	58
Figura 30 - Intervalo médio entre ocorrências de fogo (anos) e suas respectivas áreas médias das cicatrizes de fogo (ha).	58
Figura 31 - Valores médios de NDVI para as diferentes formações vegetacionais e para as situações em que a vegetação não foi atingida por fogo e em que foi atingida por fogo no ano de 2005. Os valores percentuais são a diferença nos valores de NDVI para zero e uma (1) ocorrência de fogo.	60
Figura 32 - Valores médios de NDVI para as diferentes formações vegetacionais e para as situações em que a vegetação não foi atingida por fogo e em que foi atingida no ano de 2015. Os valores percentuais são a diferença nos valores de NDVI para zero e uma (1) ocorrência.	61
Figura 33 - NDVI de formações campestres medidos em 2015 de áreas com diferentes recorrências do fogo entre 2005 e 2015.	62

Figura 34 - NDVI de formações savânicas medidos em 2015 de áreas com diferentes recorrências de fogo entre 2005 e 2015.....	63
Figura 35 - NDVI de formações florestais medidos em 2015 de áreas com diferentes recorrências de fogo entre 2005 e 2015.....	63
Figura 36 - NDVI medido em 2015 agrupado por tipo vegetacional comparando amostra de referência (sem ocorrência de fogo durante o período de 2005 a 2015), com ocorrência de fogo em 2005, com ocorrência de fogo em 2014.	64
Figura 37 - NDVI medido em 2015 agrupado por tipo vegetacional comparando amostra de referência (sem ocorrência de fogo durante o período de 2005 a 2015), com áreas atingidas pelo fogo pelo menos duas vezes; em 2006 e 2007, e em 2010 e 2011.....	66
Figura 38 - NDVI medido em 2015 agrupado por tipo vegetacional comparando amostra de referência (sem ocorrência durante o período de 2005 a 2015), com áreas atingidas pelo menos três vezes; em 2005, 2006 e 2007, e em 2009, 2010 e 2014.....	67
Figura 39 - NDVI medido em 2015 agrupado por tipo vegetacional comparando amostra de referência (sem ocorrência durante o período de 2005 a 2015), com áreas atingidas pelo menos quatro vezes; em 2005, 2006, 2007 e 2010, e em 2007, 2010, 2011 e 2014.	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Dados referentes às imagens utilizadas.....	30
Tabela 2 - Área em hectare e porcentagem dos diferentes usos e coberturas do solo na área estudada (Entorno, APA e Parque).	41
Tabela 3 - Percentual atingido por fogo de cada classe de uso e cobertura da Terra na área total, no período de 2005 a 2015, dentro do Parque, da APA e do entorno.	44
Tabela 4 - Número mínimo da recorrência de fogo e suas áreas absolutas e percentuais entre 2005 e 2015 (excluindo-se 2012).	49
Tabela 5 - Resultados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk com nível de significância de 5%.	59
Tabela 6 - Alguns dos valores dos resultados do teste T (média) entre a diferença dos NDVI das diferentes formações vegetacionais no caso de 0 (zero) ocorrências ou 1 (uma) ocorrência de fogo observados na imagem de 2005. Nível de confiança de 95%.	60
Tabela 7 - Alguns dos valores dos resultados do teste T (média) entre a diferença dos NDVI das diferentes formações vegetacionais no caso de 0 (zero) ocorrências ou 1 (uma) ocorrência de fogo observados na imagem de 2015. Nível de confiança de 95%.	61
Tabela 8 - Alguns dos valores dos resultados do teste T (média) entre as diferenças dos NDVI das diferentes formações vegetacionais no caso de 0 (zero) ocorrências de fogo ou 1 (uma) ocorrência de fogo em 2005 e 1 (uma) ocorrência de fogo em 2014 observados na imagem de 2015.....	65
Tabela 9 - Alguns dos valores dos resultados do teste T (média) entre as diferenças dos NDVI das diferentes formações vegetacionais no caso de 0 (zero) ocorrências de fogo ou 2 (duas) ocorrências de fogo em 2006, 2007 e 2 (duas) ocorrências em 2010, 2011 observadas.	66

Tabela 10 - Alguns dos valores dos resultados do teste T (média) entre as diferenças dos NDVI das diferentes formações vegetacionais no caso de 0 (zero) ocorrências ou 3 (três) ocorrências de fogo em 2005, 2006, 2007 e 3 (três) ocorrências de fogo em 2009, 2011 e 2014.	68
Tabela 11 - Alguns dos valores dos resultados do teste T (média) entre as diferenças dos NDVIs das diferentes formações vegetacionais no caso de 0 (zero) ocorrências ou 4 (quatro) ocorrências de fogo em 2005, 2006, 2007, 2010 e 4 (quatro) ocorrências de fogo em 2007, 2010, 2011 e 2014.	69

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

APA - Área de Proteção Ambiental
FC - Fator de Cobertura
GO – Goiás
ha - hectares
IBAMA - Instituto Brasileiro Ambiental e dos Recursos Naturais
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPV - Infravermelho Próximo
MMA - Ministério do Meio Ambiente
MSS - Sistema de escâner multiespectral
ND - Número Digital
NDVI - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
OLI - <i>Operational Land Imager</i>
REM - Radiação eletromagnética
RFAA - Radiação fotossinteticamente ativa absorvida
RGB - <i>Red-Green-Blue</i>
ROI - Registros de Ocorrência de Incêndios
TM - <i>Thematic Mapper</i>
UC - Unidade de Conservação
USGS - <i>United States Geological Survey</i>

INTRODUÇÃO

O fogo é um agente ecológico que ocorre em vários ecossistemas naturais, principalmente nas regiões de zonas temperadas e tropicais com estação seca bem definida (HARRIS, 1958). Assim como em todas as Savanas tropicais, no Cerrado, o fogo tem sido um importante fator ambiental há milênios (GILLON, 1983), sendo a maioria das fisionomias do Cerrado brasileiro tidas como ecossistemas dependentes do fogo, pois evoluíram e dependem deste para manter seus processos ecológicos (PIVELLO, 2011).

Uma das características principais de algumas das fitofisionomias do Cerrado que contribui indiretamente na ocorrência do fogo é a distribuição esparsa das árvores e arbustos lenhosos. Isto permite que a insolação chegue ao nível do solo promovendo o desenvolvimento eficiente do estrato herbáceo que, devido ao seu ciclo de vida, dessecam suas folhas e partes florais na época da seca, entre maio e setembro (PIVELLO, 2011). Este material fino e seco é altamente inflamável, podendo entrar em combustão facilmente pela ação dos raios, ou ação antrópica (COUTINHO, 1980).

Os incêndios naturais, que ocorram desde o aparecimento das primeiras vegetações e continuam ocorrendo nas áreas de Cerrado, são causados principalmente pelos raios nos meses chuvosos ou nos meses de transição entre estações (GILLON, 1983). Estes incêndios costumam ser brandos e rápidos, sendo apagados pelas chuvas que se seguem e não atingindo grandes áreas ou intensamente a vegetação (WARMING, 1973). O homem pode provocar incêndios acidentalmente ou não; utilizando-o para queimar os restos da colheita, preparar as terras para novos plantios, ou para incentivar a rebrota das gramíneas para alimentação do gado (PIVELLO, 2011). No entanto, as queimadas ou incêndios antrópicos ocorrem geralmente na seca, alterando sua frequência e intensidade em relação ao regime natural (RAMOS-NETO e PIVELLA, 2000).

A cerca de 40 anos, a produção pecuária se tornou de grande escala no Cerrado e se voltou para exportação. Nestas áreas a vegetação original é completamente retirada e substituída por gramas africanas altamente produtivas e o fogo é empregado ocasionalmente para gerir problemas específicos (PIVELLO, 2011). A combinação de anos extremamente secos com queimadas provocadas em regime normalmente bianual, comum em áreas de extensiva produção de bovinos para carne, aumenta consideravelmente o número e a extensão dos incêndios no cerrado (SAMBUICHI,

1991). Além disso, como a maioria dos fazendeiros não faz aceiros, o fogo se espalha para outras áreas (PIVELLO, 2011).

Atualmente, a maior ameaça às unidades de conservação inseridas em ecossistemas onde o fogo é frequente são os incêndios descontrolados, geralmente causadas pelos moradores no entorno da unidade, que utilizam a queima para preparo do solo para pastagem ou agricultura, ou mesmo para caça (PIVELLO, 1992). Na maior parte das vezes, o fogo é colocado sem nenhum cuidado, sem aceiros, verificação da temperatura e umidade local e direção do vento, portanto se propaga para as áreas vizinhas (RAMOS-NETO e PIVELLO, 2000). A maioria das unidades de conservação não está preparada para a prevenção ou combate a incêndios; não possuem plano de manejo implementado, não possuem brigada de incêndio, nem fazem manejo do fogo (MEDEIROS e PEREIRA, 2011). Isto resulta em grande acúmulo de biomassa inflamável, o que aumenta o risco de incêndios mais severos e de grande escala (PIVELLO, 2011).

Como visto, o fogo existe no Cerrado antes da presença do homem (HERINGER e BARROSO, 1971), no entanto, nesta época não existiam cercas impedindo que os animais fugissem do fogo, por exemplo, e as áreas atingidas por fogo podiam ser reconstruídas pelas populações adjacentes. Atualmente, as unidades de conservação são rodeadas por fazendas, em que a vegetação e a fauna natural não mais existem (WARMING, 2000). O Parque Nacional das Emas, por exemplo, é uma ilha de cerrado em meio a um mar de soja, desta forma, se a vegetação natural pegar fogo, ela não terá como ser naturalmente repovoada. O manejo de fogo em unidades de conservação como esta é, portanto, necessário para a conservação da biodiversidade do Cerrado (MEDEIROS e PEREIRA, 2011).

Com o intuito de colaborar com o conhecimento sobre unidades de conservação no bioma Cerrado, especificamente da dinâmica de incêndios ocorridos na seca, e devido a carência de manejo do fogo nestas áreas, este estudo tem como principal objetivo estudar a recorrência, abrangência e resiliência, ao longo dos anos de 2005 a 2015, das áreas atingidas por fogo na estação seca no Parque Estadual dos Pirineus, na Área de Proteção Ambiental (APA) dos Pirineus e em seu entorno (num raio de 10 km da APA) utilizando dados dos satélites Landsat 5 e Landsat 8, sensor TM e OLI, respectivamente.

As informações desta pesquisa poderão ser utilizadas para a identificação das áreas de maior risco à incêndios, o que poderá ser utilizado para o propor medidas de prevenção aos incêndios na região, colaborando para a elaboração do Plano Operativo de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais previsto para todos os tipos de Unidade de Conservação, assim como o próprio Plano de Manejo. Além de subsidiar o entendimento da resiliência das formações de cerrado frente a recorrência do fogo.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

O presente estudo tem por objetivos detectar a abrangência das áreas das cicatrizes de fogo, a frequência dos incêndios, e os impactos da recorrência destes nas áreas do Parque e APA dos Pireneus e seu entorno (10 km de raio) num período de dez anos, entre 2005 e 2015, para o final do período da seca (mês de setembro ou agosto), utilizando-se de dados de sensoriamento remoto.

Objetivos Específicos

- Mapear as cicatrizes de incêndio para os anos de 2005 a 2015, da área do Parque, APA dos Pireneus e entorno via técnicas de sensoriamento remoto. Classificar as imagens em: cicatrizes de fogo e outros.
- Estimar as áreas das cicatrizes de incêndios e a frequência destes nas imagens classificadas.
- Analisar a dinâmica espaço-temporal da ocorrência e frequência de fogo, verificando-se se há um padrão de localização onde ocorrem os incêndios, caracterizando as áreas de maior propensão. Comparar a localização e frequência dos incêndios nas unidades de conservação e no entorno das mesmas.
- Analisar a cicatrizes de fogo durante os anos analisados em relação aos usos e coberturas do solo.
- Estimar o índice de vegetação (NDVI) das diferentes formações vegetacionais (campestre, savânica e florestal) das imagens de 2005 e 2015, para as situações de não atingida por fogo e de atingidas por fogo, como também para as diferentes recorrências de fogo durante estes anos na imagem de NDVI de 2015. Isto é, comparar se as áreas onde houve maior recorrência de incêndios apresentam valores de NDVI diferentes em relação às áreas não atingidas por fogo ou

atingidas menos recorrentemente. Além de verificar se o tempo decorrido sem fogo, para as diferentes recorrências, influência significativamente no valor de NDVI.

HIPÓTESES

Este trabalho se baseia basicamente em quatro hipóteses: (1) a princípio, o Parque dos Pireneus, por ser uma área de proteção integral, tem menor abrangência e/ou recorrência de incêndios do que a APA dos Pireneus, que é uma unidade de conservação de uso sustentável, assim como é esperado da APA em relação a área do entorno, que não é uma UC, visto que para o mês analisado, provavelmente, trata-se de um período de incêndios não naturais; (2) formações vegetacionais mais abertas, como as campestres têm maior propensão a ocorrência de fogo; (3) há um padrão no intervalo de tempo entre os incêndios em que ocorrem as cicatrizes mais abrangentes, e (4) há áreas que não estão se regenerando em seu ritmo esperado devido à recorrência de fogo-

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho fica no bioma Cerrado e é composta pelo Parque Estadual dos Pireneus, a APA dos Pireneus, que circunda o parque, e a região do entorno da APA (faixa de 10 km de raio), totalizando em cerca de 116.604 hectares. A área fica no estado de Goiás, e abrange os municípios de Pirenópolis, Cocalzinho de Goiás e Corumbá de Goiás. Na Figura 1 é apresentado um mapa de localização e limites do Parque, da APA e da área do entorno.

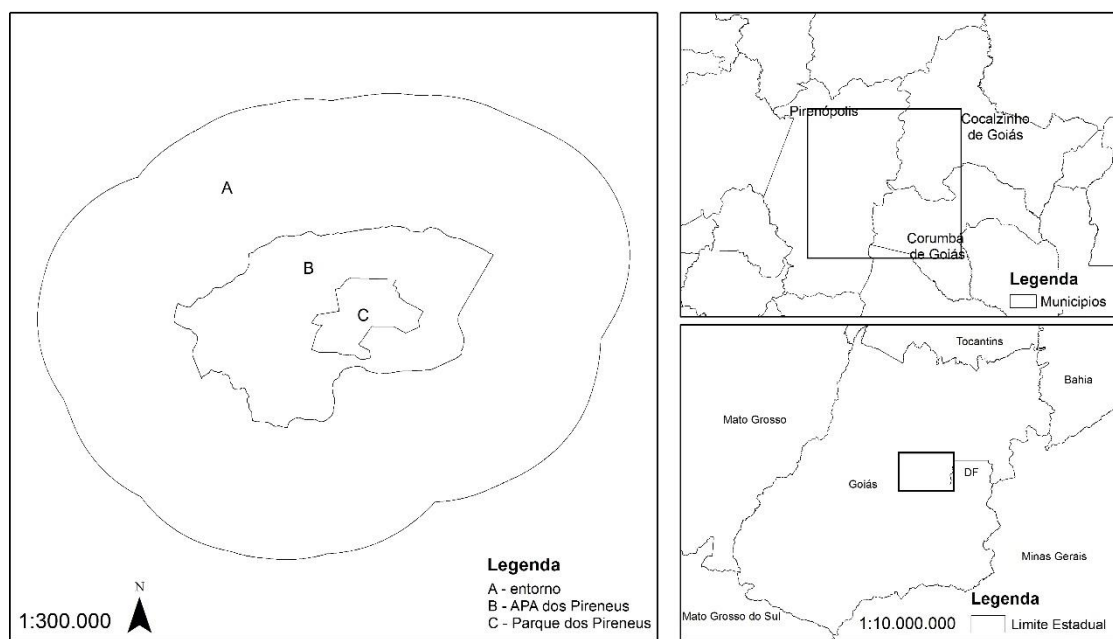


Figura 1 - Localização e delimitação do Parque e APA dos Pireneus e de seu entorno (10 km de raio).

O Parque Estadual dos Pireneus foi criado pela Lei N° 10.321, de 20 de novembro de 1987, com 2.838 hectares. O Parque foi instituído para proteger a Serra dos Pireneus, preservar a fauna, a flora, os mananciais e seus entornos existentes nos três municípios em que se encontra, protegendo sítios naturais de relevância ecológica e reconhecida importância turística, assegurando e proporcionando oportunidades controladas para uso pelo público, educação e pesquisa científica (GOIÁS, 1987).

A Área de Proteção Ambiental dos Pireneus (APA dos Pireneus), criada em 2000 (Decreto Estadual N° 5.174), enquadra-se na categoria de Unidade de Conservação de Uso Sustentável, está localizada nos municípios de Pirenópolis, Cocalzinho de Goiás, e Corumbá de Goiás (Goiás), totalizando uma área aproximada de 19.192 hectares. A APA dos Pireneus circunda o Parque Estadual dos Pireneus, sendo instituído como Zona de Uso Especial da APA.

A APA dos Pireneus foi criada com o objetivo principal de proteger a região serrana e o entorno do Parque Estadual dos Pireneus; além de proteger os remanescentes de cerrado e os recursos hídricos; melhorar a qualidade de vida das populações residentes por meio de orientação e disciplinamento das atividades econômicas locais; disciplinar o turismo ecológico e fomentar a educação ambiental; e preservar as culturas e as tradições locais (GOIÁS, 2000). Tais unidades, no entanto, contam somente com seus respectivos decretos, não tendo um plano de manejo instituído, além de terem problemas no processo

de desapropriação, infraestrutura, equipe, controle de visitantes, etc. (SALMONA *et al.*, 2014).

A Serra dos Pireneus foi ocupada para exploração mineral no início do século XVIII, o que levou Manoel Rodrigues Tomás, em sua busca por ouro, a fundar as Minas de Nossa Senhora do Rosário de Meia Ponte (1727), atual Pirenópolis (JAIME, 1971). Com a crise do ouro, a partir da metade do mesmo século, a região se voltou para a agropecuária. Com a construção de Goiânia, em 1940, e posteriormente de Brasília, em 1960, houve o crescimento da economia da região para exploração das placas de quartzito micáceo, usadas na construção civil para revestimento e piso.

Graças ao conjunto de cachoeiras da Serra, Pirenópolis e Corumbá se tornaram turísticas, sendo destinos comuns principalmente para moradores do Distrito Federal e da capital goiana (SALMONA *et al.*, 2014). Atualmente, a Serra dos Pireneus e seu entorno contam com três principais atividades econômicas: a mineração, a agropecuária e o turismo.

O clima da região é classificado como tropical semi-úmido (AW, segundo classificação de Köppen), e possui duas estações bem definidas, seca (abril a setembro) e úmida (outubro a março). No entanto, o relevo faz com que haja regiões com microclimas específicos, como nas partes altas das serras, nas encostas e nos vales.

O relevo é caracterizado por um conjunto de serras alinhadas de leste para oeste, com vales encaixados profundos e encostas côncavas, variando de 20% a 45% de inclinação, e algumas escarpas verticais (MOREIRA *et al.*, 2008). A Serra dos Pireneus, ponto culminante da região, tem mais de 1.300 m de altitude.

A região está inserida no bioma Cerrado e é uma Área-Chave para a Biodiversidade (Key Biodiversity Area - KBA), onde ocorrem espécies endêmicas de anfíbios e vegetais (LANGHAMMER *et al.*, 2007). Da lista de espécies ameaçadas de extinção da União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN), foram identificadas seis espécies endêmicas do estado que ocorrem em Pirenópolis e duas endêmicas do município (SIQUEIRA, 2004), além de outras cinco espécies ameaçadas de extinção na região de Pirenópolis (FELIZOLA FILHO, 2006). A área também é um divisor de água continental entre a Bacia do Paraná e a Bacia do Araguaia-Tocantins, sendo o ponto mais alto o Pico dos Pireneus. O Rio Corumbá, da Bacia do Prata, e o Rio

das Almas e o Córrego da Barriguda nascem em vertentes deste Pico (SALMONA *et al.*, 2014).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Fogo no Cerrado

O Cerrado está localizado predominantemente no Planalto Central do Brasil, sendo o segundo maior bioma do país em área, representando cerca de 22% do território brasileiro, atrás apenas da Floresta Amazônica (IBGE, 2004). Apesar de sua biodiversidade ser ainda pouco conhecida e estudada, sabe-se que é a savana mais rica em flora do mundo (EITEN, 1994; SANO; ALMEIDA, 1998), tendo mais de 12 mil espécies vegetais, muitas delas endêmicas da América do Sul e do Brasil (MENDONÇA *et al.*, 2008). Desta forma, é considerado um *hotspot*, pois é uma das regiões de maior biodiversidade do mundo, além de estar em alto risco de degradação, tendo uma taxa de desmatamento maior do que a da Amazônia (MYERS *et al.*, 2000).

O último relatório sobre monitoramento do desmatamento no bioma Cerrado, realizado pela cooperação técnica entre o Ministério do Meio Ambiente (MMA) e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais (IBAMA) aponta que até 2010, pelo menos 50% da cobertura natural do bioma haviam sido convertidos para outros tipos de uso. O Cerrado é, portanto, o segundo bioma brasileiro mais modificado devido atividades humanas, sendo a Mata Atlântica o primeiro (MMA e IBAMA, 2011).

As principais atividades que vêm ao longo dos anos alterando as fisionomias do bioma são: a queima anual e o desmatamento da cobertura natural para conversão das áreas em pastagens e áreas para agricultura; a extração seletiva de madeira e outros produtos não madeireiros; e as modificações irreversíveis resultantes da construção de obras públicas, especialmente estradas e hidrelétricas (KLINK e MACHADO, 2005).

A queima anual é feita para limpeza de áreas para agricultura, ou em ciclo bianual para rebrota de gramíneas para alimentação do gado (PIVELLO, 2011). Durante o período seco da região central do Cerrado brasileiro, o gado reduz sua alimentação e, conseqüentemente, produção de leite, pois as gramíneas estão secas. A queima da vegetação como manejo é a prática mais econômica utilizada pelos fazendeiros, pois, alguns dias depois de queimada, a vegetação rebrota, tornando-se mais palatável ao gado

(COUTINHO, 1990b). As áreas de cerrado são roçadas e queimadas no final do período seco também para “limpeza” da área e sua conversão em novas áreas para agricultura.

Apesar de o fogo ser considerado um dos eventos mais antigos entre os fatores de alteração e conformação da paisagem do Cerrado (BOND *et al.* 2003), mais antigo inclusive do que a existência do homem primitivo (KOMAREK, 1972), as queimadas antrópicas mudaram o regime e intensidade do fogo (PIVELLO, 2011). O fogo natural, causado principalmente por raios, costuma ocorrer no período chuvoso, ou nos meses de transição das estações, sendo rapidamente apagado pelas chuvas (GILLON, 1983). Já o fogo antrópico ocorre, geralmente, durante a seca, o que aumenta a flamabilidade da vegetação e o risco de se alastrar (LOMBARDI, 2005). Estudos sobre a ecologia do fogo indicam que a frequência do fogo está superior ao que os ambientes naturais toleram, sendo, portanto, um risco à conservação de áreas nativas (IBAMA, 2009).

Os efeitos prejudiciais da elevada incidência de incêndios são, por exemplo, a redução da biodiversidade, erosão do solo devido a perda de proteção da vegetação e exposição a chuva e poluição do ar com emissão de gases de efeito estufa (ALHO e MARTINS, 1995). O regime de fogo provocado pelo homem é, portanto, uma ameaça às áreas de proteção ambiental, já que o fogo sem controle, utilizado para renovação de pastagens nas fazendas, tem atingido UC na região do Cerrado (MEDEIROS, 2002).

Vários estudos utilizando imagens de satélite registraram extensas áreas atingidas por fogo em 2010 em unidades de conservação no Cerrado; como no Parque Nacional das Emas, Parque Nacional da Serra da Canastra, e Parque Nacional da Chapada dos Guimarães; 91%, 42% e 35% de suas áreas atingidas por fogo, respectivamente (FRANÇA, 2010). Em setembro do mesmo ano, ocorreram outros incêndios em parques nacionais do cerrado, como na Chapada dos Veadeiros, Araguaia, e Brasília, 77%, 56% e 36% das áreas atingidas por fogo.

Salmona e Pinagé (2015) mapearam os incêndios nos Parques Nacionais de Brasília e Chapada dos Veadeiros entre 2003 e 2011, não constatando cicatrizes de fogo em apenas dois desses anos, 2004 e 2005. As maiores cicatrizes de fogo ocorreram em 2007 e 2010; 28,1% e 48,2% da área do PNB, e 72,2% e 53% do PNCV, respectivamente. França (2007), mapeou as cicatrizes de fogo no Parque Nacional das Emas entre 1973 e 2003, verificando que neste período houve áreas com altíssima recorrência de fogo, 17

ou 18 reincidências, e que 62% da área do parque foi atingida por fogo no mínimo entre 9 e 12 vezes.

Monitoramento de incêndios através de sensoriamento remoto

Em sensoriamento remoto a energia refletida pela superfície da terra é medida pelo sensor de um satélite e esta medição é usada para construir a imagem de uma paisagem. Estas imagens, que são construídas a partir de vários pixels com valores distintos (números digitais) fornecem informações que podem ser usadas para os mais diversos propósitos: identificação, descrição, caracterização e quantificação dos usos da terra, avaliação da disponibilidade, qualidade e quantidade dos recursos naturais ou diferentes áreas e o monitoramento das alterações e condições desses recursos e áreas, provocadas pelo seu uso e manejo, ou por acidentes naturais, além de muitos outros (índice de vegetação, índice de clorofila, biomassa, etc.) (JENSEN, 2009).

Os recursos naturais da terra começaram a ser estudados através de dados de sensoriamento remoto desde o primeiro satélite lançado capaz de registrar informações sobre a superfície terrestre, na década de 70. Antes disso, os estudos eram realizados de forma fragmentada utilizando-se aerofotografias para fins específicos, ou via sensores em satélites tripulados (MOREIRA, 2003).

As queimadas e incêndios foram estudados logo no início da utilização dos satélites, na década de 80. A comunidade científica ficou surpresa ao tomar conhecimento da dimensão mundial de queimadas e às possíveis consequências do uso indiscriminado do fogo (FRANÇA, 2000). No final dessa década, há iniciativas do Poder Público no Brasil para organizar o estudo sobre o uso de incêndios florestais (IBAMA, 2009).

Os primeiros trabalhos de identificação de cicatrizes de fogo com dados orbitais foram feitos com imagens do satélite Landsat 1, sensor MSS, em 1972. Os estudos realizados apontaram que as bandas 6 e 7 foram adequadas para monitorar o fogo em Savanas da África (LOMBARDI, 2005). Talvez a primeira estimativa de área de cicatrizes de fogo de todo o Cerrado tenha sido feita por Pereira em 1992 e por Pereira e Setzer (1996), utilizando-se de regressão de dados do satélite NOAA e pela interpretação visual das imagens do satélite TM/Landsat.

A análise de áreas das cicatrizes de fogo a partir de imagens de sensoriamento remoto pode ser feita pela observação do fogo ativo, ou seja, que estão ocorrendo no

mesmo momento de captura da imagem, em que se utiliza a banda espectral na região do infravermelho termal; ou pela identificação das áreas após a ocorrência do fogo, isto é, das cicatrizes na superfície provocadas pelo fogo, em que se utiliza dados da região do infravermelho próximo e médio (LOMBARDI, 2005).

Ponzoni *et al.* (1986), em estudo utilizando dados do satélite Landsat 5, sensor TM, concluiu que, tanto na classificação visual quanto na classificação digital, as bandas 4 (0,76-0,90 μm) e 5 (1,55-1,75 μm) se mostraram eficientes na distinção entre cicatrizes de fogo e outros usos do solo do Parque Nacional de Brasília.

Atualmente há diversos tipos satélites na órbita da Terra, com sensores de diferentes resoluções espaciais e temporais, e de técnicas para detectar os impactos causados por incêndios em países tropicais (FRANÇA, 2000; FERREIRA, 2005). A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto tem se mostrado fundamental para diversos estudos, pois os bancos de dados gerados através do uso de satélites representam uma importante fonte de informações sobre os diversos fenômenos que ocorrem na superfície terrestre (IBAMA, 2005).

Sensores como o TM e OLI do Landsat 5 e Landsat 8, respectivamente, são frequentemente utilizados para estimar áreas das cicatrizes de fogo em regiões relativamente pequenas (FRANÇA, 2000). Eva e Lambin (1998) concluíram que a resolução de 20 a 80 metros é adequada para determinar o padrão espacial de áreas das cicatrizes de fogo, sendo as dos sensores mencionados de 30 metros.

Características espectrais das cicatrizes de fogo

A resposta espectral das cicatrizes de fogo depende, principalmente, de dois fatores: da intensidade do fogo e do tempo decorrido entre o fogo e a captura da imagem pelo sensor. A diferença na reflectância da área será mais significativa quanto mais intenso for o fogo, conseqüente da variação na estrutura e quantidade da vegetação atingida pelo fogo (TANAKA *et al.*, 1983). O tempo decorrido entre a ocorrência do fogo e a obtenção da imagem pelo sensor também é relevante, pois em algumas áreas pode haver a recuperação da vegetação (PEREIRA *et al.*, 1997). Outro fator que deve ser considerado é a resposta espectral da vegetação atingida.

França (2007) sugeriu quatro tipos de cicatrizes de fogo ao estudá-las no Parque Nacional das Emas. A primeira é aquela mais recente, quando ainda há uma camada de

carvão e cinzas, resultante da queima da vegetação. O carvão tem a propriedade de absorver a radiação solar numa ampla faixa do espectro visível. Desta forma, as cicatrizes são de fácil identificação, já que aparecem como manchas escuras que contrastam com a vegetação não queimada. Porém, esta camada, portanto este aspecto, é rapidamente removido do solo.

O segundo tipo de cicatriz corresponde ao solo exposto após a ocorrência do fogo, sem vegetação ou carvão. A duração desta situação depende da velocidade de rebrota da vegetação, mas costuma ser de curta duração no Cerrado, na ordem de algumas semanas. A terceira refere-se a as áreas em processo de rebrota, em que a vegetação está verde e não seca, contrastando com as áreas não queimadas. O quarto tipo de cicatriz resulta da alteração da temperatura do solo, pois áreas queimadas sem cobertura são mais quentes do que aquelas com cobertura vegetal, assim, estas devem ser identificadas usando-se as bandas termiais.

Ponzoni *et al.* (1986), utilizando imagens TM-Landsat de locais com diferentes fisionomias do Cerrado brasileiro, registraram que na banda 3 as áreas das cicatrizes de fogo de duas semanas de ocorrência apresentaram números digitais dos pixels destas áreas próximos aos valores das áreas de corpos d'água, e estes valores eram de seis a oito vezes mais baixos do que a de áreas com cobertura vegetal antes de ser queimada. Este aumento na reflectância na região do visível, principalmente da banda 3, se dá exatamente devido a destruição da vegetação, como será visto adiante, que é responsável pela absorção de espectros desta região do visível.

Alterações na reflectância das áreas de vegetação queimada são mais abruptas na região do infravermelho próximo (IVP) do que na região do visível, e ainda variam dependendo do tipo de fisionomia (LOMBARDI, 2005), ou seja, vegetações densas apresentarão maior variação nas propriedades espectrais das condições anteriores à queimada do que uma vegetação esparsa.

De modo geral, a reflectância do infravermelho próximo diminui após uma área ser atingida pelo fogo, sendo mais baixa do que todas as coberturas da terra, exceto a água. Este padrão espectral pode durar de um ano (em regiões temperadas), a duas semanas (nas regiões tropicais) (PEREIRA *et al.*, 1997). Isto se dá, pois, a vegetação que antes refletia muito deste espectro está desestruturada, além disso, os resíduos formados na queima possuem alto coeficiente de absorção deste espectro (LOMBARDI, 2005).

O uso das faixas do infravermelho médio do espectro para análise da superfície terrestre é consideravelmente recente, pois só foi possível a partir do lançamento do Landsat 4, em 1982, que transportava um sensor com dois canais para esta região do espectro; TM5 (1,55 a 1,75 μm) e TM7 (2,08 a 2,35 μm). As observações de campo utilizando espectrorradiômetros nesta região do espectro, como também nas demais, são raros para o estudo de cicatrizes de incêndio (PEREIRA *et al.*, 1997).

Lopez e Caselles (1991) observaram alta reflectância na banda 7 e 5 do sensor TM/Landsat em áreas queimadas de formações arbórea/arbustiva. O mesmo foi observado por Pereira e Setzer (1993) e, mais detalhadamente, através da banda 5 foi possível distinguir queimadas recentes de antigas, e pela banda 7 fogos ativos e as frentes de fogo da imagem, o que não foi possível detectar em nenhuma outra banda.

A resposta espectral de áreas florestais queimadas na região do infravermelho médio é similar a região do visível, podendo ser, portanto, a explicação sugerida para a região do visível (diferenças na estrutura do dossel e na fenologia da vegetação), válida para esta região do espectro. As queimadas recentes de formações florestais ou arbustivas de zonas temperadas apresentaram maior brilho, e formações herbáceas ou Savanas tropicais apresentaram-se mais escuras do que antes de serem atingidas pelo fogo (PEREIRA *et al.*, 1997).

Características espectrais da vegetação

O comportamento espectral da vegetação descreve o resultado da interação entre a radiação eletromagnética (REM) e as folhas, plantas individuais ou todo o dossel da vegetação (BALBINO, 2004). Uma folha verde sadia intercepta a irradiação direta do Sol ou da radiação difusa espalhada. Esta energia eletromagnética interage com os elementos celulares da folha; pigmentos, água e espaços intercelulares. A quantidade de fluxo radiante refletido, absorvido e transmitido pela folha em relação a quantidade de irradiação incidente são as características que definem o comportamento espectral da vegetação (JENSEN, 2009). Mais especificamente, a reflectância, energia refletida pela superfície foliar, é o parâmetro mais utilizado para caracterizar uma superfície em relação a resposta espectral, pois a radiação espalhada ou refletida é detectada pelo sensor dos satélites.

A energia refletida da superfície foliar é resultado da energia incidente menos a energia absorvida diretamente para fotossíntese e outros processos da planta e a energia transmitida através da folha que incide em outras folhas ou no substrato sob o dossel. O comportamento específico de refletância que a vegetação apresenta na região do visível e infravermelho permite o estudo da vegetação via sensoriamento remoto, pois a maioria dos sensores de satélites trabalham com estas bandas espectrais. A principal banda de refletância da vegetação é o infravermelho próximo, com comprimento de onda variando de 760 nm a 900 nm, e a principal banda do visível é o verde, comprimento de onda de 520 nm a 600 nm, e é por isso que a maioria da vegetação é verde à visão humana. A região espectral de maior absorção pela vegetação é a banda visível da luz vermelha, faixa de 650 nm (JENSEN, 2009).

O principal responsável pela absorção foliar na região do visível (400 nm – 700 nm) é a fotossíntese, que determina como uma folha ou um dossel vegetal aparecem radiometricamente em imagens de sensoriamento remoto. Para que haja fotossíntese, processo em que a folha transforma energia solar em açúcar simples (glucose) para ser armazenada, são necessários três fatores principais: dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O) e irradiância (E_λ) medida em W m^{-2} (JENSEN, 2009).

A fotossíntese ocorre em dois tipos de células produtoras de alimentos, nas células do mesófilo; nos parênquimas paliçádico e lacunoso. Normalmente, as células paliçádicas se localizam na porção do mesófilo mais próximo do lado por onde a luz incide na folha, principalmente em folhas horizontais, mas há folhas em que as células paliçádicas nem existem, havendo apenas células lacunosas no mesófilo. As células paliçádicas e lacunosas contêm cloroplastos com pigmentos de clorofila que, normalmente, são mais abundantes na parte superior da folha, nas células paliçádicas, o que atribui a cor verde mais escura da superfície superior da folha em comparação com a inferior (JENSEN, 2009).

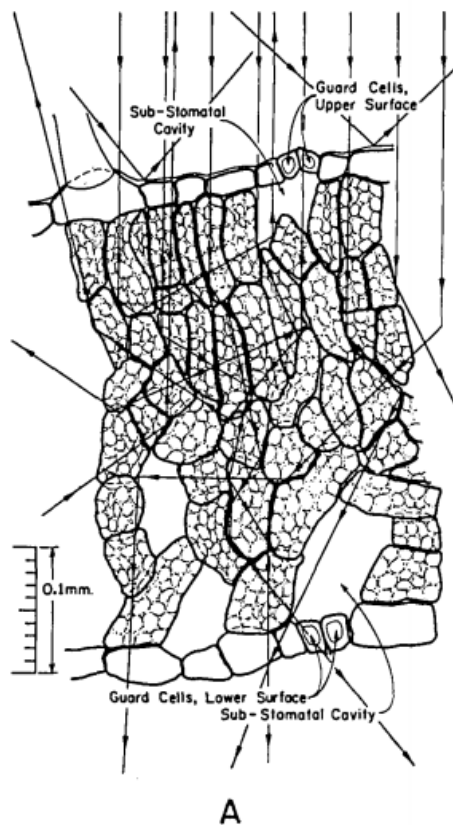


Figura 2 - Seção transversal de uma folha mostrando os possíveis caminhos da luz incidente. Os cloroplastos podem ser vistos nas células do mesófilo. Fonte: GATES et al. (1965).

Quando as moléculas da folha são atingidas pela irradiação, elas podem refletir e/ou absorver parte da energia de comprimentos de ondas específicos. A absorção da radiação no visível é feita pelos elementos constituintes da folha, principalmente os pigmentos, que ao absorverem tal energia para a fotossíntese elevam seu estado de excitação. Os mais importantes pigmentos vegetais absorvedores de energia são a clorofila *a* e a clorofila *b*, responsáveis pela absorção na região do azul (0,43 e 0,66 μm) e vermelho (0,45 e 0,65 μm), respectivamente (FARABEE, 2007). A reflectância na região do vermelho chega a ser de apenas 5%. A diminuição na absorção entre estes dois intervalos de comprimento de onda, ou seja, na porção verde do espectro eletromagnético em que há maior reflectância, é razão pela qual as folhas saudáveis apareçam verdes aos olhos humanos.

A absorção de energia do visível pelos outros pigmentos presentes nas células do mesófilo paliçádico não é expressiva devido a abundância das clorofilas. Por exemplo, os carotenos amarelos e as xantofilas amarelo-claras absorvem principalmente na região do azul. Uma folha senescente ou afetada por estresse, hídrico por exemplo, cessa a produção

de clorofila, fazendo com os outros pigmentos tornam-se dominantes e expressem seus espectros de absorção (JENSEN, 2009).

Tratando-se de absorção espectral foliar, as duas regiões ótimas para observar as características da folha são localizadas em 0,45 – 0,52 μm e em 0,63 – 0,69 μm . A primeira caracterizada pela absorção pelos carotenoides e clorofilas, e a segunda pela absorção apenas da clorofila. Em relação à reflectância espectral foliar na região do visível, localizam-se no intervalo de 535 a 640 nm e de 685 a 700 nm. O aumento de reflectância nas proximidades de 700 nm se dá em vegetação estressada (OPPELT, 2012).

A região do espectro conhecida como borda vermelha (*red edge*), região exatamente entre o vermelho e o infravermelho próximo, é talvez a banda espectral mais precisa no estudo da curva da resposta espectral da vegetação e com maior sensibilidade ao estresse. Ela é o ponto de máxima inflexão entre a baixa reflectância no vermelho devido à absorção pela clorofila e a alta reflectância associada com a estrutura interna das folhas e teor de água (KUMAR *et al.*, 2001).

Na região do infravermelho próximo (0,7 – 1,2 μm) há considerável espalhamento interno da radiação eletromagnética na folha, baixa absorção e reflectância aproximadamente constante. O espalhamento é função das lacunas na estrutura interna da folha, quanto maior os espaços vazios, maior o espalhamento e, conseqüentemente, maior a reflectância. Folhas saudáveis apresentam valores de reflectância no infravermelho próximo bastante altos, e uma pequena absorção, que não é função da clorofila e das moléculas de água. Apesar de não se saber a origem desta absorção, sabe-se que a absorção desta região do espectro normalmente aumenta com a concentração de bioquímicos (proteína, hemicelulose, lignina e amido) (JACQUEMOUD *et al.*, 1996).

A transmitância e reflectância no infravermelho próximo das folhas é tão mais elevada do que na região vermelha adjacente, pois o intervalo do infravermelho próximo onde a luz solar direta incide sobre as plantas tem o maior volume de energia. Isto é, se as plantas absorvessem esta energia com a mesma eficiência que absorvem o espectro visível, as proteínas poderiam ser irreversivelmente danificadas devido ao aquecimento excessivo. Desta forma, as plantas se adaptaram de forma a refletir ou transmitir este espectro de elevada poder energético (JENSEN, 2009).

A reflectância do infravermelho próximo diminui em folhas secas, devido ao aparecimento de pigmentos marrons e proteínas desnaturadas que absorvem comprimentos de onda menor que 1100 nm (JACQUEMOUD *et al.*, 1996). Fatores externos no ambiente, como umidade, também podem alterar a relação água-ar no mesófilo, influenciando na reflectância foliar.

Os dosséis de plantas saudáveis possuem alta reflectância no infravermelho próximo, pois as folhas por si só já refletem de 40 a 60% da energia do infravermelho próximo incidente devido ao espalhamento interno no mesófilo esponjoso, e os 45 a 50% restantes da energia são transmitidos pela folha e podem ser refletidos pelas folhas abaixo, o que é conhecido como reflectância foliar aditiva. Assim, quanto mais denso e saudável um dossel, teoricamente maior a reflectância no infravermelho. Por outro lado, um dossel esparsos terá menor reflectância, pois a parte da energia do infravermelho próximo transmitida não será refletida por outras folhas, mas pode ser absorvida pela superfície do solo abaixo do dossel. No entanto, é importante levar em consideração que a reflectância do infravermelho próximo em dosséis esparsos também será influenciada pelos solos expostos. Solos expostos úmidos tem valores muito baixos de reflectância, já solos expostos secos normalmente têm alto valor de reflectância (JENSEN, 2009).

O sensoriamento remoto nas regiões do espectrais do infravermelho médio, do infravermelho termal e das micro-ondas passivas provêm, até certo ponto, informações sobre a água presente no mesófilo esponjoso das folhas das plantas.

A água na atmosfera absorve energia principalmente de cinco bandas nas porções entre o infravermelho próximo e o infravermelho médio: 0,97; 1,19; 1,45; 1,94 e 2,7 μm . A banda em 2,7 μm é a de maior absorção entre estas, devido à absorção vibracional fundamental da água. Há também elevada absorção da energia no infravermelho médio (1,3 – 2,5 μm), o que pode fornecer informações da quantidade de água na planta; quanto maior a turgidez das folhas, menores as reflectâncias no infravermelho médio. Isso ocorre, pois quanto maior a quantidade de água nos espaços intercelulares, menor a intensidade de espalhamento da energia do infravermelho médio pelas interfaces das paredes intercelulares, resultando em menor reflectância.

Os intervalos de comprimento de onda no infravermelho médio entre 1,5 – 1,8 μm e entre 2,1 – 2,3 μm são conhecidos por serem os mais sensíveis à pequenas variações no conteúdo de água. Mudanças na reflectância no visível e infravermelho próximo apenas

começam a aparecer quando o conteúdo relativo de água diminui para 50% (JENSEN, 2009).

Índice de Vegetação

Os índices de vegetação são modelos matemáticos que correlacionam duas ou mais bandas espectrais e resultam em medidas radiométricas adimensionais que descrevem a abundância relativa e a atividade da vegetação verde, incluindo o índice de área foliar, porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa verde, e radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAA, ou APAR) (JENSEN, 2009). Estes índices minimizam os efeitos de iluminação da cena, declividade da superfície e geometria de aquisição (BALBINO, 2004).

Os Índices de Vegetação são obtidos pela divisão de bandas com o objetivo de se obter o realce das variações de densidade da cobertura vegetal. Para a vegetação, o comprimento de onda de maior absorção é na faixa de 650 nm, que corresponde a cor vermelha do visível, e os comprimentos de onda de maior refletância variam de 760 nm a 900 nm, que corresponde a região do espectro do infravermelho próximo. Ao se dividir a banda correspondente ao infravermelho próximo pela banda do vermelho, os pixels correspondentes a áreas de vegetação apresentarão valores bem maiores do que 1, enquanto pixels de regiões sem vegetação terão valores menores do que 1 (MENESES e ALMEIDA, 2012). Ou seja, a razão entre a banda do infravermelho próximo e o vermelho é proporcional à biomassa da vegetação, pois com o aumento da biomassa fotossinteticamente ativa há o aumento da refletância no infravermelho próximo e um decréscimo a refletância do visível.

Um dos mais utilizados índices é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*), proposto por Rouse *et al.* (1974). O NDVI é um índice importante, pois possibilita o monitoramento das mudanças sazonais e interanuais no desenvolvimento e na atividade da vegetação; e reduz muitas formas de ruídos multiplicativos (diferenças de iluminação solar, sombras de nuvens, atenuações atmosféricas, variações topográficas) presentes em múltiplas bandas de imagens de datas diferentes. Por outro lado, como o NDVI é um índice baseado em razão, é não-linear e pode ser influenciado por ruídos aditivos, como radiância de trajetória atmosférica (JENSEN, 2009).

Os índices de vegetação também têm sido empregados para se identificar áreas atingidas por fogo (CARDOZO *et al.*, 2011; PRUDENTE e ROSA, 2009) ou para se classificar a intensidade do fogo (ROSAN e ALCÂNTARA, 2015) uma vez que tais índices realçam o comportamento espectral da vegetação e se correlacionam com os parâmetros biofísicos da vegetação, como biomassa, índice de área foliar (IAF) e porcentagem de cobertura vegetal (ROSA, 2007) e uma vez que após uma queimada a vegetação diminui sua biomassa tornando-se em cinzas.

Em um primeiro momento, o comportamento espectral de uma área queimada é influenciado, principalmente, pelo volume de cinzas, o qual se relaciona com a quantidade de biomassa disponível para ser queimada. Posteriormente, com a gradual diminuição das cinzas e com o início da rebrota, a reflectância passa a ser controlada pela mistura de substrato e rebrota. De modo geral, a identificação de áreas queimadas por meio do uso de imagens se baseia no comportamento espectral inicial da queimada, caracterizado pela baixa reflectância em toda a faixa óptica do espectro eletromagnético (PESSOA e MENESES, 2013, p. 3314).

Processamento das Imagens Landsat

O pré-processamento refere-se a aplicação de técnicas para o tratamento inicial dos dados brutos obtidos pelo sensor, filtrando e removendo informações indesejáveis nas imagens (MENESES e ALMEIDA, 2012). A análise digital ou visual das imagens só deve ocorrer após as correções.

A correção radiométrica converte as imagens de número digital para radiância e, em sequência, em reflectância no topo da atmosfera, corrigindo degradações radiométricas que ocorrem devido a interferência atmosférica, desajustes de calibração dos sensores e erros na transmissão de dados (MORAES, 2002). Esta etapa é importante para que as imagens analisadas não contenham falsas informações.

Diferentes composições de bandas podem formar imagens coloridas que contrastam diferentes objetos na superfície (MENESES, 2001; MADEIRA-NETTO, 2001). De acordo com Sano et al. (2008) para as imagens TMLandsat 5, a banda 3 vermelha (0,63 μm – 0,69 μm) favorece a diferenciação entre vegetação fotossinteticamente ativa e inativa; a banda 4 infravermelho próximo (0,75 μm – 0,96 μm), é útil em realce de relevo e de vegetação verde densa e uniforme; e a banda 5 infravermelho médio (1,55 μm – 1,75 μm) é sensível ao teor de umidade das plantas, portanto ao estresse hídrico na vegetação. A composição colorida das bandas 3, 4 e 5 nos

canais B, G e R, respectivamente, é a mais adequada para identificação das áreas que sofreram queimadas (MACEDO *et al.*, 2009). Vários trabalhos de mapeamento de queimadas no em unidades de conservação no Cerrado utilizaram imagens Landsat com esta composição de bandas (FRANÇA *et al.*, 2007; FRANÇA; RIBEIRO, 2008).

O satélite Landsat 5, no entanto, foi desativado em 2013, mas um novo satélite com características bem semelhantes foi lançado no começo do mesmo ano, o Landsat 8. O sensor OLI deste satélite possui praticamente as mesmas bandas necessárias ao mapeamento de queimadas que o sensor TM; banda 4 vermelha (0,64 μm - 0,67 μm), banda 5 infravermelho próximo (0,85 μm - 0,88 μm) e a banda 6 SWIR 1(1,57 μm - 1,65 μm). Sendo então a composição de bandas 4, 5 e 6 nos canais B, G, R, respectivamente a mais adequada para o mapeamento de queimadas.

Essas composições fazem com que a vegetação densa fique destacada em cor verde escura, e as áreas atingidas pelo fogo em até 60 dias fiquem em cor roxa escura ou preta, dependendo da intensidade do fogo.

MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os passos metodológicos utilizados no presente estudo, demonstrando o processo aplicado para se levantar os dados necessários, assim como os cruzamentos e análises realizados. Os passos metodológicos estão esquematizados no fluxograma – (Figura 3).

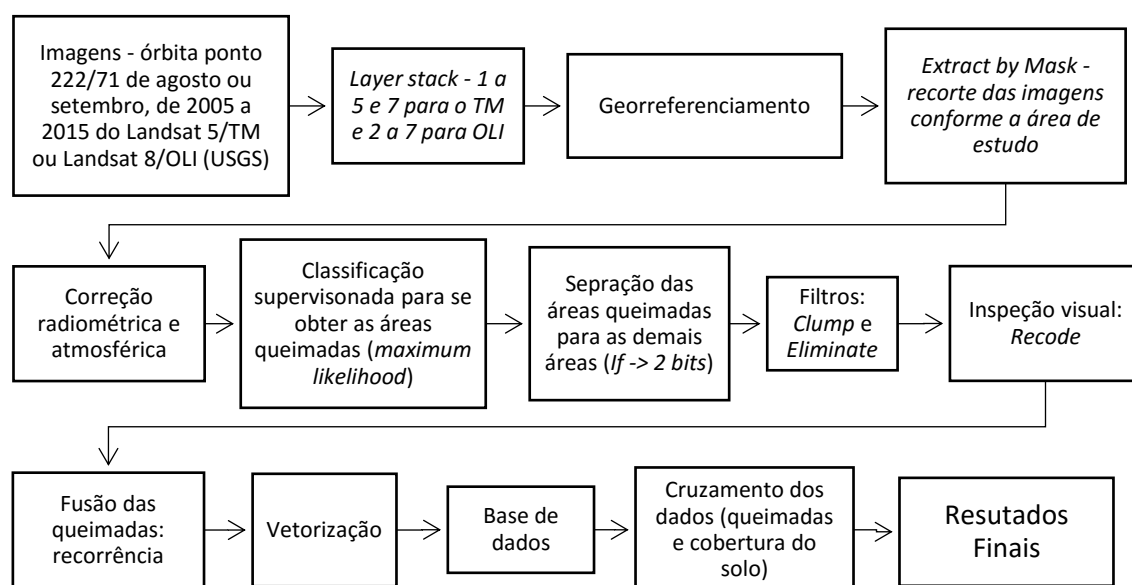


Figura 3 - Fluxograma demonstrando os passos metodológicos utilizados.

Base de Dados

Foram utilizadas para o mapeamento das áreas afetadas pelos incêndios florestais sete imagens do sensor TM e três do sensor OLI dos satélites LANDSAT-5 e LANDSAT-8, respectivamente, da órbita/ponto 222/71. As imagens utilizadas envolveram as bandas 1 a 5 e 7 para o sensor TM, e bandas de 2 a 7 para o sensor OLI, que equivalem as mesmas bandas usadas do sensor TM, adquiridas anualmente nos anos de 2005 a 2015 (Tabela 1). Não foi possível, no entanto, adquirir imagem do ano de 2012, pois neste ano houve uma lacuna de oferta de dados, pois o sensor TM estava sendo desativado e o sensor OLI ainda não havia sido lançado. Estes dados de sensoriamento remoto foram obtidos em projeção UTM, datum WGS 1984 do sítio eletrônico da *Earthexplorer* da *United States Geological Survey* (USGS).

Buscou-se adquirir imagens nos meses mais secos do ano, entre agosto a início de outubro, preferencialmente setembro, pois neste período ocorre a maior parte dos incêndios florestais no Cerrado, além de apresentarem menor quantidade de nuvens pelo baixo índice de precipitação nesse período (LOMBARDI, 2005). Buscou-se conciliar a qualidade com a maior proximidade de datas possível das imagens de satélite utilizadas nesta análise, minimizando assim os efeitos da sazonalidade nos resultados do NDVI.

Tabela 1 - Dados referentes às imagens utilizadas.

SATÉLITE/ SENSOR	DATA	BANDAS
Landsat 5/TM	16/09/2005	1, 2, 3, 4, 5, 7
Landsat 5/TM	19/09/2006	1, 2, 3, 4, 5, 7
Landsat 5/TM	22/09/2007	1, 2, 3, 4, 5, 7
Landsat 5/TM	24/09/2008	1, 2, 3, 4, 5, 7
Landsat 5/TM	27/09/2009	1, 2, 3, 4, 5, 7
Landsat 5/TM	29/08/2010	1, 2, 3, 4, 5, 7
Landsat 5/TM	17/09/2011	1, 2, 3, 4, 5, 7
Landsat 8/OLI	21/08/2013	2, 3, 4, 5, 6, 7
Landsat 8/OLI	24/08/2014	2, 3, 4, 5, 6, 7
Landsat 8/OLI	12/09/2015	2, 3, 4, 5, 6, 7

Os arquivos vetoriais em formato *shapefile* do limite da APA e do Parque dos Pireneus foram obtidos no site no Ministério do Meio Ambiente. A área do entorno da APA (faixa de 10 km ao redor da UC) foi delimitada utilizando-se a ferramenta *Buffer* no *software* ArcGIS 10.1.

Pré-processamento

As etapas de pré-processamento e processamento das imagens foram realizadas no programa ERDAS 2011[®] da Leica e no programa ArcGIS 10.1[®] da ESRI. Todas as imagens tiveram suas bandas empilhadas (*layer stack*); bandas 1 a 5 e 7 para imagens do Landsat 5, e bandas 2 a 7 para o Landsat 8. As imagens do sensor TM foram georreferenciadas com base em uma das imagens do Landsat 8 (a USGS informa que as imagens Landsat-8 já são ortorretificadas), a partir de um polinômio de terceira ordem e reamostragem pelo método do vizinho mais próximo. Em seguida as imagens foram recortadas (*Extract by Mask*) de acordo com o polígono do limite do buffer de 10 km de raio da APA, delimitando-se a área total de análise.

As imagens foram então convertidas de número digital (ND) para radiância (mW cm⁻² sr⁻¹) e, na sequência, em reflectância no topo da atmosfera (adimensional), etapas conhecidas como correção radiométrica e correção atmosférica, respectivamente (Equação 1 e 2). Na calibração foram utilizadas informações da data da passagem do satélite, ângulo de elevação solar e dados de calibração do sensor. Estas informações são obtidas dos arquivos de metadados que acompanham cada imagem, fornecida pelo USGS.

$$L_{\lambda} = L_{\min(\lambda)} + \left(\frac{L_{\max(\lambda)} - L_{\min(\lambda)}}{Q_{\max}} \right) Q_{cal} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

L_{λ} = radiância espectral recebida pelo sensor para o pixel em questão (Watts m⁻².sr⁻¹.μm⁻¹);

$L_{\min(\lambda)}$ = é a radiância espectral mínima para a cena;

$L_{\max(\lambda)}$ = é a radiância espectral máxima para a cena;

Q_{\max} = é o nível de cinza máximo (255, assumindo uma imagem 8 bits);

Q_{cal} = é o nível de cinza para o pixel analisado

Os valores de $L_{\text{mín}}$ e L_{max} são diferentes para as diferentes bandas do sensor do satélite e estão sujeitas a alteração ao longo do tempo. Essas calibrações são fornecidas de tempo a tempo pelas agências operadoras de satélite.

$$p = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta_s} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

P = reflectância no topo da atmosfera (razão, sem unidade);

L_{λ} = radiância espectral no sensor ($\text{Watts m}^{-2} \cdot \text{str}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$);

d = distância Terra-Sol em unidades astronômicas;

$\cos \theta_s$ = zênite do ângulo solar (radianos);

$ESUN$ = irradiância espectral exoatmosférica.

Abrangência das cicatrizes de fogo

O mapeamento das cicatrizes foi feito por classificação supervisionada (método *maximum likelihood*). Amostras de áreas visivelmente atingidas por fogo foram selecionadas e agrupadas numa classe denominada “cicatrizes de fogo”. Também foram criadas outras duas classes; “corpos d’água”, “sombras” e “outros”. As cicatrizes de fogo identificadas foram aquelas que ocorrem logo após o fogo, em que a superfície do solo está coberta por cinzas e carvão. Este tipo de fogo absorve um amplo espectro da região do visível, sendo fácil identificá-las, pois aparecem como manchas escuras. As classes “corpos d’água” e “sombras” foram criadas para que não se confunda essas com cicatrizes de fogo, já que estas feições podem apresentar valores de pixels parecidos. A classe “outros” engloba todas as superfícies que não forem “cicatrizes de fogo”; área urbana, vegetação densa, pastagem, etc. Em média, foram usadas 30 amostras por imagem para cada classe.

A seleção das amostras de treinamento do classificador das imagens foi feita visualizando o arranjo de bandas BGR 3/4/5 para as imagens do sensor TM do satélite Landsat-5, e para imagens do Landsat-8, sensor OLI, foi utilizada a composição colorida BGR 4/5/6 (Figura 4). Estas composições ajudam a identificar a vegetação densa, que fica verde escura, enquanto as áreas previamente atingidas pelo fogo em até 60 dias, ficam

de cor preta ou roxo escuro, dependendo da intensidade do fogo (GRANADO *et al.*, 2015).

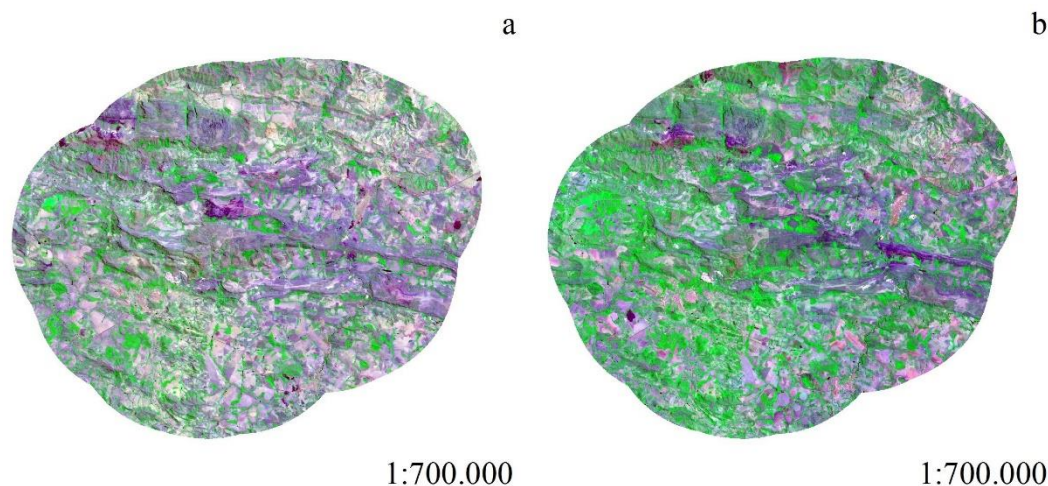


Figura 4 - Imagem Landsat 5/TM com arranjo de bandas BGR 3/4/5 de 16/09/2005 (a) e imagem Landsat 8/OLI com arranjo de bandas BGR 4/5/6 de 12/09/2015 (b)

Após a classificação, isola-se a classe “cicatrices de fogo” das outras classes, obtendo-se uma imagem com apenas a diferenciação de áreas atingidas por fogo para áreas não atingidas. Isso foi feito pela transformação das imagens classificadas em imagens biárias, usando equação de condição (*If*) no *Model Maker*, assim, as áreas atingidas por fogo assumem valor 1 e as áreas não atingidas valor 0.

Para eliminar áreas muito pequenas classificadas isoladamente e reagrupa-las a vizinhos próximos foram usados dois filtros; o *Clump*, e em seguida o *Eliminate*. As imagens resultantes ainda foram submetidas ao processo de inspeção visual utilizando a ferramenta *Recode*. Esta permite re-classificar manualmente as áreas, assim, se ainda havia uma área classificada erroneamente como “cicatriz de fogo” ou “não atingida”, pode-se alterar suas classificações.

Em seguida, estas imagens de formato raster foram transformadas para o formato vetorial, em que as cicatrizes de fogo são representadas por polígonos. As áreas desses polígonos foram então calculadas (na projeção UTM, fuso 23S, Datum Sirgas 2000).

Recorrência do fogo

As imagens raster classificadas em “cicatrices de fogo” e “não atingidas”, com valor de pixel 1 e 0, respectivamente, de 2005 a 2015 (exceto 2012) foram somadas (*Model Maker*), e o resultado obtido é valor de pixel 0 para as áreas nunca atingidas; áreas atingidas 1 vez assumem valor de pixel 1; áreas atingidas duas vezes pelo fogo valor de

pixel 2, e assim sucessivamente. A imagem resultante foi também vetorizada e as áreas das diferentes recorrências de fogo calculadas.

Uso e cobertura do solo

O mapa de uso e cobertura do solo foi disponibilizado por Salmona (2014), que realizou estudo na mesma área. A imagem utilizada foi adquirida pelo satélite Landsat 5/TM, órbita-ponto 222/71, do ano de 2009 e mês julho. Os procedimentos de sensoriamento remoto foram realizados no *software* Erdas 8.6.

O mapeamento do uso e cobertura do solo foi feito através de classificação semiautomática; classificação não supervisionada, classificador ISODATA. Nesse método os pixels são inicialmente agrupados por similaridade espectral, resultando em 50 classes que depois foram reagrupadas em seis classes: formações florestais, formações savânicas/campestres, agropecuária, mineração, área urbana e reflorestamento. Outros procedimentos, como uso dos filtros *Clump* e *Eliminate* e verificação manual da classificação foram realizados. O coeficiente *Kappa* foi de 0,65, o que valida a classificação como adequada para a proposta do estudo (SALMONA, 2014).

Neste estudo foi necessário separar também a classe de formações savânicas das formações campestres, e isto foi feito via classificação visual, pois as assinaturas espectrais destas formações são muito semelhantes não sendo classificadas por amostragem de pixels.

O mapa de uso e cobertura do solo foi intersectado com os mapas gerados na etapa de estimação da abrangência das cicatrizes de fogo, obtendo-se a área das diferentes classes de uso do solo atingidas pelo fogo em cada ano, bem como com o mapa de recorrência do fogo, gerando um mapa com as diferentes recorrências do fogo para as classes de uso do solo.

Resiliência da vegetação

O índice de vegetação das imagens foi calculado pela equação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), que serviu como base para se avaliar o efeito do fogo para as diferentes recorrências do mesmo em uma mesma área. Para tanto, foi calculado o NDVI da imagem de 2005 e da imagem de 2015, para se comparar os valores de NDVI das áreas que foram atingidas pelo fogo várias vezes neste período e áreas em que não houve nenhum incêndio. O NDVI é resultante da razão das respostas espectrais,

reflectância, das bandas do vermelho e infravermelho. Este índice é um indicador numérico que pode variar, teoricamente, entre -1 e 1. Os valores iguais ou menores a 0 (zero) indicam a ausência de vegetação ou solo exposto. Os valores próximos a 1 indicam grande quantidade de vegetação fotossinteticamente ativa (RAMOS *et al.*, 2010).

$$NDVI = \frac{(\rho_{ivp} - \rho_v)}{(\rho_{ivp} + \rho_v)} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde, ρ_{ivp} = reflectância na banda do infravermelho próximo e ρ_v = reflectância na banda do vermelho.

Após o cálculo do NDVI para a imagem de 2005 e 2015, amostras dos valores dos pixels destas imagens foram registrados para as diferentes formações vegetacionais, florestal, savânica e campestre, e para diferentes condições: áreas não atingidas por fogo e para as diferentes recorrências do fogo.

Para os três tipos de formações florestais foram amostrados 30 pixels destas áreas nas condições de não atingidas por fogo e com ocorrência de fogo, tanto na imagem de 2005, quanto para a imagem de 2015. Estes dados, além de servirem para a análise de normalidade das amostras, funcionam como valores de referência para comparação com as demais situações e como valores esperados de crescimento de NDVI para o período caso não haja incêndios. Para as demais situações, diferentes recorrências de fogo (áreas reincididas por fogo duas ou mais vezes neste período de tempo estudado), foram registrados menos pixels, dez, devido a menor abrangência de áreas atingidas por fogo (onde 1 pixel equivale a 900 m²).

Análises Estatísticas

Para as análises estatísticas utilizou-se o suplemento *Action Stat*, que utiliza o R e o conecta ao Excel. Primeiramente foi verificado se as variáveis amostradas, os valores dos pixels das imagens NDVI, tratavam-se de dados normais (Teste de Normalidade Shapiro - Wilk). Foram amostrados 30 pontos para cada situação: formações florestais, savânicas e campestres com e sem incidência de fogo. Os dados testados foram: valores de NDVI das diferentes formações vegetacionais para as diferentes condições: não atingida por fogo, e atingida por fogo. Posteriormente selecionou-se o teste adequado para testar se os pares de NDVI médios têm diferença significativa entre si.

As hipóteses testadas pelo teste de diferença significativa foram as seguintes:

NDVI de áreas sem incidência de fogo e de áreas com uma ocorrência de fogo para as diferentes formações vegetacionais (campo, savana e floresta): H0 = são iguais/ H1 = são diferentes.

NDVI de áreas sem incidência de fogo e de áreas com incidência de fogo há pouco e muito tempo para as diferentes formações vegetacionais (campo, savana e floresta) e para as diferentes recorrências do fogo: H0 = são iguais/ H1 = são diferente.

RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados referentes a área total do estudo, entorno, APA e Parque dos Pireneus. Em algumas análises, entretanto, considerou-se importante descrever os resultados apenas do total da área, ou do entorno, ou apenas das unidades de conservação, APA e/ou Parque dos Pireneus.

Abrangência

Nos nove anos analisados, foram mapeados de 239 a 9.137 hectares de cicatrizes de fogo na região total analisada; equivalentes a menor e a maior extensão de áreas incididas pelo fogo, ou a 0,21% e 8% da superfície total, e aos anos de 2011 e 2013, respectivamente. A APA dos Pireneus foi atingida por fogo todos os anos analisados, assim como seu entorno, sendo o de menor abrangência no ano de 2009, 24 hectares, ou 0,12 % da área da UC e em 2013 para o entorno, cerca de 79 hectares, apenas 0,08% desta região. Não ocorreram incêndios no Parque dos Pireneus em diversos anos; 2005, 2008, 2009, 2011 e 2013, e o de menor proporção ocorreu em 2014, abrangendo 5,34 hectares, 0,19% da área desta UC.

A Figura 5 ilustra as cicatrizes de fogo na região do entorno, APA dos Pireneus e Parque dos Pireneus ocorridas em setembro ou agosto de 2005 a 2015, com exceção de 2012. Como é possível observar nas imagens abaixo, para todos os anos analisados ocorreu fogo na região, sendo a área das cicatrizes bastante variável ano a ano. Destacaram-se em área de cicatriz os anos de 2007, 2010 e 2011. No ano de 2013 quase não há cicatrizes de fogo, pois para este ano a imagem utilizada é do final de agosto, não se conhecendo se houve fogo no mês seguinte.

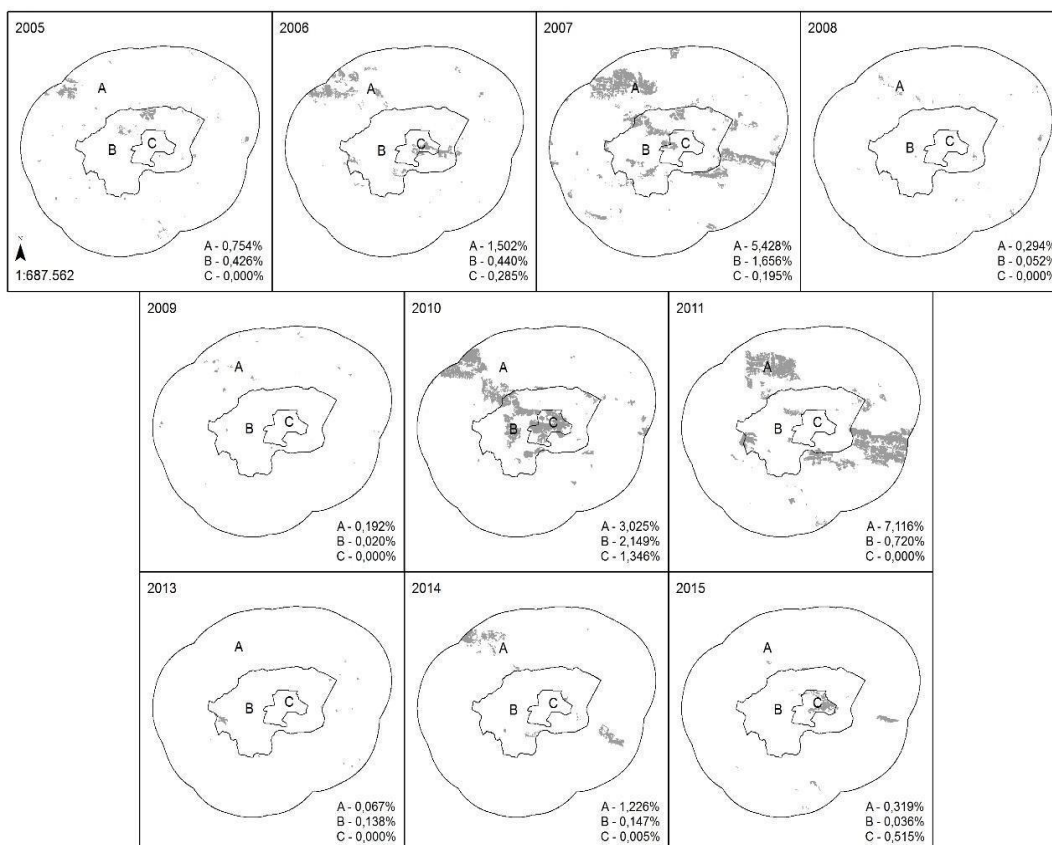


Figura 5 - Cicatrizes de fogo no entorno (A), na APA (B), e no Parque dos Pireneus (C), as percentagens destas cicatrizes em relação a área total analisada.

A Figura 6 mostra os valores absolutos das áreas das cicatrizes de fogo para cada região estudada e para os dez anos de análise. A partir do gráfico fica mais evidente de que houve incêndios para todos os anos analisados, e a variação em área absoluta das cicatrizes. Em termos absolutos, a região do Entorno teve as maiores áreas de cicatrizes de fogo, seguida da APA e o Parque, que em alguns anos não foi atingido por fogo. Mas em 2015, as áreas atingidas por fogo no Parque, cerca de 600 hectares, superaram as áreas atingidas por fogo da APA e mesmo do Entorno, 42 e 372 hectares, respectivamente.

O ano de maiores cicatrizes de fogo no Parque e na APA dos Pireneus foi o de 2010, atingindo 55% da área do Parque, e 13% da área da APA, ou 2,15% e 1,35% da área total analisada. Neste mesmo ano, foram registrados incêndios em diversas outras UC no bioma Cerrado (FRANÇA, 2007; SALMONA e PINAGÉ, 2015). Dos anos analisados, 2007 foi o segundo com maior registro de áreas atingidas por fogo na APA, e o terceiro no Parque dos Pireneus, com mais de 10% e 8% de suas áreas sendo cobertas por cicatrizes de fogo, respectivamente.

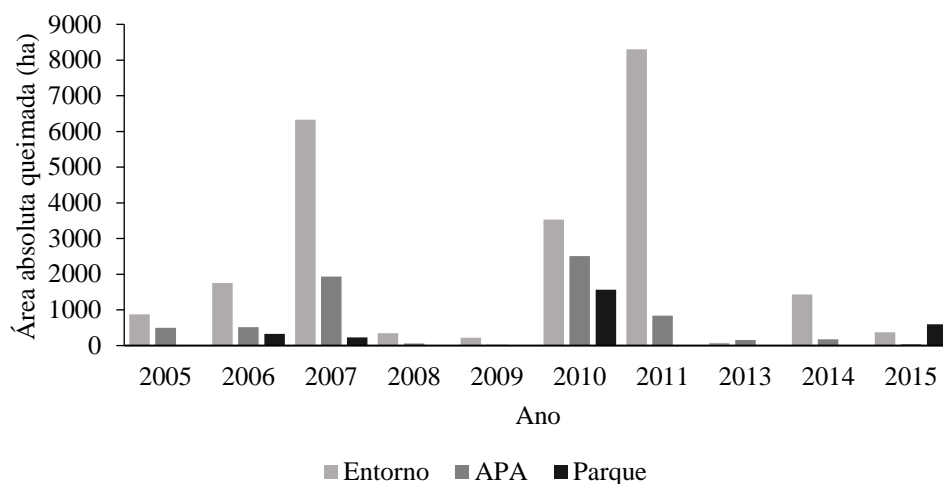


Figura 6 - Áreas absolutas das cicatrizes de fogo entre 2005 e 2015 (exceto 2012) para o entorno, APA dos Pireneus, e o Parque Estadual dos Pireneus.

A Figura 7 mostra as áreas relativas das cicatrizes de fogo (razão entre a área da cicatriz de fogo e a área total da região analisada, ou seja, entorno, APA ou Parque) para que se compreenda a proporção das cicatrizes mesmo com os diferentes tamanhos das áreas em que ocorreram. Esta análise é importante, pois o entorno, por exemplo, que possui 94.572,15 ha, representa mais de 81% da área estudada, sendo assim, as cicatrizes que ocorreram nesta região também tendem a ser as mais abrangentes. A região da APA corresponde a 16% da área total, e a do Parque a 2%, desta forma, a Figura abaixo auxilia na interpretação das áreas atingidas por fogo sem a influência do tamanho das áreas totais em que ocorrem.

Através deste gráfico é possível perceber que, em termos relativos, nos anos em que foram mapeadas cicatrizes de fogo no Parque, estas cicatrizes recobriram áreas significantes da UC. O mesmo ocorre para a APA, onde foram mapeadas cicatrizes de fogo mais abrangentes, proporcionalmente em relação a área da UC, do que na região do Entorno para quase todos os anos.

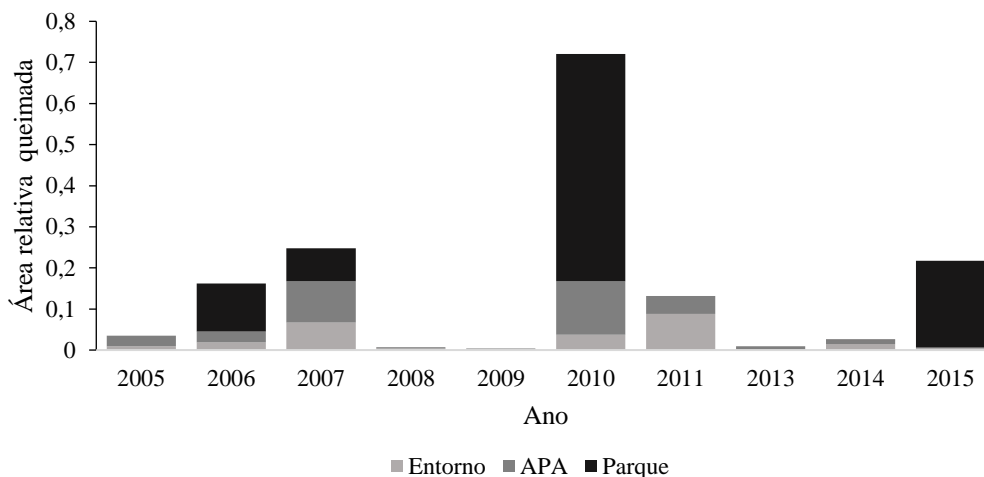


Figura 7 - Área relativa das cicatrizes de fogo no entorno, na APA e no Parque dos Pireneus no período de 2005 a 2015.

As Figuras 8 e 9 mostram as áreas das cicatrizes de fogo ao longo dos anos, ou seja, a flutuação das áreas das cicatrizes de fogo em relação aos anos. As Figuras 8 e 9 mostra os valores absolutos os valores relativos das áreas das cicatrizes.

Estas figuras evidenciam que há um certo padrão na abrangência das áreas cicatrizes de fogo em relação ao tempo, isto é, em geral, a cada 2 a 5 anos ocorre um grande incêndio, e no intervalo entre estas os incêndios ocorrem em áreas menores. O intervalo entre incêndios será apresentado em mais detalhe adiante.

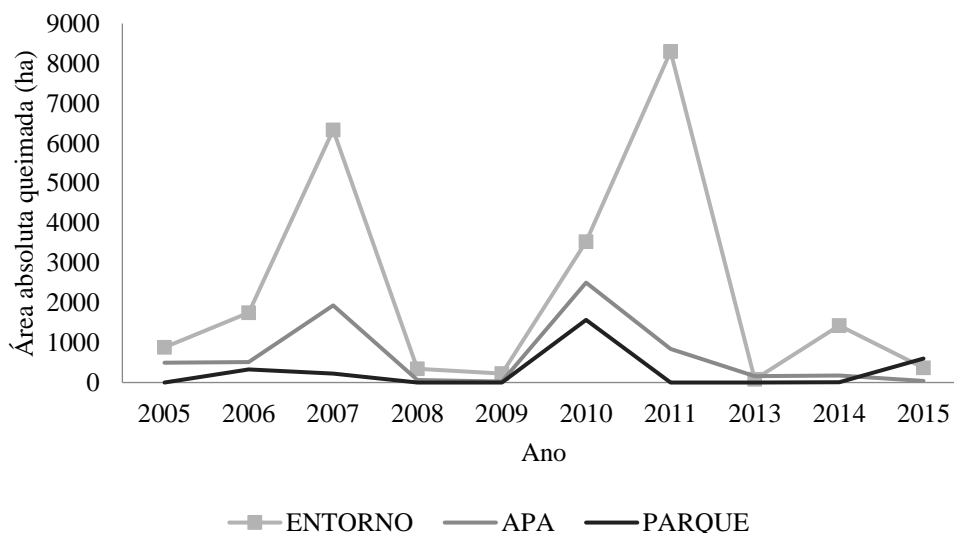


Figura 8 - Áreas absolutas (ha) de cicatrizes de fogo ao longo dos anos (2005 a 2015).

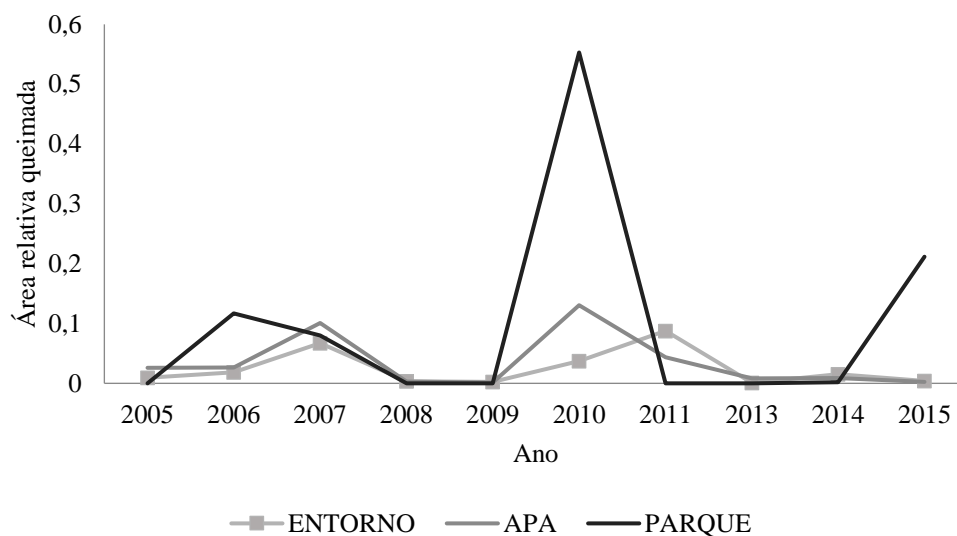


Figura 9 - Áreas relativas das cicatrizes de fogo ao longo dos anos (2005 a 2015).

Abrangência de acordo com o uso e cobertura do Solo

Nesta seção do trabalho são apresentados os dados das coberturas e usos do solo na área de estudo. Também é feita a comparação das cicatrizes mapeadas em setembro ou agosto em relação a estes usos e coberturas do solo.

A Figura 10 é resultado do mapa classificado por Salmona (2014) e da separação da formação campestre da savânica feita neste trabalho, da região total estudada. No geral, a maior parte da área é ocupada por agropecuária, principalmente no entorno. Quando se observa as UC há grandes extensões de cobertura de vegetação nativa, principalmente no Parque, que tem sua superfície coberta, principalmente, por formação campestre. Mesmo na região do entorno, há grandes extensões de formações vegetacionais nativas na porção nordeste da imagem, área da Serra Catingueiro.

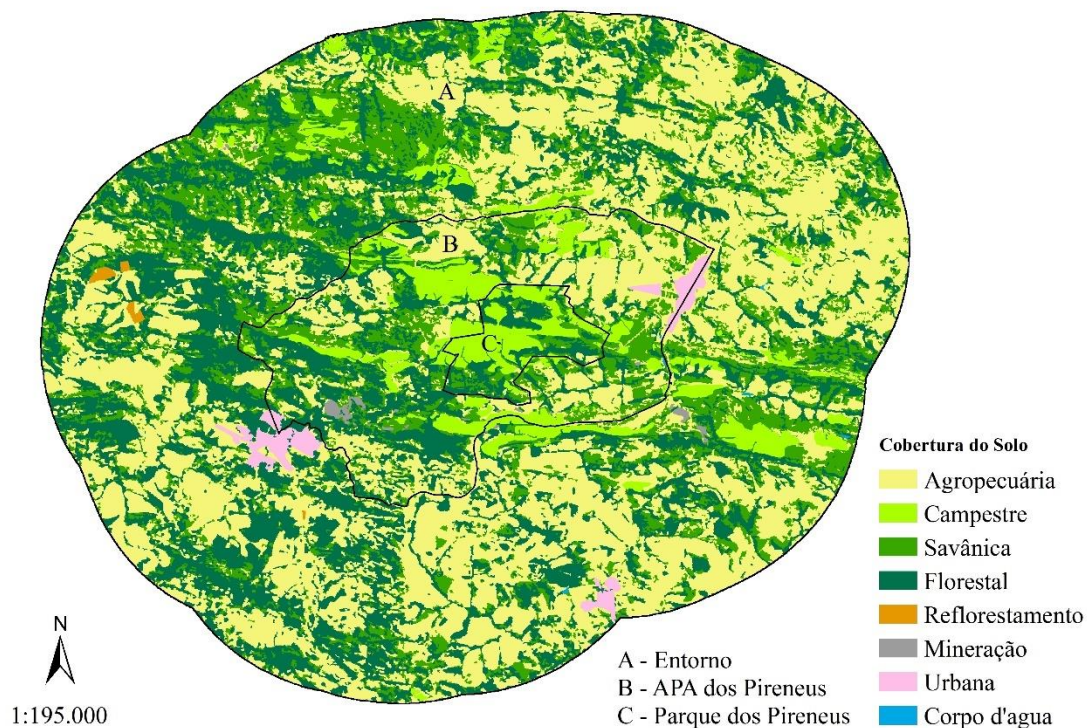


Figura 10 - Classificação da cobertura e uso do solo (agropecuária, campestre, savânica, florestal, mineração, urbana, reflorestamento e corpos de água) da região analisada.

A Tabela 2 e a Figura 11 mostram as áreas absolutas em hectare dos diferentes usos e coberturas do solo mapeados na região estudada; entorno, APA e Parque dos Pireneus, além da área total composta por estas três localidades (apenas na Tabela). A Figura 10 mostra que a cobertura do solo mais abrangente é a agropecuária, ocupando no total cerca de 48.857 hectares da região, semelhantemente a agropecuária é também predominante no Entorno e na APA. No interior do Parque, recobre cerca de 155 hectares.

Tabela 2 - Área em hectare e porcentagem dos diferentes usos e coberturas do solo na área estudada (Entorno, APA e Parque).

Cobertura	Área absoluta (ha)			
	Entorno	APA	Parque	TOTAL
Corpos d'água	27,00	5,94	0,00	32,94
Reflorestamento	141,30	0,00	0,00	141,30
Mineração	83,39	156,08	0,00	239,47
Urbana	864,07	272,51	0,00	1.136,58
Campestre	13.357,62	2.636,06	1.342,00	17.335,68
Savânica	19.353,10	4.651,11	618,86	24.623,07
Florestal	26.900,56	4.785,51	895,39	32.581,46
Agropecuária	41.968,68	6.733,41	154,79	48.856,88

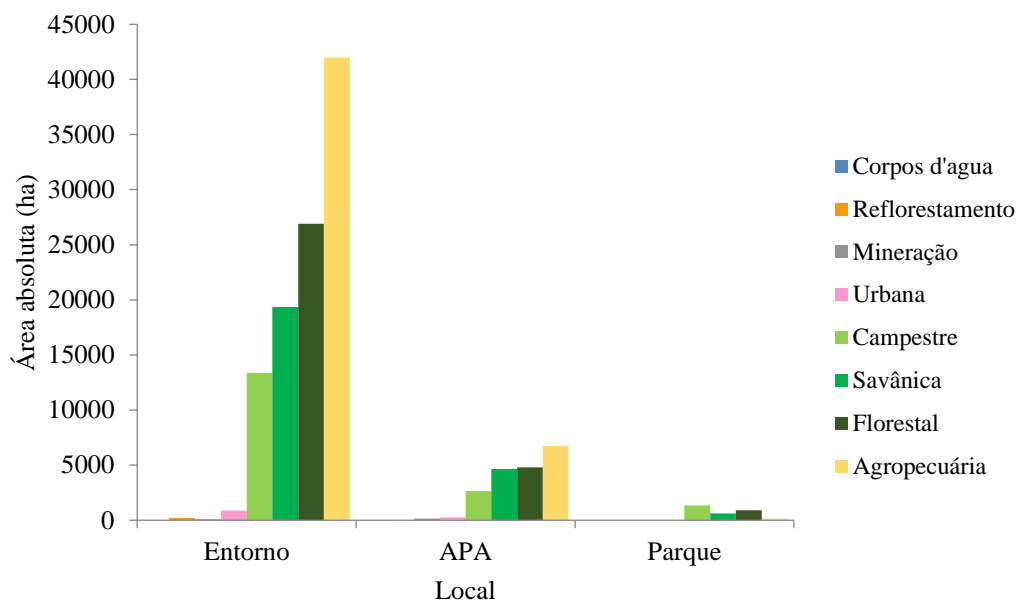


Figura 11 - Área absoluta (ha) dos diferentes usos e coberturas do solo para a região do Entorno, da APA e do Parque dos Pireneus.

A Figura 12 abaixo mostra o percentual que cada um destes diferentes usos representa na região total e em cada área analisada separadamente.

Grande parte da região total (43%) é coberta por uso de agropecuária. As formações vegetacionais naturais também têm grande representatividade (56%) da área total, sendo destes, 28% de formações florestais, 22% de formações savânicas e 6% de formações campestres. Outras ocupações/atividades antrópicas têm menor abrangência; áreas urbanas representam 0,99% da região, áreas para mineração compõem 0,21%, e áreas de reflorestamento 0,12%. Além disso, os corpos de água mapeados contam por cerca de 0,03% da região total.

Quando analisando apenas a área do entorno, os diferentes usos e cobertura do solo acompanham o mesmo padrão de ocupação que na área total; cerca de 41% é ocupado por agropecuária, 58% por formações vegetacionais naturais; em que 26% são florestas, 19% savanas, e 13% campos. Áreas urbanas contam por 0,84% da região, mineração por 0,08%, reflorestamento por 0,14% e corpos de água por 0,03%.

A região da APA é ocupada predominantemente por formações vegetacionais naturais, 63% da área, sendo destes, 25% de formações florestais, 24% de formações savânicas, e 14% de formações campestres. A representatividade da área de agropecuária diminui em relação as outras regiões analisadas, compondo cerca de 35% da região. Área

urbana representa cerca de 1,42% da APA, mineração 0,81%, e corpos de água 0,03%. Não há áreas de reflorestamento na APA.

O Parque dos Pireneus possui a cobertura do solo mais diferenciada comparado as outras localidades. Apenas cerca de 5% da área é de agropecuária. Por outro lado, as formações vegetacionais naturais contam por cerca de 95% da região, em que as formações florestais representam 30% da área, as formações savânicas 21% e as formações campestres 45%. Não foram identificadas/mapeadas áreas de mineração, reflorestamento, cidades, ou corpos de água na UC.

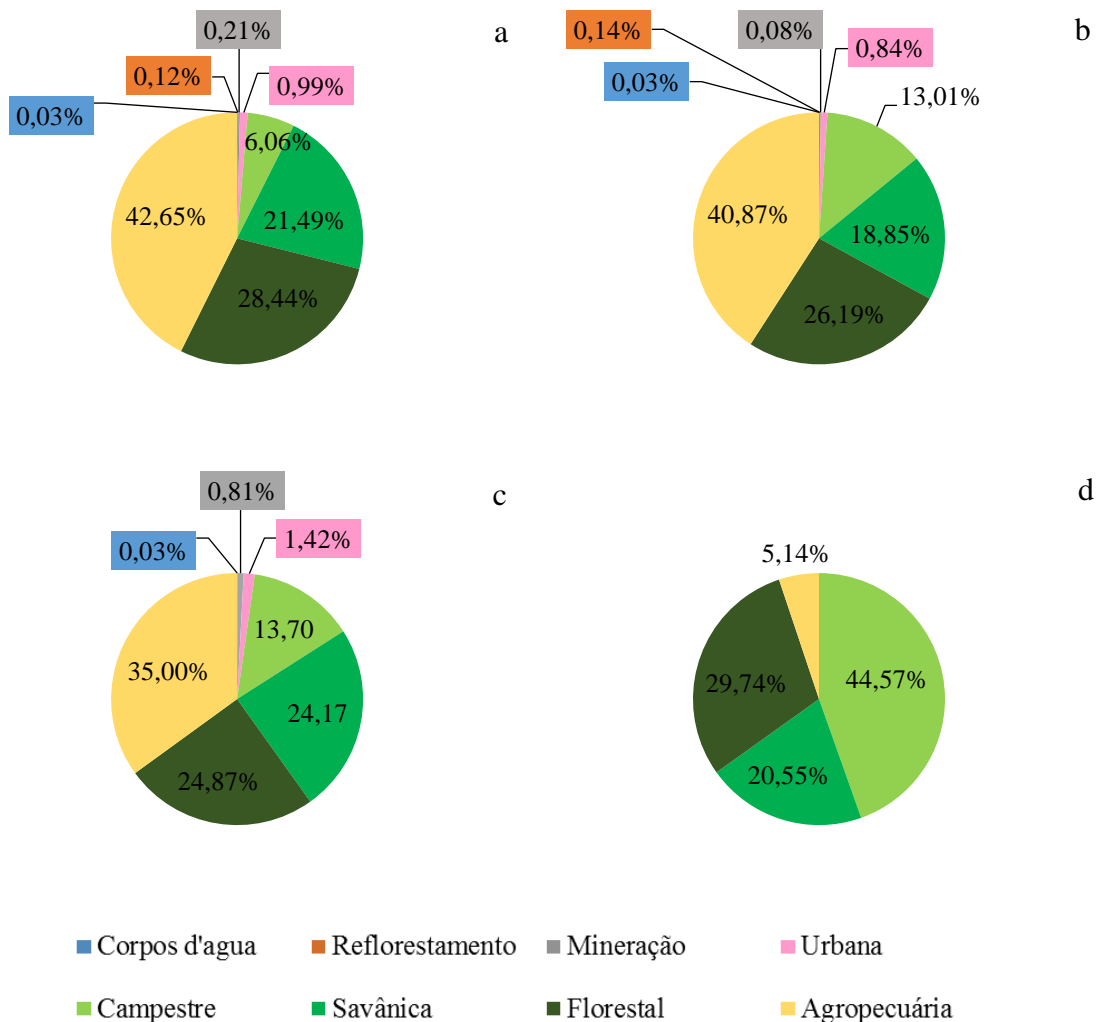


Figura 12 - Percentual de cada tipo de uso e cobertura do solo em relação a região analisada; área total (a), área do entorno (b), área da APA (c) e área do Parque dos Pireneus (d).

A Figura 13 abaixo mostra as áreas relativas destes diferentes usos em relação a área total de cada localidade em que ocorre.

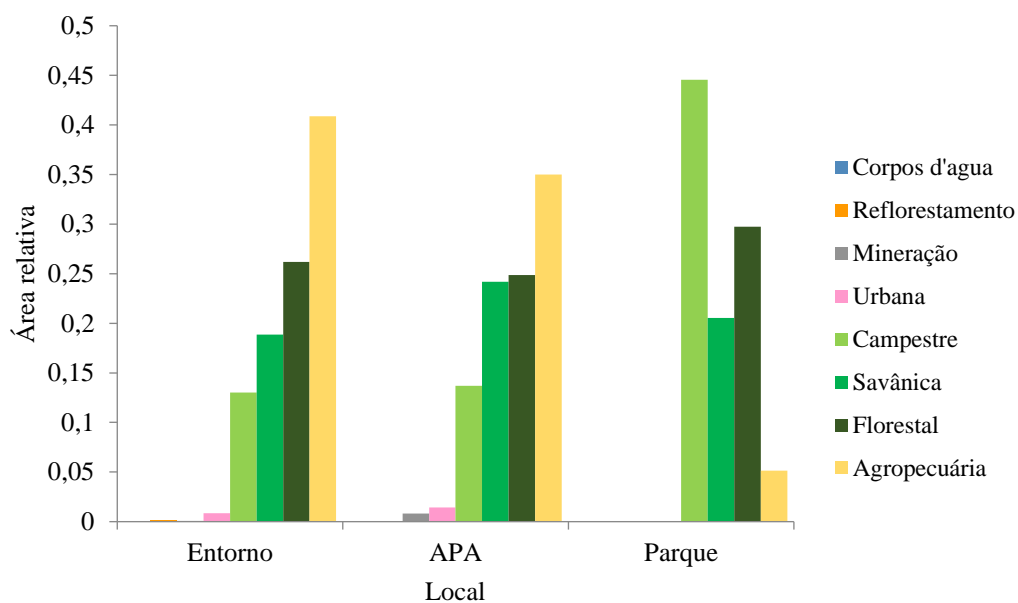


Figura 13 - Áreas relativas dos diferentes usos e coberturas do solo em relação a área de cada localidade em que ocorrem; entorno, APA e Parque dos Pireneus.

Os dados a seguir são os resultados da análise das áreas das cicatrizes de fogo por uso e cobertura do solo. A Figura 14 e a Tabela 3 abaixo mostram a área absoluta das cicatrizes para cada tipo de cobertura do solo durante os dez anos analisados e para a área total, ou seja, a soma das áreas do entorno, APA e Parque dos Pireneus.

Em termos absolutos a savana foi a formação vegetacional mais atingida por fogo na maioria dos anos, mesmo esta não sendo a formação mais abrangente em termos de área total. Em seguida, as formações campestres foram as mais atingidas por fogo em área absoluta e em 2010 foi mais amplamente atingida do que as formações savânicas. Em terceiro e quarto lugar em termos de área das cicatrizes, foram as formações florestais e as áreas de agropecuária.

Em termos percentuais, as formações campestres apresentaram as cicatrizes de fogo mais abrangentes durante todos os anos analisados, recobrando um total de cerca de 72% dessa formação vegetal afetada por fogo.

Tabela 3 - Percentual atingido por fogo de cada classe de uso e cobertura da Terra na área total, no período de 2005 a 2015, dentro do Parque, da APA e do entorno.

Cobertura	Total ocupado (ha)	Cicatriz de fogo (ha)	%
Mineração	239,47	35,24	14,72
Urbana	1.136,79	34,80	3,06
Campestre	6.944,15	5.002,45	72,04

Savânica	24.624,49	7.612,96	30,92
Florestal	32.583,03	4.755,38	14,59
Agropecuária	48.868,03	3.796,98	7,77

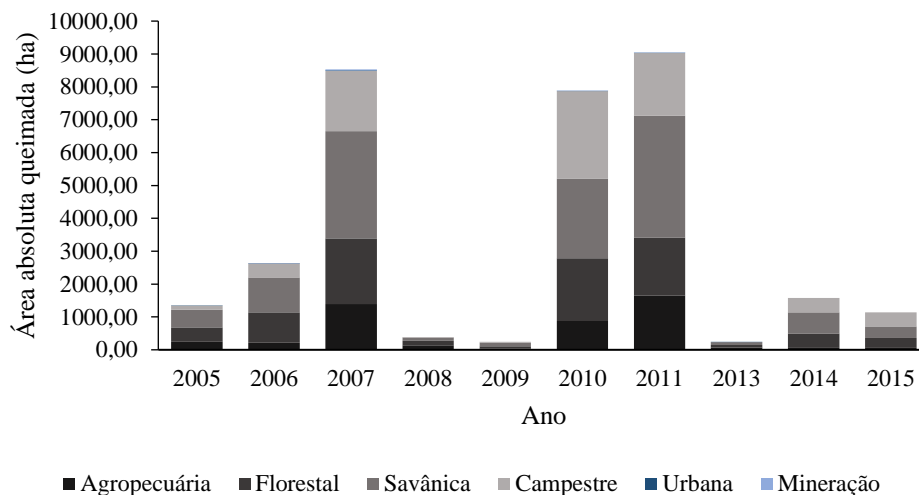


Figura 14 - Áreas absolutas das cicatrizes de fogo nos diferentes tipos de cobertura do solo entre 2005 e 2015 na área total (entorno, APA e Parque dos Pireneus).

A Figura 15 mostra as áreas relativas das cicatrizes nos anos analisados na área total. Mesmo em termos relativos, as formações savânicas e campestres apresentaram as maiores cicatrizes de fogo na maioria dos anos. O que se nota de diferente em relação a Figura anterior é a área relativa das cicatrizes de fogo de mineração em 2007 e 2010, que por representarem um percentual pequeno da área total, suas áreas atingidas por fogo só foram relevantes em termos relativos.

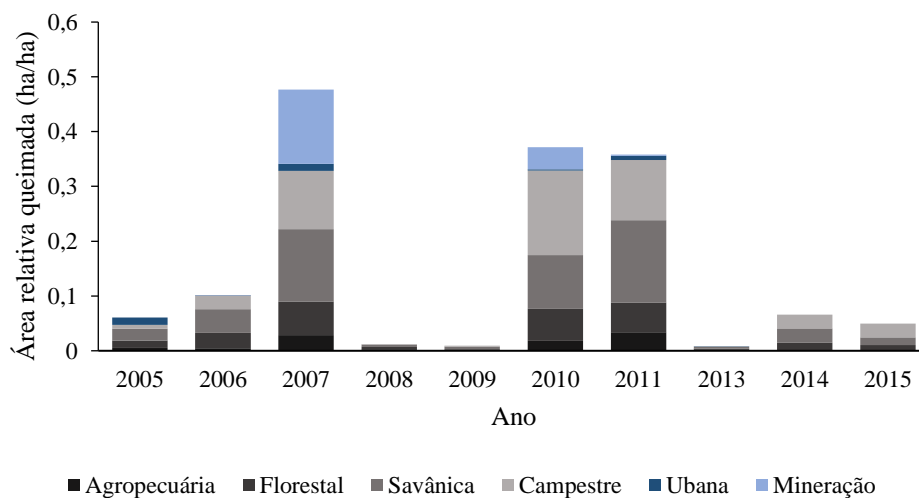


Figura 15 - Áreas relativas das cicatrizes de fogo para os diferentes tipos de cobertura do solo entre 2005 e 2015 na área total (entorno, APA e Parque dos Pireneus).

Em seguida serão apresentados os gráficos de área absoluta e área relativa das cicatrizes de fogo para cada tipo de cobertura do solo e durante os anos analisadas para cada uma das localidades em que ocorreram separadamente: entorno, APA e Parque dos Pireneus.

A Figura 16 abaixo mostra as áreas absolutas das cicatrizes de fogo (a) e áreas relativas das cicatrizes (b) para cada tipo de uso do solo na região do entorno. As áreas relativas referem-se a área absoluta atingidas por fogo pela área total de cada tipo de uso no entorno. Em termos absolutos, a formação savânica teve maiores áreas atingidas por fogo em praticamente todos os anos, seguida pelas formações florestais. Em termos relativos, no ano de 2007 e 2010, as áreas de mineração atingidas por fogo tiveram alguma representatividade em relação a área total desta cobertura.

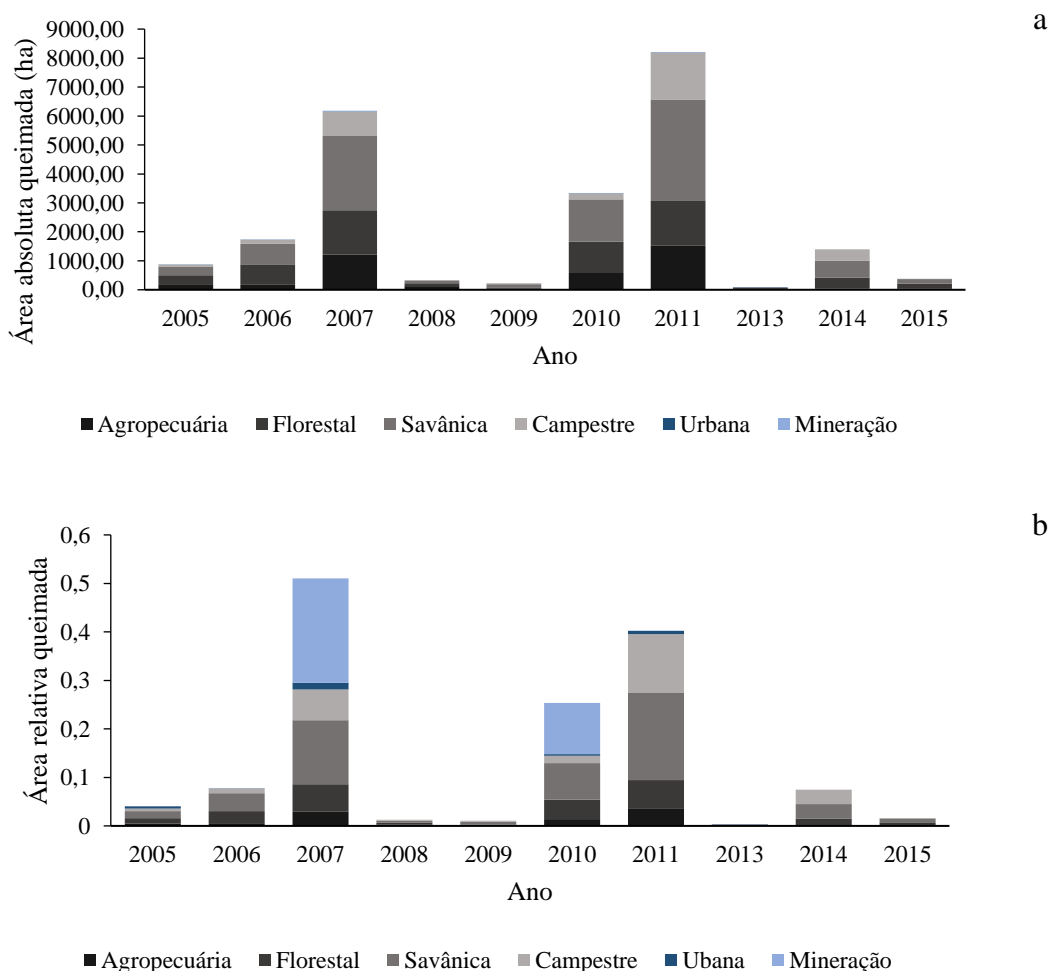


Figura 16 - Gráficos de áreas absolutas (a) e áreas relativas (b) de cicatrizes de fogo nos diferentes usos e coberturas do solo entre 2005 e 2015 na área do entorno.

A Figura 17 abaixo mostra as áreas absolutas (a) e relativas (b) das cicatrizes de fogo para as diferentes coberturas do solo e entre 2005 e 2015 na região da APA dos

Pireneus. Diferentemente da região do entorno e da área total, na APA dos Pireneus as coberturas que foram mais amplamente atingidas por fogo, em termos absolutos, foram as formações savânicas e campestres. Em termos relativos, em 2007 e, principalmente em 2010, a formação campestre foi a mais amplamente atingida por fogo.

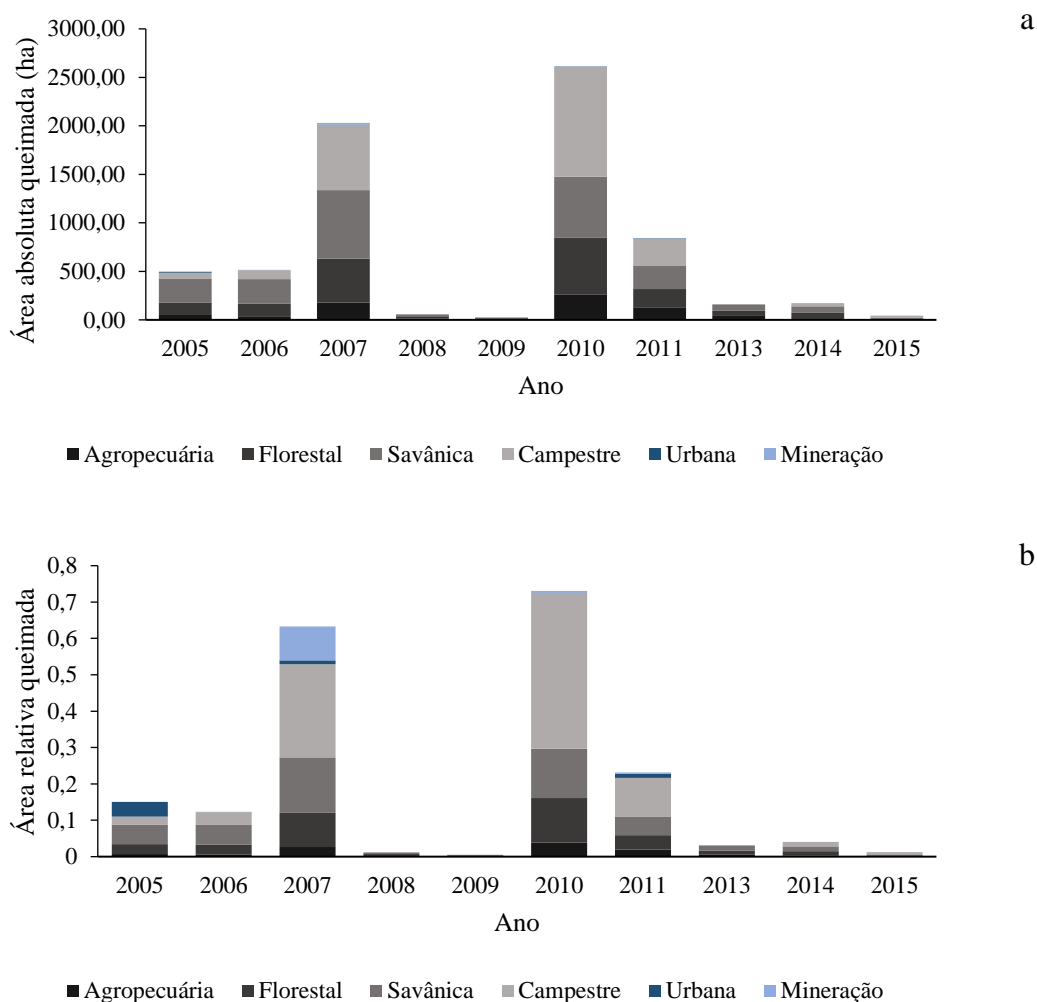


Figura 17 - Gráficos de áreas absolutas (a) e áreas relativas (b) das cicatrizes de fogo nos diferentes usos e coberturas do solo entre 2005 e 2015 na área da APA dos Pireneus.

A Figura 18 abaixo mostra as áreas absolutas e relativas de cicatrizes de fogo para as diferentes coberturas do solo na região do Parque dos Pireneus e entre os anos de 2005 e 2015. Para todos os anos em que foram mapeadas cicatrizes, as formações campestres foram as áreas mais atingidas em termos absolutos. Considerando que as formações campestres recobrem cerca de metade desta UC é esperado que esta tenha sido amplamente atingida, mas, mesmo em termos relativos, as formações campestres foram a cobertura do solo mais atingidas por fogo.

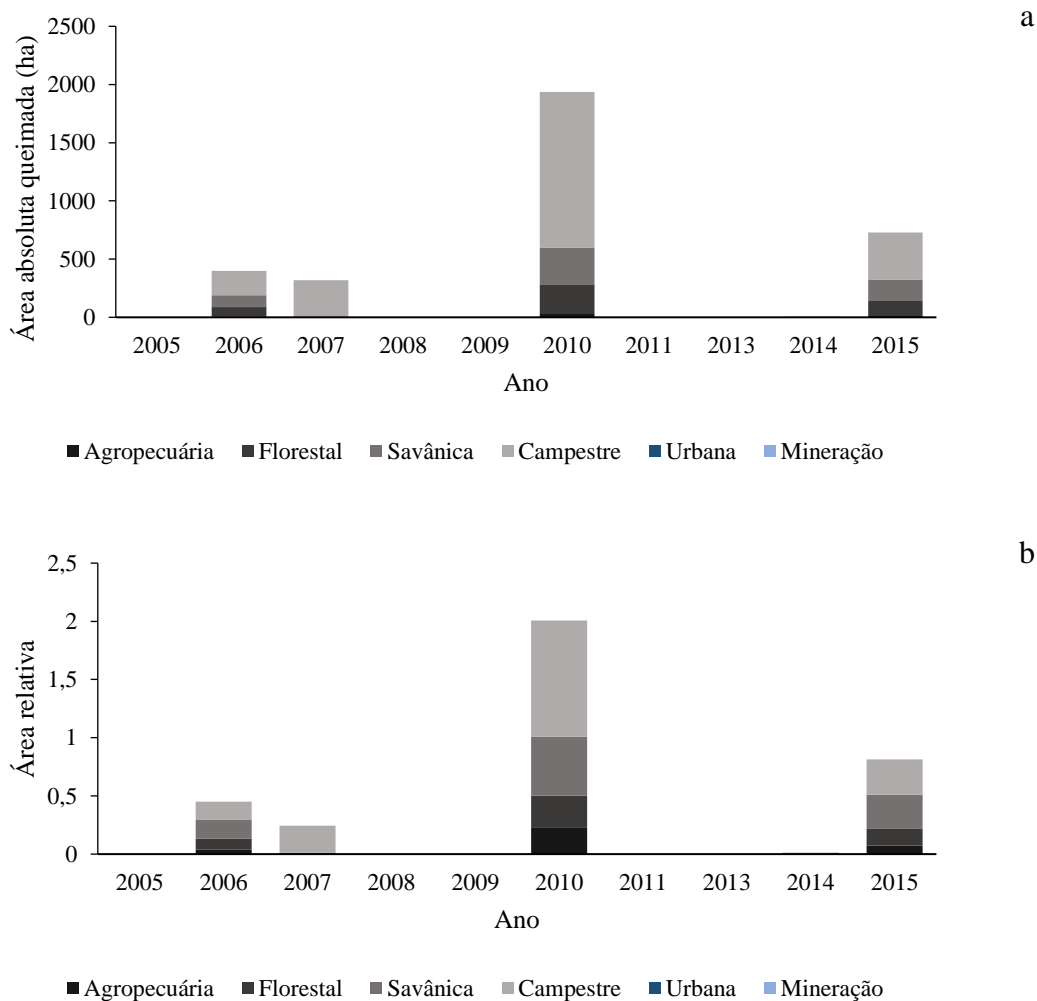


Figura 18 - Gráficos de áreas absolutas (a) e áreas relativas (b) das cicatrizes de fogo nos diferentes usos e coberturas do solo entre 2005 e 2015 na área do Parque dos Pireneus.

Recorrência

As Figuras 19, 20, 21 e 22 e a Tabela 3 foram produzidas a partir da sobreposição dos mapas anuais de cicatrizes de fogo, portanto mostram a recorrência mínima de fogo no entorno, APA e no Parque dos Pireneus, entre 2005 e 2015 para o mês de setembro. Além disso, a tabela mostra os valores absolutos e percentuais (em relação às áreas dos locais em que ocorreu o fogo, ou seja, entorno, APA ou Parque) de fogo recorrente.

Como se vê no mapa abaixo, as cicatrizes de fogo que ocorreram até o mês de setembro durante estes dez anos analisados estão agrupadas formando um traço de noroeste a sudeste na porção central da região. Estando a porção noroeste fora das UC a mais atingida por fogo com diferentes recorrências (de uma a seis). Observou-se que há muitas áreas que não foram atingidas por fogo em nenhum dos anos e imagens analisadas. As cicatrizes mais abrangentes em área são aquelas que ocorreram apenas uma vez em

determinada localidade. Além disso, houve pelo menos seis reincidência de fogo que atingiram as mesmas áreas durante os anos de análise.

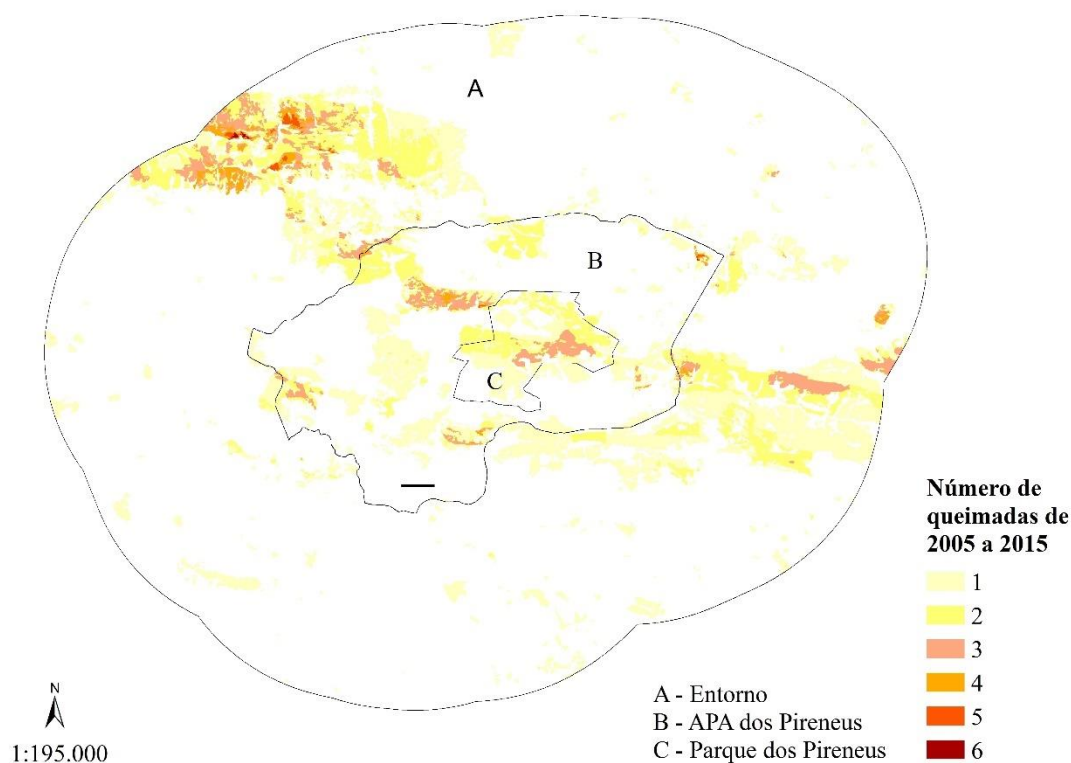


Figura 19 – Cicatrizes de fogo acumuladas entre 2005 e 2015.

Áreas atingidas por fogo apenas uma vez durante os anos analisados foram as mais amplas, recobrando 9,22% da área do entorno, 15,43% da área da APA e 31,58% do Parque. Áreas atingidas por fogo duas e três vezes também foram representativas em termos de abrangência; 4,44% e 1,53%, respectivamente, do entorno; 6,11% e 2,01%, respectivamente, da APA; e 19,86% e 8,35%, respectivamente, do Parque. O Parque teve áreas atingidas recorrentemente pelo fogo no máximo três vezes durante os anos analisados.

Tabela 4 - Número mínimo da recorrência de fogo e suas áreas absolutas e percentuais entre 2005 e 2015 (excluindo-se 2012).

Nº incêndios	Entorno		APA		Parque	
	área (ha)	% do entorno	área (ha)	% da APA	área (ha)	% do Parque
1 vez	8720,45	9,22	2961,34	15,43	896,62	31,58
2 vezes	4198,67	4,44	1172,65	6,11	563,74	19,86
3 vezes	1450,88	1,53	386,21	2,01	236,97	8,35

4 vezes	329,66	0,35	60,11	0,31	0,00	0,00
5 vezes	76,77	0,08	7,65	0,04	0,00	0,00
6 vezes	9,90	0,01	0,36	0,00	0,00	0,00

As Figuras 20 e 21 revelam as áreas absolutas e o acúmulo das diferentes regiões (Entorno, APA e Parque) das cicatrizes de fogo recorrentes durante os anos analisados. Dos 21.072 hectares atingidos pelo fogo na área total entre 2005 e 2015, 12.578 hectares (59,69% das áreas das cicatrizes e 10,79% da área total) queimaram apenas uma vez, e 8.494 hectares (40,31% das áreas das cicatrizes e 7,28% da área total) queimaram mais de uma vez. Estimou-se que 5.935 hectares sofreram com pelo menos duas incidências de fogo (28,17% das áreas das cicatrizes e 5,09% da área total), e 2.074 hectares com três incidências de fogo (9,85% das áreas das cicatrizes e 1,78% da área total). As áreas atingidas por pelo menos quatro, cinco ou seis incêndios somam em 484 hectares (2,30% das áreas das cicatrizes e 0,42% da área total). A tendência das áreas das cicatrizes de fogo pelo número de reincidência do fogo se acertou numa linha exponencial com R^2 igual a 0,9744.

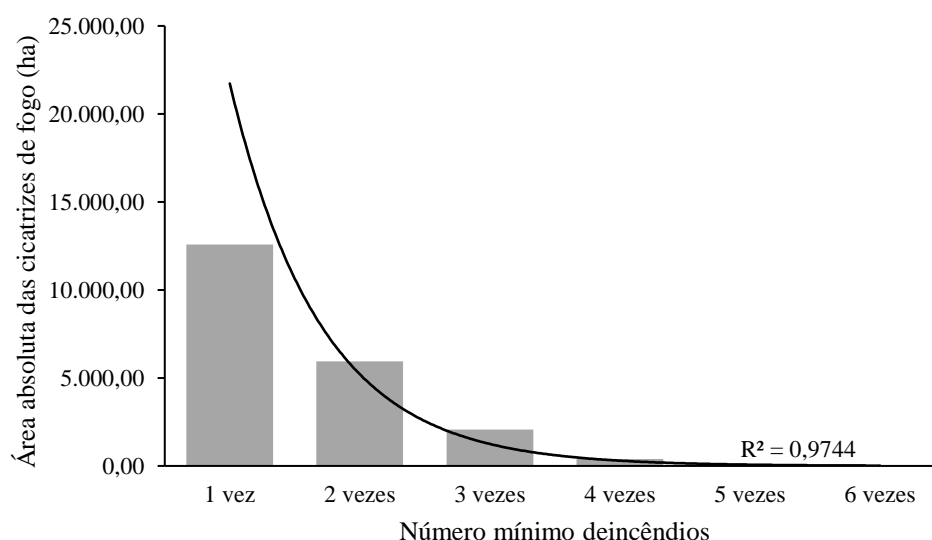


Figura 20 - Recorrência do fogo entre 2005 e 2015 e suas áreas absolutas na área total analisada.

As cicatrizes de fogo no entorno são maiores em área para todas as recorrências de fogo, em seguida na APA e finalmente no Parque. Para todas as regiões as áreas das cicatrizes de fogo foram mais abrangentes para as que ocorreram uma vez, seguida por duas vezes, três e assim por diante. O Parque, ao contrário das outras localidades que apresentaram até seis reincidências de fogo, apresentou o máximo de três.

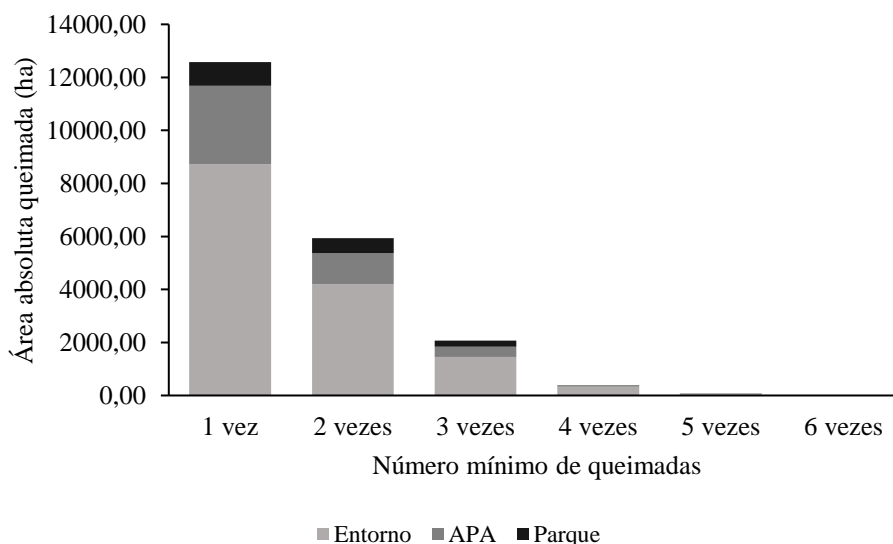


Figura 21 - Recorrência de fogo entre 2005 e 2015 e suas áreas absolutas no entorno, na APA e no Parque dos Pireneus.

A área relativa das cicatrizes de fogo é importante devido a grande diferença na abrangência das regiões estudadas, ou seja, o entorno, que recobre 81% da área estudada, terá mais incêndios, mas é importante analisar as cicatrizes de fogo proporcionalmente às regiões analisadas. Ao analisar o gráfico abaixo, nota-se que apesar da área do Parque ser a menor, em termos relativos as áreas atingidas por fogo nesta UC, para todas as recorrências de fogo, foram expressivamente maiores; 0,32 ha/ha Parque queimados uma única vez em relação a 0,15 ha/ha APA e 0,09 ha/ha Entorno para o Parque, APA e o Entorno, respectivamente.

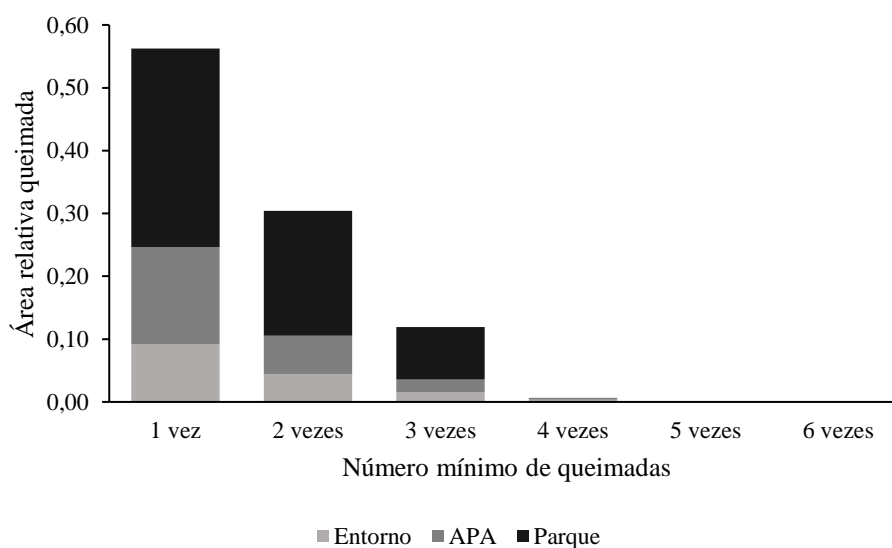


Figura 22 - Recorrência de fogo, e as áreas relativas das cicatrizes de fogo no entorno, na APA e no Parque dos Pireneus no período de 2005 a 2015.

Abaixo a Figura 23 representa as áreas absolutas das cicatrizes de fogo das diferentes coberturas do solo da área total estudada para as diferentes recorrências de fogo, ou número de reincidência do fogo em uma mesma área, que ocorreram em setembro de 2005 a 2015. No geral, as áreas de savana, campo e agropecuária foram as mais amplamente atingidas por fogo para as diferentes recorrências. Áreas de agropecuária tiveram reincidência de até cinco incêndios, as formações vegetacionais tiveram seis incêndios e as áreas urbanas e de mineração tiveram até dois incêndios recorrentes.

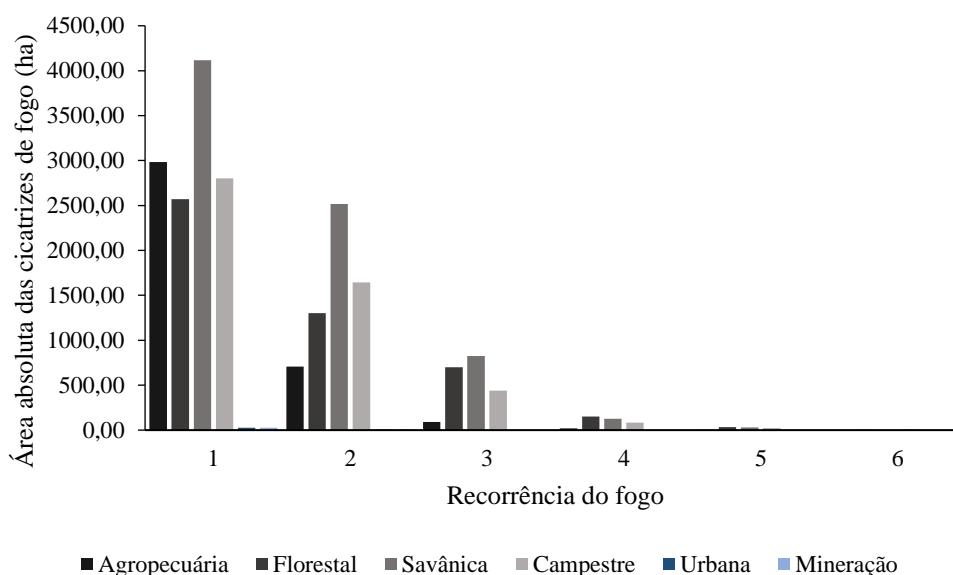


Figura 23 - Área absoluta das cicatrizes de fogo para as diferentes recorrências do fogo (entre 2005 e 2015) e usos e coberturas do solo na região total estudada.

A Figura 24 abaixo mostra as cicatrizes de fogo para as diferentes recorrências do fogo e diferentes coberturas do solo em termos relativos da área ocupada pelos respectivos usos e coberturas do solo. Nesta figura, fica evidente, assim como apresentado no tópico anterior de abrangência das cicatrizes, que as formações campestres foram as mais amplamente atingidas por fogo proporcionalmente a área ocupada por esta formação. Dos 6.944 hectares totais ocupados por campo, 2.800 hectares foram atingidos por fogo pelo menos uma vez (40,33%), e 1.645 hectares no mínimo duas vezes (23,69%).

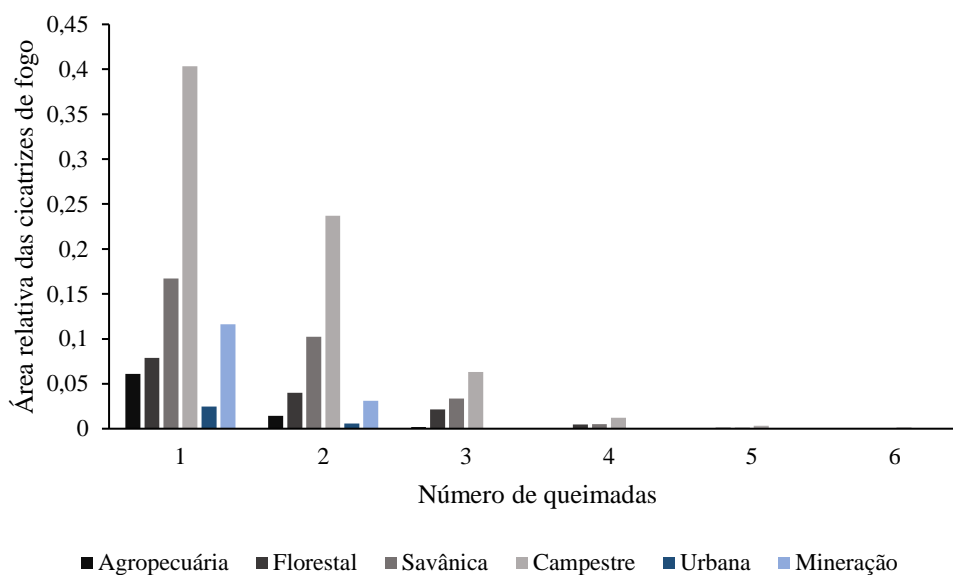


Figura 24 - Área relativa das cicatrizes de fogo para as diferentes recorrências de fogo (entre 2005 e 2015) e usos e coberturas do solo na região total estudada.

Intervalo entre incêndios

Sabemos que pelo menos 5% das áreas foram atingidas por fogo mais de 2 vezes, e que tiveram áreas atingidas até 6 vezes num período de 10 anos. Os dados a seguir foram levantados para se observar se há um padrão no intervalo entre incêndios, ou seja, quantos anos se passam entre um incêndios e outro em uma mesma área, ou ainda se há um intervalo de tempo em que a abrangência do fogo é maior.

A Figura 25 mostra as áreas das cicatrizes de fogo (hectares) duas vezes e o intervalo entre o primeiro e o segundo incêndios (anos). Algumas áreas foram atingidas por fogo duas vezes neste período de dez anos após 1 (um) até 9 (nove) anos. Entre a primeira e segunda recorrência de fogo, a abrangência das cicatrizes foi maior após três e quatro anos, sendo de cerca de 29% e 44%, respectivamente.

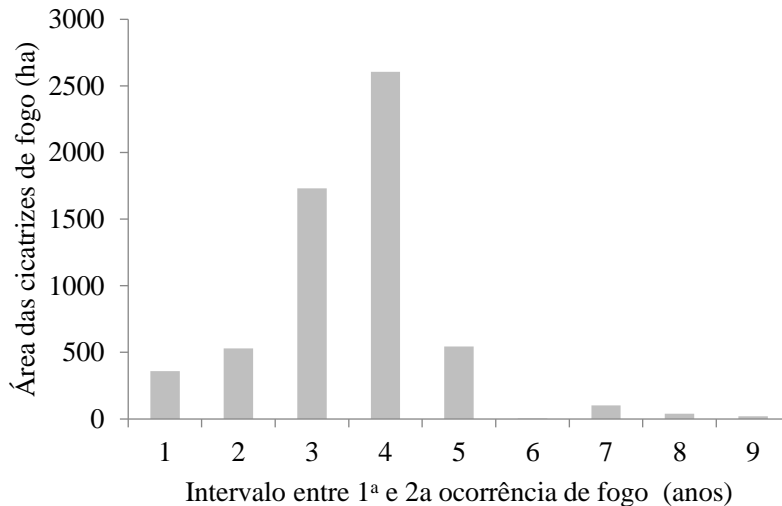


Figura 25 - Intervalo de tempo (anos) entre a primeira e segunda ocorrência de fogo e respectivas áreas das cicatrizes de fogo (hectares).

Para as áreas que foram atingidas por fogo no mínimo três vezes durante os anos analisados, entre o primeiro e segundo incêndio e entre o segundo e terceiro incêndio, após um, três e quatro anos, ocorreram as maiores cicatrizes de fogo. Entre o primeiro e segundo incêndio (a), o padrão foi o mesmo que a de áreas atingidas por fogo duas vezes (Figura 8), ou seja, as maiores cicatrizes de fogo ocorreram após três e quatro anos, cerca de 26% e 37%, respectivamente. Após um ano, também houve grande abrangência de cicatrizes. Entre o segundo e terceiro incêndio os intervalos de tempo que tiveram as maiores cicatrizes de fogo também foram um, três e quatro anos. Neste caso, após um ano houve maior abrangência de cicatrizes do que três anos, 24% e 17%, respectivamente, e 40% das áreas atingidas por fogo pela terceira vez ocorreram após quatro anos.

A Figura 26 mostra as áreas atingidas por fogo (hectares) três vezes, sendo o gráfico da esquerda referente as áreas e intervalos de tempo entre o primeiro e segundo incêndio, e o gráfico da direita aos dados entre o segundo e terceiro incêndio.

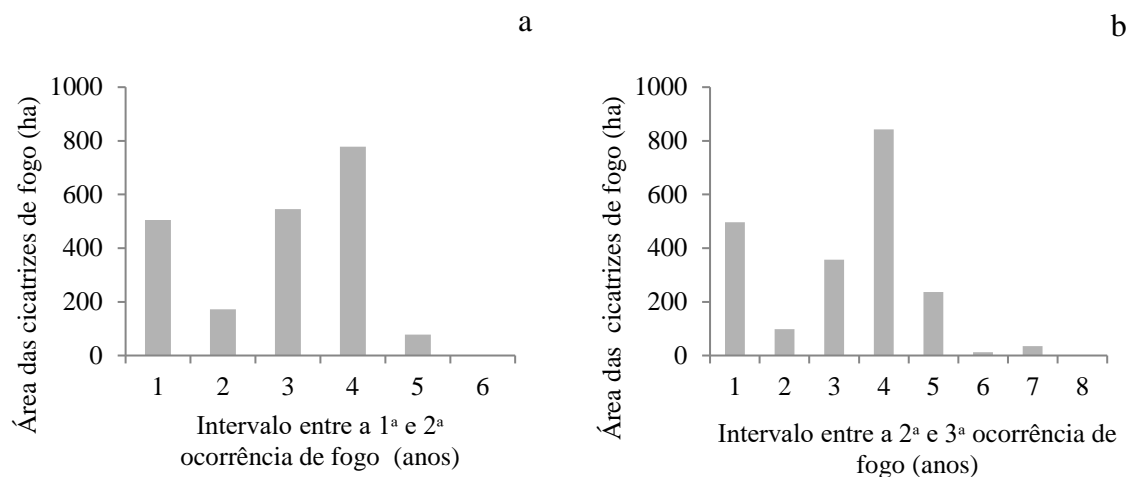


Figura 26 - Intervalo de tempo entre a primeira e segunda ocorrência do fogo (anos) (a), e entre a segunda e terceira ocorrência do fogo (b) e respectivas áreas das cicatrizes de fogo (ha).

A Figura 27 é referente aos intervalos de tempo e áreas das cicatrizes de fogo para regiões que foram atingidas por fogo até quatro vezes durante o período analisado, portanto, mostra os intervalos e áreas das cicatrizes entre o primeiro e segundo incêndio, segundo e terceiro incêndio e entre o terceiro e quarto incêndio.

As áreas reincididas por fogo quatro vezes apresentaram a maior abrangência de áreas de cicatrizes de fogo entre o primeiro e segundo incêndio e entre o segundo e terceiro incêndio após um ano, sendo estas cerca de 64% e 43% das áreas das cicatrizes de fogo, respectivamente. Após dois anos, 30% da área atingida por fogo foi reincidida por fogo pela segunda vez, e após três anos, 41% da área foi reincidida pela terceira vez. O quarto incêndio foi mais abrangente após três, quatro e um ano, em ordem decrescente, ou 45%, 27% e 20%, respectivamente das áreas atingidas por fogo.

É importante ressaltar que o total de áreas atingidas por fogo quatro vezes (390 hectares) é bastante inferior as áreas atingidas três (2.079 hectares) e duas vezes (5.940 hectares), significando apenas cerca de 19% e 7% destas áreas, respectivamente. Desta forma, pode-se entender que os dados resultantes de menor amplitude amostral (áreas das cicatrizes) podem ser menos confiáveis ou menos representativos da realidade.

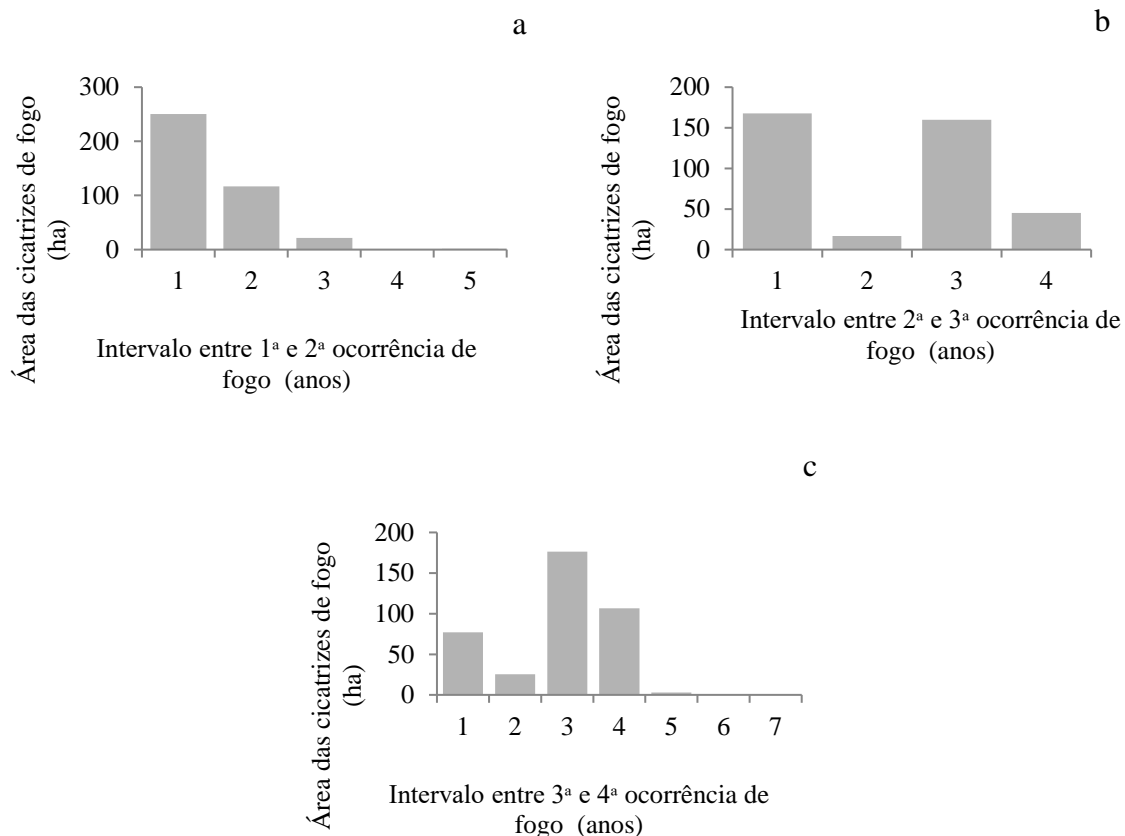
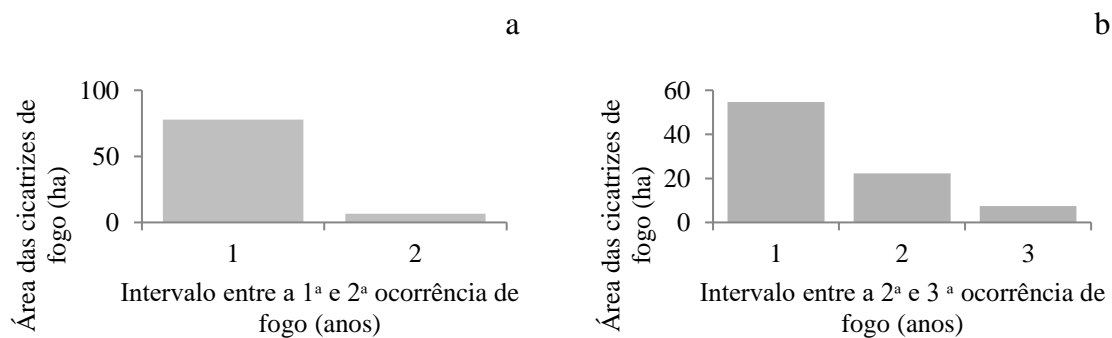


Figura 27 - Intervalo de tempo entre o primeiro e segundo incêndio (anos) (a), entre o segundo e terceiro incêndio (b) e entre o terceiro e quarto incêndio (c) e respectivas áreas das cicatrizes de fogo (ha).

Dos 84 hectares atingidos por fogo até cinco vezes entre 2005 e 2015, 92% e 65% das áreas queimaram após um ano entre o primeiro e segundo incêndio e entre o segundo e terceiro incêndio respectivamente. Entre o terceiro e quarto incêndio, 60% das áreas queimaram após três anos, e 35% após um ano. O quinto incêndio abrangeu 45% e 43% das áreas atingidas por fogo após três e quatro anos, respectivamente. A Figura 28 mostra as áreas e intervalos de tempo entre incêndios para as regiões atingidas por fogo cinco vezes.



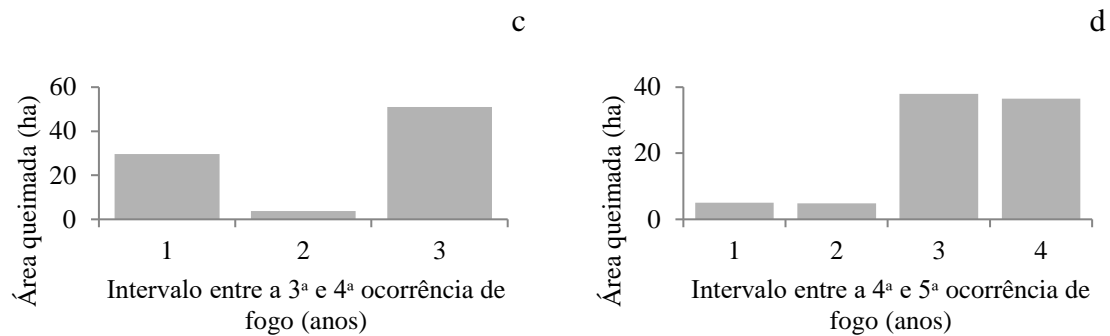
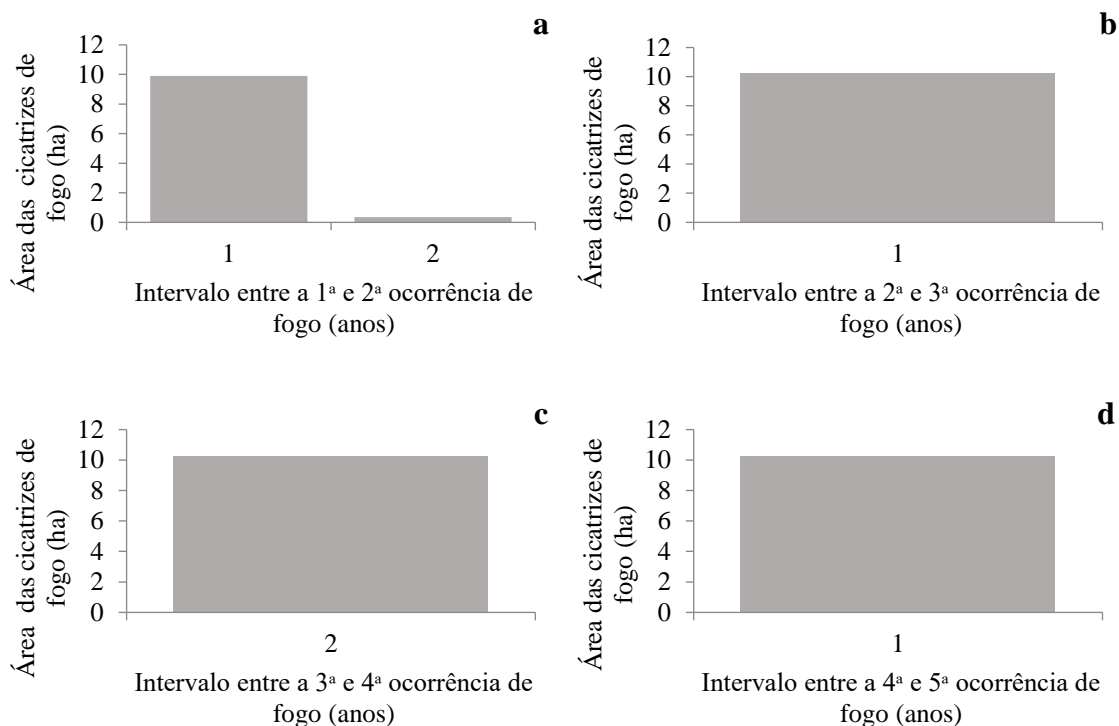


Figura 28 - Intervalo de tempo entre a primeira e segunda ocorrência de fogo (anos) (a), entre a segunda e terceira ocorrência de fogo (b), entre a terceira e quarta ocorrência de fogo (c) e entre a quarta e quinta ocorrência de fogo (d) e respectivas áreas das cicatrizes (ha).

As áreas que foram atingidas por fogo seis vezes entre os anos analisados, correspondem a cerca de 10 hectares, conforme a Figura 29, a maior parte ou a totalidade desta área foi atingida após um ano; entre a primeira e a segunda ocorrência de fogo, segunda e terceira, e entre a quarta e a quinta ocorrência de fogo, 96%, 100% e 100%, respectivamente. A terceira reincidência do fogo atingiu 100% da área já atingida após dois anos. E a sexta reincidência do fogo atingiu 96% da área já atingida após quatro anos. De forma geral, após um ano ocorreu a maioria das reincidências.



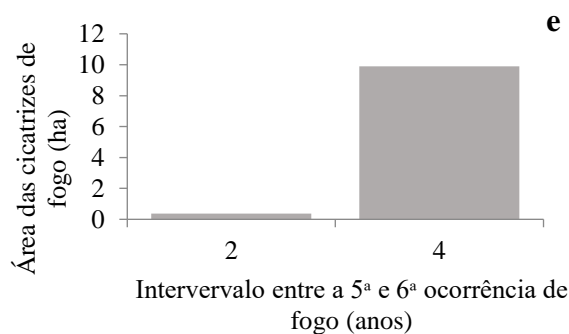


Figura 29 - Intervalo de tempo entre a primeira e segunda ocorrência de fogo (anos) (a), entre a segunda e terceira ocorrência de fogo (b), entre a terceira e quarta ocorrência de fogo (c), entre a quarta e quinta ocorrência de fogo (d) e entre a quinta e sexta ocorrência de fogo (e) e respectivas áreas das cicatrizes.

A Figura 30 mostra os valores médios de área e intervalos entre reincidências do fogo resultante dos dados de todas as análises feitas acima. No geral, as maiores cicatrizes de fogo ocorreram após quatro anos (40%), seguida de três anos (25%).

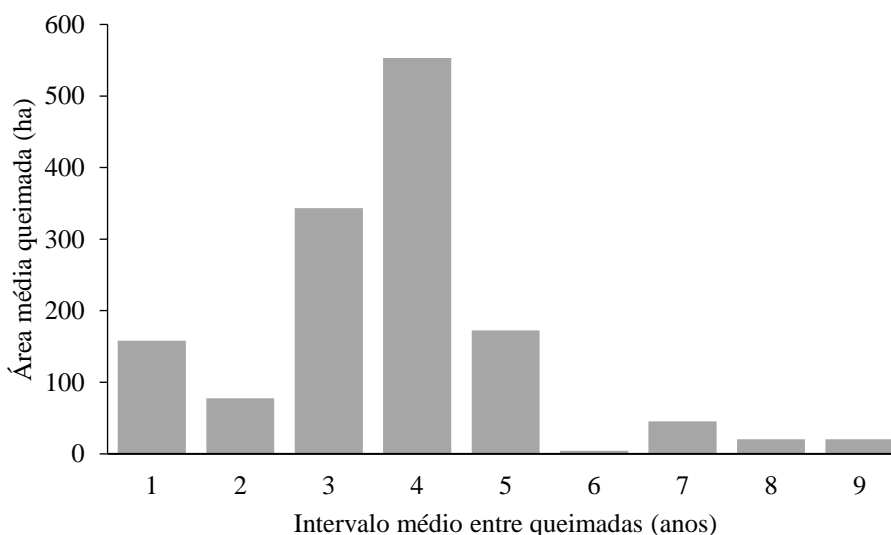


Figura 30 - Intervalo médio entre ocorrências de fogo (anos) e suas respectivas áreas médias das cicatrizes de fogo (ha).

Resiliência

O teste de Shapiro-Wilk indicou com nível de significância igual a 5% que as amostras provem de uma população normal (Tabela 5), com p-Valores maior do que 0,05 e $W_{\text{calculado}}$ maiores que $W_{\text{crítico}}$ de 0,927 ($N = 30$). Portanto, utilizou-se teste paramétrico T Student para se verificar se há diferença significativa entre as médias de NDVI das amostras. Utilizou-se um nível de confiança de 95%. As hipóteses testadas e respectivos resultados serão apresentados a seguir.

Tabela 5 - Resultados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk com nível de significância de 5%.

Formações	NDVI sem fogo		NDVI com ocorrência de fogo	
	Estatísticas	P-Valores	Estatísticas	P-Valores
Campestre	0,955080315	0,2308	0,929605636	0,0582
Savânica	0,975202138	0,6887	0,949961993	0,1687
Florestal	0,962385905	0,3559	0,946009086	0,1321

Primeiramente, foram utilizados dados de NDVI das diferentes formações vegetacionais nas imagens de 2005 e 2015 em situação de não atingida por fogo e com uma ocorrência de fogo. A fim de se verificar a diferença entre o comportamento do NDVI de uma vegetação não atingida por fogo e uma antiga por fogo foi utilizado o teste T da diferença entre estes.

A Figura 31 compara os valores médios de NDVI para as diferentes formações vegetacionais em duas situações; não atingida por fogo (0 ocorrências), ou quando foram atingidas uma vez por fogo (1 ocorrência). Para todos os tipos vegetacionais o valor de NDVI reduz com o efeito de uma ocorrência de fogo. Essa diferença é mais sentida em formações florestais (24,55% de redução nos valores de NDVI), depois nas formações savânicas (7,85%), e por fim nas formações campestres (4,25%), que também são as mais abertas naturalmente.

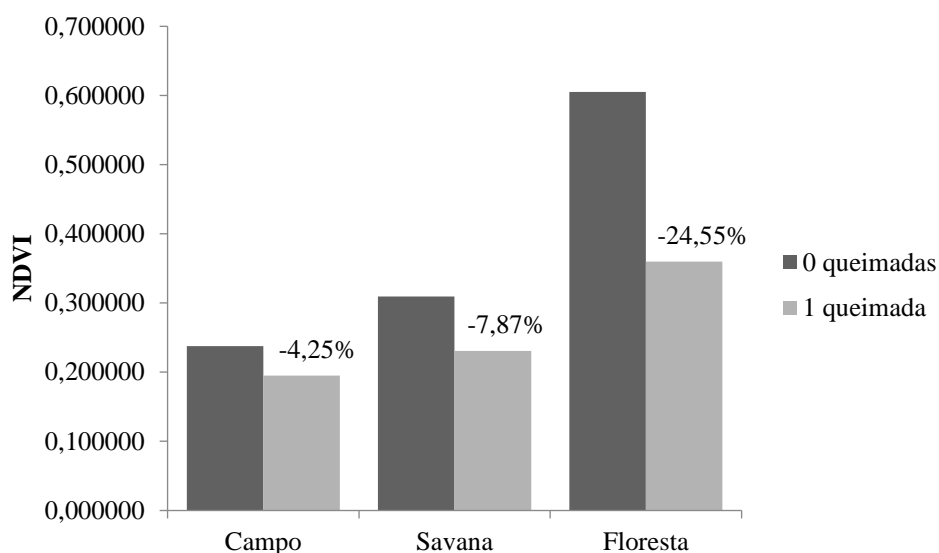


Figura 31 - Valores médios de NDVI para as diferentes formações vegetacionais e para as situações em que a vegetação não foi atingida por fogo e em que foi atingida por fogo no ano de 2005. Os valores percentuais são a diferença nos valores de NDVI para zero e uma (1) ocorrência de fogo.

A Tabela 6 apresenta os valores do teste T e a probabilidade de verificar se as diferenças entre os valores médios dos NDVI das formações vegetacionais não atingidas por fogo e com uma ocorrência de fogo são estatisticamente significantes. Como o nível de confiança usado foi de 95%, para os valores de P-Valor menores que 0,05 rejeita-se a hipótese H₀ de que as médias são iguais. Neste caso, para todas as formações vegetacionais houve diferença significativa nas médias de NDVI para as situações de zero e uma ocorrência do fogo, ou seja, valores de P-Valor menores que 0,05.

Tabela 6 - Alguns dos valores dos resultados do teste T (média) entre a diferença dos NDVI das diferentes formações vegetacionais no caso de 0 (zero) ocorrências ou 1 (uma) ocorrência de fogo observados na imagem de 2005. Nível de confiança de 95%.

TESTE T - AMOSTRAS INDEPENDENTES		
Formação	Estatística T	P-Valor
Campestre	5,190402	2,81E-06
Savânica	7,9984	6,16E-11
Florestal	14,46145	3,40E-19

A Figura 32 mostra os valores médios de NDVI para as diferentes formações vegetacionais com o efeito de zero (0) e uma (1) queimada no ano de 2015. Esta confirma os padrões de diminuição dos valores de NDVI encontrados na imagem de 2005; a maior redução ocorreu para formações florestais (29,15%), savânicas (6,44%), e então para as formações campestres (2,59%).

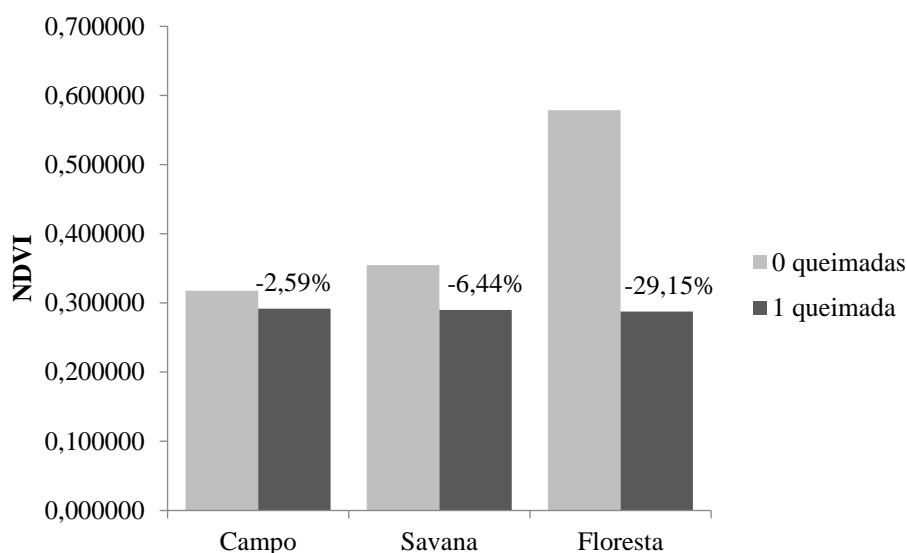


Figura 32 - Valores médios de NDVI para as diferentes formações vegetacionais e para as situações em que a vegetação não foi atingida por fogo e em que foi atingida no ano de 2015. Os valores percentuais são a diferença nos valores de NDVI para zero e uma (1) ocorrência.

As diferenças encontradas nos valores médios dos NDVI sem e com o efeito do fogo foram significantes para todas as formações vegetacionais, à um nível de confiança de 95% (Tabela 7).

Tabela 7 - Alguns dos valores dos resultados do teste T (média) entre a diferença dos NDVI das diferentes formações vegetacionais no caso de 0 (zero) ocorrências ou 1 (uma) ocorrência de fogo observados na imagem de 2015. Nível de confiança de 95%.

TESTE T - AMOSTRAS INDEPENDENTES		
Formação	Estatística T	P-Valor
Campestre	16,15606	3,88E-23
Savânica	6,229086	1,25E-07
Florestal	10,52179	4,55606E-15

A partir dos resultados acima, observou-se que a ocorrência de fogo altera significativamente os valores de NDVI das formações vegetacionais quando observada no mesmo ano/momento em que ocorre. Os resultados a seguir enfocam no entendimento do efeito da recorrência do fogo e o efeito do tempo sem ocorrência do fogo na vegetação no valor de NDVI, ou seja, na possível resiliência da vegetação. As tabelas e gráficos abaixo são resultado dos valores médios de NDVI observados em 2015 com diferentes recorrências de fogo ocorridas entre 2005 e 2015.

A Figura 33 mostra os valores médios de NDVI para as diferentes recorrências de fogo ocorridas entre 2005 e 2015 no mês de setembro para áreas de formação campestre. De forma geral, o R^2 indica quanto, em porcentagem, o modelo de regressão linear generalizado consegue explicar os valores observados. Neste caso, o R^2 consegue

relacionar cerca de 97% dos valores de NDVI com o número de ocorrências do fogo, ou seja, pode-se dizer que há uma relação linear entre estas variáveis, portanto pode-se esperar que quanto maior a recorrência de fogo em uma área de campo, menor será o valor do NDVI desta. O NDVI de áreas não atingidas por fogo para áreas atingidas pelo menos cinco vezes pelo fogo teve uma redução de aproximadamente 36%, e de áreas atingidas uma vez para áreas atingidas cinco vezes a redução foi de cerca de 33%.

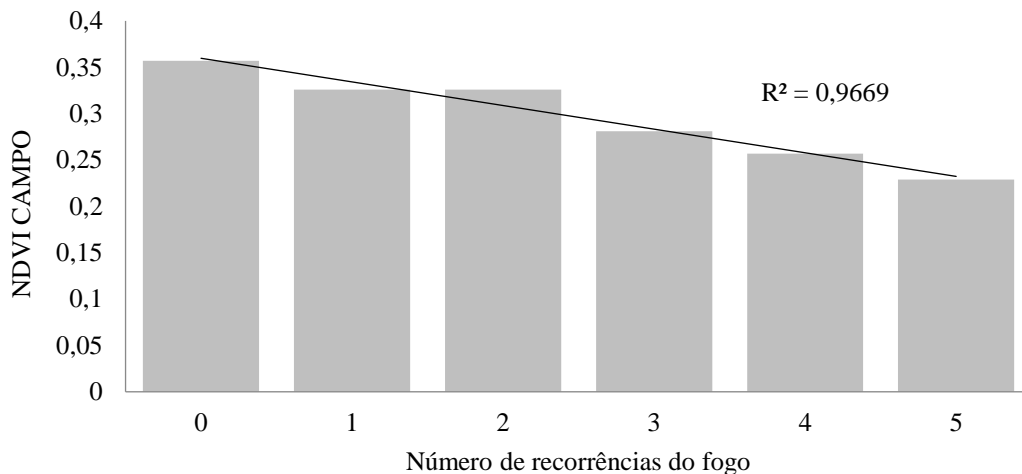


Figura 33 - NDVI de formações campestres medidos em 2015 de áreas com diferentes recorrências do fogo entre 2005 e 2015.

A Figura 34 mostra a alteração no valor do NDVI entre as áreas não atingidas por fogo e as áreas com reincidência do fogo de até cinco vezes. Observou-se que o valor de NDVI decresce linearmente com o aumento do número de reincidência do fogo, mas apresentando alguns aumentos em relação a uma queimada (por exemplo, duas e quatro queimadas). O R^2 explica cerca de 75% dos valores de NDVI em relação ao número de recorrências de fogo. A diferença no valor do NDVI para áreas não queimadas e áreas queimadas cinco vezes foi de 4%.

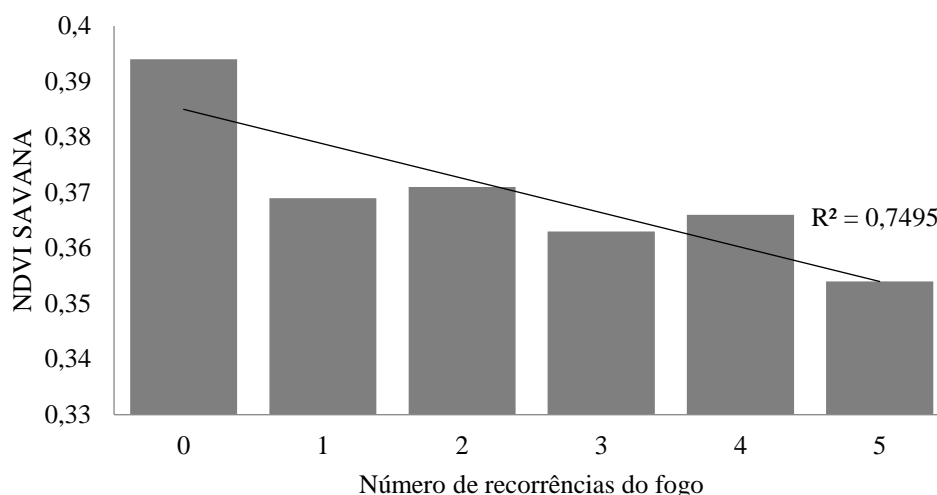


Figura 34 - NDVI de formações savânicas medidos em 2015 de áreas com diferentes recorrências de fogo entre 2005 e 2015.

A Figura 35 relaciona os valores médios de NDVI com as diferentes reincidência de fogo ocorridos entre 2005 e 2015 para áreas de formações florestal. A relação entre estas variáveis é explicada por uma linha de tendência polinomial. Observando a Figura 35, percebe-se que nos casos de três ocorrências de fogo o valor médio de NDVI foi maior do que no caso de uma e duas recorrências. A maior diferença no valor de NDVI é observada na comparação entre áreas de floresta não atingidas e atingidas uma e duas vezes. A diferença percentual entre as áreas de floresta não atingias e atingidas quatro vezes pelo fogo foi de cerca de 19%, a mesma observada para áreas atingidas duas vezes.

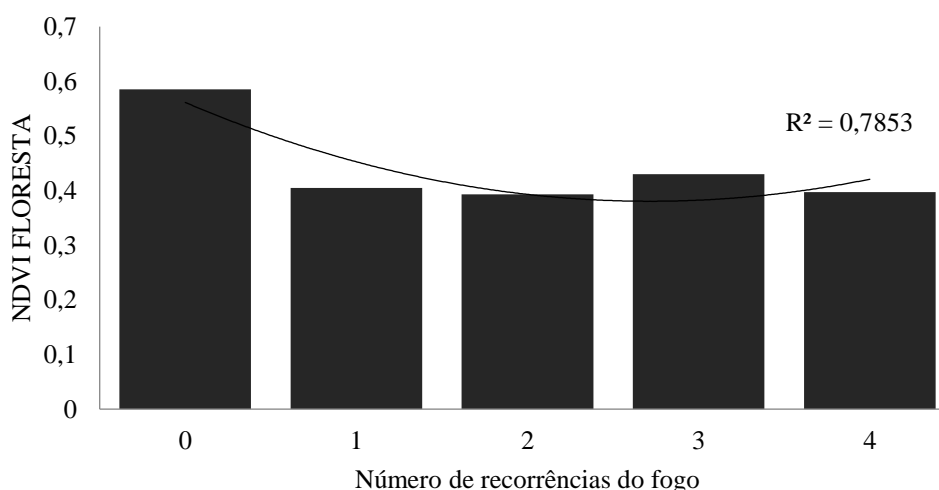


Figura 35 - NDVI de formações florestais medidos em 2015 de áreas com diferentes recorrências de fogo entre 2005 e 2015.

Os dados analisados acima foram observados em 2015, mas não foi considerado o tempo decorrido entre estas ocorrências de fogo, independentemente da recorrência, e

o ano em que se mediu o NDVI. Desta forma, esta seção do trabalho buscou analisar o efeito do tempo decorrido entre uma ou mais ocorrências do fogo em uma área no valor do NDVI. Assim sendo, aqui são apresentados valores de NDVI para diferentes formações vegetacionais e sob diferentes repetições do fogo observados no ano de 2015 (ano referência) e considerando-se o tempo decorrido entre as ocorrências do fogo e a medição do NDVI.

A Figura 36 mostra os valores de NDVI medidos em 2015 para as diferentes formações vegetacionais e para três situações; vegetação não atingida por fogo, atingida uma vez em 2005 (dez anos antes da medição do NDVI) e atingida uma vez em 2014 (um ano antes da medição). Os valores percentuais mostram a diferença do valor do NDVI não atingida para o valor do NDVI de áreas atingidas uma vez em 2005 e uma vez em 2014, respectivamente.

Para todos os tipos vegetacionais a diferença foi maior entre o valor de NDVI de áreas não atingidas para áreas atingidas pelo fogo um ano antes da medição (em 2014), do que para áreas atingidas dez anos antes (2005).

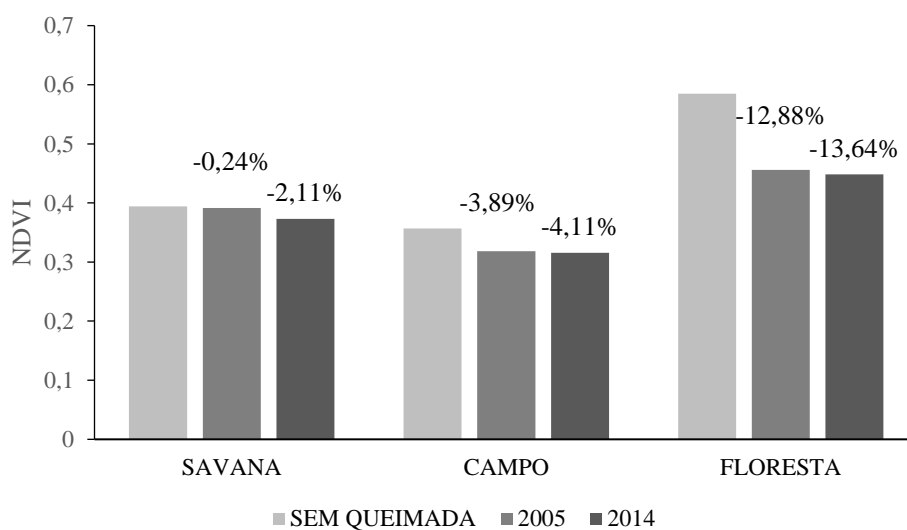


Figura 36 - NDVI medido em 2015 agrupado por tipo vegetacional comparando amostra de referência (sem ocorrência de fogo durante o período de 2005 a 2015), com ocorrência de fogo em 2005, com ocorrência de fogo em 2014.

Analisando os valores de P-Valor do teste T para os dados acima, na Tabela 8 abaixo, percebe-se que, apesar de haver diferença nos valores de NDVI para áreas sem ocorrência de fogo e com ocorrência em 2005 ou 2014, estas diferenças não são estatisticamente significantes (P-Valor > 0,05) no caso de formações savânicas e campestres. No caso de formações florestais, há diferença significativa nos valores de

NDVI no caso de áreas sem ocorrência e com ocorrência do fogo em 2014 (um ano entre a ocorrência e a observação do NDVI), mas não entre áreas sem ocorrência e com ocorrência de fogo em 2005 (10 anos passados entre a queimada e a observação do NDVI). Em nenhuma das formações vegetacionais houve diferença significativa entre áreas atingidas pelo fogo em 2005 e 2014.

Tabela 8 - Alguns dos valores dos resultados do teste T (média) entre as diferenças dos NDVI das diferentes formações vegetacionais no caso de 0 (zero) ocorrências de fogo ou 1 (uma) ocorrência de fogo em 2005 e 1 (uma) ocorrência de fogo em 2014 observados na imagem de 2015.

TESTE T - AMOSTRAS INDEPENDENTES			
		Estatística T	P-Valor
Savana	sem ocorrência x ocorrência em 2005	-1,821109	0,09859816
	sem ocorrência x ocorrência em 2014	-0,597829	0,563247
	ocorrência em 2005 x ocorrência em 2014	1,524002	0,1584876
Campo	sem ocorrência x ocorrência em 2005	0,4978005	0,6293888
	sem ocorrência x ocorrência em 2014	0,7496713	0,4707213
	ocorrência em 2005 x ocorrência em 2014	0,161891	0,874616
Floresta	sem ocorrência x ocorrência em 2005	3,564082	0,005146169
	sem ocorrência x ocorrência em 2014	4,072578	0,002240879
	ocorrência em 2005 x ocorrência em 2014	0,4021213	0,6960553

A Figura 37 mostra os valores de NDVI medidos em 2015 para diferentes formações vegetacionais (exceto campestre, pois não havia área suficiente a ser amostrada) e nos seguintes casos: sem ocorrência; duas ocorrências de fogo, uma em 2006 e a seguinte em 2007; e duas recorrências, em 2010 e 2011. A diferença entre o NDVI de áreas sem ocorrência de fogo e áreas reincididas em 2010 e 2011 (ocorrência mais próxima da data em que o NDVI foi medido) é maior do que para áreas também reincididas duas vezes pelo fogo, porém em anos mais distantes em relação ao ano de observação do NDVI (2015). De forma geral, tanto para savanas quanto para florestas, o tempo decorrido sem fogo influencia na recuperação da vegetação, mesmo quando se tratando de duas reincidências.

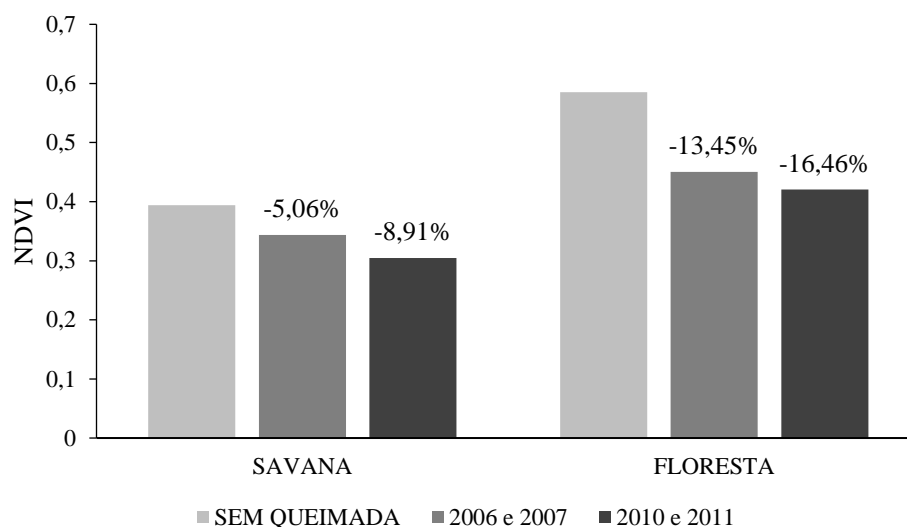


Figura 37 - NDVI medido em 2015 agrupado por tipo vegetacional comparando amostra de referência (sem ocorrência de fogo durante o período de 2005 a 2015), com áreas atingidas pelo fogo pelo menos duas vezes; em 2006 e 2007, e em 2010 e 2011.

Áreas reincididas duas vezes por fogo não apresentam diferença significativa nos valores de NDVI em relação a áreas não atingidas por fogo, independentemente do tempo decorrido entre estas (em 2006 e 2007 ou em 2010 e 2011), no caso de formações savânicas. Os valores de NDVI para as ocorrências de fogo em 2006 e 2007 e em 2010 e 2011 também não variaram significativamente (Tabela 8).

No caso das formações florestais, os valores de NDVI diferiram significativamente estatisticamente na comparação de áreas não atingidas por fogo para áreas atingidas duas vezes, tanto se o fogo ocorreu em 2006 e 2007, e ainda mais no caso de ter ocorrido em 2010 e 2011. Quando comparando os valores de NDVI para regiões atingidas duas vezes pelo fogo (em 2006 e 2007 x em 2010 e 2011), estes não variaram significativamente (Tabela 9). Assim, mesmo passados muitos anos sem ocorrência do fogo, a vegetação não volta ao seu estado original, mantendo valores de NDVI muito parecidos com de regiões atingidas por fogo a pouco tempo.

Tabela 9 - Alguns dos valores dos resultados do teste T (média) entre as diferenças dos NDVI das diferentes formações vegetacionais no caso de 0 (zero) ocorrências de fogo ou 2 (duas) ocorrências de fogo em 2006, 2007 e 2 (duas) ocorrências em 2010, 2011 observadas.

TESTE T - AMOSTRAS INDEPENDENTES			
		Estatística T	P-Valor
Savana	sem ocorrência x ocorrência: 2006 e 2007	0,837776	0,4165025
	sem ocorrência x ocorrência: 2010 e 2011	2,021897	0,06015238
	ocorrência 2006, 2007 x ocorrência: 2010, 2011	1,788604	0,09962693
Floresta	sem ocorrência x ocorrência 2006 e 2007	4,284524	0,001296495
	sem ocorrência x ocorrência 2010 e 2011	5,093311	0,000108472

A Figura 38 mostra os valores médios de NDVI para formações savânicas e florestais para áreas nunca atingidas por fogo, e atingidas três vezes; em 2005, 2006 e 2007 e em 2009, 2011 e 2014, no período de 2005 a 2015. Os valores percentuais mostram a diferença do valor do NDVI de áreas não atingidas para áreas atingidas três vezes por fogo (em 2005, 2006 e 2007 ou em 2009, 2011 e 2014). Como pode-se ver, há maior diferença caso as três ocorrências do fogo tenham sido em anos mais próximos de quando o NDVI foi medido, do que se as ocorrências em anos mais distantes de 2015.

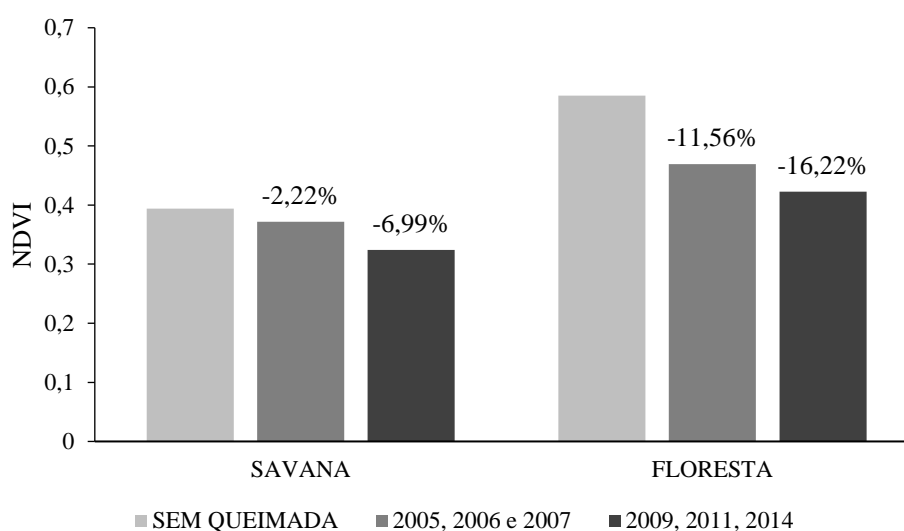


Figura 38 - NDVI medido em 2015 agrupado por tipo vegetacional comparando amostra de referência (sem ocorrência durante o período de 2005 a 2015), com áreas atingidas pelo menos três vezes; em 2005, 2006 e 2007, e em 2009, 2010 e 2014.

A Tabela 10 mostra se as diferenças observadas na Figura 38 acima são estatisticamente significativas ($P\text{-Valor} < 0,05$). No caso das formações savânicas, não há diferença significativa entre áreas não atingidas por fogo e atingidas três vezes: em 2005, 2006 e 2007. Portanto, mesmo a área sendo submetida a três reincidências de fogo, após oito anos sem fogo, esta área possui valor NDVI estatisticamente igual a de áreas nunca atingidas por fogo (entre 2005 e 2015). Já para áreas da savana não atingidas pelo fogo e áreas com ocorrência de fogo em 2009, 2011 e 2014 houve diferença significativa nos valores médios de NDVI ($P\text{-Valor} = 0,0466425$). Áreas com fogo em 2005, 2006 e 2007 e em 2009, 2011 e 2014 também apresentaram valores estatisticamente diferentes de NDVI.

Tabela 10 - Alguns dos valores dos resultados do teste T (média) entre as diferenças dos NDVI das diferentes formações vegetacionais no caso de 0 (zero) ocorrências ou 3 (três) ocorrências de fogo em 2005, 2006, 2007 e 3 (três) ocorrências de fogo em 2009, 2011 e 2014.

TESTE T - AMOSTRAS INDEPENDENTES			
		Estatística T	P-Valor
Savana	sem ocorrência x ocorrência 2005, 2006 e 2007	-0,4802515	0,6471756
	sem ocorrência x ocorrência 2009, 2011 e 2014	2,269092	0,0466425
	ocorrência 2005, 2006, 2007 x 2009, 2011 e 2014	3,502081	0,01164373
Floresta	sem ocorrência x ocorrência 2005, 2006 e 2007	3,487172	0,01302814
	sem ocorrência x ocorrência 2009, 2011 e 2014	5,451421	0,01041416
	ocorrência 2005, 2006, 2007 x 2009, 2011 e 2014	3,125873	0,0204316

A Figura 39 mostra os valores de NDVI em 2015 para formações savânicas e florestais no caso de áreas nunca atingidas por fogo, e áreas atingidas quatro anos; em 2005, 2006, 2007 e 2010, e em 2007, 2010, 2011 e 2014, durante o período de 2005 a 2015. Assim como para as outras recorrências de fogo, as áreas atingidas por fogo em anos mais próximos do ano em que foi medido o NDVI apresentam maior diferença no valor de NDVI em relação a áreas sem ocorrência de fogo.

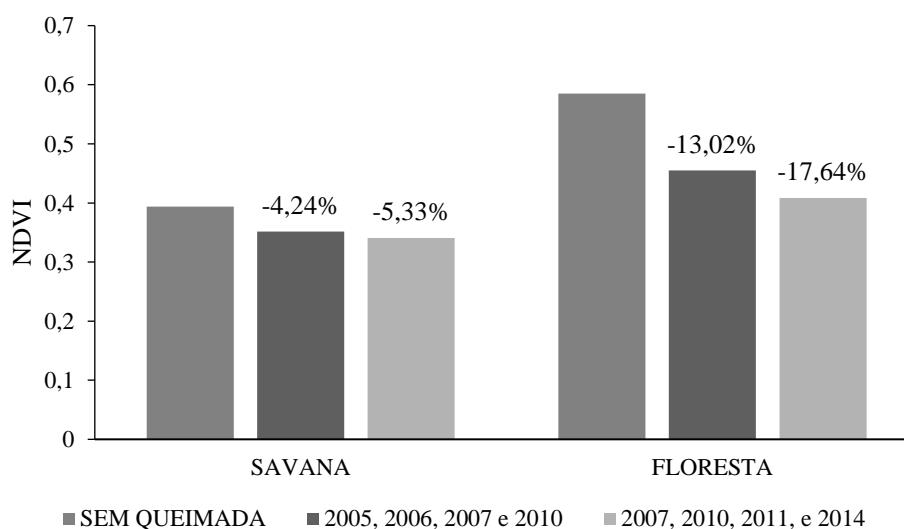


Figura 39 - NDVI medido em 2015 agrupado por tipo vegetacional comparando amostra de referência (sem ocorrência durante o período de 2005 a 2015), com áreas atingidas pelo menos quatro vezes; em 2005, 2006, 2007 e 2010, e em 2007, 2010, 2011 e 2014.

Mesmo havendo diferença nos valores de NDVI para áreas de savana não atingidas por fogo e áreas com quatro ocorrências de fogo, estas diferenças não foram estatisticamente significativas, independente de quando o fogo ocorreu (2005, 2006, 2007 e 2010 ou 2007, 2010, 2011 e 2014) (Tabela 11). As formações florestais apresentaram diferença significativa para todas as situações; áreas não atingidas pelo fogo e atingidas quatro vezes, nos anos mais distantes de 2015 (P-Valor = 0,01331874), e ainda mais para

os ocorridas nos anos mais próximos de 2015 (P-Valor = 0,001900934). Os valores de NDVI também diferiram significativamente entre os fogos ocorridas em anos mais próximos e mais distantes de 2015 (P-Valor = 0,001941859).

Tabela 11 - Alguns dos valores dos resultados do teste T (média) entre as diferenças dos NDVIs das diferentes formações vegetacionais no caso de 0 (zero) ocorrências ou 4 (quatro) ocorrências de fogo em 2005, 2006, 2007, 2010 e 4 (quatro) ocorrências de fogo em 2007, 2010, 2011 e 2014.

TESTE T - AMOSTRAS INDEPENDENTES			
		Estatística T	P-Valor
Savana	sem ocorrência x ocorrência 2005, 2006, 2007 e 2010	1,666956	0,1362984
	sem ocorrência x ocorrência 2007, 2010, 2011 e 2014	1,459724	0,1700447
	ocorrência 2005, 2006, 2007 e 2010 x 2007, 2010, 2011 e 2014	0,306892	0,7673568
Floresta	sem ocorrência x ocorrência 2005, 2006, 2007 e 2010	3,184657	0,01331874
	sem ocorrência x ocorrência 2007, 2010, 2011 e 2014	5,05262	0,001900934
	ocorrência 2005, 2006, 2007 e 2010 x 2007, 2010, 2011 e 2014	3,945971	0,001941859

DISCUSSÃO

Abrangência

Observou-se que as áreas estimadas variaram muito ao longo dos anos estudados, principalmente para a região do Parque que apresentou anos sem ocorrência de fogo. Estes anos sem fogo podem sugerir que este se origina fora desta UC e que nos outros anos em que houve ocorrência do fogo, este se alastrou do entorno para a APA e então para o Parque.

Com base nos resultados desta pesquisa, observou-se que o comportamento das áreas das cicatrizes de fogo é cíclico, no qual as áreas mais extensas de fogo foram intercaladas por áreas de menor expressão, dando indícios do processo de recuperação da vegetação de Cerrado e do acúmulo de combustível (Figura 8).

Em análise de cada local de ocorrência do fogo, observou-se que os intervalos das maiores cicatrizes de fogo variaram ente si. Para o Parque, o fogo atingiu em 2006, 331,96 hectares; 2010, 1569,82 hectares e em 2015, 600,25 hectares, ou seja; 4 e 5 anos de intervalo entre as ocorrências. Na APA as maiores cicatrizes ocorreram em 2007 (1931,35 hectares), 2010 (2505,23 hectares) e 2011 (839,79 hectares), ou seja, 3 e 1 ano de intervalo para ocorrência do fogo. No Entorno também ocorreram em 2007 (6328,81 hectares), 2010 (3527,83 hectares) e 2011 (8297,41 hectares), ou seja, 3 e 1 ano (Figura 6).

O ano de maior extensão de cicatrizes de fogo para a APA e o Parque foi o de 2010, recobrando 13,05% e 55,30% das áreas destes locais respectivamente. 2010 foi o terceiro ano de maiores cicatrizes de fogo para o Entorno, sendo 2011 o primeiro. França (2010), analisou imagens de satélite de vários Parques Nacionais no Cerrado para o ano de 2010 durante a estação seca; tendo 91% da área do Parque Nacional das Emas sido atingido por fogo, 42% do Parque Nacional da Serra da Canastra e 35% do Parque Nacional da Chapada dos Guimarães, indicando que para este ano foi “normal” incêndios de grandes extensões na região do Cerrado, incluindo em UC.

Em 2007, foram registradas as segundas maiores extensões em área de cicatrizes para o Entorno e a APA dos Pireneus, ocupando 6,69% e 10,06% da área total destes locais. Salmona e Pinagé (2015) mapearam as cicatrizes de fogo nos Parques Nacionais de Brasília e Chapada dos Veadeiros entre 2001 e 2013 e constataram que as maiores cicatrizes ocorreram em 2007 e 2010; 28,1% e 48,2% da área do PNB, e 72,2% e 53% do PNCV, respectivamente.

Em termo relativos (Figura 7 e 9) fica evidente que, apesar da área do entorno equivaler a 81% da região, apenas em 2011 e 2014 as áreas das cicatrizes de incêndio neste foram proporcionalmente maiores do que as queimadas nas UC. Nos outros anos, os incêndios foram mais abrangentes, proporcionalmente, nas UC, principalmente no Parque, como em 2006, 2010 e 2015. Isso mostra que os anos que o Parque não foi atingido por fogo (2005, 2008, 2009, 2011 e 2013) influenciaram no acúmulo e, portanto, na flambailidade da vegetação, contribuindo no alastramento do fogo.

Abraçgência de acordo com o uso e cobertura do solo

Em termos relativos, o entorno e a APA possuem uma cobertura do solo proporcionalmente equivalentes, sendo suas superfícies ocupadas em sua maioria, em ordem decrescente, por agropecuária, formações florestais, formações savânicas, formações campestres, área urbana, mineração, reflorestamentos (não ocorre na APA), e corpos de água (Figura 12). A APA possui maior cobertura vegetal (formações florestais, savânicas e campestres) do que o Entorno, 62,74% contra 58,05% (Figura 12). Essa diferença, provavelmente, não diz muita sobre o caráter protetivo da UC, lembrando-se que é da categoria de uso sustentável.

O Parque possui a cobertura do solo mais diferenciada, sendo que 94,86% de sua superfície é recoberta por formações vegetacionais, das quais as formações campestres são as responsáveis pela maioria de sua superfície (45%), seguido pelas formações florestais (30%), depois pelas formações savânicas (21%), e então pelas áreas de agropecuária. Não foram identificadas/mapeadas áreas de mineração, reflorestamento, cidades, ou corpos de água na UC.

Legalmente, o interior do Parque não se pode praticar atividades antrópicas, pois é uma UC de proteção integral, entretanto, cerca de 5% da área é ocupada por agropecuária. Em estudo feito, Salmona et al. (2014) analisou a mudança na cobertura do solo do Parque e na APA dos Pireneus antes e após suas criações e concluiu que, apesar dessa UC não ter sido consolidada, houve mais proteção da vegetação nativa no Parque do que na APA e também houve regeneração de áreas anteriormente ocupadas por pastagem. Em 1985, dois anos antes da porção superior da Serra dos Pireneus ser decretada como Parque, cerca de 365 hectares eram ocupados por pastagens, e em 2009, vinte e dois (22) anos após a criação da UC, esse uso diminuiu para 155 hectares (Tabela 2), uma redução de cerca de 30% em pastagens. Assim sendo, entende-se que estes 5% remanescentes de agropecuária venham a ser transformados em formação campestre devido a recuperação natural ao longo dos anos.

Embora as formações savânicas, que ocupam cerca de 21,49% da área total estudada (terceira maior cobertura), as áreas das cicatrizes de fogo deste tipo de vegetação foram mais abrangentes do que a de formações florestais (segunda cobertura em área) e de agropecuária (primeira cobertura em área) (Figura 14). Em termos absolutos as formações savânicas foram mais amplamente atingidas pelo fogo, em seguida as campestres e então as florestais.

As formações savânicas e campestres aparecem como as mais atingidas pelo fogo em termos relativos, sendo que as áreas campestres representam apenas 6,06% da cobertura total da região estudada e tiveram cerca de 72% de sua cobertura contra 31% da savana atingida por fogo (Figura 12 e 15 e Tabela 3).

No Parque, cerca de 45% de sua cobertura é a de formação campestre (Figura 12d) e esta formação foi a mais amplamente atingida por fogo, tanto em termos absolutos como relativos (Figura 18). Na APA, a formação campestre é a terceira em área de cobertura, e esta formação também foi a mais atingida por fogo em termos de área absoluta e relativa

(Figura 17). Miranda et al. (2002) explica que as fisionomias de Cerrado mais susceptíveis ao fogo são as mais abertas, ou seja, campestres e savânicas, pois apresentam maior densidade de espécies graminóides e pequenos arbustos. O comportamento do fogo é efeito principalmente das características do combustível; dependendo da fisionomia do Cerrado, do arranjo das espécies e do tempo sem queimadas. Mas, nem todo combustível encontra-se propensa a queima imediata, pois esse se restringe ao material de até 6 mm de diâmetro, ou seja, folhas e galhos finos.

As formações florestais, mesmo sendo a segunda cobertura mais abrangente em área em todas as localidades (total, entorno, APA e Parque) (Figura 12), foram as áreas vegetacionais com menores cicatrizes de fogo. Neste sentido, Miranda et al. (2002), observou que o dossel influencia no microclima, assim, em fitofisionomias mais fechadas há o retardamento da secagem do combustível no estrato rasteiro. Em consequência, o combustível apresenta um maior teor de umidade e há maior dificuldade de combustão.

Recorrência

No mapa de recorrência do fogo (Figura 20), as cicatrizes que ocorreram até o mês de setembro durante estes dez anos analisados, estão predominantemente localizadas no sentido noroeste a sudeste, na porção central da região. Parece haver um padrão associado ao topo das Serras dos Pireneus e do Catingueiro (porção central e nordeste da imagem, respectivamente) a maior frequência do fogo. Estas áreas sendo mais altas, com mais ventos e com vegetação mais esparsa. Nesta região há um conjunto de polígonos com reincidência do fogo de pelo menos seis vezes. Observou-se também que há muitas áreas que não foram atingidas por fogo nos anos analisados.

No geral, as formações savânicas e depois as campestres foram as que tiveram maior reincidência do fogo, reforçando suas características que as tornam susceptíveis ao fogo (Figura 23). E em termos relativos, as áreas campestres se apresentaram mais susceptíveis ao fogo com diferentes recorrências (Figura 24). Segundo Coutinho (1990a), o fogo é empregado como prática de manejo da vegetação para a criação de gado, sendo a principal atividade associada as queimadas nesta região. E as áreas para pastagem natural ocorrem justamente nas formas de Cerrado mais abertas, como campo limpo e campo sujo.

Em estudo realizado em savanas na região amazônica, Barbosa e Fearnside (2004), concluíram que as áreas atingidas por fogo e a frequência do fogo em savanas são dependentes do tipo de estrutura vegetal e da altimetria do local. Assim, quanto menor a densidade de árvores e maior a quantidade de estruturas gramíneas em regiões elevadas, maior será a porcentagem das áreas das cicatrizes de fogo.

Intervalo entre incêndios

Com relação ao intervalo entre as ocorrências de fogo na mesma área os dados de áreas atingidas duas, três e quatro vezes pelo fogo mostraram que a maior parte das áreas é atingida pelo fogo após um, três e quatro anos em relação ao fogo anterior, variando de caso a caso (Figuras 25, 26 e 27). Em média, após quatro anos entre as ocorrências de fogo, há as maiores áreas de cicatrizes. As áreas atingidas por fogo de cinco e seis vezes, que também são áreas de menor extensão, são atingidas, preferencialmente, após um ano, mas há grandes extensões atingidas após dois, três e quatro anos também (Figuras 28 e 29).

Pivello e Coutinho (1992), estudando um Cerrado aberto, estimaram que a ocorrência num intervalo de três anos de fogo é necessária e adequada para que haja a ciclagem de nutrientes sem impacto negativo sobre o balanço nutricional. Entretanto, intervalos menores entre incêndios, como tem acontecido, podem interferir negativamente neste balanço de nutrientes. Também foi observado com bastante abrangência o intervalo de apenas um ano (cerca de 158 hectares queimados após um ano) (Figura 30), e o estudo trata de eventos de queimadas em época não esperada a tal. Além disso, apesar da maioria das espécies de savana rebrotarem após uma queimada (GOTTSBERGER & SILBERBAUER-GOTTSBERGER, 2006), Medeiros e Miranda (2008) afirmam que essa capacidade é prejudicada pelo regime de fogo anual, diminuindo a altura e diâmetro das rebrotas e aumentando a mortalidade.

Resiliência

Para todas as formações vegetacionais houve diferença estatisticamente significativa nos valores de NDVI entre áreas atingidas e não atingidas pelo fogo (Tabelas 6 e 7), sendo esta diferença ainda mais significativa para as formações florestais e então para as savânicas e por último para as campestres (Figuras 31 e 32). As formações mais abertas de Cerrado são mais susceptíveis ao fogo devido as características estruturais dos

combustíveis que as compõem. As formações florestais criam um microclima em que a biomassa retém maior teor de umidade, o que explica valores de NDVI maiores para formações florestais do que para os outros tipos mesmo no período da seca. Quando o fogo ocorre, no entanto, apesar deste não se alastrar muito devido as características da vegetação, como no caso do campo, ele altera significativamente o valor de NDVI, pois essa vegetação é menos adaptada ao fogo que as demais formações. As espécies que a compõe normalmente não apresentam casca espessa, por exemplo, e não têm uma resiliência tão efetiva a esse tipo de impacto (GOTTSBERGER e SILBERBAUER-GOTTSBERGER, 2006).

Para as formações campestres a relação entre a recorrência do fogo e o valor de NDVI foi linear (Figura 33), mostrando o potencial em se usar o NDVI para se estimar a frequência do fogo de uma área com este tipo de cobertura ou simplesmente mostrando como este índice responde a diferentes recorrências que pode ser traduzido a como a vegetação se comporta e como a frequência do fogo tem efeito na estrutura e capacidade fotossintética desta.

Para as formações savânicas a relação mais precisa foi também a linear, apesar de ter alguns aumentos no valor de NDVI mesmo com o aumento da recorrência de fogo (Figura 34). A diferença no valor do NDVI para áreas não atingidas por fogo e áreas atingidas cinco vezes foi de 4%, menor do que a observada de áreas não atingidas para atingidas uma vez no mesmo ano (Figura 31 e 32) para essa formação. Isso se deve, provavelmente, ao fato de que na coleta de dados das cicatrizes recorrentes não se levou em consideração há quanto tempo elas haviam ocorrido. Para tentar resolver este problema, portanto, se fez a análise que será discutida a seguir. A relação linear apresentada ainda assim pode vir a ser empregada para a estimativa da frequência do fogo através do NDVI, além de mostrar que, no geral, a frequência do fogo reflete na resposta da vegetação.

A relação entre o valor do NDVI e a frequência do fogo em áreas de formação florestal é polinomial (Figura 35), sem decréscimo linear como o observado para formações campestres e savânicas. Isso pode ser resultado de dois fatos, primeiramente por não ter sido considerado há quanto tempo ocorreu o fogo, segundo pelo fato das áreas de floresta se comportarem de forma muito diferente em relação ao fogo, pois estas são diferentes em estrutura, composição, solo, clima, entre outros das formações savânicas e

campestres. O fogo nas formações florestais ocorre, na maioria das vezes, no sub-bosque da vegetação, não sendo captado pelos sensores remotos.

Para áreas atingidas pelo fogo pelo menos uma vez em 2005, após passados dez anos, as diferentes formações vegetacionais ainda apresentam o valor de NDVI abaixo do que de áreas não atingidas (Figura 36), mas a diferença entre os valores não é significativa, indicando que houve recuperação da vegetação neste intervalo de tempo (Figura 8). Apenas para as áreas de formações florestais há diferença estatisticamente significativa entre as áreas atingidas pelo fogo em 2014 e não atingidas, mostrando que um ano não é suficiente para a recuperação desta vegetação, mas é para as outras formações, ressaltando a adaptabilidade das formações savânicas e campestres ao fogo, sendo a maioria das espécies dessas formações capaz de rebrotar após um incêndio (GOTTSBERGER e SILBERBAUER-GOTTSBERGER, 2006).

Para as áreas reincididas pelo menos duas vezes pelo fogo os valores de NDVI também são diferentes do de áreas não atingidas, sendo que a ocorrência do fogo mais antigamente tem a diferença menor do que a de ocorrências mais recentes (Figura 37). No entanto, estas diferenças não são significativas no caso de formações savânicas (Tabela 9), indicando que mesmo após duas vezes atingidas por fogo, tanto estes tendo ocorrido há pelo menos oito anos quanto há quatro anos há certa recuperação no valor do NDVI, portanto nas características da vegetação. As formações florestais, diferentemente de uma ocorrência de fogo, duas reincidências do fogo fizeram com que os valores de NDVI sejam significativamente diferentes do que para áreas sem ocorrência do fogo, tanto se ocorreram antigamente e ainda mais para os mais recentes. Isto indica que não há recuperação da vegetação após quatro ou oito anos se este é atingida duas vezes pelo fogo.

O efeito da recorrência do fogo três vezes no valor de NDVI também é maior se estes ocorrerem há poucos anos do que aqueles que ocorrerem há mais anos, sendo a diferença estatisticamente significante para as formações savânicas e florestais. Há diferença significativa também no valor de NDVI de áreas não atingidas pelo fogo e atingidas há pouco tempo para as savanas, mas não para as áreas atingidas mais antigamente, mostrando a recuperação da vegetação. Já para as formações florestais, independentemente do tempo decorrido após o fogo, há diferença significativa para as áreas não atingidas e áreas atingidas três vezes pelo fogo.

Caso a área tenha sido atingida quatro vezes pelo fogo, o efeito sobre o NDVI segue o mesmo padrão observado para áreas atingidas duas vezes; maiores diferenças no valor de NDVI de áreas sem ocorrência de fogo para áreas com ocorrência mais recentemente do que há mais tempo (Figura 38 e 39), sendo que a diferença só é significativa no caso de formações florestais (Tabela 10 e 11).

CONCLUSÃO

A partir da análise de dez cenas Landsat 5 e 8 obtidas em setembro ou agosto entre 2005 e 2015, observou-se a abrangência e a recorrência das cicatrizes de fogo no Parque e na APA dos Pireneus e no Entorno destas UC. Em todos os anos analisados houve ocorrência de fogo para o dia e mês da cena obtida com diferentes abrangências de cicatrizes. Para a região do Parque, no entanto, houve cinco dos dez anos não foram detectadas cicatrizes de fogo nas cenas classificadas. Isto poderia reforçar a ideia da origem do fogo ser antrópico, pois na época da seca não ocorreram tempestades de raios que caracterizam as queimadas naturais. Estando o Parque, portanto, mais protegido que as outras regiões ao fogo não “natural”. No entanto, nos cinco anos em que foram mapeadas cicatrizes de fogo no interior do Parque, um total de cerca de 60% de sua área foi atingida.

Em termos de área relativa, a formação campestre se mostrou como a mais susceptível ao fogo, tendo no total cerca de 72% da área dessa formação sido atingida por fogo. Como 45% do Parque é constituído de formações campestres, quando o fogo chega na UC ele, provavelmente, se alastra com muita facilidade. É importante ressaltar que o fogo em si não é um problema, tendo este tipo de formação coevoluído com este, mas neste estudo é analisado o fogo que ocorre em época não esperada e em uma área de proteção, desta forma, o que se deve buscar saber é se estes eventos de fogo estão sendo prejudiciais na conservação da vegetação.

O intervalo mais recorrente entre os anos em que foram mapeadas as cicatrizes mais abrangentes é de quatro anos, seguido de três e um ano. Intervalos de três anos entre queimadas é necessária e adequada para que haja a ciclagem de nutrientes sem impacto negativo sobre o balanço nutricional, mas intervalos menores entre incêndios, como tem acontecido, podem interferir negativamente neste balanço de nutrientes.

Os dados de NDVI mostraram que há diferença estatisticamente significativa no valor de NDVI entre áreas não atingidas pelo fogo e atingidas uma vez para todos os tipos de formações vegetacionais. Sendo esta diferença é mais expressiva para as formações florestais, já as áreas de savana e campo não têm seus valores tão alterados, pois são mais resilientes.

Foi observado uma relação linear decrescente entre os valores de NDVI e as diferentes frequências do fogo, mostrando o efeito nocivo da repetição do fogo em uma mesma área para formações campestres e savânicas. A dinâmica da frequência do fogo e os valores de NDVI em áreas florestais é diferente, pois as vezes há queima total, as vezes apenas do sub-bosque, e as vezes somente as gramíneas. O que leva a uma “falta de padrão”.

Em relação a mudança do valor de NDVI considerando-se o tempo entre a medição deste e quando ocorreu o fogo, para todos os tipos vegetacionais e para as diferentes recorrências a diferença de áreas não atingidas para áreas atingidas pelo fogo foi maior para as áreas atingidas em ano(s) mais próximo(s) da mediação do que aquelas que haviam ocorrido há mais tempo. Ou seja, pelo menos em termos gerais, pode-se dizer que o período decorrido sem fogo faz diferença na recuperação da vegetação, refletido no valor de NDVI, que pode ser traduzido como recuperação/resiliência em sua estrutura e atividade fotossintética. No entanto, estas diferenças não foram estatisticamente significativas para as formações campestres e savânicas (exceto no caso de três queimadas), mostrando que a vegetação não se recupera totalmente, independentemente da reincidência do fogo. Estas diferenças foram estatisticamente significativas para as formações florestais, mostrando o impacto do fogo sobre este tipo de estrutura e sua não capacidade de recuperação.

A recuperação do NDVI em si, no entanto, não garante a recuperação da integridade do ambiente ou vegetação atingida pelo fogo, funcionando apenas como um indicativo da situação ambiental. Para a utilização do NDVI com este propósito, seria necessário estudo em campo associando a mortalidade e estrutura vegetal aos valores de NDVI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALHO, C. J. R.; MARTINS, E. de S. **De grão em grão, o cerrado perde espaço: (cerrado-impactos do processo de ocupação)**. Brasília: WWF, 1995.

BALBINO, V. K. **Análise da separabilidade espectral entre cerradões e matas de galeria no DF**. Brasília: UnB, 2004. 75p. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental Territorial) – Programa de Pós-graduação em Geografia – Faculdade de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

BARBOSA, R. I.; FEARNSIDE, P. M. **Área queimada e frequência de fogo em savanas no extremo norte da Amazônia brasileira**. Roraima. Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia. 2004.

BOND, W. J.; MIDGLEY, G. F.; WOODWARD, F. I. **The importance of low atmospheric CO₂ and fire in promoting the spread of grasslands and savannas**. *Global Change Biology*, 9(7): 973-982, 2003.

CARDOZO, F. S. et al. **Avaliação de áreas queimadas a partir dos índices espectrais NDVI e NDBR**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, Curitiba, PR, Brasil, v. 30, p. 7950, 2011.

CHAVES, M. E. D.; LÁZARO, A. da S.; NASSUR, O. A. C.; CONCEIÇÃO, F. G. **Estimativa da Fração de Cobertura Vegetal para o ano de 2010 em Minas Gerais a partir do NDVI gerado pelos sensores MODIS e VEGETATION-2**. In: Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE. P – 3275 – 3281.

CHUVIECO, E. **Fundamentos de teledetección espacial**. Madrid: Ediciones Rialp. 568 p. 1996.

COUTINHO, L. M. **Aspectos ecológicos do fogo no cerrado: nota sobre a ocorrência e datação de carvões vegetais encontrados no interior do solo, em Emas, Pirassununga, SP**. *Revista Brasileira de Botânica*, v. 4, n. 12, p. 115-117., 1981.

COUTINHO, L. M. **Fire in the ecology of the Brazilian cerrado**. In: Goldammer, J.G.(ed.). *Fire in the tropical biota*. New York: Springer-Verlag, Cap. 6, p. 82-105. (*Ecological Studies*, 84). 1990a.

COUTINHO, L. M. **O Cerrado e a ecologia do fogo**. *Ciência Hoje*, v. 12, n. 68, p. 22-30, 1990b.

DESHLER, W. **An examination of the extent of fire in the grassland and savanna of Africa along the southern side of the Sahara**. In: *International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 9., Ann Arbor, MI, 15-19 abr., 1974. *Proceedings*. Ann Arbor, MI: ERIM, 1974, v. 1, p. 23-30.

DIAS, B. F. S. **A conservação da natureza**. In: Pinto, M.N. org. *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. Brasília: Ed. Univ. Brasília, 1990. Cap. 21, p. 583-640.

DIAS, B. F. S. **Cerrado: uma caracterização**. In: Dias, B. F. S., ed. *Alternativas de desenvolvimento dos Cerrados: manejo e conservação dos recursos naturais renováveis*. Brasília: Fundação Pró-Natureza (FUNATURA), 1992. p. 15-26.

EITEN, G. **Vegetação do cerrado**. In: Pinto, M. N. org. *Cerrado: Caracterização, Ocupação e Perspectivas*. Brasília: Ed. Univ., 1994. p. 17-73. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/>>. Acesso em novembro de 2016.

EVA, H.; LAMBIN, E.F. **Burned area mapping in Central Africa using ATSR data**. *International Journal of Remote Sensing*, v. 19, n. 18, p. 3473-3497, 1998.

FARABEE, M. J. (2007). **Photosynthesis**. Disponível em: <<http://www2.estrellamountain.edu/faculty/farabee/biobk/BioBookPS.html>> Acesso em: 21 de setembro de 2016.

FELIZOLA FILHO, J. A. **Lista de espécies ameaçadas de extinção da fauna do estado de Goiás**. Goiânia: UFG, 2006.

FERNANDES, P. A; PESSÔA, V. L. S. **O cerrado e suas atividades impactantes: uma leitura sobre o garimpo, a mineração e a agricultura mecanizada**. *Revista Eletrônica de Geografia*, v. 3, n. 7, p. 19-37, 2011.

FOLSTER, H; HUBER, O. **Interrelaciones suelo-vegetación en el Área de Galipero, Territorio Federal Amazonas, Venezuela**. Caracas. D.F.: Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, 1984. 135 p. (Series Informes Técnicos DGSIIA/IT/144).

FRANÇA, D. de A.; FERREIRA, N. J. (2005). **Considerações sobre o uso de satélites na detecção e avaliação de queimadas**. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, INPE. p. 3017-3023.

FRANÇA, H. **Metodologia de Identificação e Quantificação de Áreas Queimadas no Cerrado com Imagens AVHRR/NOAA**. 2000. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FRANÇA, H., M.B. RAMOS-NETO, A. S. **O fogo no Parque Nacional das Emas**. Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama). p. 140. 2007.

FRANÇA, H.; RIBEIRO, K. T. **Mapeamento de queimadas no Parque Nacional da Serra do Cipó e na Área de Proteção Ambiental Morro da Pedreira, MG: 1984–2007**. Relatório Técnico. 75p, 2008.

GOTTSBERGER, G.; SILLBERBAUER-GOTTSBERGER, I. 2006. **Life in the cerrado**: a South American tropical seasonal vegetation. Vol. 1. Origin, structure, dynamics and plant use. Reta Verlag. 277p.

GILLON, D. **Fire problem in tropical savannas**. Ecosystems of the World, 1983.

HARRIS, T. M. **Forest fires in the Mesozoic**. J. Ecol. v. 46. p. 447 – 453. 1958

HERINGER, E.P.; BARROSO, G.M. **Propagação de espécies arbóreas do cerrado em função do fogo, do cupim, da capina, e do Aldrin (inseticida)**. In: Simpósio sobre o Cerrado. EDUSP/Edgar Blucher, São Paulo. 1971. p. 167-179.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Relatório de ocorrência de incêndios em Unidades de Conservação Federais 2005-2008**. Prevfogo. Brasília, DF. p.31, 2009.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Biomas do Brasil**. 2004.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha Municipal Digital**. Escala 1:5.000.000. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/biomas2/viewer.htm>>. Acesso em setembro de 2016

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2009). **Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por satélites**. Sistema PRODES, DETER. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/>>. Acesso em outubro de 2016.

JACQUEMOUND S.; et al. **Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model**. Remote Sens. Environ., 56:194-202. 1996.

JAYME, J. **Esboço Histórico de Pirenópolis**. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 1971. 618 p.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: An earth resource perspective 2/e**. Pearson Education India, 2009.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. (2005) **A conservação do Cerrado brasileiro**. Belo Horizonte, Megadiversidade, v. 1, n. 1, jul. 2005, p. 148-155

KOMAREK, E. V. **Lightning and fire ecology in Africa**. In: Tall Timbers Fire Ecology Conference, 12., 1972, Lubbock, Texas. Proceedings. Lubbock, Texas: Tall Timbers Research Station, 1972, v. 11, p. 473-509.

KUMAR, L.; SCHMIDT, K., DURY, S.; SKIDMORE, A. **Imaging spectrometry and vegetation science**. In: van der Meer, F.D., de Jong, S. (Ed). Imaging Spectrometry. Basic principles and prospective applications. Netherlands: Kluwer, 2001. 403 p.

LANGHAMMER, P. F.; et al. **Identification and gap analysis of key biodiversity areas**. Suíça: IUCN, 2007. 117 p. Disponível em: . Acesso em: 1 set. 2016.

LEVINE, J.S.; et al. **Biomass burning: combustion emissions, satellite imagery, and biogenic emissions**. In: Levine J.S., ed. Global biomass burning Cambridge: MIT Press, 1991. p. 264-271.

LOMBARDI, R. J. R. **Estudo da recorrência de queimadas e permanências de cicatrizes do fogo em áreas selecionadas do cerrado brasileiro, utilizando imagens tm/landsat**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 172 p., 2005.

LOPEZ, M.J.G., and V. CASELLES, 1991. **Mapping Burns and Natural Reforestation Using Thematic Mapper Data**. Geocarto International, Approach, McGraw-Hill, Inc., New York, 396 p. 6(1):31-37.

- MACEDO, H. de A.; SILVA, A.; NEVES, S. M. A. da S.; NEVES, R. J. (2009). **Avaliação das queimadas no Pantanal do Paraguai na região de Corumbá e Ladário, MS no período de maio de 2009**. Anais 2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Corumbá. Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 452-459.
- MADEIRA NETTO, J. **Comportamento espectral dos solos**. In: Meneses, P. R.; Madeira Netto, J. Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais. Brasília: UnB, 2001. 262 p. Cap. 4, p. 127-154.
- MEDEIROS, M. B. **Manejo de Fogo em Unidades de Conservação do Cerrado**. 2002.
- MEDEIROS, M. B.; MIRANDA, H. S. **Post-fire resprouting and mortality in cerrado woody plant species over a three-year period**. Edinburgh Journal of Botany, v. 65, n. 01, p. 53-68, 2008.
- MEDEIROS, R. e PEREIRA, G. S. **Evolução e Implementação dos Planos de Manejo em Parques Nacionais no Estado do Rio de Janeiro**. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.35, n.2, p.279-288, 2011.
- MENDONÇA, R.C.; et al. **Flora vascular do Cerrado: um “checklist” com 11.430 espécies**. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (Ed). Cerrado: ambiente e flora. 2. Ed. Brasília, DF: Embrapa Informação e Tecnológica, 2008.
- MENESES, P. R.; FERREIRA Jr., L. G. **Comportamento espectral de minerais e rochas**. In: Meneses, P. R.; Madeira Netto, J. Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais. Brasília: UnB, 2001. 262 p. Cap. 3, p. 63- 123.
- MENESES, P.R., ALMEIDA, T. de. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. 1 ed. Brasília: UnB/CNPq, v.1, 2012.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Relatório técnico de monitoramento do desmatamento no Bioma Cerrado, 2002 a 2008: dados revisados**. Centro de Informação, Documentação Ambiental e Editoração Luís. 2009.
- MMA e IBAMA. **Monitoramento do desmatamento nos bimas brasileiros por satélite: monitoramento do bioma Cerrado**. Cooperação técnica MMA/IBAMA. 2011.
- MORAES, E. C. de. **Fundamentos de sensoriamento remoto**. São José dos campos: INPE, 2002.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2a ed. UFV. Viçosa - MG. 307p. 2003.

MOREIRA, M.O. et.al. **Geologia do Estado de Goiás e do Distrito Federal**: Texto explicativo do mapa geológico do Estado de Goiás e Distrito Federal. Escala 1:500.000. Goiânia: CPRM/SIC-FUNMINERAL. 141 p. il. Anexo 1 mapa. ISBN 978-85-7499-058-3. 2008.

MYERS, N., R.A. MITTERMEIER, C.G. MITTERMEIER, G.A.B. da FONSECA; J. KENT. **Biodiversity hotspots for conservation priorities**. Nature, 2000. n. 403, p. 853-858.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. 308 p.

PEREIRA JR, A. C.; SETZER, A. W. **Comparison of fire detection in savannas using AVHRR's channel 3 and TM images**. International Journal of Remote Sensing, v. 17, n. 10, p. 1925-1937, 1996.

PEREIRA, M. C.; SETZER, A. W. **Spectral characteristics of fire scars in Landsat-5 TM images of Amazonia**. Remote Sensing, v. 14, n. 11, p. 2061-2078, 1993.

PERERIA, J. M. C.; CHUVIECO, E.; BEAUDOIN, A.; DESBOIS, N. **Remote sensing of burned areas: a review**. In: Chuvieco, E., ed. A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires. Alcalá de Henares: Universidad de Alcalá, 1997. p. 127-183.

PESSOA, O. A. A.; MENESES, P. R. **Evolução do comportamento espectral de cicatrizes de incêndio florestal no Cerrado**. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE 2013, p. 3314 – 3320.

PIVELLO, V. R.; COUTINHO, L. M. **Transfer of macro-nutrients to the atmosphere during experimental burnings in an open cerrado** (Brazilian savanna). Journal of Tropical Ecology, Vol. 8, No. 4, p. 487-497. 1992.

PIVELLO, V.R.; COUTUNHO, L.M. **The use of fire in the cerrado and amazonian rainforests of brazil: past and present**. Fire ecology, 2011. v. 7, n. 1, p. 24-39.

PONZONI, F.J.; LEE, D.C.L; HERNANDEZ FILHO, P. **Avaliação da área queimada e da regeneração da vegetação afetada pelo fogo no Parque Nacional de Brasília através de dados TM/Landsat.** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 4., Gramado, 10-15 ago., 1986. Anais. São José dos Campos: INPE, 1986. v. 1, p. 615-621.

PRUDENTE, T. D.; ROSA, R. **Geotecnologias aplicadas à análise de incêndios florestais no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros.** SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, v. 14, p. 2951-2958, 2009.

RAMOS-NETO, M. B.; PIVELLO, V.R. **Lightning fires in a Brazilian savanna National Park: rethinking management strategies.** Environmental Management, 2000. v. 26(6), p. 675-684.

RAMOS, R. R. D. et al. **Aplicação do Índice da Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) na Avaliação de Áreas Degradadas e Potenciais para Unidades de Conservação.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3., 2010, Caatinga. Anais... . Recife: 2010. p. 001 - 006.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. **Fitofisionomias do Bioma cerrado.** In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. (ed.). Cerrado: ambiente e flora. Planaltina: EMBRAPA, 1998. P.89-166.

ROBERT, A. Schowengerdt. **Remote sensing: Models and methods for image processing.** By Elsevier Inc. All rights reserved., p. p300-304, 2007.

ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto.** Uberlândia: EDUFU, 6a ed. 2007. 248 p.

ROSA, T. M.; ALCÂNTARA, E. **Detecção de áreas queimadas e severidade a partir do índice espectral ΔNBR .** In: Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE. P. 526 – 533. 2015.

SALMONA, Y.B.; RIBEIRO, F. F.; MATRICARDI, E. A. T. **Parques “no papel” conservam? O caso do Parque dos Pireneus em Goiás.** Boletim Goiano de Geografia, v. 34, n. 2, p. 295-310, 2014.

SALMONA, Y.B.; PINAGÉ, E. R. **Mapeamento de Queimadas nos Parques Nacionais de Brasília e Chapada dos Veadeiros**. In: Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE, p.1532 – 1538. 2015.

SAMBUICHI, R. H. R. **Efeitos de longo prazo do fogo periódico sobre a fitossociologia da camada lenhosa de um cerrado em Brasília, DF**. Dissertação de Mestrado (Departamento de Ecologia). Universidade de Brasília. Brasília, DF. 1991.

SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P. **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina. EMBRAPA-CPAC, 1998. xii + 556p.

SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (Ed). **Cerrado: ambiente e flora**. 2. Ed. Brasília, DF: Embrapa Informação e Tecnológica, 2008.

SIQUEIRA, J. C. **Pirenópolis: identidade territorial e biodiversidade**. Rio de Janeiro: Loyola, 2004.

TANAKA, S.; KIMURA, H.; SUGA, Y. **Preparation of a 1:25.000 Landsat map for assessment of burnt area on Etajima Island**. International Journal of Remote Sensing, v. 4, n. 1, p. 17-31, 1983.

WARMING, E. **Lagoa Santa**. São Paulo: Editora Itatiaia, 1973. 282 p.

WIGHTMAN, J.M. **Detection, mapping, and estimation of rate of spread of grasses from southern African ERTS-1 imagery**. In: Symposium of Significant Results Obtained from the Earth Resources Technology Satellite, 1., 1973, New Carolton, MD. Proceedings. Washington, DC: NASA, 1973. v.1, sec. A, p. 593-601.