

Universidade de Brasília – UnB
Instituto de Geociências – IG
Curso de Ciências Ambientais

**ANÁLISE DE SEVERIDADE DE QUEIMADA E CICLO DO CARBONO POR MEIO
DE DADOS HIPERESPECTRAIS**

JOÃO PAULO FERNANDES MÁRCICO RIBEIRO

Brasília/DF
2016

JOÃO PAULO FERNANDES MÁRCICO RIBEIRO

**ANÁLISE DE SEVERIDADE DE QUEIMADA E CICLO DO CARBONO POR MEIO
DE DADOS HIPERESPECTRAIS**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Ciências Ambientais da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Ciências Ambientais, sob orientação do professor Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista

BRASÍLIA/DF
2016

RIBEIRO, João Paulo Fernandes Márcio.

ANÁLISE DE SEVERIDADE DE QUEIMADA E CICLO DO
CARBONO POR MEIO DE DADOS HIPERESPECTRAIS.

Orientação: Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista

50 páginas.

Projeto final em Ciências Ambientais – Instituto de
Geociências – Universidade de Brasília

Brasília – DF, 2016

1. Queimada. 2. Carbono. 3. Sequestro de carbono. 4. Sensoriamento
remoto I. Baptista, Gustavo Macedo de Mello. II. Análise de
severidade de queimada e gás carbônico por meio de dados
hiperespectrais.

JOÃO PAULO FERNANDES MÁRCICO RIBEIRO

**ANÁLISE DE SEVERIDADE DE QUEIMADA E CICLO DO CARBONO POR MEIO
DE DADOS HIPERESPECTRAIS**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Ciências Ambientais da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Ciências Ambientais, sob orientação do professor Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista

Defendida e aprovada em ____ de _____ de _____.

Banca Examinadora formada pelos professores

Prof.º Dr. Gustavo Macedo de Melo Baptista - Presidente
Universidade de Brasília

Prof.º Dr. Pedro Henrique Zuchi da Conceição
Universidade de Brasília

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a minha família por me apoiar e incentivar nos estudos.

Ao querido professor Gustavo, por sua paciência em nos guiar nos caminhos acadêmicos e profissionais, sempre acreditando no nosso potencial.

Ao pequeno, porém fundamental, grupo de pesquisa que se reunia frequentemente para discutir sobre as pesquisas e planos.

Aos colegas e amigos do curso de Ciências Ambientais que firmaram grandes parcerias e amizades ao longo deste período.

A equipe de trabalho do WWF-Brasil, por também auxiliar nos momentos de maior dedicação ao término desse trabalho.

Agradeço também aos dedicados servidores que trabalham de forma a engrandecer o curso.

Deixa estar que eu... que eu sigo em frente.
(Charlie Brown Jr.)

RESUMO

Os incêndios florestais na Amazônia são cada vez mais frequentes por causa da ocupação antrópica, que emite diversos gases e aerossóis para a atmosfera. (ARTAXO et al, 1998). As novas técnicas de sensoriamento remoto auxiliam pesquisas na detecção de áreas queimadas e suas consequências para o meio ambiente. O objetivo deste trabalho é avaliar a severidade de queimada numa região de floresta ombrófila e também a relação entre o índice de vegetação e sequestro de carbono aplicado em imagens hiperespectrais. Utilizou-se imagens do instrumento Hyperion para cenas pré, pós fogo e rebrota. As imagens foram submetidas a correções atmosféricas, diminuição de ruídos e redundância e reescalonamento. Após os pré-processamentos foram aplicados os índices NBR para identificação de severidade de queimada, ICO₂ para conteúdo de CO₂ na coluna de ar adjacente, CO₂Flux para sequestro de carbono e SFDVI para densidade vegetativa. O índice NBR apresentou algumas áreas com alta severidade para o período pós fogo e recuperação da área para o período de rebrota. Para as áreas atingidas com maior intensidade pelas queimadas os valores de sequestro de carbono foram menores e também houve um aumento na quantidade de CO₂ na coluna de ar adjacente ao alvo. O índice SFDVI mostrou-se útil ao diferenciar as nuances das áreas com alta densidade vegetativa como também alto valor de correlação com o índice de sequestro de carbono. Os valores de correlação e regressão linear foram considerados altos, ao comparar com outros estudos e levando em consideração a relação sinal/ruído do sensor.

Palavras-chave: Hiperespectral. Sequestro. Queimada. Carbono. NBR. CO₂FLUX. ICO₂. SFDVI.

ABSTRACT

The fires in the Amazon rainforest that are increasingly frequent due to anthropogenic occupation emit various gases and aerosols into the atmosphere (ARTAXO et al, 1998). New remote sensing techniques helps detecting burned areas and their consequences for the environment. The objective of this work is to analyze the burn severity in an ombrophilous forest region and also the relationship between vegetation index and carbon sequestration applied in hyperspectral images. Hyperion images were used for before, post fire and regrowth scenes. The images were submitted to atmospheric corrections, noise reduction and redundancy. After the pre-processing, the NBR index were used to identify the burn severity, ICO₂ for CO₂ content in the adjacent air column, CO₂Flux for carbon sequestration and SFDVI for vegetative density. The NBR index presented some areas with high severity for the post fire period and recovery of the area for the regrowth period. For the areas hit with more severity by fires the carbon sequestration values were lower and there was also an increase in the amount of CO₂ in the air column adjacent to the target. The SFDVI index was useful in differentiating the nuances of areas with high vegetative density as well as high correlation value with the carbon sequestration index. Correlation and linear regression values were considered high, when compared with other studies and considering signal-to-noise ratio of the sensor.

Keywords: Hiperespectral. Sequestration. Burn. Carbon. NBR. CO₂FLUX. ICO₂. SFDVI.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da cena utilizada para o estudo	21
Figura 2 - Fluxo de pré-processamento dos dados	25
Figura 5 - Resultado do índice NBR para os três períodos, sendo a) para pré fogo, b) para pós fogo e c) para rebrota.....	27
Figura 6 - Valores do índice NBR retirados a partir da aplicação do trasecto para os três períodos	28
Figura 3 - Resultado ICO2. No período pré (a), pós fogo (b) e rebrota (c), respectivamente..	29
Figura 4 - Valores do ICO2 nos três períodos	30
Figura 7 - Resultado do índice SFDVI para os três períodos, sendo a) para pré fogo, b) para pós fogo e c) para rebrota.	32
Figura 8 - Valores da aplicação transecto para os três períodos do índice SFDVI	33
Figura 9 - Resultado do índice CO2Flux para os três períodos., sendo a) para pré fogo, b) para pós fogo e c) para rebrota.	34
Figura 10 - Valores da aplicação transecto para os três períodos do índice CO ₂ Flux.....	35
Figura 11 - Regressão entre os valores de sequestro de carbono e conteúdo de CO ₂	38
Figura 12 - Regressão entre os valores de índice de vegetação e de CO ₂ na atmosfera.....	39
Figura 13 - Regressão entre os valores de sequestro de carbono e graus de severidade de queimada.....	40
Figura 14 - Regressão entre os valores do índice de vegetação e graus de severidade de queimada.....	41
Figura 15 - Regressão entre os valores de conteúdo de CO ₂ e graus de severidade.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 - Avaliação qualitativa da correlação	26
Tabela 3 - Escala de níveis de severidade do NBR	27
Tabela 1 - Índices espectrais utilizados	31
Tabela 5 - Coeficiente de correlação de Kendall (τ_{xy})	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	Fogo na floresta Amazônia e sensoriamento remoto	12
2.2	Dióxido de carbono e sequestro de carbono	13
2.3	Sensoriamento remoto	14
2.3.1	Índices espectrais	15
2.3.1.1	Normalized Difference Vegetation Index – NDVI.....	15
2.3.1.2	Spectral Feature Depth Vegetation Index – SFDVI.....	16
2.3.1.3	Photochemical Reflectance Index – PRI e Scaled Photochemical Reflectance Index – sPRI	16
2.3.1.4	CO ₂ Flux	17
2.3.1.5	Normalized Burn Ratio – NBR	18
2.3.1.6	ICO ₂	18
3	MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1	Área de estudo	20
3.2	Dado de sensoriamento remoto	21
3.2.1	Sensor Hyperion	21
3.2.2	ENVI.....	22
4	MÉTODOS.....	23
4.1	Pré processamento das imagens	23
4.2	Estatística dos dados	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1	NBR – Normalized Burn Ratio	27
5.2	ICO ₂ – Quantidade de CO ₂ na coluna de ar adjacente ao alvo	29
5.3	Aplicação dos índices espectrais	31
5.4	SFDVI – Spectral Feature Depth Vegetation Index	32
5.5	CO ₂ FLUX – Índice de Sequestro de Carbono.....	34
5.6	Correlação entre os índices.....	36
5.7	Regressão entre os índices.....	37
6	CONCLUSÃO.....	43
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Os incêndios florestais na Amazônia, antigamente considerados raros e associados aos fenômenos meteorológicos (TURCQ et al, 1998), passaram a ocorrer com mais frequência por causa das ocupações humanas e mudanças no uso do solo. As alterações, associadas às práticas agrícolas como corte e queima, que muitas vezes se tornam em queimadas descontroladas, são responsáveis pela emissão de gases, partículas de aerossóis (ARTAXO et al, 1998) e também de aproximadamente de 4% a 5% do fluxo anual de carbono para a atmosfera. (NEPSTAD; MOREIRA; ALENCAR, 1999).

Além de auxiliar no estudo do monitoramento da ocupação humana e uso do solo, as novas técnicas de sensoriamento remoto vêm contribuindo cada vez mais na detecção de florestas recém-queimadas (ALENCAR; NEPSTAD; DIAZ, 2006; BROWN et al., 2006). O monitoramento por meio de satélites torna-se uma ferramenta de grande utilidade para mensurar o grau de impacto ocasionado por essas ações.

As queimadas podem ser detectadas por satélites por meio dos focos de calor sobre a superfície terrestre ou pela resposta espectral diferenciada em dados hiperespectrais. Esses dados auxiliam na caracterização da superfície terrestre e na análise de sistemas ecológicos mais complexos. (BAPTISTA, 2006).

A utilização de dados hiperespectrais permite analisar de forma mais precisa a saúde e o vigor da vegetação, a composição mineralógica do solo exposto e dos afloramentos de rochas, entre outras, devido à interação da radiação eletromagnética com as partículas, átomos e moléculas em determinado comprimento de onda. (BAPTISTA, 2006).

O objetivo deste trabalho é analisar, com a utilização de dados hiperespectrais, a severidade de queimada, o comportamento do sequestro de carbono, o conteúdo de carbono na atmosfera e a densidade da vegetação durante três períodos: pré perturbação do fogo, pós perturbação do fogo e rebrota.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fogo na floresta Amazônia e sensoriamento remoto

O fogo na Amazônia é uma das grandes perturbações ao meio ambiente, que anualmente gera impactos com áreas dez vezes maiores que a Costa Rica. (NEPSTAD; MOREIRA; ALENCAR, 1999). As florestas em geral não são consideradas inflamáveis, principalmente durante o período de chuva. Os períodos de seca severa, principalmente associados a eventos climáticos como o “*El Nino*”, são os períodos em que a floresta se torna mais vulnerável a ação do fogo. (NEPSTAD; MOREIRA; ALENCAR, 1999).

Apesar dessas combinações de fatores para a ocorrência do fogo nesse tipo de floresta, a ação do homem tem tornado cada vez mais frequente esse tipo de perturbação. Segundo Nepstad, Moreira e Alencar (1999), o fogo na Amazônia pode ser dividido em três padrões de acordo com sua natureza: queimadas para desmatamento, incêndios rasteiros e queimadas em áreas já desmatada. Observa-se que em todos os padrões, relaciona-se a ação antrópica.

Atualmente não há muitos estudos que demonstram os impactos que a queimada ocasiona na economia. Nepstad, Moreira e Alencar (1999) avaliaram no período da publicação que os custos econômicos por conta dos impactos ocasionados pelo fogo aproximam-se a valores de 100 dólares por ano para pequenas propriedades e 15 mil dólares para grandes propriedades, além de outras perdas como as das plantas medicinais e produtos não florestais, fechamento de aeroportos por conta da fumaça e doenças respiratórias. As perdas ambientais se estendem desde a perda de espécies endêmicas, fragmentação do ambiente, perdas de ecossistemas e distúrbio na dinâmica dos ciclos biogeoquímicos.

Com o crescimento do desmatamento e uso do fogo acelerado, surgiu uma preocupação por parte dos pesquisadores e instituições para monitoramento e estudo dessa problemática. Desde então, o uso de ferramentas de sensoriamento remoto tornou-se indispensável para auxiliar na questão.

Atualmente utilizam-se dados do satélite NOAA com o sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) acoplado. Embora o sensor seja destinado ao monitoramento meteorológico, ele tem sido usado para identificar diariamente os focos de calor na superfície terrestre por meio de softwares específicos. (SETZER; PEREIRA, 1991). Os sensores NOAA são a principal fonte de informação de incêndios utilizados pelo governo.

Embora possuam uma resolução temporal rápida em comparação aos outros sensores, o que o torna bastante útil para monitorar incêndios, o sensor possui limitações que prejudicam o monitoramento, como a sua resolução espacial, a incapacidade de diferenciar pequenos focos na mesma célula, a dificuldade de receber focos de incêndios como os fogos rasteiros e outros apontados por Setzer e Pereira (1991) e Robinson (1989, 1991).

Os satélites Landsat TM e SPOT seguem a lista dos mais utilizados no monitoramento. No entanto apesar de terem boa resolução espacial e abertura para aplicação de índices mais complexos do estudo do fogo, os dados carecem de informações relacionadas a origem do fogo, razão da queima, propriedades atingidas e outros, como menciona Nesptad et al. (1999).

Da mesma maneira, se enquadra o sensor Hyperion, utilizado nessa pesquisa como potencial dado para aplicação de índices de severidade de queimada e de estudos da atmosfera.

2.2 Dióxido de carbono e sequestro de carbono

Os principais ciclos biogeoquímicos do planeta envolvem o carbono, que é um dos elementos principais no planeta Terra. Seus ciclos envolvem desde os básicos com liberação do solo para atmosfera até os ciclos mais complexos como o processo de fotossíntese-respiração. Segundo Ricklefs (2009), a principal fonte de carbono para formação das moléculas orgânicas é o gás carbônico (ou dióxido de carbono - CO_2), presente em pouca quantidade na atmosfera, mas com grande importância.

O CO_2 possui um ciclo compartilhado com vários processos naturais, envolvendo seus principais estoques entre a atmosfera, ecossistema terrestre e também oceanos. De maneira mais simples para compreensão do seu ciclo, o primeiro processo envolve a troca entre o dióxido de carbono da atmosfera e o ecossistema terrestre, seguido da troca entre a atmosfera para o oceano.

Na atmosfera o dióxido de carbono é responsável por compor apenas 0,033% da composição gasosa total. Grande parte da atmosfera é composta por gases como nitrogênio, oxigênio, argônio e vapor d'água. Embora presente em pequena quantidade na atmosfera (PINTO-COELHO, 2000), sua combinação com a ajuda de outros gases como metano, vapor de água e outros, desempenha um importante fator para o efeito estufa na atmosfera. (MENDONÇA; GUTIEREZ, 2000; OLIVEIRA, 2008).

O fenômeno natural do efeito estufa atua como um regulador térmico, aquecendo o planeta por meio do calor absorvido do sol. (BROWN; ALECHANDRE, 2000; MENDONÇA;

GUTIEREZ, 2000), mantendo a temperatura ideal para a vida na terra (D'AMELIO, 2006; DOW; DOWNING, 2007; IPAM, 2002; PACHECO; HELENE, 1990).

Considerado como vilão por muitos pesquisadores e pela mídia, o CO₂ tem ganhado destaque como alvo de pesquisa por conta da sua importância na vida da terra e compreensão nos estudos microclimáticos e dos ecossistemas.

O conceito de sequestro de carbono foi lançado durante o princípio da Convenção do Clima do Protocolo de Kyoto em 1997, com a temática de que os aumentos nas concentrações de gases estufas poderiam aumentar a temperatura colocando em risco os diversos ecossistemas do planeta Terra.

Segundo Barreto, Freitas e Paiva (2009), o sequestro de carbono refere-se a processos de absorção e armazenamento de CO₂ atmosférico. Como forma de amenizar as quantidades desses gases, o sequestro de carbono passou a ser uma alternativa viável de redução dos gases do efeito estufa na atmosfera.

O dióxido de carbono pode ser retirado da atmosfera por meio do crescimento da vegetação. (BAIRD, 2002). O sequestro é observado principalmente em áreas com alto vigor da vegetação, como áreas de rebrota ou espécies com crescimento acelerado. Em comparação com diversas florestas, Renner (2008) afirma que florestas nos trópicos sequestra uma maior quantidade de carbono do que uma floresta temperada.

Os sequestros de carbono armazenado nas plantas podem ser mensurados por meios de cálculos de estimativa de biomassa (REZENDE; MERLIN; SANTOS, 2001) e também levando em consideração informações mais complexas do desenvolvimento da planta, como produção primária bruta e processos fotossintéticos (DIAS, 2010).

Como o vigor da planta pode ser estudado por diversos índices no sensoriamento remoto, esta tornou-se uma importante ferramenta para auxiliar os estudos ambientais, principalmente relacionados a conforto térmico, como observado nos estudos de Terra-Oliveira e Baptista (2015) e comportamento do gás após perturbações ocasionadas pelo fogo como em Ribeiro e Baptista (2015).

2.3 Sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto possui uma ampla definição, na qual pode ser sintetizada como uma forma de obter informação ou dados de um objeto ou alvo sem que haja contato físico.

Logo, é uma ciência bastante utilizada para monitorar e estudar o planeta Terra, seja ela seus fenômenos naturais ou uso e ocupação antrópico. (JENSEN, 2011).

Com os avanços das tecnologias, principalmente nos períodos dos conflitos militares da primeira guerra mundial (NOVO, 2010) e também outros conflitos, esses dados mostraram-se úteis não apenas para uso como auxílio para estratégia de guerra, mas também para estudar e analisar a dinâmica dos recursos naturais. (NOVO, 2010).

A vegetação, por ser um importante recurso, ganha destaque nesta análise, principalmente por se tratar de grandes áreas, na qual muita das vezes torna-se impossível ir a campo para compreender e analisar de maneira periódica sua dinâmica.

2.3.1 Índices espectrais

Como forma de facilitar e obter dados relacionados apenas ao alvo estudado, os índices espectrais foram desenvolvidos, podendo assim ser aplicados em diversos dados obtidos por vários sensores.

2.3.1.1 *Normalized Difference Vegetation Index – NDVI*

O Índice de vegetação por diferença normalizada, conhecido pela sigla em inglês NDVI, é um índice antigo amplamente utilizado e conhecido nas diversas áreas das ciências da terra (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

Como o comportamento espectral das plantas tem como característica um pico nos comprimentos de ondas do infravermelho próximo e uma absorbância nos comprimentos de onda do vermelho, o NDVI, desenvolvido por Rouse et al (1973) consiste na normalização da razão simples para o intervalo de -1 a +1. Essa normalização pode ser realizada por meio da Equação 1.

$$NDVI = \frac{(\rho NIR - \rho red)}{(\rho NIR + \rho red)}$$

Onde:

ρ Nir = reflectância nos comprimentos de onda do infravermelho próximo. Neste caso, utilizado $\rho 0,800 \mu\text{m}$ (micrometros).

ρ Red = reflectância nos comprimentos de onda do vermelho. Neste caso, utilizado $\rho 0,660 \mu\text{m}$.

O resultado da razão normalizada e constituída por uma imagem em tons de cinza e valores variando de -1 a +1. As áreas com vegetações mais densas possuem valores próximo a +1 e são constituídas por tons de cinza claro ou coloração branca. De modo contrário, os valores negativos representam áreas sem vegetação. (JENSEN, 2011).

2.3.1.2 *Spectral Feature Depth Vegetation Index – SFDVI*

O índice SFDVI, proposto por Baptista (2014), baseia-se na integração das bandas de absorção do vermelho e da borda do vermelho (conhecido na literatura como Red Edge). A intensidade da feição é mensurada realizando a subtração dessa integração da média dos picos de reflectância na região do verde com a região do infravermelho próximo. (BAPTISTA, 2014). A equação 2 referente ao índice SFDVI pode ser vista a seguir:

$$SFDVI = \frac{(\rho_{green} + \rho_{NIR})}{2} - \frac{(\rho_{red} + \rho_{re})}{2}$$

Onde:

ρ_{red} = reflectância nos comprimentos de onda do vermelho. Neste caso utilizado $\rho_{0,658 \mu m}$.

ρ_{re} = reflectância nos comprimentos de onda da borda do vermelho. Neste caso utilizado $\rho_{0,709 \mu m}$.

ρ_{green} = reflectância nos comprimentos de onda do verde. Neste caso utilizado $\rho_{0,803 \mu m}$.

ρ_{NIR} = reflectância nos comprimentos de onda do infravermelho próximo. Neste caso utilizado $\rho_{0,555 \mu m}$.

Semelhante ao resultado do NDVI, os valores digitais variam entre -1 e +1 e também possui a imagem resultante em tons de cinza claro para vegetação densa e tons de cinza escuro para áreas sem vegetação.

2.3.1.3 *Photochemical Reflectance Index – PRI e Scaled Photochemical Reflectance Index – sPRI*

O PRI é razão da diferença existente entre a feição de absorção no azul ($0,531 \mu m$) e o pico de reflectância do verde ($0,57 \mu m$) e pode ser correlacionado com a eficiência da luz na fotossíntese. (GAMON; SERRANO; SURFUS, 1997).

O índice de reflectância fotoquímica analisa a produtividade ou estresse das plantas por meio das mudanças dos pigmentos carotenóides na folha. Os pigmentos carotenóides são importantes no estudo da fotossíntese e indicam o uso da luz no processo, ou seja, conforme analisado por Canavesi, Ponzoni, Valeriano (2010), a taxa de CO₂ armazenada nas folhas.

A equação 3 mostra o PRI:

$$PRI = \frac{(\rho_{azul} - \rho_{verde})}{(\rho_{azul} + \rho_{verde})}$$

Onde:

ρ_{Azul} = reflectância nos comprimentos de onda azul. Neste caso utilizado $\rho_{0,531 \mu m}$.

ρ_{Verde} = reflectância nos comprimentos de onda verde. Neste caso utilizado $\rho_{0,57 \mu m}$.

Porém, para evitar valores negativos, o PRI necessita de um reescalonamento para valores positivos e normalização dos dados referente ao vigor da vegetação.

O sPRI pode ser observado na equação 4:

$$sPRI = \frac{(PRI + 1)}{2}$$

2.3.1.4 CO₂Flux

O índice CO₂flux (RAHMAN et al, 2000) mensura a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação (BAPTISTA, 2003; RAHMAN et al, 2001). Para sua determinação é utilizada a integração do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (ROUSE et al, 1973) com o sPRI (Photochemical Reflectance Index reescalado para valores positivos). (GAMON; SERRANO; SURFUS, 1997).

De acordo com Baptista (2003), quanto maior for a atividade fotossintética, ou seja, os valores resultantes do NDVI, maiores serão as feições de absorção nas faixas do azul e vermelho. Integrando esses dois índices é possível medir a eficiência do sequestro de carbono pela vegetação.

O resultado, também em tons de cinza, mostra valores de alto sequestro de carbono para tons de cinza claro e baixo sequestro para tons de cinza escuro.

O índice CO₂Flux pode ser observado na equação 5:

$$\text{CO}_2\text{Flux} = \text{NDVI} \times \text{SPRI}$$

2.3.1.5 Normalized Burn Ratio – NBR

Para identificação da área queimada e a severidade foi utilizado o índice espectral de queimada por razão normalizada NBR. (KEY; BENSON, 2006).

O NBR é um índice semelhante ao NDVI, diferenciando as bandas utilizadas na operação. O NBR determina a escala de severidade da queimada por meio da diferença normalizada entre o pico de reflectância no infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas. (ALLEN; SORBEL, 2008).

O resultado do índice consiste em tons de cinza, com destaque para a área queimada, em tons de cinza escuro, podendo assim diferenciar de maneira mais fácil a área afetada pelo fogo.

A equação 6 mostra o NBR:

$$\text{NBR} = \frac{(\rho_{nir} - \rho_{swir})}{(\rho_{nir} + \rho_{swir})}$$

Onde:

ρ_{NIR} = reflectância nos comprimentos de onda do infravermelho. Neste caso utilizado ρ 0,793 μm .

ρ_{SWIR} = reflectância nos comprimentos de onda do infravermelho de ondas curtas. Neste caso utilizado ρ 0,2635 μm .

2.3.1.6 ICO₂

O índice ICO₂ (BAPTISTA, 2004) é um índice de determinação do conteúdo de CO₂ na coluna de ar adjacente ao alvo. O ICO₂ pode ser determinado por meio da subtração do ponto de

máxima radiância a 2032,35 nm e do ponto de mínima de radiância 2000,00 nm (BAPTISTA, 2004).

O resultado da imagem também é observado em tons de cinza, contudo, de forma oposta ao resultado do CO₂Flux, as áreas com maiores conteúdos de CO₂ apresentam tons de cinza claro, e com menores valores de CO₂ tons de cinza escuro.

Na equação 7, pode ser visto o índice ICO₂:

$$ICO_2 = 2032,35nm - 2000nm$$

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área de estudo deste trabalho localiza-se ao norte de Porto Velho, no município de Candeias do Jamari, no estado de Rondônia. A área está inserida no bioma Amazônia, podendo encontrar florestas do tipo ombrófila aberta, floresta densa e estacional semidecidual. Na figura 1, pode-se observar onde a cena foi capturada.

Segundo a classificação climática de Köppen, o estado de Rondônia possui um clima do tipo Aw – Clima Tropical Chuvoso, com média climatológica da temperatura do ar durante o mês mais frio superior a 18°C e um período seco bem definido durante a estação de inverno, a média anual da precipitação pluvial varia entre 1.400 e 2.600 mm/ano, enquanto a média anual da temperatura do ar varia entre 24 ° e 26°C (SEDAM, 2005).

A prática agrícola e de criação de gado é uma das principais atividades da região. O clima favorece esse tipo de prática, sendo o desmatamento um dos principais problemas ambientais da região.

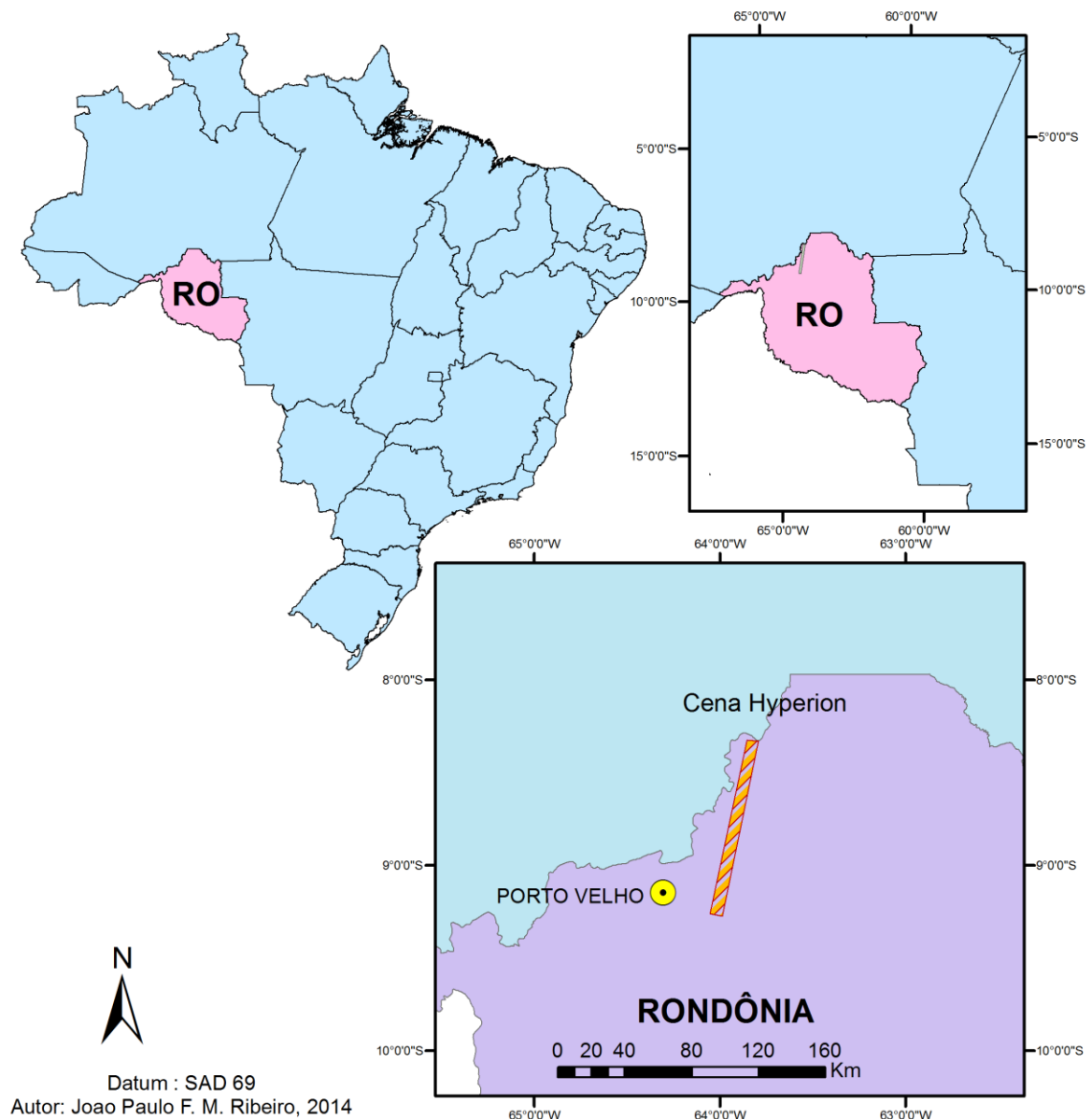


Figura 1 - Localização da cena utilizada para o estudo

3.2 Dado de sensoriamento remoto

Para este estudo, foram utilizados os dados provenientes do sensor Hyperion, que está acoplado no satélite EO-1 (Earth Observing-1) da NASA. Os dados estão disponíveis no website <http://eo1.usgs.gov>, do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS).

3.2.1 Sensor Hyperion

O sensor Hyperion, acoplado no satélite EO-1, foi colocado em órbita com o objetivo de analisar e estudar novas tecnologias do sensoriamento remoto hiperespectral.

Este satélite orbita de maneira circular, sincronizada com o sol, a uma altura de 705 Km ao passar pelo Equador. Viaja no sentido do hemisfério norte para o sul, fazendo 14 órbitas por dia na Terra. Sua resolução temporal é de 16 dias. (LINN, 2008).

O sensor fornece imagens com resolução espacial de 30 m, com largura de 7,5 Km e 100 Km de comprimento (PEARLMAN et al, 2001) e cobre um intervalo espectral de 0,4 a 2,4 μm .

Diferente dos dados mais conhecidos e estudados, como os dos sensores do Landsat, o Hyperion possui 242 bandas, sendo que apenas 196 são radiometricamente calibradas. Devido a complexa dinâmica da atmosfera ou até mesmo por mau funcionamento do sensor, a relação sinal ruído é considerada moderada, contudo, por meio de correções no dado, é possível melhorar o dado.

Embora pouco utilizado no Brasil, principalmente por conta da deficiência das bibliotecas espectrais e outros estudos, pesquisadores brasileiros conseguiram obter boa resposta na diferenciação da densidade da vegetação em floresta ombrófila no Brasil e discriminação de alvos agrícolas. (GALVÃO et al, 2005; SHIMABOKURO et al, 2003; TISOT et al, 2005;). Num trabalho realizado por Schramm e Vibrans (2007), verificaram o uso do sensor no detalhamento de formações florestais em floresta ombrófilas, tendo resultados melhores em relações a dados multiespectrais. (VIBRANS, 2003). Desse modo, estes dados demonstram potencialidade para bons resultados de estudos da vegetação dos diversos biomas do Brasil.

3.2.2 ENVI

O software ENVI, possui vários módulos e ferramentas úteis para a análise e processamento de imagens. Utiliza-se amplamente em análises de cobertura vegetal, agricultura, recursos minerais, meio ambiente, urbanismo e outros. (SULSOFT, 2013). É um software que necessita de uma licença, neste caso providenciada pelo Instituto de Geociências da Universidade de Brasília.

4 MÉTODOS

4.1 Pré processamento das imagens

A primeira etapa do estudo foram as aquisições das cenas. Por se tratar de uma análise temporal relacionado a ação do fogo, o critério de seleção de imagem baseou-se em encontrar cicatrizes de queimada na região da Amazônia. Após encontrar a área queimada, o segundo critério foi buscar imagens referente ao período de rebrota, ou seja, após alguns meses da ação do fogo, e no período pré fogo, período que antecedeu a ação do fogo. Todas as cenas foram avaliadas observando a quantidade de nuvem, a fim de não alterar ou atrapalhar o alvo de estudo. No final, seguindo esses critérios, foram baixadas três cenas, do período de 6 de setembro, 14 de setembro e 7 de dezembro de 2012, correspondendo assim ao período pré fogo, pós fogo e rebrota.

Com base na metodologia utilizada por Pedroza da Silva e Baptista (2013), os dados foram submetidos a uma série de etapas para redução dos ruídos e distorções causados por erro dos sensores ou interferências atmosféricas.

Após a aquisição das cenas, as imagens foram convertidas para o formato BIP (*Band Interleaved by Pixel*), formato que organiza ordenando o primeiro pixel para todas as bandas, de modo sequencial, seguido pelo segundo pixel de todas as bandas, de modo sequencial e assim sucessivamente.

Para a aplicação dos índices CO₂Flux, NBR e SFDVI, foi necessário aplicar o modelo de correção atmosférica FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*). A aplicação do FLAASH tem como intuito atenuar os efeitos atmosféricos nas imagens. O FLAASH possui um complexo algoritmo baseado no modelo de transferência radiativa MODTRAN4 para remoção dos efeitos de espalhamento e absorção atmosférica (FELDE et al, 2003; ITT, 2009). Segundo Kruse (2004), esse modelo fornece uma derivação com base nas propriedades atmosféricas, tais como, albedo da superfície, altitude de superfície, coluna de água, de vapor e de aerossóis e superfície e temperatura atmosférica.

Para tal aplicação é necessário o preenchimento do módulo, como a hora da obtenção da imagem, dados de latitude e longitude, altitude do sensor, utilizado para esse estudo 705 Km, altitude do local de 0,0150 Km, visibilidade de 30 Km e tipo de modelo aerossol rural.

Após essa aplicação, as imagens foram submetidas a uma divisão por dez mil, efetuada pelo modulo *band math*, do software ENVI.

Diferente dos outros índices, as etapas iniciais de pré-processamento para aplicação do índice I CO₂ repete apenas para a conversão do formato BIP. Como o dado deve ser analisado em radiância, não se pode aplicar nenhum modelo de correção atmosférica. Nesse caso, utiliza-se as bandas calibradas no SWIR (bandas 77 a 224) que são multiplicadas por 80, pelo módulo *band math* do software ENVI. Esse método pode ser consultado no Guia do Usuário do Sensor Hyperion (EO-1 User Guide, 2003).

Embora os dados hiperespectrais forneçam um espectro contínuo, eles geram também uma enorme quantidade de dados para processamento, o que pode influenciar a demanda computacional (SILVA, 2014). Deste modo, deve-se atentar a redundância dos dados e também as interferências causadas por ruídos, o que pode comprometer as análises e os resultados do processamento. Como modo de diminuir tal redundância e interferência, aplicou-se o método desenvolvido por Green et al. (1988), *Minimum Noise Fraction* (MNF).

O método MNF foi aplicado nas três cenas, tanto para os índices com correção atmosférica ou transformado para radiância absoluta. Após a aplicação, os dados foram submetidos ao método *Inverse Minimum Noise Fraction*, proposto por Boardman e Kruse (1994), como uma maneira de considerar a ordem inversa da saída das componentes, que conciliava tanto os procedimentos de segregação do componente ruído, quanto a redução da dimensionalidade dos dados. (CARVALHO JÚNIOR et al., 2002).

Na figura 2, pode-se ver um fluxograma com as etapas de pré-processamento.

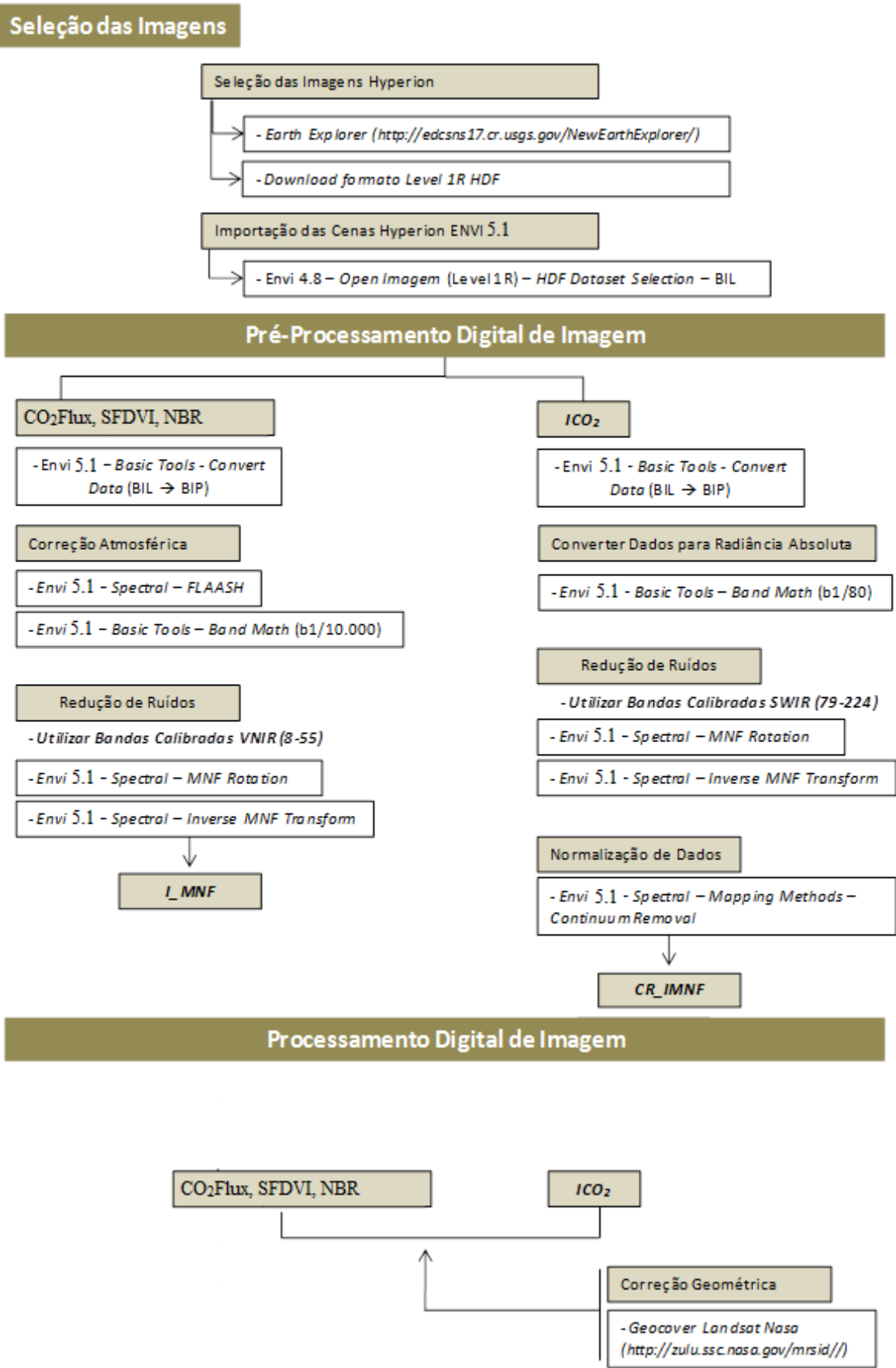


Figura 2 - Fluxo de pré-processamento dos dados
 Fonte: Baseado em Pedroza da Silva, 2014.

4.2 Estatística dos dados

Para determinação da correlação entre os índices aplicados e também para comparar o comportamento dos índices nas diferentes datas, foi aplicado um transecto, iniciando da mata com vegetação densa e ativa, cruzando na região afetada pelo fogo e passando por estradas. O transecto foi aplicado para cada resultado do índice aplicado nas diferentes datas.

Os dados coletados a partir da aplicação do transecto foram submetidos a análise estática, utilizando o aplicativo BioEstat.

Primeiro, para análise de normalidade dos dados, utilizou-se o teste de normalidade de D'Agostino-Pearson para o resultado dos índices em todos os períodos (pré, pós fogo e rebrota).

De acordo com o valor do χ^2 (QUI-quadrado) tabelado igual a 13.816, testou-se a seguinte hipótese: Se K^2 , valor resultante do teste estatístico, for superior ao valor do χ^2 , logo deve-se rejeitar a hipótese nula (H_0), ou seja, os dados não possuem distribuição normal, caso contrário, eles possuem. Os valores do teste de normalidade podem ser observados na tabela 3, na seção de resultados.

Os índices foram correlacionados utilizando o método de coeficiente de correlação de Kendall, utilizado para dados não paramétricos. A avaliação qualitativa do grau de correlação entre as variáveis seguiu o critério proposto por Callegari-Jacques (2003), na qual pode ser visualizada na tabela 2.

Em seguida, avaliou-se a relação entre as variáveis por meio de regressão linear.

Tabela 1 - Avaliação qualitativa da correlação

0 NULA	
0,0 — 0,3 Fraca Positiva	0,0 a -0,3 Fraca Negativa
0,3 a 0,6 Regular ou Moderada Positiva	-0,3 a - 0,6 Regular ou Moderada Negativa
0,6 a 0,9 Forte Positiva	-0,6 a -0,9 Forte Negativa
0,9 a 0,99 Muito Forte Positiva	-0,9 a -0,99 Muito Forte Negativa
1 Plena ou Perfeita Positiva	-1 Plena ou Perfeita Negativa

Fonte: Baseado em Callegari-Jacques (2003).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 NBR – Normalized Burn Ratio

A figura 5 mostra o resultado do índice NBR para os três períodos e suas cores obedecem ao fatiamento dos valores demonstrados na tabela 4.

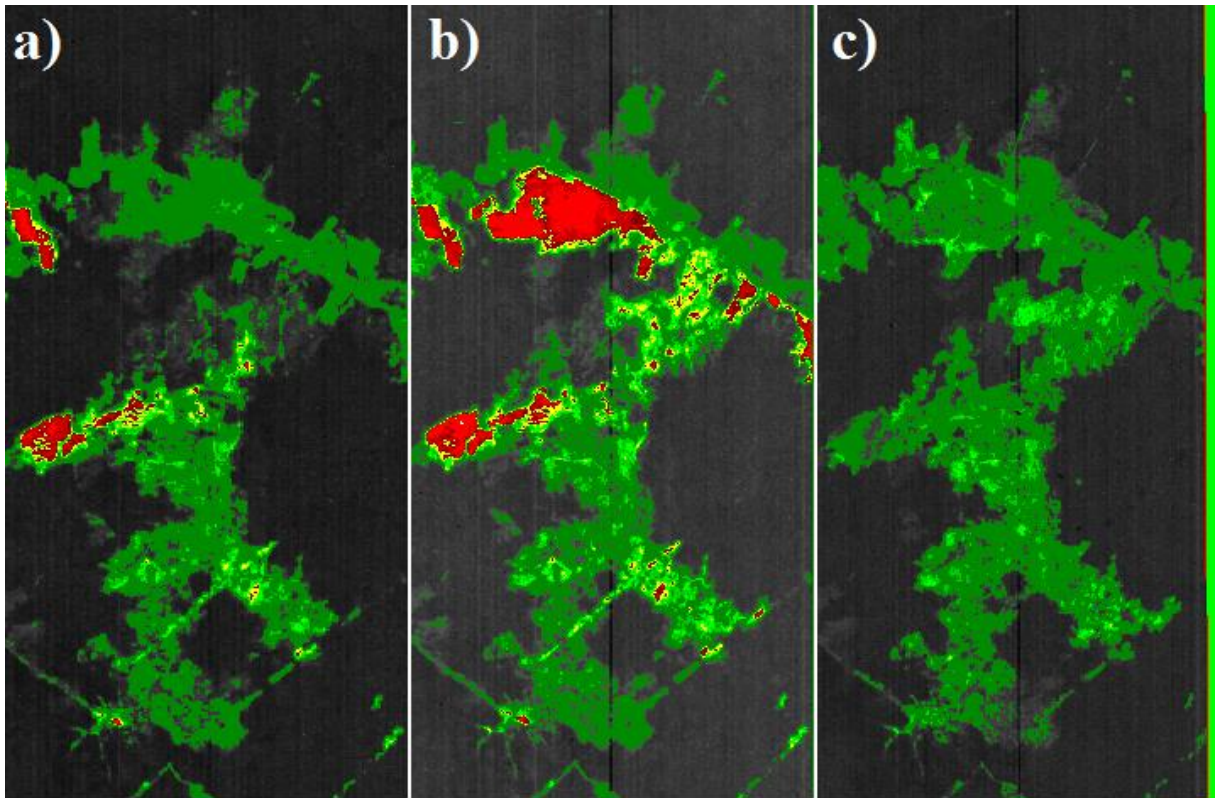









Figura 3 - Resultado do índice NBR para os três períodos, sendo a) para pré fogo, b) para pós fogo e c) para rebrota.

Tabela 2 - Escala de níveis de severidade do NBR

Nível de severidade	Legenda do mapa	Extensão
Alta rebrota		-500 a -250
Baixa rebrota		-250 a -100
Não queimada		-100 a +100
Baixa severidade		+100 a +270
Severidade moderada baixa		+270 a +440
Severidade moderada alta		+440 a +660
Alta severidade		+660 a +1300

Fonte: Baseado em Teobaldo, 2013.

Durante o período pré fogo, observam-se algumas áreas queimadas classificadas em moderada baixa e moderada alta. As demais classes foram classificadas em geral como não queimada ou alta rebrota.

No período pós fogo observa-se um aumento na severidade e também no tamanho das áreas queimadas. As demais áreas também foram classificadas como não queimada ou alta rebrota.

Na imagem referente ao período de rebrota observa-se que as áreas perturbadas pela ação do fogo foram classificadas como alta rebrota e não queimada.

Os valores da aplicação do transecto podem ser observados na figura 6.

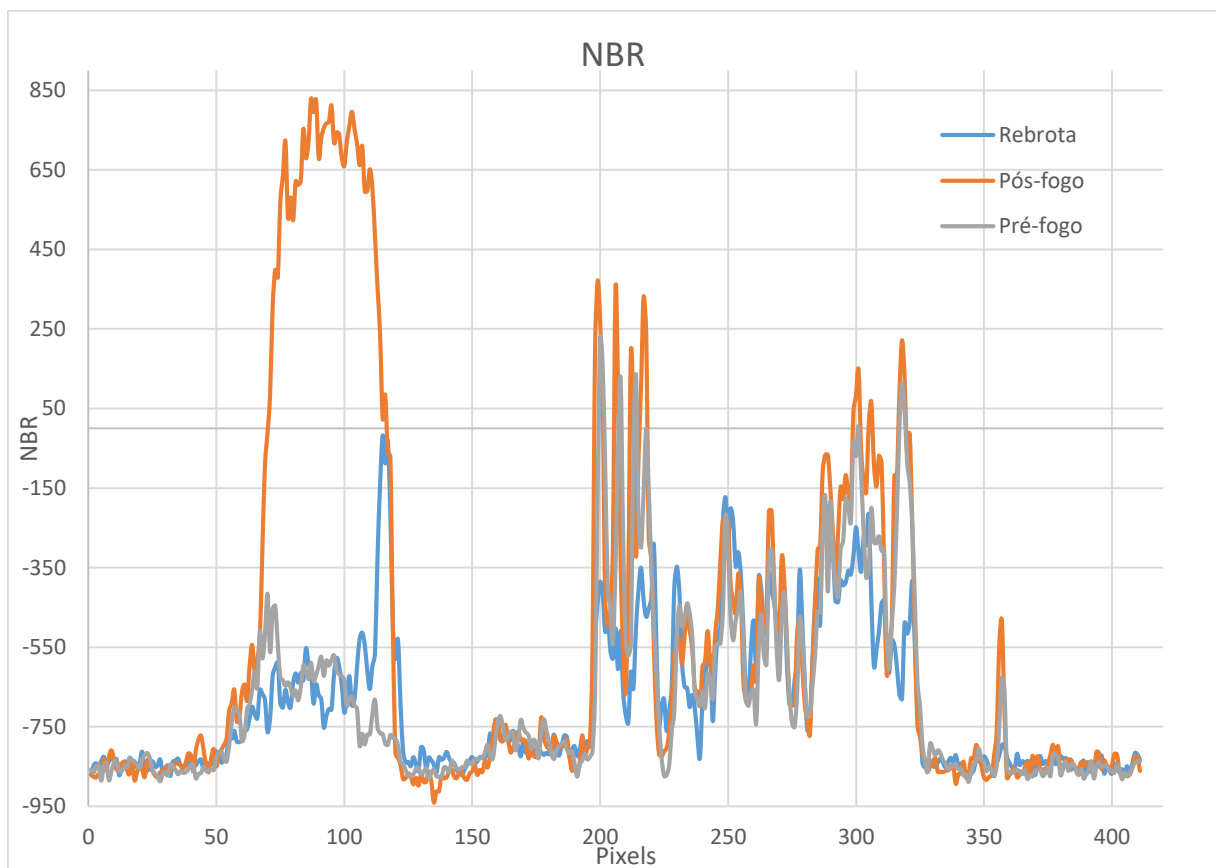


Figura 4 - Valores do índice NBR retirados a partir da aplicação do trasecto para os três períodos

Semelhante ao comportamento do índice ICO_2 , o gráfico possui altos valores no período pós fogo. Essa área cujo possui um pico, foi classificada com maior severidade de queimada. Os outros períodos apresentam comportamentos semelhantes por não sofrerem alterações. A rebrota foi o período que retornou o maior número de baixos valores, indicando uma recuperação da área, ou seja, o crescimento da vegetação.

A área possui acesso facilitado por conta de estradas, o que torna viável afirmar que o fogo foi ocasionado por ação antrópica. As florestas ombrófilas antes imunes a ação do fogo por conta da sua alta umidade (UHL, 1998), torna-se cada vez mais frequente e com alta severidade, tendo em visto a acumulação da grande quantidade de biomassa da floresta.

Outro ponto que deve ser levado em consideração é o fato da área já ter sido degradada antes. No período pré fogo é possível observar áreas classificadas com moderada e alta severidade, e boa parte como rebrota, sugerindo que a área previamente sofreu algum tipo de perturbação. A região de Rondônia possui grande atividade agropecuária representando o décimo lugar nacional na criação bovina (COSTA, 2004). Boa parte das atividades agropecuárias utilizam a queimada como maneira de elevar a qualidade das pastagens (SVEJCAR, 1989), o que explica a ação constante do fogo num período curto e a alta rebrota após um longo período.

5.2 ICO_2 - Quantidade de CO_2 na coluna de ar adjacente ao alvo

A Figura 3 apresenta o resultado do índice ICO_2 , com a aplicação do transceto. Observa-se o resultado da imagem em tons de cinza.

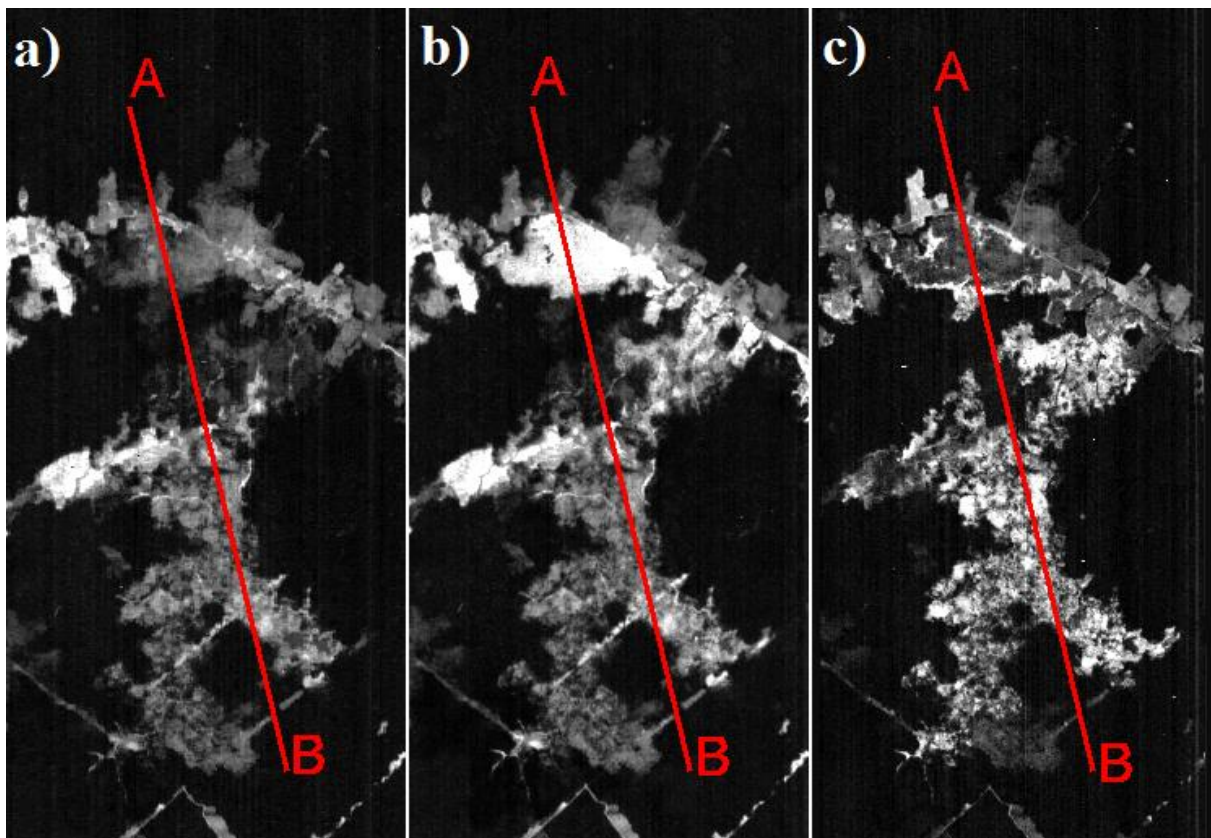


Figura 5 - Resultado ICO_2 . No período pré (a), pós fogo (b) e rebrota (c), respectivamente.

Os tons de cinza escuro ou de coloração preta, representam áreas com baixo valor de CO₂ na atmosfera. Eles estão inseridos em áreas com alta densidade vegetativa, ou seja, nessa área por uma floresta densa.

Os tons de cinza claro e algumas áreas com a coloração branca, representa altos valores de CO₂ na atmosfera. Essas áreas ganham destaque principalmente no centro da imagem, nas quais sofreram algum tipo de perturbação, como no caso a ação do fogo ou as estradas. Percebe-se que as cores brancas ganham destaque na imagem “b” que representa o período pós fogo, indicando que a vegetação antes presente naquela área, após a perturbação, possivelmente liberou o CO₂ armazenado na biomassa para a atmosfera. Já na imagem “c”, há uma diminuição das áreas saturadas pela cor branca, indicando crescimento da vegetação naquela área.

O aumento significativo do CO₂ nessa localização, está associado a queima da biomassa da floresta que antes liberava oxigênio e sequestrava o carbono. Ao submeter-se a queimada, houve uma inversão, sendo o produto da queima o CO₂ armazenado na biomassa agora liberado para a atmosfera (AREVALO; ALEGRE; MONTOYA VILCAHUAMAN, 2002).

Na figura 4 e possível observar os valores do CO₂ durante os três períodos.

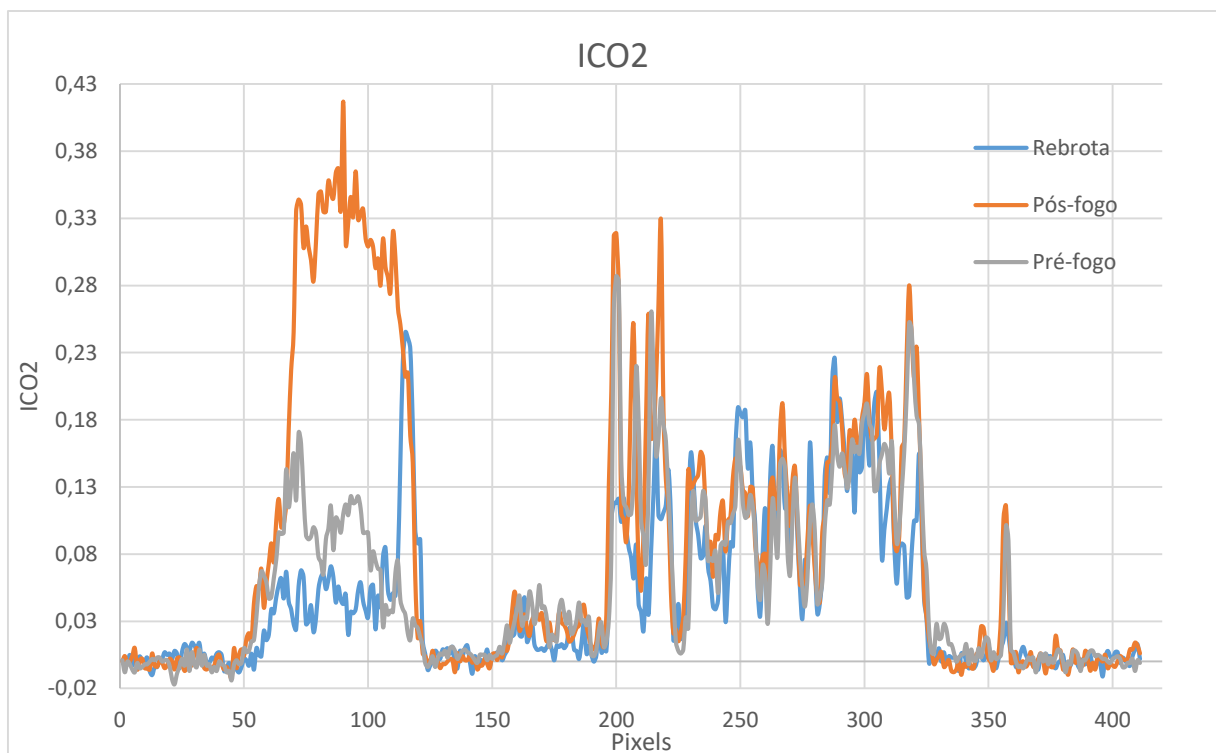


Figura 6 - Valores do ICO2 nos três períodos

Os picos, principalmente destacados no período pós fogo, demonstra que a perturbação nessa localização na qual o transecto cruzou, liberou uma grande quantidade de CO₂, na atmosfera. Já no período de rebrota observa-se uma diminuição nesses valores, inclusive quando comparado com o período antes da perturbação (pré fogo).

Nos estudos referentes a aplicação do ICO₂, Baptista e Munhoz (2009) e Pedroza da Silva e Baptista (2013), associaram os baixos valores encontrados a áreas com alta atividade fotossintética e os altos valores a baixa atividade fotossintética. Como a ação do fogo suprimiu a vegetação do local e liberou o CO₂ acumulado na biomassa, o comportamento do pico de CO₂ durante o período pós fogo pode ser esclarecido ao relacionar com a perturbação e comparação com esses estudos.

5.3 Aplicação dos índices espectrais

O índice utilizado para análise de severidade de queimada foi NBR (KEY; BENSON, 2006). Para análise de sequestro de carbono foi utilizado o CO₂Flux (RAHMAN et al, 2000) e o ICO₂ (BAPTISTA, 2004) para conteúdo de gás carbônico na coluna de ar adjacente ao alvo. O índice SFDVI (BAPTISTA, 2014) foi utilizado para analisar a densidade da vegetação na região.

A tabela 1 indica todas as equações utilizadas, com os respectivos comprimentos de onda do sensor Hyperion.

Tabela 3 - Índices espectrais utilizados

Índices Espectrais	Equação
NBR	$NBR = \frac{(\rho_{0,793} - \rho_{2,635})}{(\rho_{0,793} + \rho_{2,635})}$
ICO ₂	$ICO_2 = R_{\rho_{2,032}} - R_{\rho_{2,000}}$
NDVI	$NDVI = \frac{\rho_{0,800} - \rho_{0,660}}{\rho_{0,800} + \rho_{0,660}}$
PRI	$PRI = \frac{\rho_{0,531} - \rho_{0,570}}{\rho_{0,531} + \rho_{0,570}} \cdot \frac{R_{0,531} - R_{0,57}}{R_{0,531} + R_{0,57}}$
sPRI	$sPRI = (PRI + 1)/2$
SFDVI	$SFDVI = \frac{(\rho_{0,803} + \rho_{0,555})}{2} - \frac{(\rho_{0,658} + \rho_{0,709})}{2}$

CO₂Flux

$$CO_2flux = NDVI * sPRI$$

Fonte: . Elaborado pelo autor.

Após a aplicação dos índices, as imagens foram registradas, para as análises temporais em cada cena.

5.4 SFDVI – Spectral Feature Depth Vegetation Index

Na figura 7 é possível visualizar o resultado da aplicação do índice SFDVI.

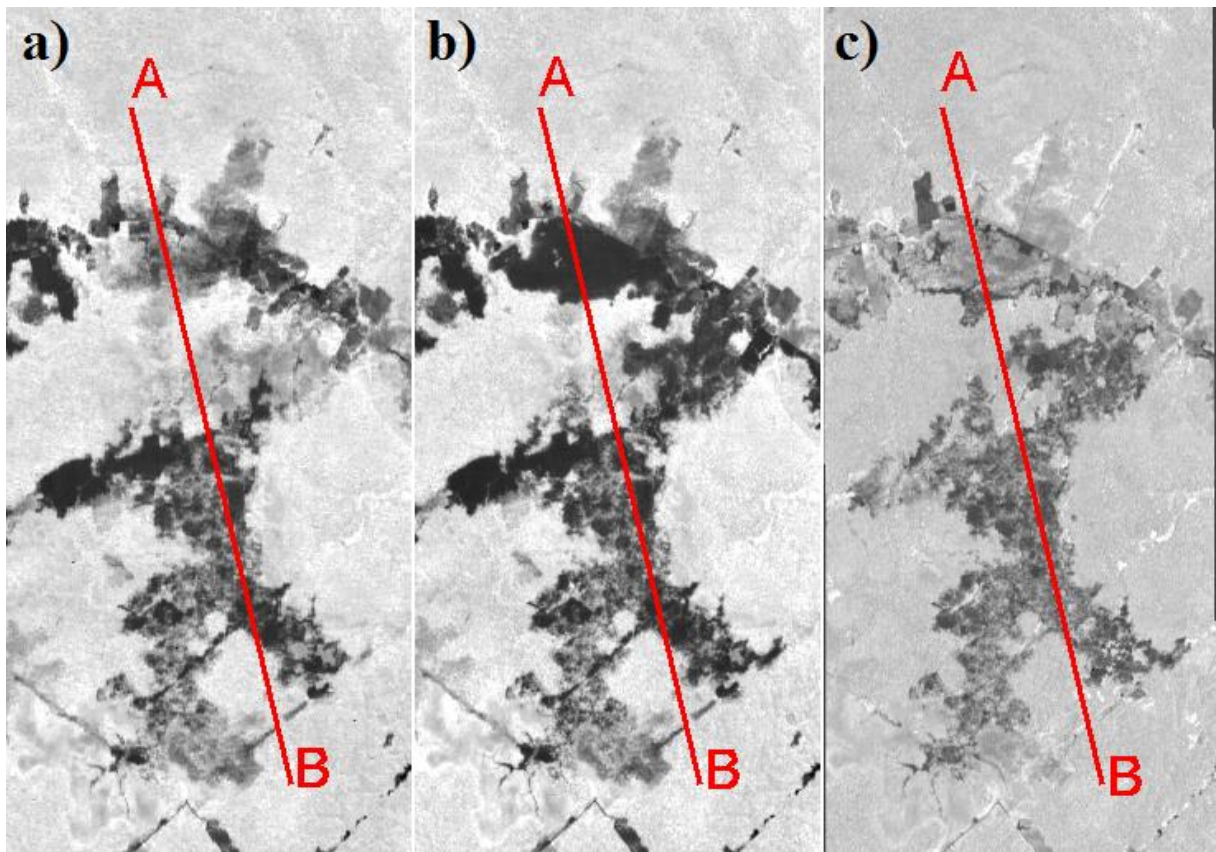


Figura 7 - Resultado do índice SFDVI para os três períodos, sendo a) para pré fogo, b) para pós fogo e c) para rebrota.

O resultado pode ser visualmente interpretado de maneira similar ao índice NDVI. Os tons de cinza claro representam área fotossinteticamente ativas, o que é notado principalmente ao redor da área perturbada, local onde há predominantemente floresta densa. Os tons de cinza escuro representam áreas que não possuem vegetação, concentradas principalmente no centro da imagem com a área degradada ou nas estradas.

No período pré fogo é possível visualizar as manchas de vegetação no interior da área perturbada e sua variação ao longo da floresta, de acordo com a densidade. No período pós fogo observa um escurecimento dessa mancha, principalmente na área afetada com maior severidade da queimada. No período de rebrota, observa-se variações de tons de cinza, sugerindo uma vegetação não muito densa ou em crescimento.

O comportamento dos valores retirados a partir da aplicação do transecto podem ser observados na figura 8.

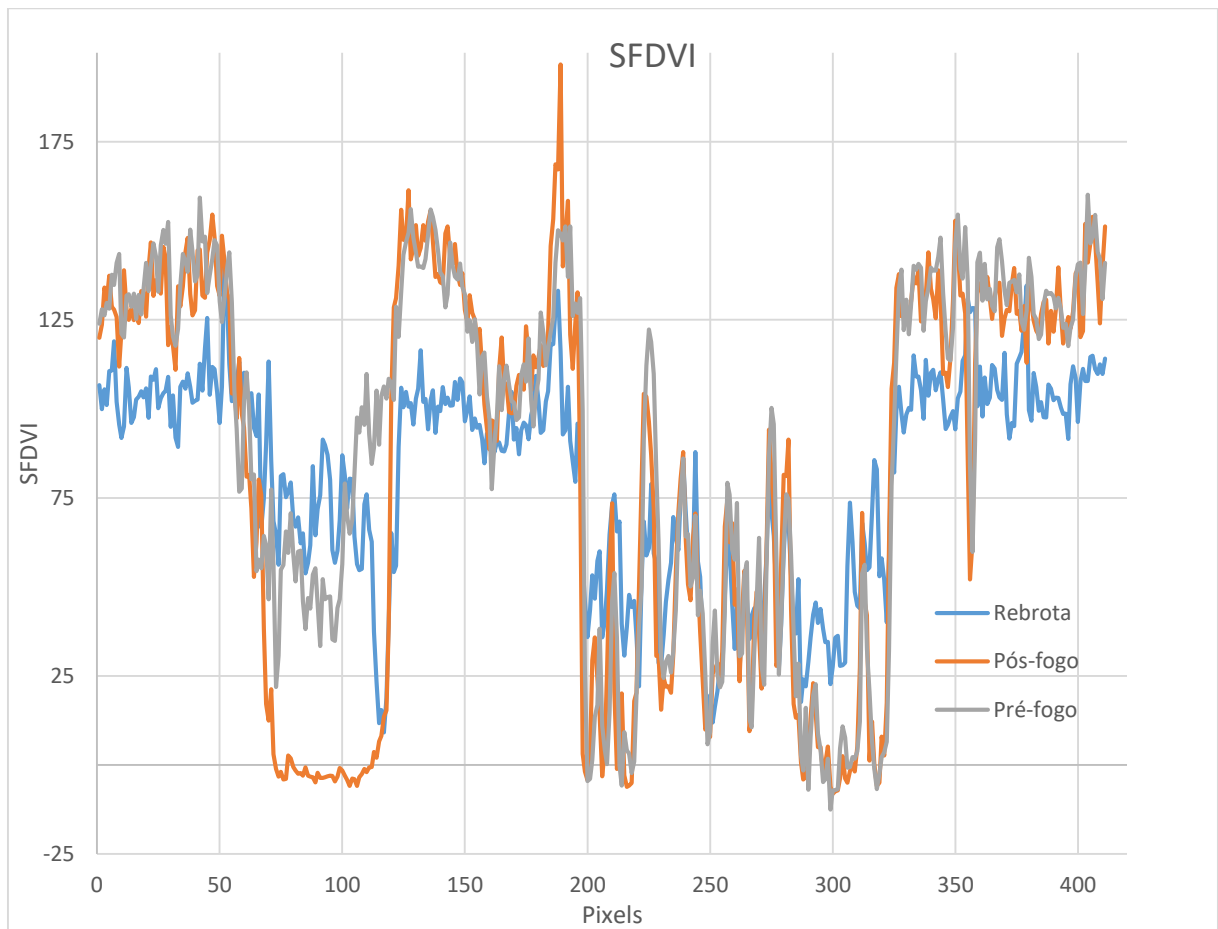


Figura 8 - Valores da aplicação transecto para os três períodos do índice SFDVI

Os valores mais baixos encontrados estão no período pós fogo na região atingida com maior severidade. Os valores de rebrota demonstram ser inferiores antes do período da perturbação. O tempo médio de recuperação das áreas de florestas ombrófilas pela ação do fogo tem uma média de três meses (ALENCAR et al, 1997; NEPSTAD et al, 1999; NEPSTAD et al, 2001). Embora a cena da rebrota tenha ultrapassado esse período médio, os valores demonstram que não houve tempo suficiente para recuperação da área.

O índice mostra as nuances da vegetação podendo diferenciar as áreas com maiores densidades e menores densidades vegetativas. Num estudo realizado por Baptista (2014) utilizando o índice em imagem multiespectral, o índice SFDVI mostrou melhor resultados ao comparar com outros índices de vegetação como o RENDVI e NDVI, que saturam as respostas das áreas arbóreas. O resultado possui melhor visualização da vegetação, mesmo em áreas com grandes densidades vegetativas como a Amazônia.

5.5 CO₂FLUX – Índice de Sequestro de Carbono

A imagem 9 mostra o resultado da aplicação do índice CO₂Flux para os três períodos.

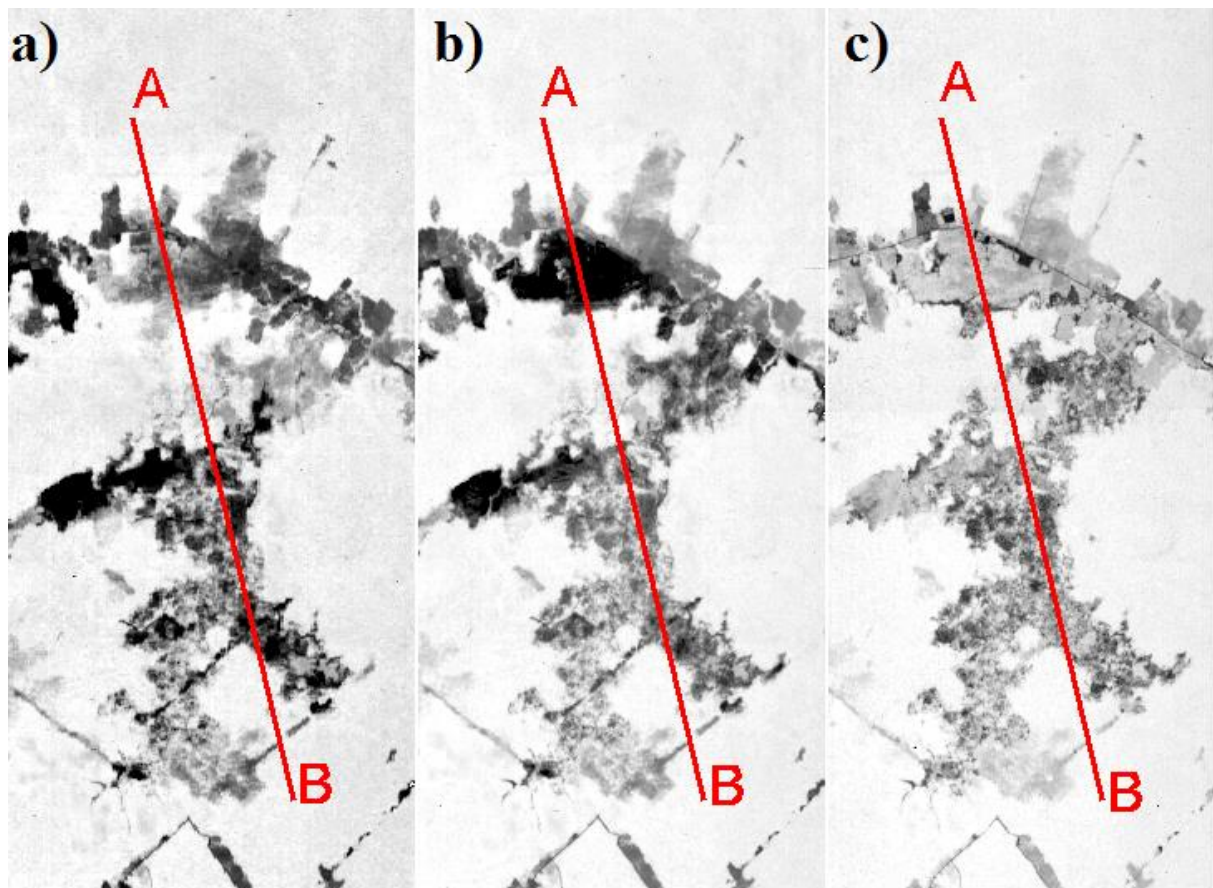


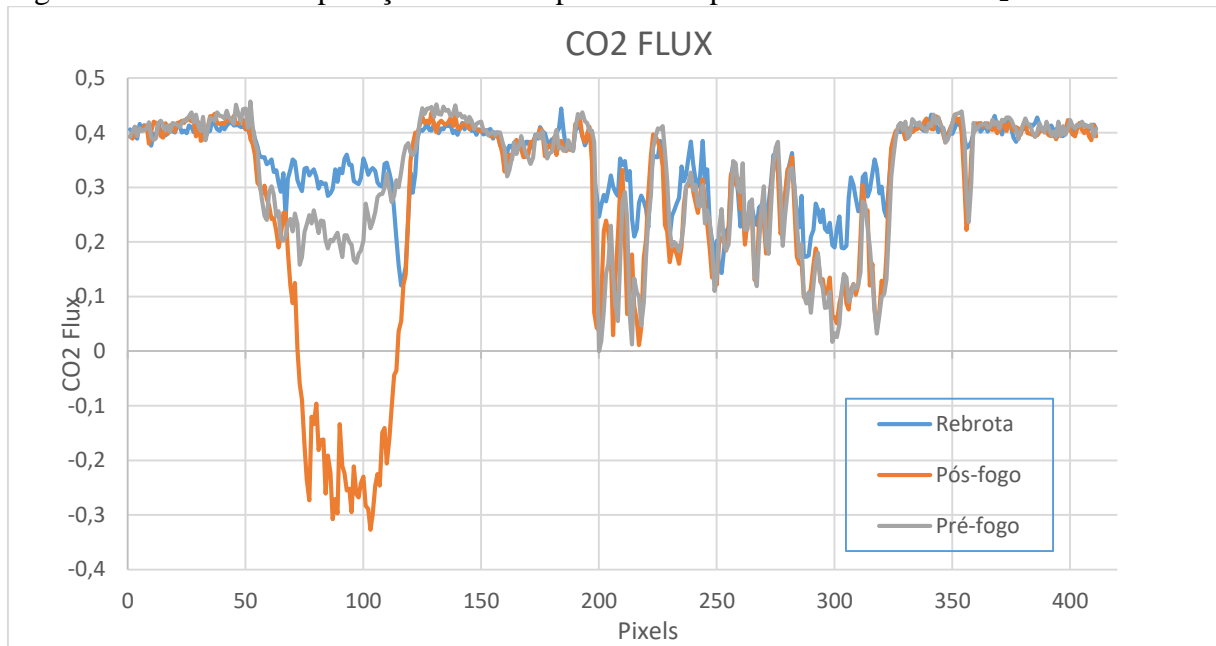
Figura 9 - Resultado do índice CO₂Flux para os três períodos., sendo a) para pré fogo, b) para pós fogo e c) para rebrota.

Semelhante ao resultado do índice SFDVI, os tons de cinza claro representam áreas com maiores atividades fotossintéticas. Os tons de cinza escuro representam áreas com menos atividades fotossintéticas.

É possível observar uma evolução do sequestro de carbono nas três cenas. As cenas referentes aos períodos pré e pós fogo mostram maiores quantidades de pixels em tons de cinza escuro. Na cena “c”, no período de rebrota, observa-se uma diminuição nessa quantidade de pixel.

Na figura 10 é possível compreender o comportamento do sequestro de carbono nos três períodos.

Figura 10 - Valores da aplicação transecto para os três períodos do índice CO₂Flux



Inicialmente para os três períodos os valores são semelhantes. Esta parte do transecto indica área de vegetação densa. O primeiro vale das curvas indica a área degradada, com destaque para a área no período pós fogo, no qual foi atingida com maior severidade.

Os valores do período pré fogo são inferiores ao período rebrota, indicando um crescimento da vegetação e maior sequestro de carbono. Os valores de rebrota também se destacam em outras localidades ao longo da área degradada, principalmente próximo ao pixel valor 300, que nas três cenas possuíam baixos valores e durante esse período houve um acréscimo.

Em estudos na Amazônia com aplicação do índice utilizando o mesmo tipo de dado, também houveram valores próximos 0.45 em áreas com grandes densidades vegetativas. Os menores valores foram encontrados em áreas urbanizadas (PEDROZA DA SILVA; BAPTISTA, 2013). Desse modo, os valores demonstram similaridade com outros estudo e diferenças apenas na área com grande perturbação do fogo.

5.6 Correlação entre os índices

Na tabela três é possível observar os valores para o teste de normalidade entre os índices. Apenas os valores de CO₂Flux para o período pré fogo e rebrota foram inferiores ao valor tabelado de Qui-quadrado (13,816).

Tabela 3 - Resultado do teste de normalidade para os índices nos três períodos. Os valores representam os valores de K²

	CO ₂ Flux	ICO ₂	NBR	SFDVI
Pré-fogo	12.6748	16.541	42.909	15.2494
Pós-fogo	32.7173	15.3497	28.1427	17.6567
Rebrota	12.8269	26.6942	22.1561	11.4068

Os valores resultantes da correlação de Kendall podem ser vistos na tabela 5.

Tabela 4 - Coeficiente de correlação de Kendall (τ_{xy})

	CO ₂ Flux e ICO ₂	CO ₂ Flux e NBR	ICO ₂ e NBR	SFDVI e ICO ₂	SFDVI e NBR
Pré-fogo	-0,7458	-0,7803	0,8194	-0,7525	-0,8116
Pós-fogo	-0,8146	-0,8127	0,8213	-0,7405	-0,7951
Rebrota	-0,7707	-0,765	0,7868	-0,6919	-0,7098

Para a correlação entre os índices de sequestro e conteúdo de CO₂, observam-se valores forte negativos para os três períodos. Esse resultado segue a lógica de serem inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior o sequestro de carbono, menor o conteúdo de CO₂ na atmosfera. O valor possui maior força no período pós fogo, período que houve maior injeção de CO₂ na atmosfera devido a maior severidade de queimada e conseqüentemente diminuição do sequestro, devido a perda da vegetação. Os valores foram semelhantes ao comparar com os resultados encontrados por Rahman et al (2000; 2001), que comparou os dados de CO₂flux com o fluxo de CO₂ nas torres utilizando o sensor hiperespectral AVIRIS.

Na correlação entre o índice CO₂Flux e NBR, os valores resultaram em forte negativos, indicando também a inversão de proporcionalidade nos dois índices. A ação do fogo atua principalmente na vegetação nessas áreas, que são os maiores sequestradores de gás carbono na região. Principalmente no período pós fogo, observa-se maiores valores de correlação, indicando que o aumento da perturbação, ou seja, diminuição da vegetação, diminui também o sequestro de carbono.

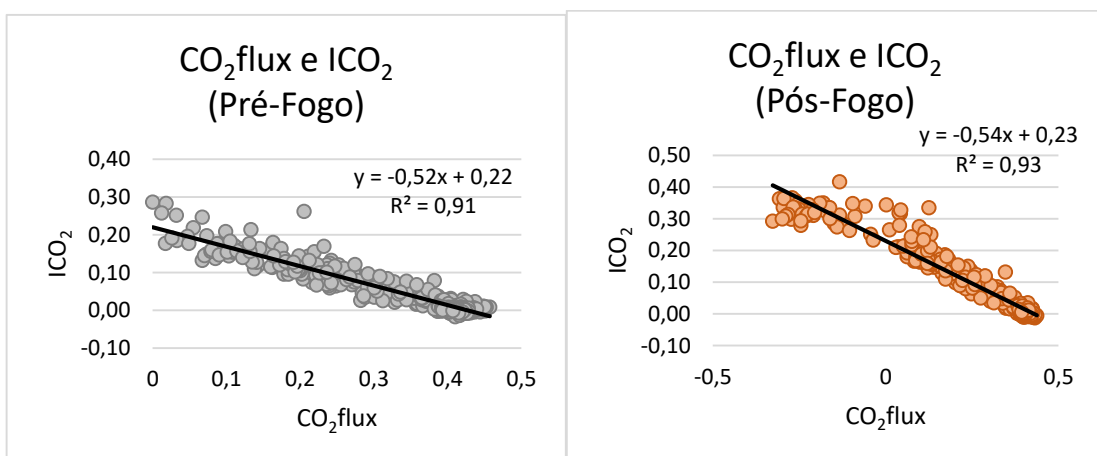
De modo semelhante pode-se comparar os valores dos índices de conteúdo de CO₂ na atmosfera e a queimada. Nesse caso, observam-se valores fortes positivos, indicando que a ação do fogo na vegetação aumenta a quantidade de CO₂ na atmosfera.

O índice de vegetação SFDVI e conteúdo de CO₂ na atmosfera tiveram valores classificados como fortes negativos. De modo semelhante ao índice de sequestro, isso indica que onde há maior densidade de vegetação, há menor quantidade de CO₂ na atmosfera. Os valores são bem maiores ao comparar com o estudo feito por Pedroza da Silva e Baptista (2013), na qual avaliou o sequestro de carbono por meio de dados hiperespectrais e comparou com índices de vegetação como NDVI, EVI (HUETE et al, 1997) e EVI₂. Os valores de correlação foram bem superiores neste estudo, indicando um forte potencial do índice para análises nesse tipo de floresta, mesmo com grandes perturbações.

No caso da correlação entre os índices de vegetação e queimada, observam-se valores fortes negativos, indicando serem inversamente proporcionais. Infere-se que quanto maior a severidade ou perturbação ocasionada pelo fogo há uma diminuição na vegetação.

5.7 Regressão entre os índices

O resultado da regressão linear entre os índices de sequestro de carbono e conteúdo de CO₂ na coluna de ar adjacente ao alvo pode ser observado na figura 11.



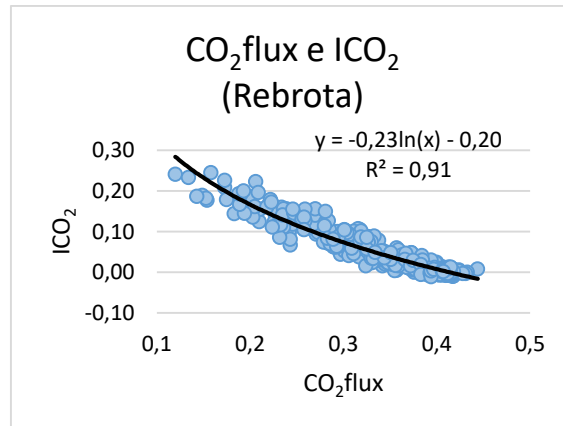


Figura 11 - Regressão entre os valores de sequestro de carbono e conteúdo de CO₂.

O coeficiente de determinação (R^2) significa quanto do sequestro de carbono explica o conteúdo de CO₂ na atmosfera (ICO₂) (Figura 11). Essa correlação teve como resultado valor altíssimo, o que mostra como o sequestro de carbono está ligado ao conteúdo de CO₂ na atmosfera. Embora analisado em outro bioma, Baptista e Munhoz (2009) encontram alto valores de regressão linear ao comparar os dois índices na savana densa ou florestada, que nesse caso, assemelha-se com um comportamento espectral de floresta ombrófila. O alto valor nesse resultado demonstra que apesar da variação sazonal e perturbações, o sequestro de carbono está ligado a quantidade de CO₂ na atmosfera.

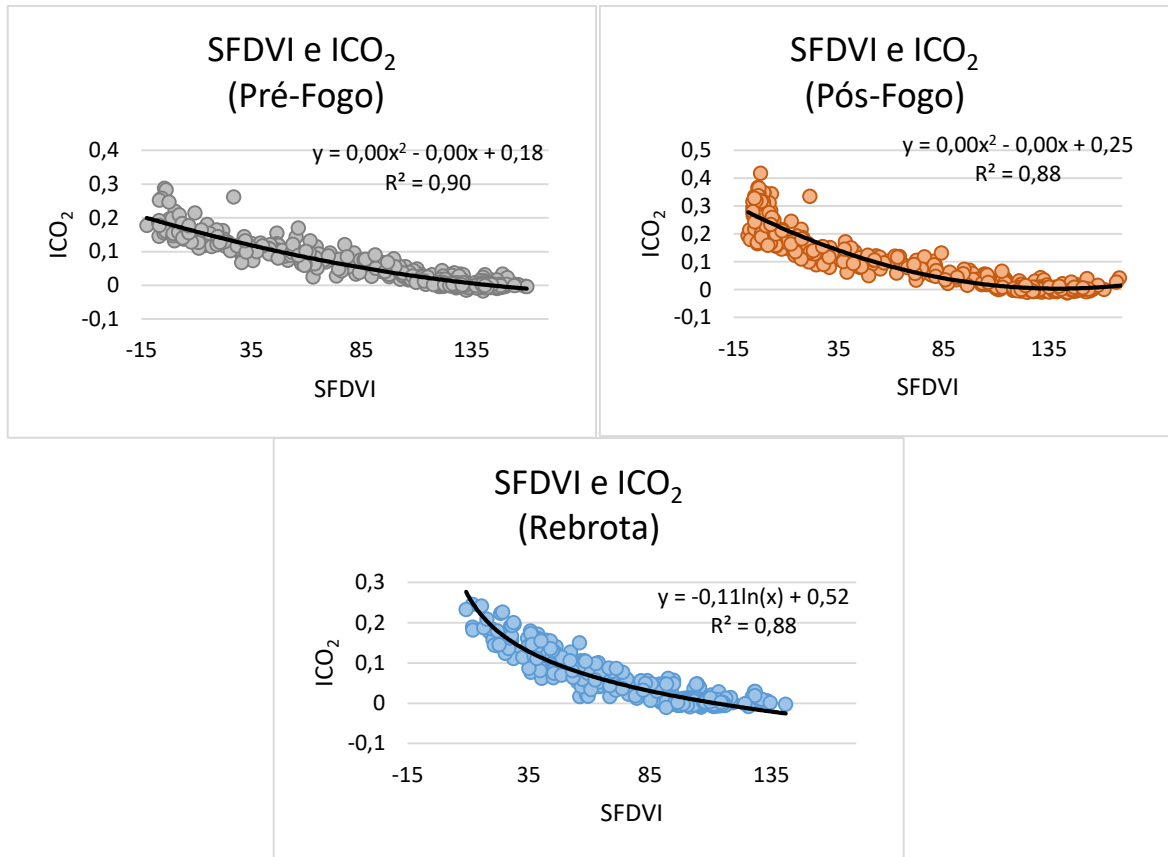


Figura 12 - Regressão entre os valores de índice de vegetação e de CO₂ na atmosfera

No caso da regressão linear entre o índice de vegetação SFDVI e conteúdo de CO₂ na coluna de ar (figura 12), os valores foram altos para os três períodos, também explicando que o índice de vegetação está ligado ao conteúdo de CO₂ na atmosfera, mesmo com as perturbações ocasionadas pela ação do fogo e com o início da rebrota. Outro ponto que deve ser levado em consideração é que apesar do Sensor Hyperion possuir uma relação sinal/ruído moderada, os valores encontrados para regressão mostraram-se altos. Em comparação com o estudo de Silva (2014) na qual realizou uma modelagem de CO₂ com base no sensor Hyperion e nos dados fornecidos pelas torres, o resultado mostrou-se satisfatório, tendo em vista que apesar da aplicação de outros índices de vegetação, os números obtidos na regressão foram superiores ao encontrados no estudo de modelagem.

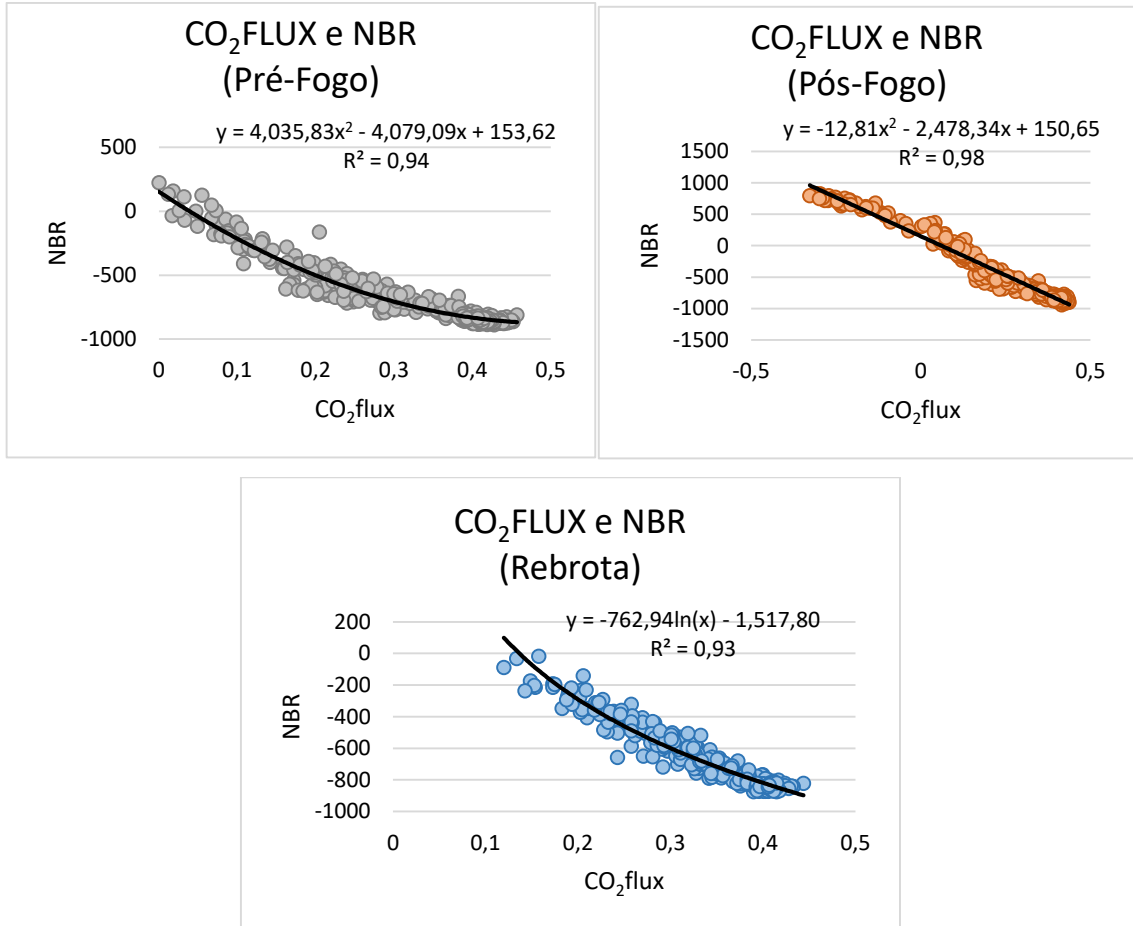


Figura 13 - Regressão entre os valores de sequestro de carbono e graus de severidade de queimada

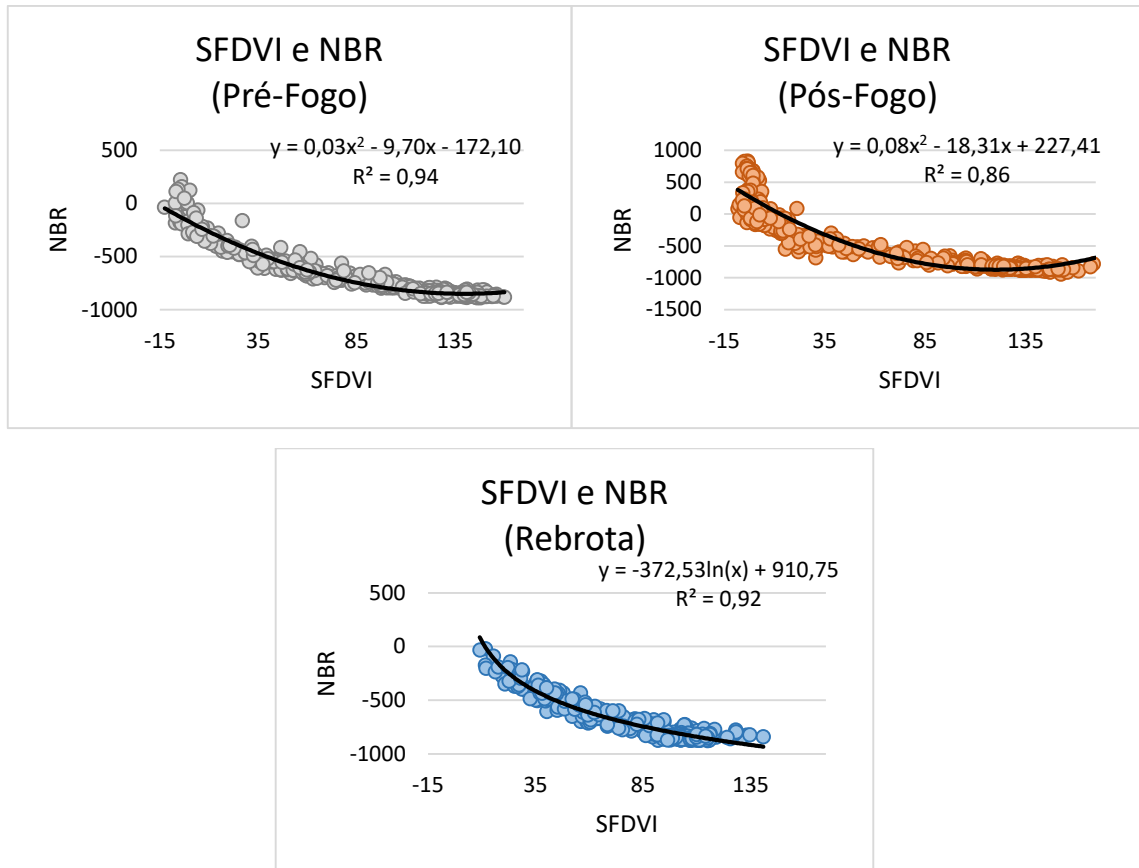


Figura 14 - Regressão entre os valores do índice de vegetação e graus de severidade de queimada

Foram observados altíssimos valores de regressão linear entre o CO_2 Flux e NBR para os três períodos (figura 13). Diferente de outros estudos relacionando índices de queimadas e sequestro de carbono, como observado em Teobaldo e Baptista (2013). Embora o estudo seja aplicado a regiões com bioma Cerrado, Teobaldo e Baptista observam que os aumentos dos valores de regressão estão ligados a homogeneidade da vegetação, o que no Cerrado fica evidente em períodos chuvosos. No caso da região de estudo, por ser do tipo floresta ombrófila, os valores mostram-se coerentes, por ser uma floresta mais homogênea. O mesmo pode ser aplicado para o resultado entre a regressão linear do índice de vegetação e queimada, observado na figura 14.

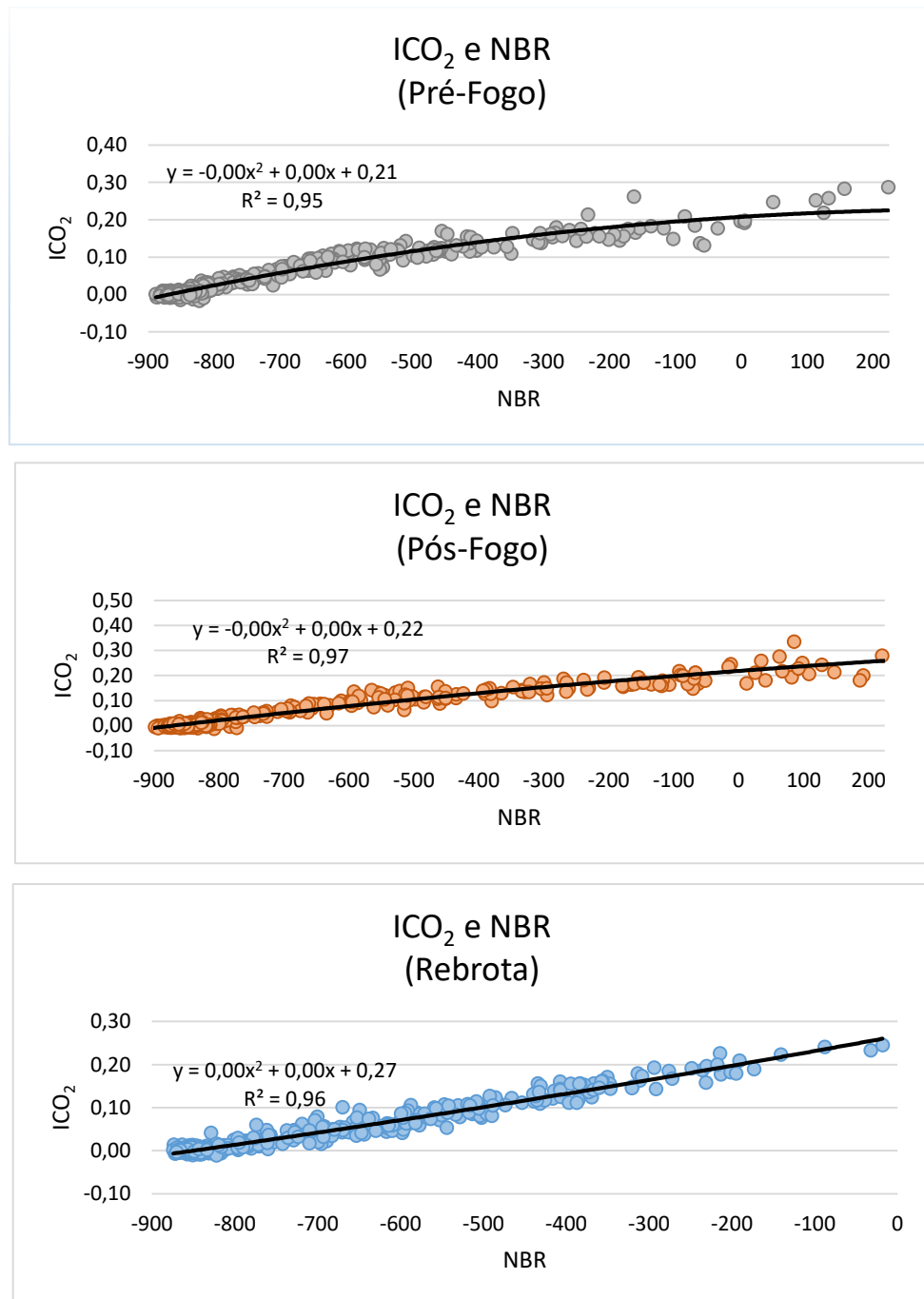


Figura 15 - Regressão entre os valores de conteúdo de CO₂ e graus de severidade.

A regressão linear entre o índice de queimada NBR e o conteúdo de CO₂ na atmosfera (ICO₂), teve valores de coeficiente de determinação altíssimo para os três períodos (figura 15). Embora as variações sazonais, a perturbação ocasionada pelo fogo e a recuperação da vegetação, ou seja, várias variáveis que poderia interferir no resultado, os valores mostraram ser altos.

6 CONCLUSÃO

O resultado da aplicação do índice de severidade de queimada mostrou-se satisfatório, tendo em vista que os valores de fatiamento utilizados por autores puderam ser aplicados e separados de acordo com o grau de severidade. Os métodos estatísticos de correlações e regressões lineares mostrou valores altos ao comparar com índices de conteúdo de CO₂ na coluna de ar atmosférica, sequestro de carbono e de vegetação.

As análises de sequestro de carbono observadas por meio da aplicação do índice CO₂Flux seguiram o padrão lógico observado de acordo com os graus de severidade para o período pré, pós fogo e rebrota. Os valores mostraram altos na área antes da queimada, indicando uma relativa alta taxa de sequestro de carbono. No período pós fogo observou-se baixos valores de sequestro, principalmente nas áreas afetadas com maior severidade. No período de rebrota observa-se maiores valores, principalmente ao comparar com o período pré fogo, indicando como a vegetação em crescimento e um potencial sequestrador de carbono.

O índice de conteúdo de carbono na coluna de ar adjacente ao alvo, observada por meio da aplicação do índice ICO₂, mostrou-se útil nas análises após a perturbação do fogo. Principalmente no período pós fogo, observou-se altos valores no local atingido com maior severidade de queimada, indicando que a vegetação afetada de maneira maior, liberou mais CO₂ para a atmosfera. De modo oposto, no período de rebrota, observou-se menores valores nas áreas com alta rebrota, indicando ao comparar com o índice de sequestro, a interação da vegetação com o gás.

Mesmo com as perturbações e irregularidades da floresta após o período de rebrota, o índice SFDVI mostrou-se útil para diferenciar as nuances da vegetação ao longo dos três períodos estudados, o que seria inviável ao analisar utilizando outros índices de vegetação.

Os resultados de correlação mostraram-se altos em todos os resultados, principalmente quando comparados com outras literaturas, o que demonstra como o dado pode aumentar sua qualidade ao aplicar os métodos de correção e minimização de ruído. Mesmo se aplica para os resultados das regressões lineares.

De maneira geral, embora o sensor tenha um sinal/ruído moderado, as técnicas de pré-processamento para correção e minimização da redundância e ruído mostram-se de grande importância para a qualidade nos resultados, mostrando que o sensor pode ser uma potencial ferramenta para os estudos envolvendo queimadas e análises atmosféricas.

Próximos passos para a pesquisa consiste na validação dos índices aplicados nas florestas brasileiras, tendo em vista que boa parte dos índices foram elaborados em zonas de florestas temperadas. Estudos em relação aos custos e prejuízos ocasionados pelas queimadas também podem ser elaborados a partir da aplicação desses índices, com o intuito de atualizar essas informações.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, A.; NEPSTAD, D.; DIAZ, M. C. V. Forest understory fire in the Brazilian Amazon in ENSO and non-ENSO years: Area burned and committed carbon emissions. **Earth Interactions**. v. 6, p. 1–17, 2006.
- ALENCAR, A. et al. **O uso do fogo na Amazônia**: Estudos de caso ao longo do arco de desmatamento. World Bank Report. Brasília, 1997.
- ALLEN, J. L.; SORBEL, B. Assessing the difference Normalized Burn Ratio's ability to map burn severity in the boreal forest and tundra ecosystems of Alaska's national parks. **International Journal of Wildland Fire**, 05/08/2008. v. 17(4). Disponível em: <<http://www.publish.csiro.au/WF/WF08034>>. Acesso em: 22 nov. 2016.
- AREVALO, L. A.; ALEGRE, J. C.; MONTOYA VILCAHUAMAN, L. J. Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra. **Embrapa Florestas**, 2002. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/308054/metodologia-para-estimar-o-estoque-de-carbono-em-diferentes-sistemas-de-uso-da-terra>>. Acesso em: 22 nov. 2016.
- ARTAXO, P. et al. Large Scale Aerosol Source Apportionment in Amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v. 103 (D24), p. 31.837-31.848, 1998.
- BAIRD, C. **Química ambiental**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.
- BARRETO, L. V; FREITAS, A. C. S; PAIVA, L. C. Sequestro de carbono. **Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v. 07, 2009.
- BAPTISTA, G.M.M. Validação da modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados aviris e hyperion. **Anais XI SBSR**, Belo Horizonte, p. 1037-1044, 2003.
- BAPTISTA, G. M. M. Mapeamento do Sequestro de Carbono e de Domos Urbanos de CO₂ em Ambientes Tropicais, por meio de Sensoriamento Remoto Hiperespectral. **Geografia**, Rio Claro, v. 29, p. 189-202, 2004.
- BAPTISTA, G. M. M. **Sensoriamento Remoto Hiperespectral**: o novo paradigma nos estudos de solos tropicais. Brasília: Universa, 2006.
- BAPTISTA, G. M. M. Spectral Feature Depth Vegetation Index – SFDVI. **Revista Brasileira de Cartografia**. 2014. (Submetido)
- BAPTISTA, G. M. M.; MUNHOZ, C. B. R. Comportamento do sequestro florestal de carbono, do conteúdo de CO₂ atmosférico e do conteúdo de umidade da vegetação no Pantanal de Nhecolândia, MS, por meio de sensoriamento remoto hiperespectral. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XIV, Natal, 2009. **Anais...**, São José dos Campos: INPE, p. 1071-1078, 2009.
- BOARDMAN, J. W.; KRUSE, F. A. Automated spectral analysis: A geologic example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada. In: ERIM - THEMATIC CONFERENCE ON GEOLOGIC REMOTE SENSING, 10, Ann Arbor, MI. **Proceedings**, Ann Arbor: Environmental Research Institute of Michigan, p. I-407 - I-418, 1994.

BROWN, I. F.; ALECHANDRE, A. S. O carbono nos ecossistemas brasileiros. In: MOREIRA, A. G.; SCHWARTZMAN, S. (Eds.). **As mudanças climáticas globais e os ecossistemas brasileiros**. Brasília: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia; The Woods Hole Research Center; Environmental Defense, 2000.

BROWN, I. F. et al. **Monitoring fires in Southwestern Amazonia rain forest**. EOS, Transaction American Geophysical Union, 87 (26), 253- 264. 2006.

CANAVESI, V.; PONZONI, F.J.; VALERIANO, M.M. Estimativa de Volume de madeira em plantios de Eucalyptus spp. utilizando dados hiperespectrais e dados topográficos. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.34, n.3, p.539-549. 2010. Cardozo

CARVALHO JÚNIOR, O. A. et al. Classificação e eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise sequencial da transformação por fração de ruído mínima. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol. 20 (1), 2002.

COSTA, N. L. (Ed.). **Formação, manejo e recuperação de pastagens em Rondônia**. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2004.

D'AMELIO, M. T. S. **Estudo de gases de efeito estufa na Amazônia**. 2006. 178 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energética e Nucleares, Programa de Pós-Graduação em Ciências, na área de Tecnologia Nuclear, São Paulo, 2006.

DIAS, R. R. A. **Modelagem dos estoques de C do solo sob diferentes coberturas na região do cerrado**. 2010. 120f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) -Pós-Graduação em Ecologia do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

DOW, K; DOWNING, T. E. **O atlas da mudança climática: o mapeamento completo do maior desafio do planeta**. Tradução Vera Caputo. São Paulo: Publifolha, 2007.

EO-1 USER GUIDE. **Version 2.3 - 2003, Supporting materials are available**. Disponível em: <<http://eo1.usgs.gov>; <http://eo1.gsfc.nasa.gov>>. Acesso em: 12 set. 2016.

ITT Visual Information Solutions. **Atmospheric correction module: QUAC and FLAASH user's guide**. Version 4.7. Boulder, CO: ITT Visual Information Solutions, 2009.

FELDE, G. W. et al. Analysis of Hyperion data with the FLAASH atmospheric correction algorithm. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), Toulouse, 21–25 July. **Proceedings**. 2003, pp. 90–92, 2003.

GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; TISOT, D. A. **Discriminação De Variedades De Cana-De-Açúcar Com Dados Hiperespectrais Do Sensor Hyperion/EO-1**. Revista Brasileira de Cartografia, n.o 57/01, 2005.

GAMON, J. A.; SERRANO, L.; SURFUS, J.S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. **Oecologia**, vol. 112, p. 492- 501, 1997.

GREEN, A.A. et al. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n. 1, p.65 – 74, 1988.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295-309, 1988.

INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA - IPAM. **Perguntas e Respostas sobre Mudanças Climáticas**. Fundação Biblioteca Nacional, Belém, 2002.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução de José Carlos Neves Epiphânio (Coord.). São Paulo: Editora Parêntese, 2011.

KEY, C. H.; BENSON, N. C. Landscape Assessment (LA). In: LUTES; D.C (Ed.). et al. **FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System**. USDA Forest Service, Rocky Mountains Research Station General Technical Report. 2006.

KRUSE, F.A. Comparison of ATREM, ACORN, FLAASH atmospheric correction using low-altitude AVIRIS data of Boulder, CO, p. 1-10, 2004.

LINN, R. M. **Avaliação dos Modelos de Mistura Espectral MESMA e SMA aplicados aos dados hiperespectrais Hyperion/EO-1 adquiridos na Planície Costeira RO Rio Grande do Sul**. 2008. 153f. Dissertação (Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia – CEPARM, Porto Alegre, 2008.

MENDONÇA, M. J. C.; GUTIEREZ, M. B. S. **O efeito estufa e o setor energético brasileiro**. MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO. IPEA, n.719, Rio de Janeiro, 2000.

NEPSTAD, D. C.; MOREIRA, A.; ALENCAR, A. A. A Floresta em Chamas: Origens, Impactos e Prevenção de Fogo na Amazônia. Programa Piloto para a Proteção das Florestas Tropicais do Brasil, Brasília, Brasil, 1999.

NEPSTAD, D. et al. **Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests**, *Forest Ecology and Management*, v. 154, p. 395-407, 2001.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 4ª edição. Editora Blucher. 2010.

OLIVEIRA, S. M. B. Base científica para a compreensão do aquecimento global. In: VEIGA, J. E. S. (Org). **Aquecimento Global**: frias contendas científicas. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2008.

PACHECO, M. R. P. S.; HELENE, M. E. M. Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO₂. **Estudos avançados**, vol.4, n.9, p. 204-220, 1990. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/eav/article/view/8567>>. Acesso em: 12 set. 2016.

PEARLMAN, J. et al. Overview of the Hyperion Imaging Spectrometer for the NASA EO-1 mission. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, IGARSS '01, IEEE 2001 International, 2001. **Anais ...** v. 7, p. 3036-3038, 2001.

PEDROZA DA SILVA, S. C.; BAPTISTA, G. M. M. Variações na Modelagem do Sequestro Florestal de Carbono por meio de Dados Hiperespectrais na Floresta Nacional do Tapajós, Pará. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR,

- Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2013. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p.8484, 2013.
- PINTO-COELHO, R. M. **Fundamentos em ecologia**. Porto Alegre: Artmed, 2000.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y.E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento Remoto da vegetação**. 2. ed. Oficina de textos. 2012.
- RAHMAN, A.F. et al. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS 61 imagery. In: AVIRIS WORKSHOP. Proceedings. **Anais...** JPL/NASA, Pasadena, Califórnia, 2000.
- RAHMAN, A.F. et al. Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. D24, p. 33,579-33. 2001.
- RENNER, R. M. **Sequestro de Carbono e viabilização de novos reflorestamentos no Brasil**. 2004. 147f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) -Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2004. Disponível em: <http://www.floresta.ufpr.br/defesas/pdf_ms/2004/d387_0560-M.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2016.
- REZENDE, D.; MERLIN, S.; SANTOS, M. **Sequestro de carbono uma experiência concreta**. 2. ed. rev. e ampl. Instituto ecológica.2001.
- RIBEIRO, J. P. F. M; BAPTISTA, G. M. M. **Análise da Severidade de Queimadas na Amazônia por meio de dados Hiperespectrais**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015 (SBSR 2015). Artigos Pag 0095.
- RICKLEFS, R. E. **A Economia da Natureza**. Rio de Janeiro: Guanabara, Koogan, 2009.
- ROBINSON, J. On uncertainty in the estimation of global emissions from biomass burning. **Climatic Change** v.14, p. 243-262, 1989.
- ROBINSON, J. Fire from space: global fire evaluation using infrared remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, p. 3-24, 1991.
- ROUSE, J. W. et al. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: PROCEEDING OF ERTS-1 SYMPOSIUM, NASA, United States, n. 3. p. 309-317, 1973.
- SEDAM. **Boletim climatológico de Rondônia**. Porto Velho: Anual. Brazilian Amazon. Proc. Nat. Acad. Sci. USA. v. 103, p. 12947–12950, 2005.
- SCHRAMM, V. F.; VIBRANS, A. C. Uso de imagens hiperespectrais (EO-1 Hyperion) para detalhamento da detecção das formações florestais na bacia do Itajaí. **Dynamis revista tecnológica**, v. 13, n. 1, p. 5969, 2007.
- SETZER, A. W. E M. C. PEREIRA. Amazonia biomass burnings in 1987 and an estimate of their tropospheric emissions. **Ambio**, v. 20 (1), p. 19-22, 1991.
- SHIMABUKURO, Y. E. et al. Análise dos dados hiperespectrais do EO-1 obtidos sobre a Floresta Nacional de Tapajós no Estado do Pará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

SENSORIAMENTO REMOTO, 11. (SBSR), 5-10 abr. 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. Artigos, p. 1099-1106.

SILVA, S.C.P. **Modelagem espectral para determinação da concentração e fluxo de CO₂ em paisagens naturais e antrópicas na região Amazônica**. 2014. xiv, 173 f., il. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

SVEJCAR, T. J. Animal performance and diet quality as influenced by burning on tallgrass prairie. **Journal of Range Management**, v. 42, n. 1, p. 11-15, 1989.

SULSOFT. Disponível em: <<http://www.envi.com.br/index.php/envi/novidades>>. Acesso em: 15 nov. 2013.

TEOBALDO, D.; BAPTISTA, G. M. M. Quantificação do Grau de Severidade de Queimada em Unidades de Conservação no Distrito Federal por meio dos Índices Espectrais dNBR e RdNBR. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2013.

TERRA-OLIVEIRA, M.; BAPTISTA, G. M. M. **Variações na Modelagem do fluxo de CO₂ na Área Metropolitana de Brasília, por meio de Dados OLI do Landsat 8**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015 (SBSR 2015). Artigos pag 0067.

TISOT, D. A. et al. Dados Hyperion e ETM+ na classificação de alvos agrícolas com diferentes níveis de distinção espectral. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 16-21 abr. 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 439-446.

TURCQ, B. et al. Amazonia rainforest fires: A lacustrine record of 7000 years, **Ambio**, v. 26(2), p. 139-142, 1998.

VIBRANS, A. C. **A cobertura florestal da bacia do Rio Itajaí – elementos para uma análise histórica**. 2003. 240f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

UHL, C. Perspectives on wildfire in the humid tropics. **Conservation Biology**, v. 12, p. 942–943, 1998.