

# ANÁLISE MULTITEMPORAL DE ÁREAS AFETADAS PELO FOGO NO ENCLAVE DE CERRADO DO PARQUE NACIONAL DOS CAMPOS AMAZÔNICOS UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO E TRABALHO DE CAMPO

## MULTITEMPORAL ANALYSIS OF FIRE-AFFECTED AREAS IN THE SAVANNA ENCLAVE OF CAMPOS AMAZÔNICOS NATIONAL PARK USING DATA DERIVED FROM REMOTE SENSING AND FIELDWORK

Daniel Borini Alves\*  
 Fernando Pérez-Cabello\*\*  
 Bruno Contursi Cambraia\*\*\*  
 Francismeire Bonadeu\*\*\*\*  
 Antônio Laffayette Pires da Silveira\*\*\*\*\*

### Resumo:

Monitorar e entender as relações entre o fogo e as formações vegetais nos ambientes de transição do Cerrado e a Amazônia segue um desafio científico muito importante para ampliar a capacidade de gestão destas áreas. Neste contexto, o presente artigo analisa as respostas da vegetação ao fogo no maior enclave de Cerrado da Amazônia Meridional (Enclave de Cerrado dos Campos Amazônicos), mediante o uso de séries multitemporais de sensoriamento remoto e informações derivadas de trabalho de campo. Com base na disponibilidade de imagens da série Landsat, e no fusão de imagens de Landsat e MODIS, foi gerada uma série multitemporal índices espectrais (NDVI e NBR) para o intervalo temporal de 2009-2016 (com 8 registros para cada ano), contrastando o comportamento de grupos amostrais afetados pelo fogo apenas em 2010, em 2010 e 2014 ou em 2010 e 2016. Estas informações foram complementadas com dados de campo obtidos numa campanha realizada no pós-fogo de 2016. Os valores de NDVI e NBR se demonstraram sensíveis a ação do fogo sobre a vegetação, apresentando descensos abruptos associados as queimas (em média -93 % inferiores aos apresentados para áreas não queimadas no mesmo período). Nas informações obtidas em campo se destaca o maior acúmulo de biomassa seca registrado nas parcelas com mais tempo sem queima (-146% superior), no comparativo com áreas de queima recente. Estes resultados auxiliam na compreensão da incidência do fogo sobre estes ambientes, contribuindo com a implementação do plano de manejo de fogo da área estudada.

\*Licenciado e Bacharel em Geografia (Universidade Federal de Santa Maria) e Mestre em Geografia (Área de Concentração - Análise Ambiental e Dinâmica Espacial) pela mesma instituição.)

\*\* Doutor em "Ordenación del Territorio y Medio Ambiente" pela Universidad de Zaragoza.

\*\*\* Mestre em Botânica Tropical pelo Museu Paraense Emílio Goeldi.

\*\*\*\* Mestre em Botânica Tropical pelo Museu Paraense Emílio Goeldi.

\*\*\*\*\*Doutorando em Biologia Vegetal pela Universidade Estadual de Campinas.

### Abstract:

Monitoring and understanding the relationships between fire and vegetation in the transition environments of the tropical savanna and Amazon region remains a very relevant scientific challenge to improve land management strategies of these areas. In this context, the present article analyzes the responses of vegetation to fire in the largest tropical savanna enclave of the Southern Amazon (Campos Amazônicos Savanna Enclave) through the use of multitemporal remote sensing series and information derived from fieldwork. Based on the Landsat series image availability and the fusion Landsat and MODIS images, a multitemporal spectral index (NDVI and NBR) series was generated from 2009 to 2016 (with 8 records for each year), contrasting the behavior of three sample groups: burned only in 2010; burned in 2010 and 2014; and burned in 2010 and 2016. This information was complemented with field data obtained in a post-fire campaign in 2016. The NDVI and NBR values were sensitive to fire events, presenting abrupt declines in the immediate post-fire record (on average -93% lower than those presented for non-burned areas in the same period). The information obtained in the fieldwork shows the greatest accumulation of dry biomass (-146% higher) recorded in the plots with more time since last fire, in comparison with recent fire-affected areas. These results help to understand the fire incidence on these environments, contributing to the implementation of the fire management plan of the studied area.

### Palavras-chave:

áreas queimadas,  
 vegetação,  
 enclave de Cerrado,  
 séries Landsat,  
 sensoriamento remoto

### Keywords:

burned areas,  
 vegetation,  
 tropical savanna enclave,  
 Landsat series,  
 remote sensing

## INTRODUÇÃO

Em âmbitos globais, o fogo é um dos principais agentes na dinâmica dos processos ecológicos, configurando-se como um importante ator do passado, presente e futuro do comportamento do sistema terrestre (BOND; WOODWARD; MIDGLEY, 2005; BOWMAN et al., 2009). A presença do fogo nas savanas tropicais da América do Sul é evidenciada há mais de 32.000 anos (SALGADO-LABOURIAU; FERRAZ-VICENTINI, 1994; LEDRU, 2002), antes mesmo do registro de assentamentos humanos, o que demonstra a naturalidade deste elemento na formação das áreas de Cerrado (savana tropical brasileira), categorizadas como ambientes dependentes do fogo (HARDSETY; MYERS; FULKS, 2005). Neste tipo de paisagem, os regimes naturais de fogo estão associados a ocorrência de raios (RAMOS-NETO; PIVELLO, 2000), desempenhando um importante papel para o ciclo de nutrientes e para a manutenção da diversidade e da estrutura dos habitats (COUTINHO, 1990; MIRANDA et al., 2009; FIDELIS; PIVELLO, 2011).

Nos ambientes de Cerrado, o uso regrado do fogo como forma de manejo não é necessariamente negativo, tendo sido historicamente empregado pelas populações tradicionais para fins diversos, tais como para a limpeza e preparação de terras para cultivo, a atração animal para a caça ou o estímulo da frutificação de certas espécies (MISTRY et al., 2005; PIVELLO, 2011). Entretanto, é consenso que o aumento exponencial das pressões antrópicas observado nas últimas décadas incidiu de maneira significativa no aumento da recorrência de incêndios, o que resultou em mudanças severas dos regimes naturais de fogo e tem influenciado diretamente na alteração destes ambientes (GOLDAMMER, 1993; PAUSAS; KEELEY, 2009). Nas áreas de transição Cerrado-Amazônia, comprova-se que as áreas queimadas estão fortemente vinculadas as mudanças de uso e cobertura do solo ocorridas nas últimas décadas (EVA; LAMBIN, 2000; OMETTO; SOUZA-NETO; TEJADA, 2016), representados principalmente pelo avanço das fronteiras agropecuárias, das redes viárias e do adensamento populacional (NEPSTAD et al., 2001; MORTON et al., 2006; ESPINDOLA et al., 2012).

Queimas recorrentes ou até mesmo a alteração sistemática da temporada de queima de determinado regime de fogo (por exemplo ao favorecer ignições durante períodos mais críticos de seca, onde os raios são menos frequentes) estão associados a impactos severos sobre os componentes da biosfera, pedosfera e a atmosfera (PAUSAS; KEELEY, 2009). Sobre a vegetação, incêndios fre-

quentes impactam na redução do estoque total de biomassa, especialmente em relação as formações vegetais lenhosas (arbóreas e arbustivas), que podem resultar na exclusão de determinadas espécies mais sensíveis ao fogo (MOREIRA, 2000; HOFFMANN; MOREIRA, 2002), questão que também pode incidir sobre determinadas espécies de fauna (SILVEIRA et al., 1999). A incidência de queimas frequentes e de alta temperatura podem alterar a composição física e química dos solos, favorecendo altas taxas de erosão e perda de solo (CERTINI, 2005). A emissão total de gases de efeito estufa para a atmosfera a partir da queima mais frequente de materiais combustíveis também é um impacto relevante (LEVINE et al., 1995).

Todos estes fatores ressaltam a importância de monitorar os efeitos do fogo sobre ambientes de Cerrado, dando subsídio para ações estratégicas voltadas a conservação da biodiversidade e a diminuição das emissões de carbono. Surge a necessidade de se pensar estrategicamente, em termos de política pública nacional (DURIGAN; RATTER, 2016), avançando em diretrizes para o desenvolvimento de planos de manejo integrado do fogo (SCHMIDT et al., 2018). É preciso superar a percepção de que as queimas são necessariamente negativas (LARIS; WARDELL, 2006), planejando ações que considerem o manejo em concomitância com o seguimento e análise dos seus impactos, questão que caminha lentamente no âmbito das políticas de conservação no Brasil.

No contexto de melhor compreender aspectos associados a incidência ao fogo sobre a superfície terrestre, são essenciais as informações geradas através de sensores remotos, principalmente no que se refere a informação de satélites (PEREIRA, 2003; GIGLIO et al., 2010). Imagens derivadas da série de satélites Landsat demonstraram ser uma importante fonte de informação, permitindo, entre outras aplicações, delimitar áreas queimadas (KOUTSIAS; KARTERIS, 2000; BASTARRIKA et al., 2014), avaliar a severidade das queimas (WIMBERLY; REILLY, 2007; ESCUIN; NAVARRO; FERNÁNDEZ, 2008) e monitorar a dinâmica multitemporal pós-fogo (RÖDER et al., 2008; BARTELS et al., 2016; WHITE et al., 2017). Com uma resolução espacial de 30 metros e disponibilidade de bandas espectrais nas regiões do visível, infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio de onda curta (SWIR), os sensores de Landsat (*Thematic Mapper – TM*; *Enhanced Thematic Mapper – ETM+*; e *Operational Land Imager – OLI*) oferecem informações muito úteis para a análise de áreas afetadas pelo fogo com um ciclo de revisita de 16 dias (que se

reduz a 8 dias nos períodos de funcionamento mútuo de mais de um sensor), desde 1984 até os dias atuais.

Devido à forte influência de perturbações atmosféricas (nuvens, sombras de nuvens...) incidentes nas áreas de transição Cerrado-Amazônia (ASNER, 2001; SANO et al., 2007), o ciclo de revisita da série Landsat é em vezes insuficiente para gerar séries multitemporais consistentes para a análise. Para superar este tipo de adversidades, numerosos estudos buscam aproveitar a disponibilidade diária de do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), aplicando métodos de fusão de imagens que fazem uso de sua alta resolução temporal com a maior resolução espacial de Landsat (GAO et al., 2008; HILKER et al., 2009; ZHU et al., 2010). Um método de fusão destacado é o *Flexible Spatiotemporal Data Fusion* (FSDAF) (ZHU et al., 2016), que recentemente foi comprovado como uma boa alternativa para ampliar a disponibilidade de informações espectrais de fina resolução espacial em ambientes de savana tropical afetados pelo fogo (ALVES et al., 2018).

Neste contexto, o presente trabalho busca monitorar os efeitos das queimas sobre ambientes de Cerrado utilizando dados de sensoriamento remoto e informações obtidas em trabalho de campo. Para isso, se tem como área de estudo o maior enclave de Cerrado da Amazônia Meridional, o Enclave de Cerrado dos Campos Amazônicos (ECCA), onde se registraram mais de um milhão de hectares queimados no período de 2000-2016 (ALVES; PÉREZ-CABELLO, 2017). Mais especificamente, se trabalha com um fragmento do enclave situado em áreas do Parque Nacional dos Campos Amazônicos (PNCA), que foi afetado pelo fogo nos anos de 2010, 2014 e 2016, e permite o monitoramento da incidência do fogo.

Quais as respostas da vegetação ao fogo que são observadas mediante análise multitemporal de índices espectrais derivados de imagens de satélite? Quanto tempo é necessário para que o processo de regeneração pós-fogo atinja níveis de vigor vegetal similares aos observados antes da queima? Que efeitos das queimas são observados sobre a proporção de vegetação em relação a solo exposto, bem como no acúmulo de material combustível fino nas feições abertas de cobertura vegetal? Estas são algumas das questões específicas que se busca explorar no desenvolvimento do artigo. Dada a escassez atual de informações referentes a incidência do fogo na área estudada, acredita-se que, para além de reportar uma experiência metodológica no contexto de realizar um seguimento multitemporal utilizando sensoriamento remoto e trabalho de campo, se avança também no sentido de gerar informações sobre o comportamento da

vegetação frente ao fogo nestes ambientes, que contribuirão com o processo de gestão territorial local e oferecerão subsídios para o plano de manejo integrado do fogo da área.

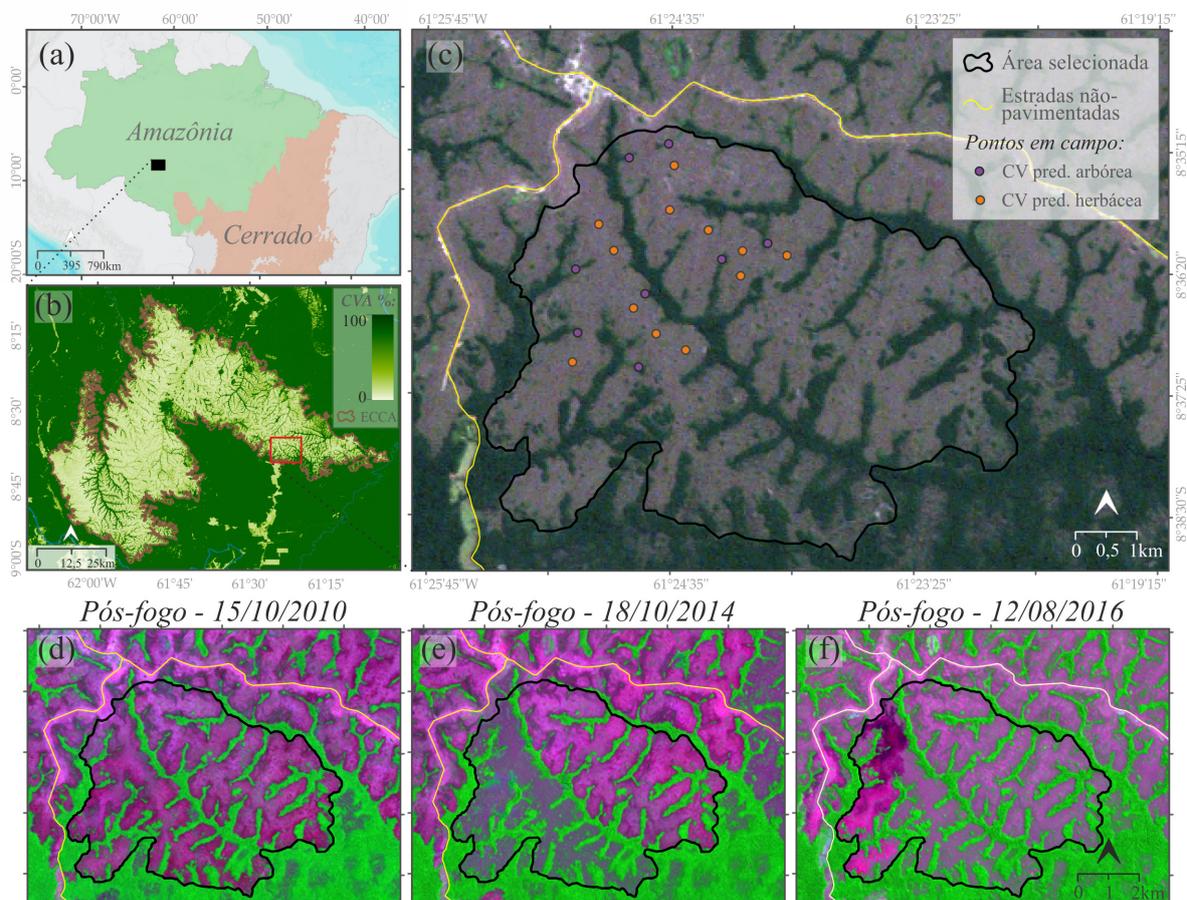
## 2. O ENCLAVE DE CERRADO DOS CAMPOS AMAZÔNICOS

O ECCA (Figuras 1<sub>a</sub> e 1<sub>b</sub>) possui um total 4342 km<sup>2</sup>, e está situado no quadrante sul ocidental da Amazônia Brasileira, área recoberta pelos municípios de Manicoré, Humaitá, Novo Aripuanã (Estado do Amazonas) e Machadinho D'Oeste (Estado de Rondônia). Atualmente, está quase que em sua totalidade integrado como área protegida dentro do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), sendo 47% pertencente aos limites do PNCA, 46% na Terra Indígena Tenharim Marmelos (limítrofe a oeste do PNCA) e 5% na Terra Indígena Tenharim do Igarapé Preto (limítrofe a leste do PNCA). O fragmento selecionado (Figura 1<sub>c</sub>) possui um total de ~3200 hectares, integrados em áreas pertencentes ao PNCA. Este fragmento foi afetado pelo fogo quase que em sua totalidade no ano de 2010 (Figura 1<sub>d</sub>) e parcialmente nos anos de 2014 (Figura 1<sub>e</sub>) e 2016 (Figura 1<sub>f</sub>).

O enclave, tal como o termo sugere, corresponde a uma área de predomínio de fitofisionomias vegetais de Cerrado em meio a uma grande área de predomínio de vegetação amazônica. O grupo de formações vegetais da região do ECCA é genericamente classificado como savana amazônica disjunta (RATTER; BRIDGEWATER; RIBEIRO, 2003), o que corrobora com a possibilidade de que, além dos modernos fatores ambientais, o atual padrão de vegetação da área reflita as dinâmicas das grandes mudanças climáticas dos períodos Terciário e Quaternário (CARNEIRO FILHO, 1993). Representa uma vegetação relictual, remanescente de climas anteriores, isolada da área core do bioma Cerrado, sendo a sua proteção significativamente importante para a conservação da biodiversidade, protegendo inclusive possíveis processos de especiação em andamento (ICMBIO, 2016).

Assim como nas áreas core do Cerrado, a área apresenta variações de fitofisionomias que vão desde formações campestres (campo limpo e campo sujo) variando para formações savânicas (campo cerrado e cerrado *stricto sensu*) e florestais, sendo estas últimas muito vinculadas a vegetação ciliar e a fragmentos menores de vegetação arbórea (incluindo murundus) (OLIVEIRA-FILHO; RATTER, 2002; ICMBIO, 2016). A proporção de cobertura vegetal arbórea é um importante critério para distinguir a distribuição espacial destas fito-

Figura 1 - Área de estudo: a) localização do ECCA em áreas de domínio amazônico; b) distribuição da porcentagem de Cobertura Vegetal Arbórea (CVA) por pixel no enclave e arredores; c) fragmento do selecionado do enclave em condições pré-fogo (Landsat TM de 27-07-2010, composição em cor real), situando os pontos visitados em trabalho de campo; d) imagem pós-fogo de 2010; e) imagem pós-fogo de 2014; f) imagem pós-fogo de 2016. As três últimas imagens dispõem de uma composição Landsat TM ou OLI em falsa-cor (R-G-B/SWIR-NIR-RED) para melhor visualização das áreas queimadas



Fonte: Elaborado pelos autores. As imagens Landsat são disponibilizadas pelo USGS (2017), enquanto que a distribuição de CVA deriva do produto Landsat Tree Cover Continuous Field de 2010 (SEXTON et al., 2013).

fisionomias no ECCA (Figura 1<sub>b</sub>), onde é possível observar que formações campestres e savânicas predominam nas áreas de interflúvio e nas vertentes da densa rede de drenagem da área, enquanto as formações florestais estão associadas principalmente as bordas dos canais. O fragmento selecionado contempla a variação destas fitofisionomias e é representativo em relação ao panorama geral do ECCA. Processos geomorfológicos associados a fertilidade dos solos, a dinâmica hidrológica e a ação do fogo são agentes que jogam um papel importante na dinâmica destas formações vegetais (MIRANDA et al., 2009; DANTAS; BATALHA; PAUSAS, 2013).

As condições climáticas regionais apresentam altas temperaturas medias anuais, variando entre 24°C e 28°C, e precipitações anuais de até 2000 mm. O período de forte atividade convectiva está marcado entre os meses de novembro e março, enquanto entre os meses de maio e setembro predomina um período de seca. Os

meses de abril e outubro geralmente correspondem aos meses de transição entre os regimes (MARENGO et al., 2001). Estas características climáticas influenciam no comportamento fenológico das formações vegetais, observados principalmente sobre as fitofisionomias campestres e savânicas, mais verdes e vigorosas no final do período de chuvas e mais secas nos meses finais do período de seca. As áreas queimadas aumentam exponencialmente com a diminuição da precipitação no período de seca (ARAGÃO et al., 2008), favorecidas pelo maior acúmulo de biomassa seca neste período, que favorece a propagação do fogo.

Em termos de dinâmica espacial, a criação e estabilização dos limites do PNCA contribuíram com a diminuição do número de ocorrências de queimas no ECCA (ALVES; PÉREZ-CABELLO, 2017). Entre o final da década de 90 e o início dos anos 2000, áreas situadas nas proximidades da Estrada do Estanho (estrada

não-pavimentada que cruza a área), hoje pertencentes ao PNCA, foram utilizadas para o desenvolvimento de atividades agropecuárias, chegando a abrigar cerca de 50 famílias (ICMbio, 2016). No momento da criação, no ano de 2006, os limites do PNCA não incluíam um raio de 10 km em relação a Estrada do Estanho, sendo estas áreas oficialmente integradas a unidade de conservação no ano de 2012, refletindo na remoção de fazendas ali existentes, por tratar-se de uma Unidade de Conservação (UC) de proteção integral. Nas atividades agropecuárias antes desenvolvidas nestas áreas, o uso intensivo do fogo era uma prática recorrente, o que explica a diminuição do número de ocorrências de queimas sob influência do PNCA.

Entretanto, a redução do número de ocorrências não esteve associada a uma diminuição dos sub-totais anuais de áreas queimadas no ECCA, como se observou nos anos de 2010 e 2014, onde as áreas afetadas pelo fogo superaram os 135 mil hectares (ALVES; PÉREZ-CABELLO, 2017). Esse quadro se soma ao panorama de outras UC situadas nas áreas core do Cerrado, onde a aplicação de políticas de “fogo-zero” (restritas a ações de extinção do fogo) se demonstraram ineficientes para estes ambientes, pois geraram maior acumulação de materiais combustíveis e favoreceram a ocorrência de grandes e intensos incêndios (BATISTA et al., 2018; SCHMIDT et al., 2018). Em virtude disso, ações vinculadas ao manejo do fogo têm sido atualmente aplicadas pela equipe de gestão do PNCA, entre elas o uso de queimas prescritas nos meses iniciais do período de seca sobre áreas estratégicas, avançando na prevenção dos grandes incêndios.

### 3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos estão divididos em duas principais fases: i) processamento e análise dos dados derivados de sensores remotos; ii) obtenção e análise de dados mediante trabalho de campo. Nas seguintes subseções se detalham as etapas associadas as duas fases indicadas.

#### 3.1 Processamento e análise de dados de derivados de sensores remotos

##### 3.1.1 Obtenção dos produtos derivados de sensores remotos

A obtenção dos dados derivados de sensores remotos considerou um intervalo temporal de 8 anos, considerando o período de 2009 a 2016. Se inclui assim o monitoramento das três ocorrências de área queimada registradas no fragmento selecionado (2010, 2014 e

2016), e um ano prévio adicional para a avaliação das condições pré-fogo.

Como principal material disponível se conta com os produtos da série de refletância de superfície do satélite Landsat, associadas aos sensores TM, ETM+ e OLI, que oferecem imagens a cada 16 dias com uma resolução espacial de 30 metros, gerando informações em regiões espectrais sensíveis a resposta da vegetação ao fogo, tais como a bandas na região do vermelho, NIR e SWIR (TRIGG; FLASSE, 2000). Mais especificamente, se trabalha com o produto da mais nova coleção de Landsat disponível (*Landsat Collection 1 Surface Reflectance Level-2 Science Products*), que permite dispor de informações adequadas para a análise multitemporal (processadas com correções radiométricas, geométricas e atmosféricas). No que se refere as correções atmosféricas, as imagens dos sensores TM e ETM+ estão processadas com o algoritmo *Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System* (LEDAPS) (VERMOTE et al., 1997; MASEK et al., 2006). Já as imagens do sensor OLI estão corrigidas com o algoritmo *Landsat 8 Surface Reflectance Code* (LaSRC) (USGS, 2018). Esta coleção está disponível gratuitamente sob demanda pelo *Center Science Processing Architecture* (ESPA) do USGS (<<https://espa.cr.usgs.gov/>>), de onde foram obtidas todas as imagens disponíveis no intervalo temporal selecionado (path/row-231/66), excluindo apenas aquelas totalmente cobertas por nuvens.

Também se contou com a série temporal de imagens de refletância de superfície da coleção VI de MODIS, fazendo uso dos produtos MOD09GQ e MOD09GA (VERMOTE; WOLFE, 2015a, 2015b). O primeiro deles gera informações espectrais com maior resolução espacial (250 m), porém restritos as bandas espectrais do vermelho e NIR. Já o segundo dispõe ainda de informações da banda espectral SWIR, numa resolução espacial de 500 m. Ambos os produtos podem ser obtidos gratuitamente pelo portal *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC) da NASA (<<https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT/>>). Ainda que disponibilize informações de menor resolução espacial no paralelo com Landsat, o ciclo diário de revisita de MODIS permite contar com uma maior quantidade de dados livre de perturbações atmosféricas. É neste sentido que a obtenção destas imagens foi realizada exclusivamente para enfrentar problemas indisponibilidade contínua de informação da série Landsat, através do fusão de imagens (ver “subseção 2.1.2”).

Por último, se obteve o produto *Landsat Tree Cover Continuous Field* (SEXTON et al., 2013) que permite dispor de uma estimativa da CVA para cada pixel

da imagem. Esse produto é disponibilizado gratuitamente pelo Departamento de Ciências Geográficas da Universidade de Maryland (<<http://glcf.umd.edu/data/landsatTrecover/>>). Se fez uso das informações do ano de 2010 (pré-fogo), utilizado com o objetivo categorizar as superfícies em dois grupos de predomínio de CVA: baixa/média baixa (1-30%); média alta/alta (>30%).

### 3.1.2 Geração de uma série multitemporal mediante uso de imagens Landsat e do fusionado de Landsat e MODIS

O período selecionado inclui desde um ano prévio a ocorrência da primeira queima (ano de 2010) até o ano da última queima parcial e da realização das atividades de campo (ano de 2016) sobre a área selecionada. Neste contexto, se buscou gerar para cada ano da série uma composição mensal de registros que recobre continuamente todo o período de seca anual (maio a outubro), adicionados de duas composições (uma anterior e outra posterior ao período de seca) que retratam final e o início do período de chuvas, respectivamente. Para cada composição se utiliza como critério o último valor de pixel válido (sem influência de perturbações atmosféricas) disponível no mês. No caso dos dois registros fora do período de seca, a composição aplica o mesmo critério, mas considera todos os pixels válidos em um período superior a um mês (janeiro a março para a composição que retrata o final do período de chuvas; novembro e dezembro para a composição que retrata o início do período de chuvas).

Sendo assim, primeiramente foi feita uma checagem da qualidade dos dados da série Landsat disponível para a área estudada. Utilizando a banda de qualidade de cada imagem, disponibilizada pelo próprio produto, foi aplicada uma máscara associando a “*nodata*” todos os pixels afetados por perturbações atmosféricas (nuvens, sombras de nuvens e altos índices de efeitos aerossóis). Foram ainda aplicadas outras máscaras de “*nodata*” a partir da interpretação visual das imagens da série, quando observado que as máscaras automáticas não excluía todos os pixels afetados por alguma perturbação.

Após este processamento, foi possível identificar as composições da série Landsat que careciam de imagens livres de perturbações atmosféricas. Para superar esta falta de informações, se utilizou a fusão de imagens Landsat e MODIS. Mais precisamente foi aplicado o método de fusionado FSDAF (ZHU et al., 2016), que aplica uma função espaço-temporal que relaciona um par de imagens Landsat-MODIS adquiridas em  $t_1$  com uma imagem MODIS adquirida em  $t_2$  para estimar os valores de refletância de superfície em  $t_2$

com uma resolução espacial de Landsat. Esse método apresenta melhorias em relação a outros algoritmos de fusão mais conhecidos, tais como o *Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model* (STARFM) (GAO et al., 2006) e o *Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model* (ESTARFM) (ZHU et al., 2010), sendo desenhado para melhor tratar possíveis situações de mudanças abruptas existentes entre as imagens relacionadas, convergindo ideias de modelos de mistura espectral, interpolação espacial e de STARFM (ZHU et al., 2016).

Sendo assim, se utilizaram os pares de imagens Landsat e MODIS livres de perturbações atmosféricas (os mais próximos na série temporal), em conjunto com uma imagem MODIS do período com falta de informações, para estimar a refletância de superfície com a resolução espacial de Landsat deste determinado período. O fusionado foi aplicado tanto para completar a série temporal como para cobrir os *gaps* de composições incompletas. A aplicação se realizou banda a banda, focando em três bandas espectrais. Em Landsat TM e ETM+, essas bandas estão situadas nos canais 3 (vermelho), 4 (NIR) e 7 (SWIR<sub>2</sub>), enquanto que em Landsat OLI se referem aos canais 4 (vermelho), 5 (NIR) e 7 (SWIR<sub>2</sub>). A correspondência com MODIS são as bandas 1 e 2 do produto MOD09GQ V006 (bandas do vermelho e NIR, respectivamente) e a banda 7 do produto MOD09GA V006 (SWIR<sub>2</sub>). O detalhamento da série temporal final utilizada (contrastando dados derivados diretamente de Landsat com os de fusionado de Landsat-MODIS) pode ser observado no Anexo A (Figura A<sub>1</sub>).

### 3.1.3 Avaliação das respostas da vegetação ao fogo mediante índices espectrais

Considerando a série temporal completa gerada na etapa anterior, dois índices espectrais foram selecionados para a análise das respostas da vegetação ao fogo: *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Equação 1) e o *Normalized Burn Ratio* (NBR) (Equação 2).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad Eq. 1$$

$$NBR = \frac{NIR - SWIR_2}{NIR + SWIR_2} \quad Eq. 2$$

Ambos índices variam entre -1 e 1, sendo o NDVI um referente bastante utilizado para estimar o vigor vegetal da vegetação (PETTORELLI et al., 2005) ao relacionar as bandas do NIR e vermelho (ROUSE

et al., 1974; TUCKER, 1979). Já o NBR é um índice habitualmente aplicado para estimação dos efeitos do fogo, utilizando no seu cômputo as bandas do SWIR e NIR, onde a vegetação se demonstra especialmente sensível as queimas (KEY; BENSON, 2006).

A análise estatística baseou-se em amostras estratificadas aleatórias dos centroides de pixel. Se considera o período total (2009 a 2016), agrupando-se as amostras em 3 grupos: (i) áreas queimadas apenas em 2010; (ii) áreas queimadas em 2010 e 2014; (iii) áreas queimadas em 2010 e 2016. Adicionalmente aos agrupamentos por períodos, também se subdivide os pixels de acordo com a porcentagem de cobertura vegetal arbórea (CVA), conforme as duas classes descritas na “subseção 2.1.1”. Os detalhamentos sobre os agrupamentos de análise e seus respectivos estratos amostrais são descritos no Anexo A (Figura A<sub>2</sub>).

Com base nestes agrupamentos, foram computados os valores médios para cada registro temporal da série, permitindo a comparação gráfica das trajetórias resultantes, quantificando os diferentes ascensos e descensos observados. Esta comparação quali-quantitativa possibilitou a análise do processo de regeneração pós-fogo, verificando o tempo transcorrido para que se atinja os índices de vigor vegetal apresentados antes da queima.

### 3.2 Obtenção e análise de dados mediante trabalho de campo

As informações obtidas *in situ* estão associadas a uma incursão em campo realizada entre os dias 15 e 24 de setembro de 2016, realizada em conjunto com a equipe de gestão do PNCA e sua brigada de incêndios. Dentro da área estudada, foram distribuídos 20 pontos aleatórios para o levantamento de variáveis, considerando a predominância de cobertura vegetal de cada pixel (12 sobre áreas de CV predominantemente herbácea e 8 em áreas de CV predominantemente arbórea) e a data da última queima (Figura 1). Após a chegada a cada ponto predefinido, se demarcou uma parcela de 15x15 metros, dentro da qual se coletavam dados de acordo com uma ficha de campo correspondente. Estas atividades foram autorizadas no Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade (SISBIO) do Ministério do Meio Ambiente sob o registro número 55012-1.

Para áreas de predomínio de cobertura vegetal herbácea (feições abertas de campo limpo/sujo) foi aplicada uma ficha de campo (Anexo B) para coletar informações a respeito da altura da vegetação, da porcentagem de cobertura vegetal em relação ao solo exposto, da presença visual de cinza escura ou branca, entre outros dados. Em cada parcela foi realizada a es-

timização de material combustível fino, que consistiu em coletar toda a biomassa fina (igual ou inferior a 6mm) rente ao solo em uma porção de 25x25 cm de terreno de uma parte representativa de cada parcela. Este material está composto por gramíneas, graminóides, folhas e ramos, vivos ou mortos, situados no interior desta área amostral. Se procedeu com o corte de toda a vegetação rasteira rente ao solo situado dentro do *plot* de 25x25 cm, separando em duas bolsas distintas a biomassa verde e seca. O material coletado foi seco em estufa a 70°C durante 72 horas, e depois pesado para a contabilização das seguintes variáveis: total de biomassa fina verde; total de biomassa fina seca; total de biomassa fina (somatório dos dois anteriores). Esta metodologia é habitualmente utilizada na estimação de material combustível fino de áreas com predomínio de vegetação herbácea, sendo aplicada de maneira similar em experimentos recentemente realizados em áreas core do Cerrado (SCHMIDT et al., 2018).

Para as parcelas situadas em áreas de predomínio de cobertura vegetal arbórea (áreas de vegetação ciliar) foi aplicada uma segunda ficha de campo (Anexo C), onde consta a estimação da altura dos distintos estratos de vegetação existentes, a observação de marcas da altura das chamas sobre os troncos de árvores, da estimação do recobrimento de serapilheira, entre outras informações. Foi ainda quantificado a fração de radiação fotossinteticamente ativa (FRFA) a nível superficial, abaixo das copas, utilizando um ceptômetro, modelo *Apogee MQ-306*. Este equipamento dispõe de sensores capazes de medir a energia eletromagnética de amplitude espectral entre 400 e 700 nm, faixa sensível a atividade fotossintética das plantas. Esta quantificação consistiu em medir (na altura da cintura do operador) a energia incidente sobre o sensor antes de adentrar na massa florestal ( $RFA_{above}$ ), e posteriormente realizar a mesma medida abaixo das copas ( $RFA_{below}$ ). O cociente entre  $RFA_{below}$  e  $RFA_{above}$  permite estimar o FPAR, ou seja, a quantidade de radiação interceptada pela massa vegetal.

Também foram incluídas descrições genéricas a respeito da presença de determinadas espécies vegetais, assim como a realização de coletas de solo superficial (~10 cm) para análise mediante análise de laboratório. Estas análises foram realizadas pelo Laboratório de Solos da Embrapa de Porto Velho (RO), concentrada na contabilização de matéria orgânica e macronutrientes. Estas características foram estimadas para apontar indícios sobre o comportamento destes parâmetros (sucessão de comunidades vegetais e afeição ao solo), a serem expandidos em futuras pesquisas.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

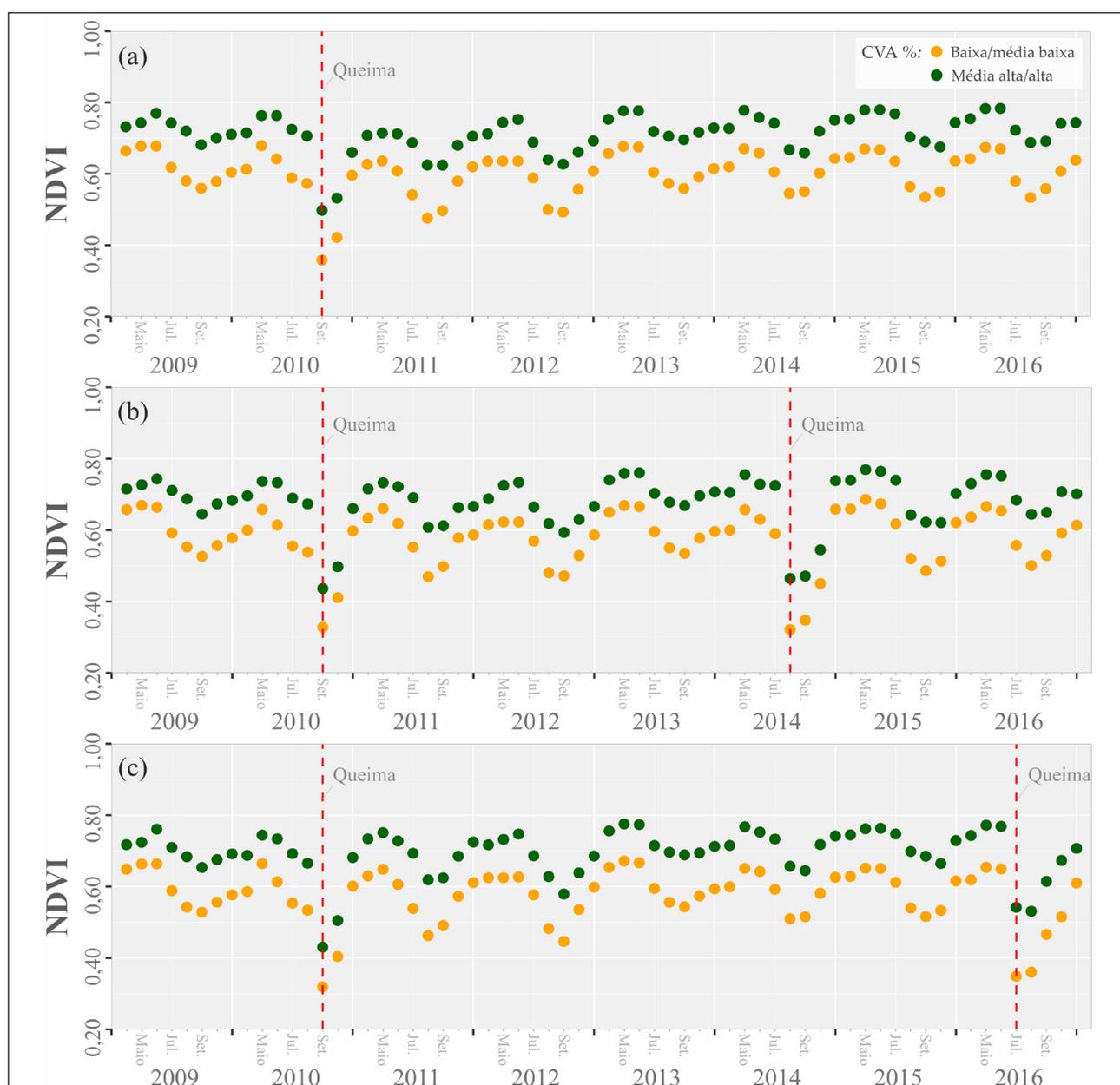
### 4.1 Análise multitemporal das respostas da vegetação ao fogo utilizando índices espectrais

A visualização da série temporal (2009-2016) dos índices espectrais gerados – NDVI (Figura 2) e NBR (Figura 3) - permitem analisar o comportamento da vegetação frente a incidência do fogo, contrastando as trajetórias de pixels afetados pelo fogo apenas em 2010 com as trajetórias com queimas registradas em 2010 e 2014 ou 2010 e 2016. Contrasta-se também o compor-

tamento de áreas de predomínio de feições herbáceas (CVA baixa/média baixa) com áreas de predomínio de feições arbóreas (CVA média alta/alta).

As trajetórias de 2009 de cada amostragem retratam o comportamento fenológico anual das formações vegetais predominantes na área, marcada por uma ascensão inicial do vigor vegetal, situando entre os meses de maio e junho os seus valores médios anuais mais altos (início da temporada de seca). Estes valores dão lugar a um descenso gradual durante o período de seca, atingindo valores mínimos entre os meses de agosto e setembro. A volta da chuva durante o mês de outubro dá lugar a um

Figura 2 – Trajetórias de valores médios do índice espectral NDVI em áreas afetadas pelo fogo em distintos períodos: (a) apenas em 2010; (b) em 2010 e 2014; (c) em 2010 e 2016



Fonte: Elaborado pelos autores

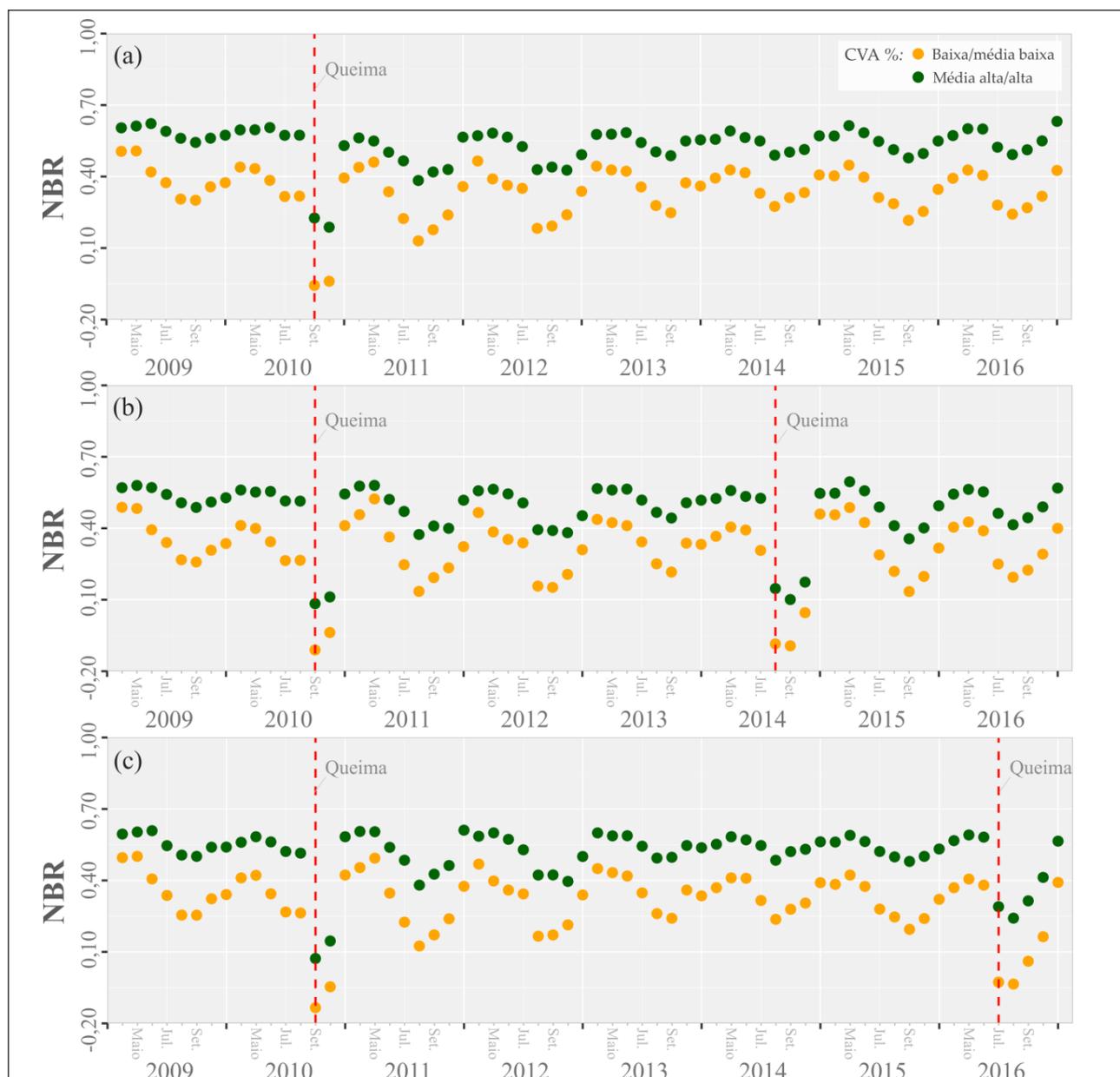
novo ciclo, de ascendência gradual do vigor vegetal, verificado na série de ambos os índices espectrais analisados.

Para melhor interpretar os efeitos das queimas observados em cada gráfico, se toma como referência a série de NDVI do agrupamento de pixels queimados apenas em 2010 (Figura 2<sub>a</sub>). No ano de 2010, os picos máximos de NDVI (anteriores a queima) são de 0,678 e 0,763 para as classes de CVA baixa/média baixa e média-alta/alta, respectivamente. Em resposta a queima ocorrida em setembro de 2010, os valores médios desse índice sofrem um descenso abrupto, atingindo 0,358 para as áreas de predomínio de CVA baixa/média-baixa

e 0,497 para as áreas de maior porcentagem de CVA. Isso supõe perdas de 35,97% e 26,94% de vigor vegetal nas classes de menor e maior predomínio de CVA, respectivamente, no comparativo com os valores observados em setembro de 2009.

Nos dois anos subsequentes a queima (2011 e 2012), os meses iniciais de cada trajetória (maio e junho) apresentam valores similares as condições pré-fogo de 2009, porém o efeito extensivo da incidência do fogo é observado com o decorrer do período de seca, onde se observa uma descendência mais acentuada dos valores de NDVI. Enquanto os valores mínimos mé-

Figura 3 – Trajetórias de valores médios do índice espectral NBR em áreas afetadas pelo fogo em distintos períodos: (a) apenas em 2010; (b) em 2010 e 2014; (c) em 2010 e 2016



Fonte: Elaborado pelos autores

dios de NDVI da trajetória de 2009 são de 0,559 (CVA menor) e 0,681 (CVA maior), em 2011 e 2012 esses valores atingem 0,475 e 0,492 para a classe de menor CVA, e 0,624 e 0,627 para a classe de maior CVA. Neste agrupamento de pixels afetados pelo fogo apenas em 2010, as trajetórias de NDVI dos anos seguintes (2013 a 2016) se assemelham com a apresentada nas variações de 2009, indicando uma recuperação dos níveis de vigor vegetal observados nas condições pré-fogo no terceiro ano após a ocorrência da queima.

Estes efeitos do fogo observados nos dois anos seguintes à ocorrência das queimas também são observados nas trajetórias de NDVI e NBR dos agrupamentos de pixels queimados em 2010 e 2014 (Figura 2<sub>b</sub> e Figura 3<sub>b</sub>) ou 2010 e 2016 (Figura 2<sub>c</sub> e Figura 3<sub>c</sub>). Mais precisamente, se observa que a ocorrência da queima de 2010 gera repercussões no pós-fogo imediato e na descendência mais acentuada dos valores médios de 2011 e 2012, apresentando trajetórias similares ao pré-fogo no ano de 2013 (Figura 2<sub>b</sub> e Figura 3<sub>b</sub>) e nos anos de 2013, 2014 e 2015 (Figura 2<sub>c</sub> e Figura 3<sub>c</sub>).

A estimativa de perdas do vigor vegetal imediata associada as queimas é mais fidedigna quando se contrastam os valores observados no ano de 2014 do agrupamento de pixels afetados pelo fogo em 2010 e 2014 (Figura 2<sub>b</sub> e Figura 3<sub>b</sub>) com as trajetórias deste mesmo ano dos demais agrupamentos (afetados por queimas apenas em 2010 ou em 2010 e 2016). Tomando como referência os valores médios de NBR de feições de CVA baixa/média-baixa, a trajetória de 2014 afetada pela queima apresenta valores máximos e mínimos de 0,405 e -0,094, que

contrastam com os valores máximos e mínimos observados pelo agrupamento de pixels queimados apenas em 2010, de 0,427 e 0,274. Se constata assim que enquanto o descenso fenológico representa uma diminuição de 35,97% dos seus valores em relação ao seu pico máximo anual, a ocorrência da queima gera um descenso 87,27% maior. Para as áreas de CVA média-alta/alta esse descenso é 68,56% maior que o experimentado na variação fenológica, como resultado da ação do fogo sobre a área.

Ainda que ambos os índices espectrais (NDVI e NBR) apresentem trajetórias similares em relação a caracterização da variação fenológica e das respostas da vegetação ao fogo, é possível especificar certas diferenças. Uma delas é verificada na observação das trajetórias de CVA baixa/média-baixa, onde os valores de NBR descem de maneira mais acentuada que os de NDVI no que se refere a variação fenológica durante o período de seca. Se verifica ainda que as respostas do índice NBR aos efeitos imediatos e extensivos da queima são de maior amplitude que os apresentados pelo índice NDVI, em ambas as classes de CVA. Isso ocorre pelas próprias características de cada índice, sendo que o NBR incorpora na sua fórmula informações espectrais mais sensíveis ao sinal do solo (banda do SWIR), em substituição a banda espectral do vermelho utilizada no NDVI. Em ambos os casos (variação fenológica e efeitos da queima) a sensibilidade do NDVI é menor que o NBR devido a maior influência do sinal de superfícies de solos expostos na mistura espectral destes pixels.

A contabilização das diferenças entre os picos anuais de ascendência e descendência dos valores mé-

Tabela 1 – Medidas associadas as trajetórias anuais de valores médios de NDVI e NBR, agrupadas de acordo com a distância da ocorrência da queima e a classe de CVA. Se apresenta os valores máximos e mínimos das trajetórias de agrupamentos anuais (MAX/MIN), e a diferença entre ambos (DIF = MAX-MIN)

| CVA                    | Índice | Medida | Ano pré-fogo | Ano da queima | + 1 ano | + 2 anos | + 3 anos | + 4 ou mais anos |
|------------------------|--------|--------|--------------|---------------|---------|----------|----------|------------------|
| baixa                  | NDVI   | MAX    | 0.670        | 0.662         | 0.657   | 0.628    | 0.672    | 0.660            |
|                        |        | MIN    | 0.538        | 0.335         | 0.473   | 0.470    | 0.545    | 0.526            |
|                        |        | DIF    | 0.132        | 0.328         | 0.184   | 0.158    | 0.127    | 0.134            |
| Baixa/média (1-30%)    | NBR    | MAX    | 0.486        | 0.428         | 0.491   | 0.466    | 0.453    | 0.427            |
|                        |        | MIN    | 0.271        | -0.087        | 0.131   | 0.166    | 0.235    | 0.230            |
|                        |        | DIF    | 0.215        | 0.514         | 0.360   | 0.300    | 0.218    | 0.197            |
| Alta/média-alta (>30%) | NDVI   | MAX    | 0.758        | 0.754         | 0.742   | 0.744    | 0.771    | 0.772            |
|                        |        | MIN    | 0.660        | 0.472         | 0.618   | 0.600    | 0.684    | 0.660            |
|                        |        | DIF    | 0.098        | 0.282         | 0.124   | 0.145    | 0.087    | 0.111            |
|                        | NBR    | MAX    | 0.603        | 0.579         | 0.588   | 0.581    | 0.583    | 0.594            |
|                        |        | MIN    | 0.510        | 0.137         | 0.373   | 0.401    | 0.474    | 0.483            |
|                        |        | DIF    | 0.093        | 0.442         | 0.215   | 0.181    | 0.109    | 0.111            |

Fonte: Elaborado pelos autores

dios de NDVI e NBR (Tabela 1) auxiliam na interpretação dos efeitos do fogo na vegetação observados na abordagem gráfica. Nesta tabela, se reagrupam os dados de acordo com o tempo em relação as queimas: pré-fogo (ano de 2009); ano com queima (pixels queimados de 2010, 2014 e 2016); 1 ano posterior a queima (2011 e os pixels de 2015 afetados pelo fogo em 2014); 2 anos posterior a queima (2012 e os pixels de 2016 afetados pelo fogo em 2014); 3 anos sem queima (2013); 4 ou mais anos sem queima (pixels de 2014, 2015 e 2016 não afetados pelo fogo em 2014 e 2016).

A análise da Tabela 1 corrobora com a argumentação realizada sobre a abordagem gráfica, resumindo-se três aspectos: i) no ano de ocorrência da queima se registra um descenso mais abrupto dos valores de NDVI e NBR; ii) dois anos posteriores a queima esses efeitos são já bastante reduzidos, mas ainda são mais acentuados que o registro pré-fogo; iii) no terceiro ano após a queima os valores médios de NDVI e NBR já se assemelham muito aos observados na trajetória pré-fogo, e seguem similares

nos registros de 4 ou 5 anos posteriores a queima.

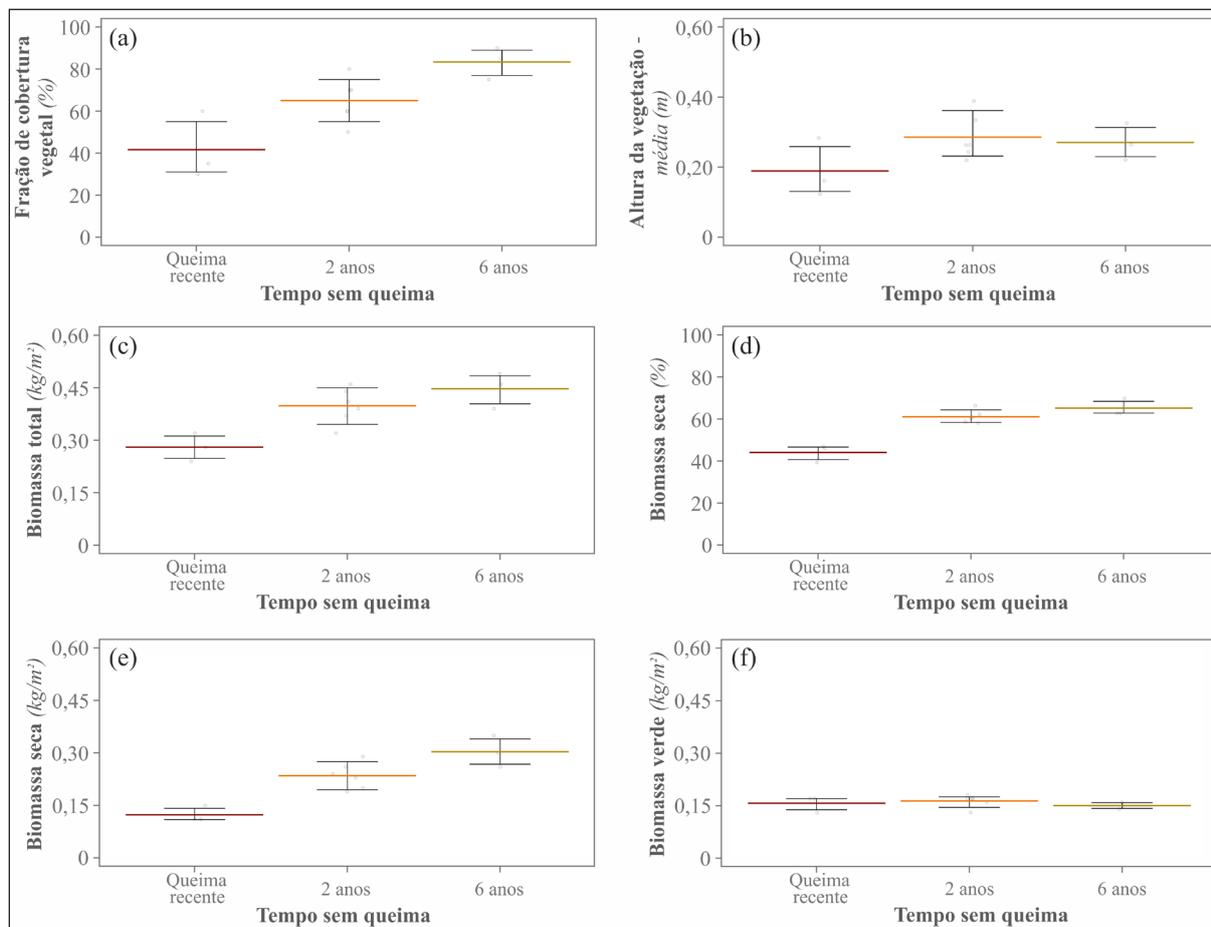
## 4.2 Avaliação mediante variáveis obtidas em trabalho de campo

### 4.2.1 Análise das áreas de predomínio de vegetação herbácea

A descrição dos dados obtidos em campo permite comparar o comportamento da vegetação afetada pelo fogo recentemente (2 meses posterior a queima) com áreas que se queimaram pela última vez em 2014 (2 anos posterior a queima) e 2010 (6 anos posterior a queima) (Figura 4).

Tratando-se de parcelas com predomínio de CV herbácea, um primeiro dado que chama a atenção se refere a estimação da fração de cobertura vegetal em relação a solos expostos (Figura 4<sub>a</sub>). Áreas recentemente afetadas pelo fogo apresentaram os menores valores (média situada em ~40%), contrastando com as maiores proporções estimadas para as áreas afetadas pelo fogo há dois anos atrás (~63%) e seis anos atrás (sempre supe-

Figura 4 – Comportamento de variáveis obtidas em campo em parcelas de CV predominantemente herbácea agrupadas pelo tempo sem queima (última queima ocorrida em 2016, 2014 ou 2010). A barra horizontal central apresenta a média de cada grupo, enquanto que os pontos situam os valores concretos de cada medida realizada; as demais barras marcam as posições interquartis



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 5 – Parcelas de CV predominantemente herbácea afetadas pelo fogo: a) queima recente (2 meses antes); b) 2 anos antes (queima de 2014); c) 6 anos antes (queima de 2010)



Fonte: Acervo de fotografias do PNCA, setembro de 2016

riores a 70%). Já a variável altura da vegetação (Figura 4<sub>b</sub>) apresenta diferenças menos acentuadas entre os três grupos, mais visíveis quando da comparação de áreas recentemente afetadas pelo fogo (média de altura de 0,19 m) frente a médias de altura similares das áreas afetadas pela queima de 2014 e 2010 (0,29 m e 0,27 m, respectivamente).

As medições derivadas da coleta de material combustível fino permitem descrever aspectos associados a quantidade e proporção de biomassa seca, verde e total acumuladas após a ocorrência de uma queima. Se observa que 2 meses posterior a passagem do fogo a biomassa fina total (Figura 4<sub>c</sub>) apresenta uma média de 0,280 kg/m<sup>2</sup>, com um desvio padrão de 0,04, o que representa um total 29,7% inferior que a média registrada nas parcelas queimadas pela última vez com 2 anos de anterioridade a coleta (0,398 kg/m<sup>2</sup>). O acúmulo de biomassa total é ainda ligeiramente maior nas áreas afetadas pelo fogo pela última vez com 6 anos de anterioridade a coleta, com uma média de 0,449 kg/m<sup>2</sup>.

Outra importante observação está nas diferenças de composição desta biomassa fina total entre os grupos analisados. Os subtotais de biomassa seca e verde (Figura 4<sub>e</sub> e Figura 4<sub>f</sub>) demonstram que a maior biomassa total fina das áreas com maior tempo sem queima está vinculada a um maior acúmulo de biomassa seca. Enquanto os valores médios de biomassa verde estão situados em ~0,150 kg/m<sup>2</sup> nos três grupos, o total de biomassa seca apresenta uma média de 0,123 kg/m<sup>2</sup> nas áreas recentemente queimadas e 0,235 e 0,303 kg/m<sup>2</sup> nas parcelas queimadas a 2 e 6 anos atrás, respectivamente. A porcentagem de biomassa seca em relação a total (Figura 4<sub>d</sub>) apresenta com mais precisão este contraste, demonstrando os efeitos da queima na diminuição do acúmulo de material seco. A Figura 5 retrata uma parcela de cada grupo analisado, auxiliando na distinção visual das diferenças entre os grupos.

#### 4.2.2 Análise das áreas de predomínio de cobertura vegetal arbórea

A sistematização das variáveis recolhidas nas áreas de predomínio de cobertura vegetal arbórea (Tabela 2) permitem a sua caracterização e a comparação de certos parâmetros associados a afeição ao fogo. O plano geral destas áreas (Figura 6), que correspondem a áreas de vegetação ciliar, auxilia na observação das diferenças entre os grupos de parcelas analisados.

É possível identificar que nas áreas de queimas recentes (Figura 6<sub>a</sub>) se observa uma transição mais abrupta entre o estrato aberto de formações vegetais e o início do adensamento da vegetação ciliar. Nas demais áreas (Figura 6<sub>b</sub> e 6<sub>c</sub>), queimadas há 2 e 6 anos atrás, se observa uma transição mais gradual, com a presença de arbustos e arvoretas pequenas, provavelmente associadas a processos de regeneração vegetal pós-fogo.

Em termos de caracterização, as parcelas situadas em áreas de vegetação ciliar apresentam médias superiores a 30 indivíduos arbóreos nas três classes de parcela, com alturas médias estrato arbóreo superior entre 14,5-17,5 m e DAP entre 0,13-0,16 m. A altura média de marcas do fogo foi ligeiramente superior nas parcelas recentemente queimadas (7,5 m contra 4,0 e 4,8 m nos outros grupos), provavelmente influenciada pelo fato das queimas recentes serem mais aparentes. No que se refere ao recobrimento de serrapilheira, as áreas recentemente queimadas demonstraram sinais de consumo parcial com a passagem do fogo (média de 22,5%), enquanto que as parcelas com maior tempo sem passagem de fogo dispõem de serrapilheiras mais desenvolvidas (ambos grupos com ~80% de recobrimento).

Diferenças aparentes também foram observadas nos valores médios de FRFA, onde as proporções de atividade fotossinteticamente ativa foram inferiores nas parcelas de vegetação ciliar afetadas recentemente pelo fogo (62,1%), na comparação com as parcelas queimadas pela última vez há 2 anos (81,2%) e 6 anos

Tabela 2 – Valores médios das variáveis obtidas sobre parcelas de predomínio de cobertura vegetal arbórea, subdivididas pelo tempo sem queima (queima recente, última queima há 2 anos ou a 6 anos atrás)

| Variável  | Queima recente | 2 anos | 6 anos |
|---|----------------|--------|--------|
| Altura estimada do estrato arbóreo superior (m) | 14,5           | 17,5   | 15,3   |
| Número de indivíduos de porte arbóreo           | 31             | 38     | 36     |
| Diâmetro na altura do peito (DAP) (m)           | 0,13           | 0,16   | 0,14   |
| Altura de marcas de fogo (tronco, copa...) (m)  | 7,5            | 4,0    | 4,8    |
| Estimação de serrapilheira (%)                  | 22,5           | 78,3   | 82,5   |
| FRFA (%)  | 62,1           | 81,2   | 86,5   |

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 6 – Plano geral da vegetação ciliar onde se situam parcelas afetadas pelo fogo: a) queima recente (2 meses antes); b) 2 anos antes (queima de 2014); c) 6 anos antes (queima de 2010)



Fonte: Acervo de fotografias do PNCA, setembro de 2016

(86,5%). A passagem recente do fogo refletiu num consumo parcial da vegetação destas parcelas recentemente queimadas (principalmente dos seus estratos menores e intermediários), o que explica a menor interceptação da radiação neste grupo de parcelas. Em contrapartida, as parcelas afetadas pelo fogo há mais tempo (2 ou 6 anos) aparentam sinais de regeneração destes estratos intermediários, o que influenciam diretamente nos maiores valores de FRFA.

De maneira sintética, é possível descrever que os efeitos mais aparentes do fogo no conjunto de parcelas de maior adensamento de CVA foram vistos nas áreas recentemente queimadas, enquanto que as parcelas queimadas entre 2 ou 6 anos atrás apresentam indícios de avanços de processo de regeneração vegetal.

#### 4.2.3 Breves avanços sobre a sucessão ecológica e os impactos do fogo no solo superficial

A observação das parcelas amostradas permitiu retratar alguns aspectos associados à sucessão ecológica de espécies vegetais nas áreas de predomínio de CV herbácea. Identificou-se um papel predominante de *Bulbos-*

*tylis paradoxa* (Spreng.) Lindm. em todos os pontos de amostragem, incluindo áreas queimadas recentemente e áreas sem queima nos últimos 2 ou 6 anos. A predominância de *B. paradoxa* é esperada, pois esta espécie de *Bulbostylis* apresenta um alto potencial adaptativo para áreas que sofrem períodos de estiagem e alagamento prolongados (MUNHOZ; FELFILI, 2006), como é o caso das áreas analisadas. A densa camada de bases foliares dispostas ao longo do caule permite a esta espécie resistir ao fogo, representando assim, uma característica adaptativa importante a ambientes sujeitos ao fogo periódico (RODRÍGUEZ, 2014).

As parcelas com dois anos sem a passagem do fogo (queimadas em 2010 e 2014) foram as que apresentaram um número maior de espécies em comparação com os demais grupos de parcelas, observando a presença de *B. paradoxa*, *Davilla nitida* (Vahl) Kubitzki, *Paepalanthus chiquitensis* Herzog, Cyperaceae sp., Poaceae sp. 1, Poaceae sp. 2, *Hymatanthus semilunatus* Markgr. e Melastomataceae sp. Já para as parcelas de queima recente (queimadas em 2010 e 2016) o número de espécies identificadas diminuiu consideravelmente, sendo essa redução prova-

Tabela 3 – Resultados analíticos das amostras de solo superficial (matéria orgânica e macronutrientes), nos distintos grupos e subgrupos analisados

| Grupo             | Subgrupos         | pH em água | MO (g kg <sup>-1</sup> ) | P (mg dm <sup>-3</sup> ) | K (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) | Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) | Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) | H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) | Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) |
|-------------------|-------------------|------------|--------------------------|--------------------------|---|--|--|--|--|
| CV pred. herbácea | Queima recente    | 4,95       | 12,20                    | 1,5                      | 0,06                                    | 0,06                                     | 0,07                                     | 4,50                                       | 1,01                                     |
|                   | 2 anos sem queima | 4,75       | 16,25                    | 1,0                      | 0,06                                    | 0,06                                     | 0,07                                     | 4,95                                       | 1,06                                     |
|                   | 6 anos sem queima | 4,90       | 16,80                    | 2,0                      | 0,04                                    | 0,06                                     | 0,07                                     | 6,40                                       | 1,49                                     |
| CV pred. arbórea  | Queima recente    | 4,80       | 29,30                    | 1,0                      | 0,27                                    | 0,08                                     | 0,28                                     | 10,70                                      | 2,34                                     |
|                   | 2 anos sem queima | 4,80       | 56,90                    | 1,0                      | 0,08                                    | 0,12                                     | 0,10                                     | 13,50                                      | 2,87                                     |
|                   | 6 anos sem queima | 4,90       | 88,10                    | 1,0                      | 0,11                                    | 0,08                                     | 0,15                                     | 17,20                                      | 3,22                                     |

Fonte: Resultados derivados das análises de solos processadas pelo Laboratório de Solos da Embrapa - Porto Velho (RO)

velmente associada aos efeitos da ação do fogo recente sobre espécies perenes, como *D. nitida* e *H. semilunatus*, que precisam de um intervalo maior da ocorrência do fogo para se reestabelecer. As parcelas situadas em áreas com 6 anos sem queima (última queima em 2010) apresentaram um número maior de espécies que as parcelas recentemente queimadas, porém inferior ao observado nas parcelas queimadas em 2010 e 2014. Nestas parcelas de amostragem, observaram-se a presença de *B. paradoxa*, *P. chiquitensis*, Poaceae sp. 1, *H. obavatus*, *H. semilunatus* e Melastomataceae sp.

No que se refere a observação de possíveis impactos do fogo nas características do solo superficial, os resultados analíticos (Tabela 3) permitem comparar as características de cada grupo amostral. Níveis muito baixos de pH em água se verificam em todos os grupos amostrais (valores sempre inferiores e próximos a 5,0), que indicam um alto grau de acidez dos solos presentes na área. Os conteúdos de macronutrientes também indicam que se tratam em geral de solos pouco férteis, com destaque para os baixos valores de fósforo e cálcio.

O grupo de solos em áreas de CV predominantemente herbácea apresentou baixos conteúdos de matéria orgânica (MO) (sempre inferiores a 17,0 g kg<sup>-1</sup>), com uma ligeira variação entre os valores observados nas áreas recentemente queimadas (~12,0 g kg<sup>-1</sup>) e os grupos com queimas mais distantes no tempo (~16,0 g kg<sup>-1</sup>). Já no grupo de áreas de CV predominantemente arbórea (coletados exclusivamente em parcelas de vegetação ciliar), os subtotais de MO são mais altos (entre 29,30 e 88,10 g kg<sup>-1</sup>), coincidindo como o de valor mínimo aquele que registrou uma queima mais recente. Em ambos os grupos, esses registros um tanto inferiores de MO são esperados para áreas recentemente queimadas, já que estão mais sujeitas ao escoamento superficial após a chuva devido a eliminação ao menos parcial da sua cobertura vegetal.

De isso resulta que os nutrientes derivados das cinzas das queimas acabam sendo transportados para as áreas mais baixas.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E FUTURAS LINHAS DE TRABALHO

O presente artigo analisou as respostas de formações vegetais ao fogo em áreas do enclave de cerrado do PNCA mediante séries temporais de sensoriamento remoto e dados derivados de trabalho de campo. Foi possível verificar que as séries multitemporais de ambos índices espectrais utilizados (NDVI e NBR) foram sensíveis aos efeitos da queima, destacando-se os descensos abruptos observados no pós-fogo imediato. A análise das trajetórias multitemporais também permitiu inferir que nos dois anos posteriores à ocorrência da queima os efeitos sobre a vegetação já são bastante reduzidos, mas ainda aparentes, sendo a partir do terceiro ano que as trajetórias voltam a se assemelhar ao comportamento fenológico verificado em condições pré-fogo.

Estas observações ressaltam a alta resiliência ao fogo das formações vegetais em ambientes de Cerrado (GIGNOUX; CLOBERT; MENAUT, 1997; FIGUEIRA et al., 2016), que contextualizam com a sistematização de informações observadas na campanha de campo. Nas áreas de CV predominantemente herbácea se verificaram frações de cobertura vegetal inferior nas parcelas com queima recente, contrastando com os valores mais altos observados nos grupos de parcelas com mais tempo sem queima. Ao mesmo tempo, destaca-se o maior acúmulo de biomassa total nestes grupos de parcelas com mais tempo sem queima, que corresponderam a maiores subtotais de biomassa seca, tornando estas áreas mais propícias a ignição e propagação das chamas. Estes resultados se assemelham aos estimados em áreas de Cerrado do Parque Nacional da Serra da Canastra (BATISTA et

al., 2018), onde também se comparam totais de biomassa e fração de cobertura vegetal de grupos queimados recentemente com grupos com maior tempo sem queima.

Em relação as parcelas em áreas de maior adensamento de CV arbórea, os resultados mais destacados estiveram relacionados a menor interceptação de FRFA e as proporções inferiores de serrapilheira identificadas nas parcelas de queima recente, no contraste com os demais grupos de parcelas. Se destaca ainda que as áreas com mais tempo sem fogo aparentaram maior adensamento dos estratos vegetais intermediários, provavelmente associados a estratos de regeneração vegetal após a passagem do fogo. Altas taxas de regeneração vegetal de espécies arbóreas e baixas taxas de mortalidade foram observadas no estudo de áreas de transição de florestas e vegetação de Cerrado afetadas pelo fogo na Reserva Ecológica do IBGE (HOFFMANN et al., 2009), retratando a resiliência de áreas similares as de vegetação ciliar deste estudo. Novos estudos mais aprofundados são necessários para que se permita um seguimento detalhado das taxas de mortalidade de indivíduos destas áreas, que as vinculem com diferentes frequências de queimas.

É importante ponderar que o levantamento de variáveis em campo foi realizado a partir de uma única grande campanha, o que acaba limitando comparações mais exaustivas com o comportamento observado na análise de derivada de produtos de sensoriamento remoto. Estas condições também limitaram avançar em interpretações mais específicas associadas a mortalidade, ao efeito “*tree topkill*” e a regeneração de indivíduos arbóreos frente as queimas. Ainda assim, se considera que importantes avanços iniciais foram obtidos na interpretação os efeitos das queimas sobre áreas com distintos padrões de cobertura vegetal, que servirão como base para novas incursões a serem realizadas visando a compreensão da dinâmica existente entre vegetação e fogo neste tipo de ambiente.

Cabe ainda ponderar que os dados de campo derivados de queima recente (queima de 2016) são associados a uma passagem do fogo ocorrida no final do mês de julho, enquanto que as queimas registradas em 2010 e 2014 ocorreram nos meses de agosto e setembro, respectivamente. Ainda que o final do mês de julho já apresente condições de seca próximas as observadas no mês de agosto e setembro, é provável que a intensidade das queimas de 2010 e 2014 tenham sido superiores a observada em 2016. Por este motivo, é também provável que o contraste entre áreas de queima recente vs. áreas com maior tempo sem queima possa ser inclusive maior que o encontrado neste estudo.

Em relação a análise multitemporal baseada em dados de sensoriamento remoto, se destaca que o uso do fusionado de imagens Landsat-MODIS permitiu completar a série temporal da série Landsat, contando assim com oito registros multitemporais anuais para análise entre 2009-2016. A disponibilidade de novos produtos de sensoriamento remoto de maior resolução espacial e temporal poderão auxiliar na geração de séries temporais mais detalhadas e completas. Se considera que a disponibilidade futura da série harmônica derivadas dos satélites Landsat e Sentinel 2 (CLAVERIE et al., 2017) se integrará como uma alternativa importante para ampliar a capacidade de análise dos efeitos do fogo nestes ambientes.

Outro desafio futuro está na otimização das fichas de campo aqui utilizadas para a análise de parcelas, para que possibilitem a integração de um índice genérico que mensure os impactos do fogo sobre os distintos estratos da vegetação. Para isso, se poderá utilizar como base as fichas utilizadas para caracterizar a severidade do fogo sobre outros tipos de ambientes, tais como a desenvolvida por De Santis e Chuvieco (2009) para a análise dos impactos do fogo em ambientes mediterrâneos, com o cômputo generalizado do índice *Geometrically structured Composite Burn Index* (GeoCBI).

A partir do ano de 2019, está previsto a realização de queimas experimentais em parcelas de 100x100 metros sobre as feições abertas de cerrado do PNCA, que contarão com um monitoramento mais exaustivo de variáveis a serem obtidas em campo em conjunto com as informações derivadas de sensoriamento remoto. Os tratamentos a serem aplicados em cada parcela incluirão diferentes frequências e temporadas de queima, permitindo assim obter informações precisas sobre os efeitos do fogo sobre as formações vegetais ali existentes, dando continuidade aos avanços iniciais sobre a sucessão de espécies vegetais aqui apresentado. Ao mesmo tempo, o monitoramento detalhado da variação da biomassa irá gerar informações chave para o planejamento de estratégias mais amplas associadas ao plano manejo do fogo no PNCA.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo financiamento para os estudos de doutorado pleno no exterior ao primeiro autor (processo n. 9540-130). Agradece-se ainda a toda a equipe de gestão do PNCA, e em especial a sua Brigada de Incêndios de 2016, pelo suporte e comprometimento no desempenho das atividades de campo.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, D. B.; MONTORIO LLOVERÍA, R.; PÉREZ-CABELLO, F.; VLASSOVA, L. Fusing Landsat and MODIS data to retrieve multispectral information from fire-affected areas over tropical savannah environments in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, v. 39, p. 1–23, 2018.
- ALVES, D. B.; PÉREZ-CABELLO, F. Multiple remote sensing data sources to assess spatio-temporal patterns of fire incidence over Campos Amazônicos Savanna Vegetation Enclave (Brazilian Amazon). *Science of The Total Environment*, v. 601–602, p. 142–158, 2017.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; BARBIER, N.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E.; ANDERSON, L.; SAATCHI, S. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Philosophical transactions of the Royal Society of London Series B, Biological sciences*, v. 363, p. 1779–1785, 2008.
- ASNER, G. P. Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, v. 22, n. 18, p. 3855–3862, 2001.
- BARTELS, S. F.; CHEN, H. Y. H.; WULDER, M. A.; WHITE, J. C. Trends in post-disturbance recovery rates of Canada's forests following wildfire and harvest. *Forest Ecology and Management*, v. 361, p. 194–207, 2016.
- BASTARRIKA, A.; ALVARADO, M.; ARTANO, K.; MARTINEZ, M. P.; MESANZA, A.; TORRE, L.; RAMO, R.; CHUVIECO, E. BAMS: a tool for supervised burned area mapping using Landsat data. *Remote Sensing*, v. 6, p. 12360–12380, 2014.
- BATISTA, E. K. L.; RUSSELL-SMITH, J.; FRANÇA, H.; FIGUEIRA, J. E. C. An evaluation of contemporary savanna fire regimes in the Canastra National Park, Brazil: Outcomes of fire suppression policies. *Journal of Environmental Management*, v. 205, p. 40–49, 2018.
- BOND, W. J.; WOODWARD, F. I.; MIDGLEY, G. F. The Global Distribution of Ecosystems in a world without Fire. *New Phytologist*, v. 165, n. 2, p. 525–538, 2005.
- BOWMAN, D. M. J. S.; BALCH, J. K.; ARTAXO, P.; BOND, W. J.; CARLSON, J. M.; COCHRANE, M. A.; ANTONIO, C. M. D.; DEFRIES, R. S.; DOYLE, J. C.; HARRISON, S. P.; JOHNSTON, F. H.; KEELEY, J. E.; KRAWCHUK, M. A.; KULL, C. A.; MARSTON, J. B.; MORITZ, M. A.; PRENTICE, I. C.; ROOS, C. I.; SCOTT, A. C.; SWETNAM, T. W.; VAN DER WERF, G. R.; PYNE, S. J. Fire in the Earth System. *Science*, v. 324, n. 5926, p. 481–484, 2009.
- CARNEIRO FILHO, A. Cerrados amazônicos: fósseis vivos? Algumas reflexões. *Revista do Instituto Geológico*, v. 14, n. 1, p. 63–68, 1993.
- CERTINI, G. Effects of fire on properties of forest soils: A review. *Oecologia*, v. 143, n. 1, p. 1–10, 2005.
- CLAVERIE, M.; MASEK, J. G.; JU, J.; DUNGAN, J. L. **Harmonized Landsat-8 Sentinel 2 (HLS) Product User's Guide**, NASA, 2017. Disponível em: <[https://hls.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/08/HLS.v1.3.UserGuide\\_v2.pdf](https://hls.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/08/HLS.v1.3.UserGuide_v2.pdf)>. Acesso em 05 de jun de 2018.
- COUTINHO, L. M. Fire in the Ecology of the Brazilian Cerrado. In: GOLDAMMER, J. G. (Ed.). **Fire in the Tropical Biota**. Berlin: Springer, p. 82–105, 1990.
- DANTAS, V. de L.; BATALHA, M. A.; PAUSAS, J. G. Fire drives functional thresholds on the savanna – forest transition. *Ecology*, v. 94, n. 11, p. 2454–2463, 2013.
- DE SANTIS, A.; CHUVIECO, E. GeoCBI: A modified version of the Composite Burn Index for the initial assessment of the short-term burn severity from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, v. 113, n. 3, p. 554–562, 2009.
- DURIGAN, G.; RATTER, J. A. The need for a consistent fire policy for Cerrado conservation. *Journal of Applied Ecology*, v. 53, n. 1, p. 11–15, 2016.
- ESCUIN, S.; NAVARRO, R.; FERNÁNDEZ, P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing*, v. 29, n. 4, p. 1053–1073, 2008.
- ESPINDOLA, G. M.; AGUIAR, A. P. D.; PEBESMA, E.; CÂMARA, G.; FONSECA, L. Agricultural land use dynamics in the Brazilian Amazon based on remote sensing and census data. *Applied Geography*, v. 32, n. 2, p. 240–252, 2012.
- EVA, H.; LAMBIN, E. F. Fires and land-cover change in the tropics: a remote sensing analysis at the landscape scale. *Journal of Biogeography*, v. 27, n. 3, p. 765–776, 2000.
- FIDELIS, A.; PIVELLO, V. R. Deve-se usar o fogo como instrumento de manejo no Cerrado e Campos Sulinos? *Biodiversidade Brasileira*, v. 1, n. 2, p. 12–25, 2011.
- FIGUEIRA, J. E. C.; RIBEIRO, K. T.; RIBEIRO, M. C.; JACOBI, C. M.; FRANÇA, H.; NEVES, A. C. de O.; CONCEIÇÃO, A. A.; MOURÃO, F. A.; SOUZA, J. M.; MIRANDA, C. A. de K. Fire in Rupestrian Grasslands: Plant Response and Management. In: FERNANDES, G. W. (Ed.). **Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil**. Belo Horizonte, Brasil: Springer International Publishing, p. 415–448, 2016.

- GAO, F.; MASEK, J.; SCHWALLER, M.; HALL, F. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: Predicting daily Landsat Surface Reflectance. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 8, p. 2207–2218, 2006.
- GAO, F.; MORISETTE, J. T.; WOLFE, R. E.; EDERER, G.; PEDELTY, J.; MASUOKA, E.; MYNENI, R.; TAN, B.; NIGHTINGALE, J. An Algorithm to Produce Temporally and Spatially Continuous MODIS-LAI Time Series. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 5, n. 1, p. 60–64, 2008.
- GIGLIO, L.; RANDERSON, J. T.; VAN DER WERF, G. R.; KASIBHATLA, P. S.; COLLATZ, G. J.; MORTON, D. C.; DEFRIES, R. S. Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. **Biogeosciences**, v. 7, p. 1171–1186, 2010.
- GIGNOUX, J.; CLOBERT, J.; MENAUT, J.-C. Alternative fire resistance strategies in savanna trees. **Oecologia**, v. 110, n. 4, p. 576–583, 1997.
- GOLDAMMER, J. G. Historical biogeography of fire: tropical and subtropical. In: CRUTZEN, P. J.; GOLDAMMER, J. G. (Ed.). **The ecological, atmospheric and climatic importance of vegetation fires**. New York: John Wiley & Sons, Ltd, p. 297–314, 1993.
- HARDESTY, J.; MYERS, R.; FULKS, W. Fire, ecosystems and people: a preliminary assessment of fire as a global conservation issue. **Fire Management**, v. 22, n. 4, p. 78–87, 2005.
- HILKER, T.; WULDER, M. a.; COOPS, N. C.; LINKE, J.; MCDERMID, G.; MASEK, J. G.; GAO, F.; WHITE, J. C. A new data fusion model for high spatial- and temporal-resolution mapping of forest disturbance based on Landsat and MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 8, p. 1613–1627, 2009.
- HOFFMANN, W. A.; ADASME, R.; HARIDASAN, M.; DE CARVALHO, M. T.; GEIGER, E. L.; PEREIRA, M. A. B.; GOTSCH, S. G.; FRANCO, A. C. Tree topkill, not mortality, governs the dynamics of savanna-forest boundaries under frequent fire in central Brazil. **Ecology**, v. 90, n. 5, p. 1326–1337, 2009.
- HOFFMANN, W. A.; MOREIRA, A. G. The role of fire in population dynamics of woody plants. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. (Ed.). **The Cerrados of Brazil: Ecology and Natural History of a Neotropical Savanna**. New York, EUA: Columbia University Press, p. 139–177, 2002.
- ICMBIO, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Plano de Manejo do Parque Nacional dos Campos Amazônicos**. Brasília, Brasil: Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2016.
- KEY, C. H.; BENSON, N. C. Landscape assessment (LA): Sampling and analysis methods. In: LUTES, D. C.; KEANE, R. E.; CARATTI, J. F.; KEY, C. H.; BENSON, N. C.; SUTHERLAND, S.; GANGI, L. J. (Ed.). **FIRE-MON: Fire effects monitoring and inventory system**. Fort Collins, CO, USA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, p. 1–55, 2006.
- KOUTSIAS, N.; KARTERIS, M. Burned area mapping using logistic regression modeling of a single post-fire Landsat-5 Thematic Mapper image. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 4, p. 673–687, 2000.
- LARIS, P.; WARDELL, D. A. Good, bad or “necessary evil”? Reinterpreting the colonial burning experiments in the savanna landscapes of West Africa. **Geographical Journal**, v. 172, n. 4, p. 271–290, 2006.
- LEDRU, M.-P. Late Quaternary History and Evolution of the Cerrados as Revealed by Palynological Records. In: OLIVEIRA, P.; MARQUIS, P. J. (Ed.). **The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a Neotropical Savanna**. New York, EUA: Columbia University Press, 2002.
- LEVINE, J. S.; COFER, W. R.; CAHOON, D. J.; WINSTEAD, E. L. Biomass burning - a driver for global change. **Environmental Science & Technology**, v. 29, n. 3, p. 120–125, 1995.
- MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; KOUSKY, V. E.; FILIZOLA, N. P.; WAINER, I. C. Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, v. 14, n. 5, p. 833–852, 2001.
- MASEK, J. G.; VERMOTE, E. F.; SALEOUS, N. E.; WOLFE, R.; HALL, F. G.; HUENNRICH, K. F.; GAO, F.; KUTLER, J.; LIM, T. A Landsat Surface Reflectance Dataset for North America, 1990–2000. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 3, n. 1, p. 68–72, 2006.
- MIRANDA, H. S.; SATO, M. N.; NASCIMENTO NETO, W.; AIRES, F. S. Fires in the cerrado, the Brazilian savanna. In: COCHRANE, M. A. (Ed.). **Tropical Fire Ecology: Climate change, land use, and ecosystem dynamics**. Chichester, UK: Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 427–450.
- MISTRY, J.; BERARDI, A.; ANDRADE, V.; KRAHÔ, T.; KRAHÔ, P.; LEONARDOS, O. Indigenous fire management in the cerrado of Brazil: The case of the Krahô of Tocantins. **Human Ecology**, v. 33, n. 3, p. 365–386, 2005.
- MOREIRA, A. G. Effects of fire protection on savanna structure in central Brazil. **Journal of Biogeography**, v. 27, n. 4, p. 1021–1029, 2000.

- MORTON, D. C.; DEFRIES, R. S.; SHIMABUKURO, Y. E.; ANDERSON, L. O.; ARAI, E.; ESPIRITO-SANTO, F. del B.; FREITAS, R.; MORISETTE, J. Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 103, n. 39, p. 14637–14641, 2006.
- MUNHOZ, C. B. R.; FELFILI, J. M. Fitossociologia do estrato herbáceo-subarbusivo de uma área de campo sujo no Distrito Federal, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 23, n. 3, p. 671-685, 2006
- NEPSTAD, D.; CARVALHO, G.; BARROS, A. C.; ALENCAR, A.; CAPOBIANCO, J. P.; BISHOP, J.; MOUTINHO, P.; LEFEBVRE, P.; SILVA JR., U. L.; PRINS, E. Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests. **Forest Ecology and Management**, v. 154, p. 397–407, 2001.
- OLIVEIRA-FILHO, A. T.; RATTER, J. A. Vegetation physiognomies and woody flora of the Cerrado Biome. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (Ed.). **The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**. New York, EUA: Columbia University Press, 2002. p. 91–120.
- OMETTO, J. P.; SOUZA-NETO, E. r.; TEJADA, G. Land Use, Land Cover and Land Use Change in the Brazilian Amazon (1960–2013). In: NAGY, L.; FORSBERG, B. R.; ARTAXO, P. (Ed.). **Interactions between biosphere, atmosphere and human land use Amazon Basin** - Ecological Studies. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, p. 369–384, 2016.
- PAUSAS, J. G.; KEELEY, J. E. A burning story: The role of fire in the history of life. **BioScience**, v. 59, n. 7, p. 593–601, 2009.
- PEREIRA, J. M. C. Remote sensing of burned areas in tropical savannas. **International Journal of Wildland Fire**, v. 12, n. 4, p. 259–270, 2003.
- PETTORELLI, N.; VIK, J. O.; MYSTERUD, A.; GAILLARD, J. M.; TUCKER, C. J.; STENSETH, N. C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 20, n. 9, p. 503–510, 2005.
- PIVELLO, V. R. The use of fire in the cerrado and amazonian rainforests of Brazil: past and present. **Fire Ecology**, v. 7, n. 1, p. 24–39, 2011.
- RAMOS-NETO, M. B.; PIVELLO, V. R. Lightning fires in a Brazilian Savanna National Park: rethinking management strategies. **Environmental Management**, v. 26, n. 6, p. 675–684, 2000.
- RATTER, J. A.; BRIDGEWATER, S.; RIBEIRO, J. F. Analysis of the floristic composition of the Brazilian cerrado vegetation: comparison of the woody vegetation of 376 areas. **Edinburgh Journal of Botany**, n. 60, p. 57–109, 2003.
- RÖDER, A.; HILL, J.; DUGUY, B.; ALLOZA, J. A.; VALLEJO, R. Using long time series of Landsat data to monitor fire events and post-fire dynamics and identify driving factors - a case study in the Ayora region (eastern Spain). **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 1, p. 259–273, 2008.
- RODRÍGUEZ, D. *Bulbostylis paradoxa* (Cyperaceae), nuevo registro para la flora de El Salvador. **Phytoneuron**, n. 71, p. 1-3, 2014.
- ROUSE, J. W.; HASS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: S. C. FREDEN, E. P. MERCANTI, M. A. BECKER, (Eds.). Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium, Washington, DC, United States. **Proceedings...** Washington, DC, United States: NASA Goddard Space Flight Center, 1974. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf>>. Acesso em 13 de set de 2017.
- SALGADO-LABOURIAU, M. L.; FERRAZ-VICENTINI, K. R. Fire in the Cerrado 32,000 years ago. **Current Research in the Pleistocene**, v. 11, p. 85–87, 1994.
- SANO, E. E.; FERREIRA, L. G.; ASNER, G. P.; STEINKE, E. T. Spatial and temporal probabilities of obtaining cloud-free Landsat images over the Brazilian tropical savanna. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 12, p. 2739–2752, 2007.
- SCHMIDT, I. B.; MOURA, L. C.; FERREIRA, M. C.; ELOY, L.; SAMPAIO, A. B.; DIAS, P. A.; BERLINCK, C. N. Fire management in the Brazilian savanna: First steps and the way forward. **Journal of Applied Ecology**, n. October/17, p. 1–8, 2018.
- SEXTON, J. O.; SONG, X.-P.; FENG, M.; NOOJIPADY, P.; ANAND, A.; HUANG, C.; KIM, D.-H.; COLLINS, K. M.; CHANNAN, S.; DIMICELI, C.; TOWNSHEND, J. R. Global, 30-m resolution continuous fields of tree cover: Landsat-based rescaling of MODIS Vegetation Continuous Fields with LIDAR-based estimates of error. **International Journal of Digital Earth**, v. 6, n. 5, p. 427–448, 2013.
- SILVEIRA, L.; DE ALMEIDA JACOMO, A. T.; DINIZ FILHO, J. A. F.; RODRIGUES, F. H. G. Impact of wildfires on the megafauna of Emas National Park, central Brazil. **Oryx**, v. 33, n. 2, p. 108–114, 1999.

TRIGG, S.; FLASSE, S. Characterizing the spectral-temporal response of burned savannah using in situ spectroradiometry and infrared thermometry. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 16, p. 3161–3168, 2000.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127–150, 1979.

USGS, United States Geological Survey. **Landsat Collection 1 Level 1 Product**. Sioux Falls, South Dakota, USA, 2017. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/landsat-collections>>. Acesso em 10 de dez de 2017.

USGS, United States Geological Survey. **Landsat 8 Surface Reflectance Code (LaSRC) Product Guide**, 2018. Disponível em: <[https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/lasrc\\_product\\_guide.pdf](https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/lasrc_product_guide.pdf)>. Acesso em 10 de jun de 2018.

VERMOTE, E. F.; EL SALEOUS, N.; JUSTICE, C. O.; KAUFMAN, Y. J.; PRIVETTE, J. L.; REMER, L.; ROGER, J. C.; TANRÉ, D. Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces: Background, operational algorithm and validation. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, p. 17131, 1997.

VERMOTE, E.; WOLFE, R. **MYD09GQ MODIS/Aqua Surface Reflectance Daily L2G Global 250m SIN Grid V006**. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015a. Disponível em: <<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD09GQ.006>>. Acesso em 10 de nov de 2016.

VERMOTE, E.; WOLFE, R. **MOD09GA MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m SIN Grid V006**. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015b. Disponível em: <<https://doi.org/10.5067/modis/mod09ga.006>>. Acesso em 10 de nov de 2016.

WHITE, J. C.; WULDER, M. A.; HERMOSILLA, T.; COOPS, N. C.; HOBART, G. W. A nationwide annual characterization of 25 years of forest disturbance and recovery for Canada using Landsat time series. **Remote Sensing of Environment**, v. 194, p. 303–321, 2017.

WIMBERLY, M. C.; REILLY, M. J. Assessment of fire severity and species diversity in the southern Appalachians using Landsat TM and ETM+ imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, n. 2, p. 189–197, 2007.

ZHU, X.; CHEN, J.; GAO, F.; CHEN, X.; MASEK, J. G. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 11, p. 2610–2623, 2010.

ZHU, X.; HELMER, E. H.; GAO, F.; LIU, D.; CHEN, J.; LEFSKY, M. A. A flexible spatiotemporal method for fusing satellite images with different resolutions. **Remote Sensing of Environment**, v. 172, p. 165–177, 2016.

---

### Correspondência dos autores:

Daniel Borini Alves  
e-mail: [danielborini.geo@gmail.com](mailto:danielborini.geo@gmail.com)

Fernando Pérez-Cabello  
e-mail: [fcabello@unizar.es](mailto:fcabello@unizar.es)

Bruno Contursi Cambraia  
e-mail: [bruno.cambraia@icmbio.gov.br](mailto:bruno.cambraia@icmbio.gov.br)

Francismeire Bonadeu  
e-mail: [francismeireb@gmail.com](mailto:francismeireb@gmail.com)

Antônio Laffayette Pires da Silveira  
e-mail: [antonio@unir.br](mailto:antonio@unir.br)

---

Artigo recebido em: 11/07/2018

Revisado pelos autores em: 24/07/2018

Aceito para publicação em: 24/07/2018

**ANEXO A.** Detalhamento da composição e dos agrupamentos de análise da série multitemporal de dados de sensoriamento remoto.

Figura A<sub>1</sub> - Composição da série temporal de índices vegetais com dados Landsat e derivados da fusão de Landsat e MODIS.

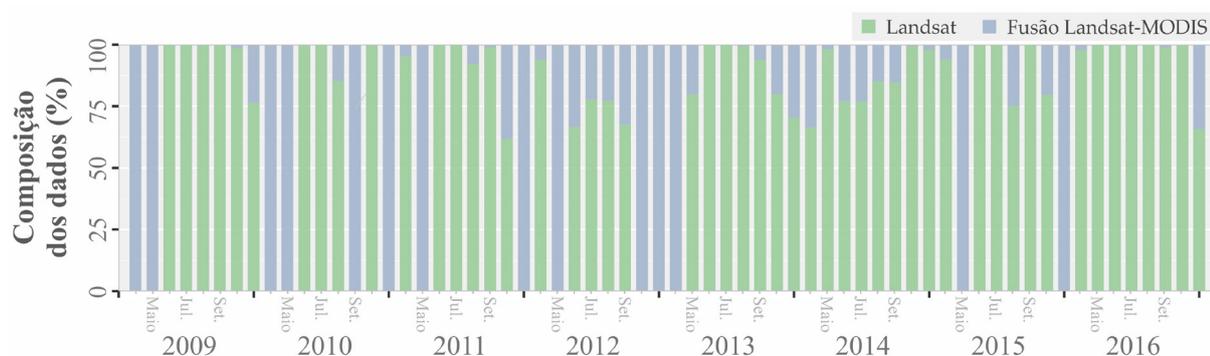


Figura A<sub>2</sub> - Detalhamento sobre os agrupamentos de análise e seus respectivos estratos amostrais.



- Totais e subtotais de áreas afetadas pelo fogo

| Anos queimados | Total (ha) | Subtotal (ha) CVA 1-30% | Subtotal (ha) CVA >30% |
|----------------|------------|-------------------------|------------------------|
| Apenas 2010    | 969,03     | 587,43                  | 381,60                 |
| 2010 e 2014    | 1647,90    | 1451,07                 | 196,83                 |
| 2010 e 2016    | 549,54     | 499,41                  | 50,13                  |

- Amostras aleatórias (35%) de pixels por categoria

| Anos queimados | Número de amostras (N) | N - CVA 1-30% | N - CVA >30% |
|----------------|------------------------|---------------|--------------|
| Apenas 2010    | 3786                   | 2284          | 1484         |
| 2010 e 2014    | 7830                   | 5643          | 2187         |
| 2010 e 2016    | 2136                   | 1942          | 194          |

**ANEXO B. Ficha de campo para as parcelas de predomínio de CV herbácea.**

| <b>FICHA DE CAMPO 1 - PARCELAS DE PREDOMÍNIO DE VEGETAÇÃO HERBÁCEA</b> |         |  |            |
|--|---------|--|------------|
| Data: ___/___/___  |         | Horário: _____                                     |            |
| Localização/parcela: _____   |         |  |            |
| ID do ponto de GPS: _____  |         | Declividade: ( ) Baixa/plana ( ) moderada ( ) alta |            |
| 1. DESCRIÇÃO GERAL DA PARCELA  |         |  |            |
| <b>% de cobertura vegetal em relação ao solo exposto:</b>              |         |  |            |
| ( ) <5%    ( ) 5-25%    ( ) 25-50%    ( ) 50-75%    ( ) 75-100%        |         |  |            |
| <b>Presença de cinzas:</b>   |         | <b>% estimada na parcela</b>                       |            |
| <b>Negra:</b> ( ) S ( ) N  | ( ) <5% | ( ) 5-25%  | ( ) 25-50% |
| <b>Branca:</b> ( ) S ( ) N   | ( ) <5% | ( ) 5-25%  | ( ) 25-50% |
| <b>Umidade da vegetação (visão geral pelo verdor):</b>                 |         |  |            |
| ( ) Úmido    ( ) Pouco úmido    ( ) Seco    ( ) Muito seco             |         |  |            |

O diagrama mostra uma parcela quadrada de 15m x 15m. Os pontos de amostragem são marcados por pontos cinza e estão distribuídos em uma grade de 5x5. As cinzas são representadas por retângulos divididos em duas partes: a esquerda para cinza negra e a direita para cinza branca. As linhas de amostragem são indicadas por linhas tracejadas que conectam os pontos de amostragem. Os pontos de GPS são marcados por triângulos e as estacas de delimitação por círculos. As fotos são tomadas nos quatro cantos da parcela, como indicado por 'No foto' nos vértices.

15m

15m

△ Ponto de GPS

○ Estacas de delimitação

● Pontos de amostragem

- - - Trajetos de amostragem

◼ Cinza negra?

◻ Cinza branca?

(frente)

## 2. CARACTERÍSTICAS E DIVERSIDADE DE VEGETAÇÃO NA PARCELA

### 2.1 HERBÁCEAS

Espécie(s) predominante(s) de herbácea(s) (Nº FOTOS): \_\_\_\_\_

Presença da espécie "sempre-viva"? S ( ) N ( ) Núm. total estimado: \_\_\_\_\_

Estado de floração: \_\_\_\_\_

Outros tipos de herbáceas reconhecidos (Nº FOTOS):

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

### 2.2. PRESENÇA DE ARBUSTOS

Núm. tot. no interior da parcela: \_\_\_\_\_ Altura média estimada: \_\_\_\_\_

Tipos de arbustos reconhecidos (Nº FOTOS):

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Marcas de fogo? S ( ) N ( ) Altura das marcas/foto nº: \_\_\_\_\_/ \_\_\_\_\_

### 2.3. ÁRVORES E ARVORETAS

Núm. Tot. no interior da parcela: \_\_\_\_\_ Altura média estimada: \_\_\_\_\_

Diâmetro médio estimado \_\_\_\_\_

Tipos de árvores/arvoretas reconhecidos (Nº FOTOS):

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Marcas de fogo? S ( ) N ( ) Altura das marcas/foto nº: \_\_\_\_\_/ \_\_\_\_\_

## 3. COLETAS

| ID | Nº FOTO | TIPO (solo, biomassa seca, biomassa verde) |
|----|---------|--|
|    |         |  |
|    |         |  |
|    |         |  |
|    |         |  |
|    |         |  |
|    |         |  |
|    |         |  |
|    |         |  |

## 4. OBSERVAÇÕES

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

(verso)

**ANEXO C. Ficha de campo para as parcelas de predomínio de CV arbórea.**

| <b>FICHA DE CAMPO 2 - PARCELAS DE PREDOMÍNIO DE VEGETAÇÃO CILIAR</b>                |  |
|---|--|
| Data: ___/___/_____   | Horário: _____                                     |
| Grupo: _____  |  |
| Localização/parcela: _____  |  |
| ID do ponto de GPS: _____   | Declividade: ( ) Baixa/plana ( ) moderada ( ) alta |
| <i>1. VISÃO GERAL DA PARCELA</i>  |  |
| <u>1.1. REGISTROS FOTOGRÁFICOS</u>  |  |
| <b>Norte</b> _____  | <b>Leste</b> _____                                 |
| <b>Sul</b> _____  | <b>Oeste</b> _____                                 |
| <b>Vertical 1</b> _____   | <b>Vertical 2</b> _____                            |
| <u>1.2 PAR</u>  |  |
| <b>Above</b> _____  | <b>Med. 1</b> _____                                |
| <b>Med. 2</b> _____   | <b>Med. 3</b> _____                                |
| <b>Altura aparente das chamas do último fogo (em metros/foto nº):</b> _____/_____   |  |
| <i>2. AFEIÇÃO AO FOGO POR ESTRATOS</i>  |  |
| <u>2.1. SUBSTRATO</u>   |  |
| - <b>Serrapilheira:</b> ( ) NE ( ) <5% ( ) 5-25% ( ) 25-50% ( ) 50-75% ( ) 75-100%  |  |
| - <b>Cinza negra:</b> ( ) NE ( ) <5% ( ) 5-25% ( ) 25-50% ( ) 50-75% ( ) 75-100%    |  |
| - <b>Cinza branca:</b> ( ) NE ( ) <5% ( ) 5-25% ( ) 25-50% ( ) 50-75% ( ) 75-100%   |  |
| Nº FOTOS _____  |  |
| <u>2.2. HERBÁCEO</u>  |  |
| - <b>% de cobertura:</b> ( ) NE ( ) <5% ( ) 5-25% ( ) 25-50% ( ) 50-75% ( ) 75-100% |  |
| - <b>Altura média estimada:</b> _____   |  |
| Nº FOTOS _____  |  |
| <u>2.3. ARBUSTIVO (até aprox. 5m)</u>   |  |
| - <b>% de cobertura:</b> ( ) <5% ( ) 5-25% ( ) 25-50% ( ) 50-75% ( ) 75-100%        |  |
| - <b>% de cobertura afetada pelo fogo:</b> _____                                    |  |
| <b>Número de indivíduos estimado:</b> _____ <b>Altura média estimada:</b> _____     |  |
| Nº FOTOS _____  |  |
| <u>2.4. ARBÓREO</u>   |  |
| <b>% de cobertura:</b> ( ) <5% ( ) 5-25% ( ) 25-50% ( ) 50-75% ( ) 75-100%          |  |
| <b>% de cobertura afetada pelo fogo:</b> _____                                      |  |
| <b>Número de indivíduos estimado:</b> _____ <b>Altura média estimada:</b> _____     |  |
| <b>Diâmetro médio estimado:</b> _____   |  |
| Nº FOTOS _____  |  |

(frente)

