

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM AGROECOLOGIA**

ZÉLIA MARIA NUNES

**USO DE IMAGEM ORBITAL DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL PARA
MONITORAMENTO DE NÍVEIS DE DEGRADAÇÃO FLORESTAL NO
BAIXO CURSO DO RIO MEARIM NO MARANHÃO**

**São Luís – MA
Setembro de 2017**

**ZÉLIA MARIA NUNES
GEÓGRAFA.**

**Dissertação apresentada ao
curso de mestrado do programa
de Pós-Graduação em
Agroecologia da Universidade
Estadual do Maranhão, para
obtenção do título de Mestra em
Agroecologia.**

**Prof. Dr. Christoph Gehring
Orientador**

São Luís, 2017

**USO DE IMAGEM ORBITAL DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL PARA
MONITORAMENTO DE NÍVEIS DE DEGRADAÇÃO FLORESTAL NO
BAIXO CURSO DO RIO MEARIM NO MARANHÃO**

Zélia Maria Nunes

Aprovada em: ____/____/____

Comissão Julgadora:

Dr. Christoph Gehring - Universidade Estadual do Maranhão

Dr. Gabriel Pereira - Universidade Federal de São João Del Rei- MG

Dr. Maurício Eduardo Salgado Rangel - Universidade Federal do Maranhão

Agradecimentos

A Deus, porque “sem Ele nada do que foi feito se fez” (Jo 3.1.b).

A minha família, especialmente minha mãe Aldenira Nunes, meus irmãos e meus sobrinhos, porque sem eles nada seria igual.

A Marcelino Farias, por acreditar em mim, quando nem eu mais acredito, pelos incentivos e pela valiosa amizade.

Ao PPG em Agroecologia na pessoa que para mim melhor o representa: Rayanne Cristina, dizem que ela é a secretária, mas pra mim é bem mais.

Ao meu orientador, professor Christoph Gehring, porque ele me ensinou que nossas diferenças e nossas divergências precisam ser superadas.

A FAPEMA pelos 22 meses de bolsa que me “permitiram” a dedicação exclusiva.

Ao prof. Gabriel Pereira e toda sua equipe, em especial Viviane Valéria e Shayenne Dutra, porque com muito carinho me receberam em seu laboratório e me deram assistência durante o tempo que estive em São João Del Rei - MG.

Ao Núcleo Geoambiental da UEMA, especialmente sr. Jucivan e sr. Elienê pela atenção, pelo estágio no NUGEO e pela paciência.

A Márcio Fernandes, nosso menino gênio, pelas análises estatísticas, pela paciência e pela generosidade.

A Ronildson Luz e Marlon Gomes pela valiosa colaboração em análises estatísticas.

Ao professor Maurício Rangel (UFMA) pela generosa contribuição.

A Wendell Dias, pela generosidade tão rara de encontrar, pela amizade e pela colaboração durante a pesquisa.

A Fabrício Luz, porque nas horas de sufoco acadêmico ele está presente “voluntariamente”, isso é incrível.

Aos colegas da turma de 2015: Jailson Moreira, Caroline Rabelo, Jésus Burgos, Rones Castro, Eduardo Mendonça, Leo Leonel, Marcelo Viana, Henry Reyes, Josilene Dias, Luciana Lins e Hélio Dantas, pelo carinho, pelos incentivos e pelos exemplos.

A Luíz Ernandes, pelas aulas particulares, pelas dicas e pela amizade.

A todos os amigos que fiz “na Agroecologia” que desejo que sejam pra sempre, especialmente: Caroline Rabelo, Jesus Burgos, Luíz Ernandes, Francisneide Lourenço, Ronildson Luz, Raysa Oliveira, Vivian Loc, Stefania Pizon e Neto, pelos momentos de descontrações e de apoio que fizeram com que as exaustivas jornadas se tornassem menos duras.

A todos, gratidão eterna!

A todos que colaboraram de alguma forma.

Dedico

“Porque na muita sabedoria
há muito enfado; e o que
aumenta o conhecimento
aumenta a tristeza.”

Eclesiastes 1.18

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| RESUMO | 10 |
| ABSTRACT | 11 |
| CAPÍTULO I | 12 |
| 1.INTRODUÇÃO GERAL | 13 |
| 1.1 Caracterização e importância da mata ripária | 14 |
| 1.2 Degradação e recuperação da mata ripária | 14 |
| 1.3 Rio Mearim | 16 |
| 1.4 Sensoriamento Remoto | 16 |
| 1.5 Índices de vegetação | 17 |
| REFERÊNCIAS | 18 |
| CAPÍTULO II: RapidEye fails to distinguish different degrees of riparian forest degradation of the Mearim river, eastern periphery of Amazonia | 21 |
| Abstract | 22 |
| Introduction | 22 |
| Methods | 24 |
| Study region and vegetation sampling scheme | 24 |
| Pixel delimitations and attributes | 25 |
| Results and discussion | 27 |
| Distinction of hydrographic zones | 27 |
| Reflectance response in spectral bands and vegetation indices to levels of forest degradation. | 27 |
| Reflectance response in spectral bands and spectral indices to riparian forest biomass and composition | 28 |
| Conclusions | 29 |
| References | 30 |

LISTA DE FIGURAS

- Figure 1 Study area of the lower Mearim river, and location of the 32 transects: 24
MF = mature undisturbed riparian rainforest, WD = weakly degraded tall riparian forests, MD = mid-level degradation secondary forest regrowth, SD = strongly degraded pastures and bushlands.
- Figure 2 Red edge reflectance from aquatic (A), semiaquatic (SA) and *terra firme* (TF) of riparian forests (all degradation levels combined): means +SE, letters refer to the Tukey-Kramer test at the 5% significance-level 26
- Figure 3 Contrasts of VARIgreen and GNDVI in areas with and without forest 27

LISTA DE TABELAS

| | | |
|---------|---------------------------------------|----|
| Table 1 | ln% herbaceous / total aerial biomass | 29 |
| Table 2 | Table 2. ln Biomass of herbaceous | 29 |

RESUMO

A degradação das florestas em todo mundo constitui-se um dos mais graves problemas ambientais à ser enfrentado pelas sociedades, a saúde dos ecossistemas e o bem-estar social, proporcionados pelos bens e serviços ecossistêmicos, estão a cada dia mais ameaçados. Pensar em preservação, conservação e restauração perpassa por entender os processos inerentes à estes e à própria degradação. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi analisar as implicações ambientais causadas pelo desmatamento ciliar no baixo curso do rio Mearim, no Maranhão. Para isso, um primeiro capítulo trouxe uma revisão de literatura focada nos principais conceitos e nas pesquisas atuais com fim de apresentar um panorama da temática. Um segundo capítulo aborda as possibilidades de utilizar as informações de bandas espectrais (Green, Red, Red Edge e NIR) e índices de vegetação (NDVI, NDVI_{re}, VI_{green}) baseados em Sensoriamento Remoto para definir gradientes de degradação florestal, testar a sensibilidade desses em vegetação em zonas hidrográficas (Aquática, Semi Aquática e Terra Firme) e ainda quanto à composição da biomassa florestal. Análises estatísticas (ANOVA e regressão linear) foram realizadas e constatou-se a sensibilidade de NDVI, NDVI_{re} e VI_{green} para definir dois dos quatro níveis de degradação propostos e para diferenciar vegetação em uma das três zonas hidrográficas apresentadas. A reflectância na banda Red Edge apresenta sensibilidade às zonas hidrográficas. Índices e bandas são sensíveis à composição da biomassa florestal.

Palavras-chave: Degradação florestal. Biomassa. Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

Degradation of forests throughout the world is one of the most serious environmental problems facing societies, ecosystem health and social welfare, provided by ecosystem goods and services, are increasingly threatened. Thinking about preservation, conservation and restoration goes through understanding the inherent processes and degradation itself. In this sense, the objective of this work was to analyze the environmental implications caused by ciliary deforestation in the lower course of the Mearim river, in Maranhão. For this, a first chapter brought a literature review focused on the main concepts and current research in order to present a panorama of the theme. A second chapter deals with the possibilities of using spectral bands (Green, Red, Red Edge and NIR) and vegetation indices (NDVI, NDVI_{re}, VI_{green}) based on Remote Sensing to define forest degradation gradients, vegetation in watersheds (Aquatic, SemiAquatic and Terra Firma) and also on the composition of forest biomass. Statistical analyzes (ANOVA and linear regression) were performed and the sensitivity of NDVI, NDVI_{re} and VI_{green} was determined to define two of the four levels of degradation proposed and to differentiate vegetation in one of the three hydrographic zones presented. Red Edge reflectance shows sensitivity to hydrographic zones. Indices and bands are sensitive to the composition of forest biomass.

Key words: Forest degradation. Biomass. Remote Sensing.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

1. INTRODUÇÃO

Matas ripárias são sistemas de extrema importância para o equilíbrio ecológico, pois contribuem para manutenção da biodiversidade (GRAY et al., 2014), oferecem proteção aos corpos hídricos e prestam uma série de serviços ecossistêmicos, entretanto figuram entre os sistemas que mais sofrem degradação e desmatamento no Brasil. O modo histórico de uso e ocupação do solo, que não é uma particularidade do Brasil, mas uma tendência da humanidade, associado aos meios modernos de produção: do espaço, de alimentos e dos bens, fizeram com que em alguns corpos d'água as matas ripárias tenham sido extintas, em outros tenham sido reduzidas e ainda outras sofram processo de degradação em níveis variados.

Embora o Brasil possua legislação específica (Brasil, 2012) que garanta a preservação das matas ciliares, na prática essa proteção não ocorre como esperado e o que se tem são rios, lagos e nascentes com suas APPs devastadas. O rio Mearim é um dos mais importantes rios do estado do Maranhão e sua Área de Preservação Permanente vem sendo suprimida e do que resta, grande parte passa por processo de degradação (SILVA et al., 2017). A rizicultura, a piscicultura e a pecuária são as principais responsáveis pela perda da vegetação nessa área.

Monitorar vastas áreas de vegetação nunca foi uma tarefa fácil, seja pela extensão, pela dificuldade de acesso, ou por falta de recursos, porém o advento e o aprimoramento das técnicas de sensoriamento remoto tem permitido monitorar desmatamento e queimadas, entretanto monitorar degradação florestal continua sendo uma tarefa difícil devido aos diversos fatores envolvidos no processo.

O que se tem até o presente momento são os Índices de Vegetação (IVs) que se relacionam com Índices e Área Foliar e podem ser utilizados para estimar biomassa, ainda assim não foi possível até agora estabelecer gradientes de degradação florestal baseados em IVs e reflectância.

Diante do exposto, esta pesquisa teve como objetivo inferir sobre o estado de conservação da mata ripária no baixo curso do rio Mearim utilizando dados de reflectância e IVs baseados em reflectâncias obtidas por imagens de sensoriamento remoto, bem como apontar as implicações ambientais locais do desmatamento da referida floresta ripária.

1.1 Caracterização e importância da mata ripária

Mata ripária ou mata ciliar é a denominação dada à vegetação que se desenvolve ao longo de cursos d'água. Kageyama et al., (2001) descrevem mata ciliar como aquela característica de margens ou áreas adjacentes a corpos d'água (rios, lagos, represas, córregos ou várzeas) composta por espécies típicas, resistentes ou tolerantes ao encharcamento ou excesso de água no solo.

Matas ciliares são fundamentais para conservação da biodiversidade e influenciam na redução do assoreamento e na qualidade da água e são influenciadas pelos sistemas aquáticos que elas margeiam (CASTRO, 2012).

Inúmeras são as funções atribuídas às matas ciliares, Castro (2012), Kageyama (2001) e Rizzo (2007) são unânimes em categoriza-las como corredores ecológicos ressaltando a importância dessas matas na minimização de impactos ocasionados por lixiviação de defensivos e fertilizantes agrícolas que são carregados para corpos d'água, erosão e assoreamento, entre outros.

Devido à reconhecida importância das florestas ripárias (matas ciliares), esses sistemas são protegidos por lei no Brasil, e o principal instrumento de proteção é o Código Florestal Brasileiro, Lei nº 12.651/2012. Entretanto na prática o que se tem observado é a degradação ou desmatamento dessas matas, embora também seja possível observar pontuais iniciativas de restauração.

1.2 Degradação e recuperação de mata ripária

Degradação florestal é um processo de mudanças dentro da floresta e não deve ser confundido com desmatamento, que por sua vez é a mudança de floresta para não floresta. FAO (2009). Florestas podem permanecer degradadas por longo tempo e nunca se tornarem completamente desmatadas (ANGELSEN, 2008).

De acordo com FAO (2009), para o monitoramento de mudanças durante o processo de degradação, muitas vezes se faz necessário distinguir os níveis da degradação florestal, e que qualquer definição específica que inclua valores limiares, determinará os limites entre floresta não degradada e degradada, e floresta degradada e área desmatada (não floresta), e lembra: medir grau de degradação pode ser complexo devido a natureza multifacetada do processo.

A International Tropical Timber Organization (ITTO) em “Criteria and indicators for the sustainable management of tropical forests”, afirma que indicadores identificam a informação necessária para avaliar e monitorar a mudança tanto na própria floresta, quanto como parte dos sistemas ambientais e de manejo florestal utilizados. E que uma série temporal dos valores de qualquer indicador mensurável ou claramente descritivo pode fornecer informações sobre a direção da mudança (ITTO, 2016).

Bahia (2007) lembra que a degradação das matas ciliares no Brasil acompanha o processo histórico de colonização portuguesa e elenca algumas das principais causas, entre elas: o processo de crescimento desordenado das cidades e o rápido crescimento da agricultura e da pecuária. E segue:

A destruição das matas cria inúmeros problemas como: solos descobertos sujeitos à erosão, reduzindo a fertilidade e a quantidade de solo útil para agricultura, aumentando assim os gastos na produção, assoreamento dos rios, substituindo a água por terra nos seus leitos, o que também diminui a vida útil de barragens e hidrelétricas; risco de secar as nascentes dos rios; aumento das possibilidades de inundações em áreas urbanas e rurais; poluição das águas pela presença de resíduos diversos, carregados diretamente para rios, lagos, barragens e lagoas, tornando a água não utilizável; perda da biodiversidade, com o desaparecimento de plantas e animais importantes para o equilíbrio da natureza, muitos desses, fonte de alimento para o próprio ser humano, como peixes, por exemplo (BAHIA, 2007).

Celentano et al (2016), afirmam que a degradação da floresta ripária na Amazônia oriental brasileira tem grave efeito negativo nas propriedades do solo e nos subsequentes serviços ecossistêmicos. Nunes et al., (2014) constataram que a prática do desmatamento é recorrente em florestas ripárias na região amazônica brasileira.

Para Zelarayán et al (2014), no Maranhão é preocupante a degradação e o desmatamento das florestas ripárias porque essas florestas protegem a água que está se tornando um recurso escasso.

Recuperar matas ciliares pode ser significativamente benéfico considerando que as mesmas são fundamentais para o equilíbrio ambiental não apenas em escala local, mas também em escalas regional e global, pois as florestas em crescimento fixam carbono contribuindo dessa forma com a redução dos gases do efeito estufa. (BARBOSA, 2006).

1.3 Rio Mearim

O rio Mearim é um dos maiores e está entre os mais importantes rios genuinamente maranhenses, com extensão de mais 930 km, pertence a uma bacia hidrográfica que recebe seu nome. Nasce na serra da Menina, próximo a Fortaleza dos Nogueiras, a 650 m de altitude e desemboca na baía de São Marcos, entre São Luís e Alcântara (IBGE, 1997).

De acordo com ISAM (2014), “a Bacia Hidrográfica do Rio Mearim é a maior do estado do Maranhão com área de 99.058,68 km², com população de 1.681.307 habitantes e abrangência em 83 municípios”.

O baixo Mearim estende-se desde Porto Seco das Mulatas à baía de São Marcos onde se bifurca em dois braços que contornam a ilha dos Caranguejos, nesse trecho sua característica principal é a formação de meandros (IBGE, 1997).

A importância do rio Mearim é conhecida desde longa data, Galvão (1955) cita: “na baixada, às bordas do estuário do Mearim, o homem extrai cera de carnaúba, quebra o babaçu, nas "ilhas" de terras mais altas, tenta a lavoura e prepara farinha (seca ou d'água), colhe arroz, milho, algodão, fava e feijão”. Contudo, “a bacia hidrográfica do rio Mearim tem sofrido de modo progressivo e constante [...] não sendo tomadas ações em prol da sua revitalização a levarão à morte”. ISAM (2014).

1.4 Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto pode ser entendido como "tecnologia que permite a aquisição de informações sobre objetos sem contato físico com eles" (SANTOS, 2013). Ou ainda como uma "ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres" (MENESES, 2012).

Para Meneses (2012), a base científica para definir o sensoriamento remoto está nos seguintes preceitos: i) "exigência", trata-se da ausência de matéria no espaço entre o sensor e o objeto alvo; ii) "consequência", entendida como a possibilidade de transporte de informação do objeto pelo espaço vazio; iii) "processo", em que a radiação eletromagnética (única forma de energia capaz de se transportar pelo espaço) é o elo de comunicação entre o objeto e o sensor.

De acordo com Matos e Kirchner, (2008) o sensoriamento remoto tem papel primordial na estimativa indireta de biomassa, utilizando-se de modelos matemáticos em equações desenvolvidas com os valores digitais dos sensores remotos o que diminui custos e tempo em relação a quantificação clássica de biomassa. Para Watzlawick et al., (2009) o avanço no processamento das imagens de satélite tem permitido melhor caracterização da estrutura das florestas e, conseqüentemente de sua biomassa e estoque de carbono.

1.5 Índices de vegetação

Índices de vegetação são formados a partir de combinações de valores espectrais de imagens de satélites, são modelos matemáticos utilizados para indicar vigor da vegetação. De acordo com Gamon et al., (1995) podem ser utilizados como indicadores de biomassa.

Para Ponzoni e Shimabukuro (2009) a aplicação de índices de vegetação deve ser precedida pela transformação dos Números Digitais (NDs) das imagens em valores de reflectância, isto porque segundo esses autores imagens de sensores diferentes ou ainda de um mesmo sensor em diferentes bandas podem não apresentar compatibilidade entre NDs o que impossibilitaria caracterização por NDs.

O *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) é um dos vários índices que existem para o estudo da quantidade de biomassa verde e dos parâmetros de crescimento e desenvolvimento da vegetação. Trata-se de uma das ferramentas geradas por técnicas de sensoriamento remoto empregada em trabalhos que relacionam as informações captadas pelos sensores com a vegetação da área imageada (RIBEIRO, 2012).

O NDVI utiliza a diferença da reflectância entre a faixa do infravermelho próximo (onde a vegetação saudável reflete maior quantidade de luz) e no canal do vermelho, na faixa do visível (onde a vegetação saudável absorve maior quantidade de luz). Os valores do índice variam de -1 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, mais densa é a vegetação e zero está para pixels não vegetados (RODRIGUES, RIBEIRO, VAZ, 2013).

Uma variação do NDVI foi proposta por Gitelson e Merzlyak, (1994) substituindo a banda red pela red edge, o Red Edge Normalized Vegetation Index-

$NDVI_{re} = (RNIR - R_{Red\ Edge}) / (RNIR + R_{Red\ Edge})$. Em 1996 Gitelson et al., (1996) propõem o uso de um índice baseado na relação entre as bandas NIR e Green, o $GNDVI = (Nir - green) / (Nir + Green)$, afirmando que esse índice é mais sensível às variações de clorofila.

Gitelson et al (2002) sugerem um índice que utiliza somente bandas na região do visível para estimar a Fração Vegetação (FV), o $VI_{green} = (R_{green} - R_{red}) / (R_{green} + R_{red})$, após terem comparado o VI_{green} com outros índices incluindo o NDVI, obtendo resposta mais significativa quanto à percepção da fração vegetação.

Índices de vegetação, não são quantidades físicas intrínsecas, embora de fato estejam correlacionados com certas propriedades físicas do dossel da vegetação, como índice de área foliar e biomassa, entre outros. Assim sendo, os índices de vegetação são medidas altamente úteis, apesar das suas limitações (CARLSON, 1997).

2. REFERÊNCIAS

ANGELSEN, A. **Moving ahead with REDD: Issues, options and implications**. CIFOR, (Center for International Forestry Research) Bogor, Indonesia. 2008.

BAHIA. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Semarh. **Recomposição Florestal de Matas Ciliares**. Salvador: Gráfica Print Folhas, 3.ed.rev. e ampl. 2007.

BARBOSA, L.M. **manual para recuperação de áreas degradadas do estado de São Paulo: Matas Ciliares do Interior Paulista**. São Paulo: Instituto de Botânica. 2006.

BRASIL. Código Florestal. Lei nº 12.651 de 25 de maio de 2012.

CARLSON, T. N; Riziley, David A. **On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index**. HEMOTE SENS. ENVIKON. 62: 241-252 (1997).

CASTRO, D.; MELLO, R. S.P.; POESTER, G.C. **Práticas para restauração da mata ciliar**. -- Porto Alegre: Catarse – Coletivo de Comunicação, 2012.

CELENTANO, D. O. E.C; Rousseau, G. X.; Engel, V. L. Marcelo Zelarayán, M.; Elivaldo C. Oliveira, E.C.; Araujo, A. C.M.; Moura, E.G de M. Degradation of riparian forest affects soil properties and ecosystem services provision in eastern amazon of Brazil. **Land Degradation & Development**. 2016.

FAO. **Towards defining forest degradation: comparative analysis of existing definitions**. Forest Resources Assessment Program Working Paper. 154. FAO, Italy. 2009.

GALVÃO, R. Introdução ao conhecimento da área maranhense abrangida pelo plano de valorização econômica da Amazônia. **Revista Brasileira de Geografia, ano XVII. n° 3. 1955.**

GAMON, J.A.; FIELD, C. B.; GOLDEM, M. L.; GRIFFIN, K.L.; HARTLEY, A. E.; JOEL G.; PEÑUELAS, J.; VALENTINI, R. Relationships Between NDVI, Canopy Structure, and Photosynthesis in Three Californian Vegetation Types. **Ecological Applications, Washington, DC, V 5, N 1, P- 28-41,1995.**

GITELSON, A., & MERZLYAK, M. N. (1994). Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves. **Journal of Photochemistry and Photobiology, B: Biology, 22(3), 247–252.** [https://doi.org/10.1016/1011-1344\(93\)06963-4](https://doi.org/10.1016/1011-1344(93)06963-4)

GITELSON, A., KAUFMAN, Y., & MERZLYAK, M. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment, 58, 289–298.**

GITELSON, A. A. et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 76–87, 2002.

GRAY, C. L., Slade, E. M., Mann, D. J., & Lewis, O. T. (2014). Do riparian reserves support dung beetle biodiversity and ecosystem services in oil palm-dominated tropical landscapes? **Ecology and Evolution**. <https://doi.org/10.1002/ece3.1003>

IBGE. **Zoneamento Geoambiental do Estado do Maranhão: diretrizes gerais para o reordenamento territorial**. Salvador 1997. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/recursos_naturais/diagnosticos/maranhao.pdf. Acessado em: 01.2016.

ISAM (Instituto Socioambiental do Médio Mearim) **Proposta para recomposição da mata ciliar do rio Mearim – Pedreiras, 2014**. Disponível em: <http://www.ipades.com.br/publicacoes/COMITE%20DA%20BACIA%20HIDROGRAFICA%20DO%20RIO%20MEARIM.pdf> Acesso em 01.2016.

ITTO. Criteria and indicators for the sustainable management of tropical forests. ITTO Policy Development Series No. 21. International Tropical Timber Organization, Yokohama, Japan. 2016.

KAGEYAMA, P. Y. et al. **Restauração da mata ciliar - manual para recuperação de áreas ciliares e microbacias**. Rio de Janeiro: Semads 2001.

MATOS, F. D, de A.; KIRCHNER, F.F. Estimativa de biomassa da Floresta Ombrófila Densa de terra firme na Amazônia central com o satélite Ikonos II. **FLORESTA, Curitiba, PR, v. 38, n. 1, jan./mar. 2008.**

MENESES, P.R., ALMEIDA, T. de et al. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>. Acesso em 01 de 2016.

PONZONI, Flávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio Edemir. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. 2010. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2010.

RESENDE, R.U. **Programa de Matas Ciliares da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo**. In BARBOSA, L.M et al. **manual para recuperação de áreas degradadas do estado de São Paulo: Matas Ciliares do Interior Paulista**. São Paulo: Instituto de Botânica, 2006.

RIBEIRO, E. A. W. Operações aritméticas com o Spring para o estudo da vegetação. – Presidente Prudente: **Azimute**, 2012.

RIZZO, M. R. A recomposição das matas ciliares – um bom exemplo que vem de Pedro Gomes (MS). Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros – Seção Três Lagoas - MS, V 1 – n.º6 - ano 4, Novembro de 2007.

RODRIGUES, T. S.; RIBEIRO, S. R. A.; VAZ, M. S. M. G. **Avaliação do desempenho de dois Índices de Vegetação (NDVI e SAVI) por meio de Índice de Qualidade de Imagens**. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

SANTOS, A. R dos. **Apostila de sensoriamento remoto**. Universidade Federal do Espírito Santo. Alegre, ES-Brasil, 2013. Disponível em: http://www.mundogeomatica.com.br/SR/ApostilaTeoricaSR/Apostila_Teorica_Sensoriamento_Remto.pdf. Acessado em: 07.2015.

SILVA, R. L da., Leite, M. F. A., Muniz, F. H., de Souza, L. A. G., de Moraes, F. H. R., & Gehring, C. (2017). Degradation impacts on riparian forests of the lower Mearim river, eastern periphery of Amazonia. *Forest Ecology and Management*, **402**, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.07.019>

WATZLAWICK, L.F.; KIRCHNER, F.F.; SANQUETTA, C.R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucaria utilizando imagens do satélite Ikonos II. **Ciência Florestal, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 169-181, abr.-jun., 2009. ISSN 0103-9954.**

ZELARAYÁN, M. L. C., Celentano, D., Oliveira, E. C., Triana, S. P., Sodré, D. N., Muchavisoy, K. H. M., & Rousseau, G. X. (2015). Impacto da degradação sobre o estoque total de carbono de florestas ripárias na Amazônia Oriental, Brasil. *Acta Amazonica*, **45**(3), 271–282. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201500432>

CAPÍTULO 2

RAPIDEYE FAILS TO DISTINGUISH DIFFERENT DEGREES OF RIPARIAN FOREST DEGRADATION OF THE MEARIM RIVER, EASTERN PERIPHERY OF AMAZONIA

Submetido à revista: **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**

RapidEye fails to distinguish different degrees of riparian forest degradation of the Mearim river, eastern periphery of Amazonia

Running title: Remote sensing of riparian forests

Abstract

This study evaluates the RapidEye images in distinguishing different types of riparian forests of the lower Mearim river, eastern periphery of Amazonia. We cover four degradation levels (ranging from intact mature riparian forests to degraded pastures) and three hydric zones (aquatic, semiaquatic and terra firme). For this purpose, we take advantage of georeferenced field data on aboveground biomass and vegetation composition in 32 riparian forest transects was used (published in Silva et al., 2017), and associate pure-pixel (i.e. pixels entirely within a hydrographic zone) spectral data and vegetation indices obtained from RapidEye image of May 2011 (end of rainy season) with the field truth. Our results indicate that RapidEye precisely differentiates between the three hydrographic zones, but all spectral bands and common indices fail to relate to riparian forest biomass and to differentiate between the four degradation levels and only weakly differentiates between tall forests and degraded pastures. We also did not detect any significant relationships between any spectral band or index and riparian vegetation composition (i.e. legume biomass or biomass shares on *terra-firme* or of characteristic ‘aninga’ (*Montrichardia* sp., Araceae) in the aquatic zone, with the only exception of herbaceous / gramineous vegetation.

Keywords: forest degradation; hydric zones; remote sensing; spectral bands; vegetation composition.

Introduction

Riparian forests are considered priority ecosystems because the provision of wide range of functions and ecosystem services, the influence in quality and quantity of water (Souza, Fonseca, Libório, & Tanaka, 2013), the retention of large carbon stocks (Zelarayán et al., 2015, Souza et al., 2016), and also the riparian forests are primordial for the survival of traditional populations (Castro, 2012). Therefore, riparian forests are

specially protected by law in Brazil (Federal law No. 12.651 / 2012). However, riparian forests are threatened by deforestation pressure and degradation (Silva et al., 2017), with serious negative effects on soil properties and subsequent ecosystem services (Celentano et al., 2016), causing great socioeconomic and environmental damage (Zelarayán et al., 2015).

The monitoring of vegetation by remote sensing has been widely used since the second half of the last century (Tucker, 1979; Gamon et al., 1995) The obtaining of physical-chemical as well as biological information from large areas of the earth's surface is possible by combining new satellites with operational products and advances in remote sensing techniques (Pereira et al 2010).

Reflectance of vegetation in the spectral bands is not enough to characterize it, since the solar radiation varies with time and atmospheric conditions, though the combination of several spectral bands to form the vegetation indices can help to solve this problem (Jackson & Huet, 1991), enabling to infer in biophysical characteristics such as foliar area and biomass indices (Myneni et al., 1997; Gitelson et al., 2003; Kross et al., 2015). Over the past 40 years, a significant number of spectral indices have been proposed, focusing on precision agriculture.

The normalized difference vegetation index (NDVI) is widely used worldwide (Kross et al., (2015); Araújo et al., (2010); Le Maire et al., 2011; Borowik et al., 2013, Fensholt, Proud, 2012). NDVI is the ratio between near infrared (NIR) and red band in the visible region, and was proposed by Rouse et al., (1973).As an alternative to the NDVI, Gitelson and Merzlyak, (1994) presented the Red Edge Normalized Vegetation Index (NDVI_{re}), which constitutes in the ratio between the NIR and red edge bands. The red edge presents the advantage of being sensitive to specific plant species. Gitelson et al., (1996) propose the use of an index based on the ratio between the NIR and Green bands (GNDVI), stating that this index is more sensitive to chlorophyll variations. Gitelson et al., (2002) also propose VI_{green}, that is the ratio between green and red wavelengths to estimate distinct vegetation fractions, supposedly with better results for vegetation characterization than other indices such as NDVI. So far no spectral index that is efficient to detect gradients of forest degradation is found.

Thus, this paper discusses the sensitivity of spectral indices (NDVI, NDVI_{re}, GNDVI and VI_{green}) and reflectance in the blue, green, red, red edge and NIR bands to monitor riparian forest status (biomass and functional composition as a function of anthropogenic degradation and different hydric zones) in the lower course of the

Mearim River, eastern periphery of Amazonia, Brazil.

Methods

Study region and vegetation sampling scheme

The study region is part of the lower course of the Mearim river between the coordinates 3°31'31.76"S / 44°50'13.39"W and 3° 24'45.49"S / 44°47'56.75"W, located at the eastern periphery of Amazonia, in the north of the Maranhão state, Brazil, (figure 1), encompassing the municipalities of Arari and Vitória do Mearim. The region is a fluvial-marine plain, with an Aw (two distinct season, a 7 months rainy season and 5 months dry season) climate according to Köppen classification, presenting average temperatures above 18° and a rainy period (January to July) and a dry period (August to December) (IBGE, 2002). Terrain is flat and low-lying (approx. 3–9 m a.s.l.), the soils are alluvial hydromorphic Vertisols, which likewise predominate in many other coastal sections of the eastern Amazonian lowlands (USDA, 2010) suitable for rice production that together with fish farming represents the agribusiness activities in the region.

In this area the riparian forest was well characterized by Silva et al., (2017), who also classified it into four levels of forest degradation distributed in three hydrographic zones.

Levels of forest degradation:

MF = mature undisturbed multistrata riparian rainforest. Estimated aboveground biomass $300 \pm 440 \text{ Mg/ha}^{-1}$

WD = weakly degraded (selective logging a.o.) riparian forest. Estimated aboveground biomass $190 \pm 270 \text{ Mg/ha}^{-1}$

MD = medium degraded/mid-sized (i.e. 5–10 yr.-old) secondary riparian forest.

Estimated aboveground biomass $70 \pm <120 \text{ Mg/ha}^{-1}$

SD = strongly degraded/devastated pastures and bushlands. Estimated aboveground biomass $>20 \pm 30 \text{ Mg/ha}^{-1}$

Hydrographic zones:

A = Aquatic: daily inundation at high flood, partially exposed at low-tide during dry season but constantly flooded during rainy season;

SA = Semi-Aquatic: transition-zone regularly inundated at high floods (floods at mid/end of rainy season);

TF = ‘*Terra Firme*’: upland plateau, inundated only during exceptional floods at peak rainy season of wet years.

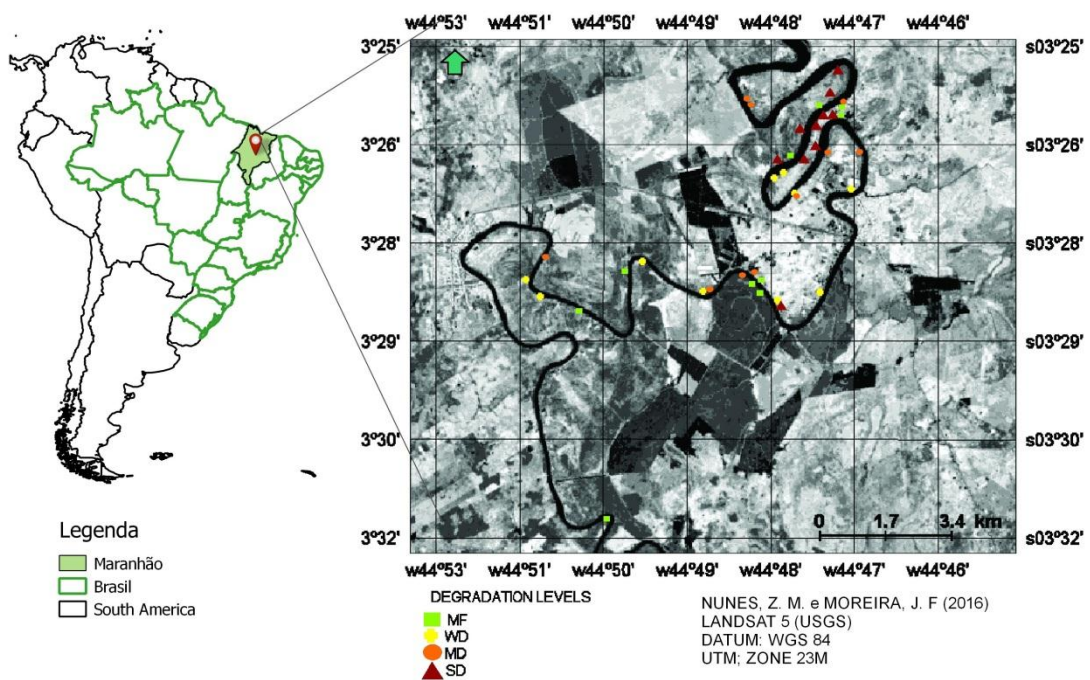


Figure 1- Study area of the lower Mearim river, and location of the 32 transects: MF = mature undisturbed riparian rainforest, WD = weakly degraded tall riparian forests, MD = mid-level degradation secondary forest regrowth, SD = strongly degraded pastures and bushlands.

Pixel delimitations and attributes

We selected 32 georeferenced transects with 0% cloud cover from the 40 transects of Silva et al. (2017) study, totaling 14.645 m². We transformed all *terra firme*, semi-aquatic and aquatic sections of these transects into shapefiles using SPRING software version 5.4.3. As the positioning of Silva et al. (2017) transects always had been within larger stretches of \pm homogenous riparian forest vegetation belonging to the same degradation level, we identified a total of 1007 pixels totally within the plots, but some belonging to more than one water zone, we removed 240

mixed pixels (part in a water zone and part in another), we used 766 pure pixels (completely inside a water zone) in our regression analyzes

For each pixel we (i) generate all spectral data of the RapidEye images was generated (blue: 440 - 510 nm, green: 520 - 590 nm, red: 630 - 685 nm, red-edge: 690 - 730 nm, NIR: 760 - 850 nm) and subsequently all relevant spectral indices was calculated:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red}), \text{ Rouse et al., (1974);}$$

$$\text{NDVI}_{\text{re}} = (\text{NIR} - \text{Red Rdge}) / (\text{NIR} + \text{Red Edge}), \text{ Gitelson and Merzlyak (1994);}$$

$$\text{GNDVI} = (\text{Nir} - \text{green}) / (\text{Nir} + \text{Green}), \text{ (Gitelson et al., 1996);}$$

$$\text{VI}_{\text{green}} = (\text{Green} - \text{Red}) / (\text{Green} + \text{Red}), \text{ Gitelson et al., (2002);}$$

$$\text{VAR}_{\text{Igreen}} = (\text{Green} - \text{Red}) / (\text{green} + \text{Red} - \text{blue}), \text{ Gitelson et al., 2002).}$$

We subsequently associate all key ground-truth data of Silva et al. (2017) study with each pixel, and in case of mixed pixels the averages of two hydric zones weighted by their area-percentages within the respective pixel was computed. Vegetation ground-truth data included in this study are total aboveground biomass, growth-form composition and biomass shares of key functional plant groups, notably of all legume trees and lianas, and of ‘aninga’ (the two morphologically similar *Montrichardia* species *M. arborescens* and *M. linifera*) in the aquatic zone.

Statistical analyzes

We evaluated the data distribution both visually through histograms and with Kolmogorov Smirnov, Lilliefor and Shapiro-Wilk tests against normality. The effects of the aquatic zones on the spectral bands were verified via ANOVAs and subsequent Tukey test at the 5% significance-level. Total aboveground biomass was analyzed by the non-parametric Kruskal Wallis test (Dunn method). The relationship between spectral bands and aboveground biomass or vegetation composition was analyzed via linear regressions. Statistical analyses were performed with Statistica 8.0 and the graphs was generated with Sigmaplot 12.5.

Results and discussion

Distinction of hydrographic zones

Figure 2 shows a clear and significant distinction of aquatic (A), semiaquatic (SA) and *terra firme* (TF) hydric zones by the red edge spectral band. By contrast, no other spectral band, nor spectral index distinguished unambiguously between the three hydric zones (data not shown).

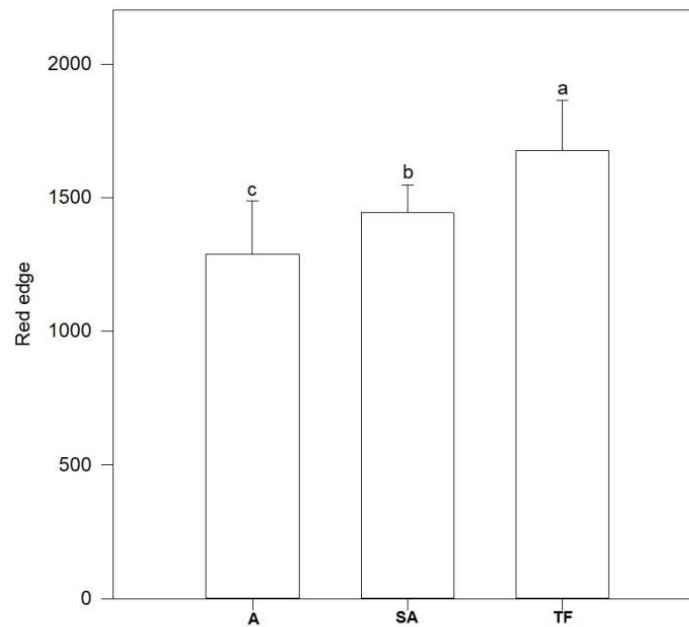


Figure 2 – Red edge reflectance from aquatic (A), semiaquatic (SA) and *terra firme* (TF) of riparian forests (all degradation levels combined): means +SE, letters refer to the Tukey-Kramer test at the 5% significance-level.

Reflectance response in spectral bands and vegetation indices to levels of forest degradation.

All spectral bands and spectral indices were insensitive to degradation gradients, without any significant differences between degradation levels (data not shown). In a second step, we compare the extremes of degradation levels, and the undisturbed mature riparian rainforest (MF) vs strongly degraded pastures / bushlands (SD) was performed resulting in significant differences in two indices (GNDVI and VARIgreen), though with a degree of variability and uncertainty too large to be of practical use (Figure 3).

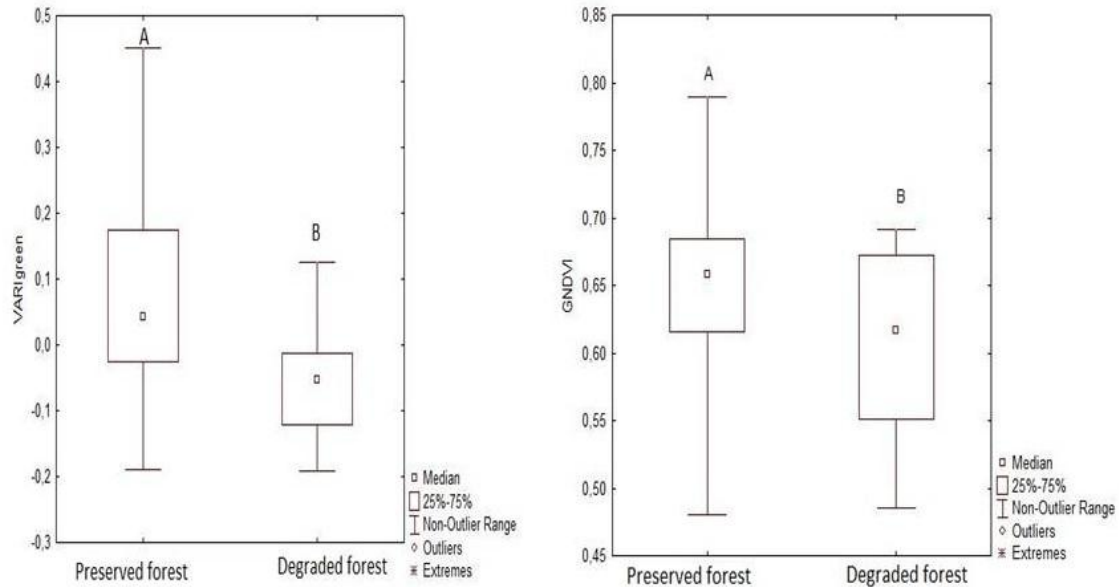


Figure 3- Contrasts of VARIgreen and GNDVI in areas with and without forest

Remote sensing is an indispensable tool for monitoring and forest management, however, it has not yet been possible to detect degradation gradients via remote sensing data. One of the possible explanations for the non-detection of forest degradation gradients, either by reflection of the spectral bands or by vegetation indices, is the saturation of the vegetation indexes with the increase of the foliar area index. Povh et al. (2008) analyzed the NDVI behavior in cereals and found NDVI saturation and reflectance in the red band when the leaf area index was greater than 2.

The greater amount of shade in the mature forest compared to secondary vegetation may be further possible explanation. For Ponzoni and Shimabukuro (2010), the amount of shade in a mature forest that is taller than a regenerating forest can mask and compromise the expected direct relationship between NDVI and biomass.

However, GNDVI and VARIgreen distinguished between the degradation levels MF and SD, suggesting that it may be possible to use these indices to distinguish between mature forests and heavily degraded lands.

3.3 Reflectance response in spectral bands and spectral indices to riparian forest biomass and composition

We investigated if bands and indices related with total aboveground biomass or vegetation composition. We did not find any significant correlation between any spectral band or index and total aboveground biomass, nor with vegetation composition (i.e.,

biomass shares of key functional groups such as legume trees and lianas in *terra firme*, or the conspicuous ‘anginga’ (*Montrichardia* spp.) in the aquatic zone (data not shown). The only exception to this finding is the herbaceous / grassy layer, with weak but near-significant linear relationships between (ln-transformed) biomass shares or absolute biomass of herbaceous and gramineous vegetation with some spectral bands and indices, as shown in Tables 1 and 2.

Table 1. ln% herbaceous / total aerial biomass

| Bands | r² | p |
|--------------|----------------------|----------|
| Red edge | 0,3368 | 0,0233 |
| NIR | 0,2375 | 0,0654 |

Table 2. ln Biomass of herbaceous

| Bands/index | r² | p |
|--------------------|----------------------|----------|
| Blue | 0,1161 | 0,0564 |
| Red | 0,1813 | 0,0151 |
| NDVire | 0,2004 | 0,0102 |
| NDVI | 0,1215 | 0,0506 |
| Vlgreen | 0,1204 | 0,0517 |
| VARlgreen | 0,1190 | 0,0532 |
| GNDVI | 0,1740 | 0,0175 |

Conclusions

Our results show that through Remote Sensing it is possible to distinguish between hydrographic zones, but that high-resolution RapidEye images fail to differentiate between degradation-levels and only barely are capable of differentiating between mature riparian rainforests and strongly degraded pastures / bushlands, and are also insensitive to riparian vegetation composition (key functional groups or total aboveground biomass). Thus, this form of remote sensing fails to meet the practical demands for the extrapolation of ground truth data or for the monitoring of riparian forests.

Acknowledgments

The RapidEye image was provided by the Brazilian Ministry of the Environment and the Foundation for Research and Scientific and Technological Development of Maranhão - FAPEMA financed this study.

5 References

Borowik, T., Pettorelli, N., Sönnichsen, L., & Jedrzejewska, B. (2013). Normalized difference vegetation index (NDVI) as a predictor of forage availability for ungulates in forest and field habitats. *European Journal of Wildlife Research*, 59(5), 675–682. <https://doi.org/10.1007/s10344-013-0720-0>

Brasil. Código Florestal. Lei nº 12.651 de 25 de maio de 2012.

Celentano, D., Rousseau, G. X., Engel, V. L., Zelarayán, M., Oliveira, E. C., Araujo, A. C. M., & de Moura, E. G. (2016). Degradation of riparian forest affects soil properties and ecosystem services provision in Eastern Amazon of Brazil. *Land Degradation and Development*, 28, 482–493. <https://doi.org/10.1002/ldr.2547>

Araújo, I.R., Silva, H.P da., Lopes, A. da S., Alencar, B.p.B de., Silva, H.D.B da. (2010). Calculo de NDVI no suporte ao estudo de desertificação no município de Orocó – PE, 1–6.

FAO. **Towards defining forest degradation: comparative analysis of existing definitions**. Forest Resources Assessment Program Working Paper. 154. FAO, Italy. 2009

Fensholt, R., & Proud, S. R. (2012). Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends - Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, 119, 131–147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.015>

Gamon, J. A., Field, C. B., Goulden, M. L., Griffin, K. L., Hartley, A. E., Joel, G., Peñuelas, J., Valentini, R., (1995). Relationships Between NDVI , Canopy Structure , and Photosynthesis in Three Californian Vegetation Types .Published by : Wiley on behalf of the Ecological Society of America Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/1942049>

Gitelson, A. A., Viña, A., Arkebauer, T. J., Rundquist, D. C., Keydan, G., & Leavitt, B. (2003). Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophysical Research Letters*, 30(5), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2002GL016450>

Gitelson, A., & Merzlyak, M. N. (1994). Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves. *Journal of Photochemistry and Photobiology, B: Biology*, 22(3), 247–252. [https://doi.org/10.1016/1011-1344\(93\)06963-4](https://doi.org/10.1016/1011-1344(93)06963-4)

Gitelson, A. A., Kaufman, Y.J., Merzlyak, M.N (1996) Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens Environ.*

58(3):289-298. doi:10.1016/S0034-4257(96)00072-7.

Gitelson AA, Kaufman YJ, Stark R, Rundquist D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sens Environ.* 2002;80(1):76-87. doi:10.1016/S0034-4257(01)00289-9.

Jackson, R. D., & Huete, A. R. (1991). Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11(3–4), 185–200. [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(05\)80004-2](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(05)80004-2)

Kross, A., McNairn, H., Lapen, D., Sunohara, M., & Champagne, C. (2015). Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34(1), 235–248. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.08.002>

le Maire, G., Marsden, C., Nouvellon, Y., Grinand, C., Hakamada, R., Stape, J. L., & Laclau, J. P. (2011). MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass. *Remote Sensing of Environment*, 115(10), 2613–2625. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.017>

Myneni, B. R., Nemani, R.R., Running, S. W, (1997). Estimation of global Leaf Index and absorbed Par Using Radiative transfer Models. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol 35. N°6. November 1997.

Pereira, G., Takeda, M.M.G., Shimabukuro, Y. E., Cardozo, F.S., Silva, G.B. S., Moraes, E. C., Silva, F.B., Coura, S. M. C. (2010). Uso de produtos de sensoriamento remoto para a análise ambiental na América do Sul. *Revista Ambiente & Água- Na interdisciplinar jornal of Applied Science*. V 5. n.3,2010.

Ponzoni, Flávio Jorge; Shimabukuro, Yosio Edemir, (2010). **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2010.

Povh, F. P., Molin, J. P., Gimenez, L. M., Pauletti, V., Molin, R., & Salvi, J. V. (2008). Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 43(8), 1075–1083. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000800018>

Silva, R. L da., Leite, M. F. A., Muniz, F. H., de Souza, L. A. G., de Moraes, F. H. R., & Gehring, C. (2017). Degradation impacts on riparian forests of the lower Mearim river, eastern periphery of Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 402, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.07.019>

Silva, F. B., Shimabukuro, Y. E., Aragão, L. E. O. C., Anderson, L. O., Pereira, G., Cardozo, F., & Arai, E. (2013). Large-scale heterogeneity of Amazonian phenology revealed from 26-year long AVHRR/NDVI time-series. *Environmental Research Letters*, 8(2), 24011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024011>

Souza, A. L. T. D., Fonseca, D. G., Libório, R. A., & Tanaka, M. O. (2013). Influence of riparian vegetation and forest structure on the water quality of rural low-order streams in SE Brazil. *Forest Ecology and Management*, 298, 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.02.022>

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

Zelarayán, M. L. C., Celentano, D., Oliveira, E. C., Triana, S. P., Sodré, D. N., Muchavisoy, K. H. M., & Rousseau, G. X. (2015). Impacto da degradação sobre o estoque total de carbono de florestas ripárias na Amazônia Oriental, Brasil. *Acta Amazonica*, 45(3), 271–282. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201500432>