



Indicador dos Estágios de Sucessão de Fragmentos Florestais do Bioma Mata Atlântica

Indicator of the Succession Stages of Forest Fragments of the Atlantic Forest Biome

*Amanda Trindade Amorim*¹

*Jocy Ana Paixão de Sousa*²

*Roberto Wagner Lourenço*³

Recebido em maio de 2019.

Aprovado em julho de 2019.

RESUMO

Estudos sobre os estágios de sucessão de fragmentos florestais são essenciais para sua preservação e conservação, além de contribuir de forma significativa na gestão e no planejamento voltados à recuperação de sua biodiversidade. No entanto, a avaliação desses estágios demanda elevados custos, pessoal qualificado e tempo, principalmente nos trabalhos em campo. Portanto, pesquisas têm surgido incorporando métodos que utilizam as técnicas de geoprocessamento para avaliações dessa natureza. A pesquisa objetivou estudar os parâmetros que interferem na dinâmica dos fragmentos florestais e as características biofísicas, cujo o intuito foi propor um indicador dos estágios de sucessão de fragmentos florestais do bioma Mata Atlântica. Para isto foi utilizado como base a bacia hidrográfica do rio Murundú-Paiol situada no sudeste do estado de São Paulo. Os métodos se basearam no estudo dos fatores que interferem na dinâmica dos fragmentos florestais (tamanho, efeito antrópico no entorno, altitude, relevo e exposição solar) e índices de vegetação, gerados a partir de técnicas de geoprocessamento. Todos estes fatores foram correlacionados e os fragmentos florestais foram selecionados para avaliação em campo. Dentre todos os parâmetros avaliados, apenas os relacionados à altitude e relevo apresentaram boa correlação com os índices de vegetação, sendo estes os parâmetros integrantes no indicador dos estágios de sucessão. Este indicador exibiu uma acurácia de 85,7% na avaliação, o que permite ser replicado em outros estudos semelhantes, apresentando-se como uma alternativa científica viável e capaz de indicar o provável estágio de sucessão dos fragmentos florestais.

¹Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Programa de Pós-graduação em Geografia, Brasil. E-mail: amanda.amorim@unesp.br

²Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Brasil. E-mail: jocy.sousa@unesp.br

³Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Brasil. E-mail: roberto.lourenco@unesp.br

PALAVRAS-CHAVE: Recurso florestal. Geoprocessamento. Modelagem matemática.

ABSTRACT

Studies on the succession stages of forest fragments are essential for their preservation and conservation, as well as contributing significantly to the management and planning aimed at recovering their biodiversity. However, the evaluation of these stages demands high costs, qualified personnel and time, especially in the fieldwork. Therefore, research has emerged incorporating methods that use geoprocessing techniques for evaluations of this nature. The objective of this research was to study the parameters that interfere in the dynamics of the forest fragments and the biophysical characteristics, whose purpose was to propose an indicator of the succession stages of forest fragments of the Atlantic Forest biome. To this was used as the basis the Murundú-Paiol watershed located in the southeast of the state of São Paulo. The methods were based on the study of the factors that interfere in the dynamics of forest fragments (size, anthropic effect around, altitude, relief and sun exposure) and vegetation indices, generated from geoprocessing techniques. All these factors were correlated and the forest fragments were selected for evaluation in the field. Among all the parameters evaluated, only those related to altitude and relief showed a good correlation with the vegetation indices, being these the integrating parameters in the indicator of the succession stages. This indicator showed an accuracy of 85.7% in the evaluation, which allows to be replicated in other similar studies, presenting as a viable scientific alternative and capable of indicating the probable succession stage of the forest fragments.

KEYWORDS: Forest resource. Geoprocessing. Mathematical modeling.

* * *

Introdução

A Mata Atlântica está em constante ameaça devido às alterações antrópicas que resultaram em uma vasta fragmentação da paisagem e perda de sua diversidade. A intensa intervenção antrópica no Brasil é marcada principalmente pelas atividades agrícolas, urbanização e parcelamentos de terras, o que resultou em apenas 12% da área original deste bioma no Brasil. O Estado de São Paulo apresentava originalmente 80% do seu território constituído por Mata Atlântica, porém atualmente restam apenas 14%, que é marcado por fragmentos florestais dispersos (MCT, 2017). Esses fragmentos estão presentes principalmente em unidades de conservação, circundados por áreas de agricultura e ocupação urbana, compondo uma paisagem mosaificada

com diferentes estágios de sucessão (VIDAL et al., 2007; LOURENÇO et al., 2014; LOPES et al., 2018).

A avaliação dos estágios de sucessão dos fragmentos florestais da Mata Atlântica mostra-se importante para a compreensão do estado de intervenção, proposição de medidas de conservação e recuperação, além de subsidiar nos procedimentos de licenciamento de exploração da vegetação nativa. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) apresenta resoluções distintas por Estado que descrevem parâmetros para caracterizar os estágios da vegetação, porém, essas resoluções não apresentam uma regra para a amostragem da avaliação, favorecendo a subjetividade. Vale ressaltar que pesquisas dessa natureza demandam elevados custos, pessoal qualificado e tempo, principalmente nos trabalhos em campo.

Frente às dificuldades encontradas no processo de avaliação dos estágios de sucessão dos fragmentos florestais, diversas pesquisas têm surgido com o intuito de incorporar novos métodos que utilizam o geoprocessamento e o sensoriamento remoto para a avaliação desses estágios. Cintra (2007) avaliou a vegetação a partir da interpretação visual de imagens de satélite; Amaral et al. (2009) realizaram classificação de imagens por pixels, por regiões e visual; Costa et al. (2011) correlacionaram padrões avaliados em campo com dados digitais de bandas do visível e do infravermelho próximo; Souza, Vicens e Cruz (2014) avaliaram a curva de refletância de uma imagem hiperespectral de amostras avaliadas em campo. Entretanto, essas pesquisas apontam a necessidade de incorporar novos métodos efetivos para a identificação dos estágios de sucessão, visando aprimorá-los e reduzir os custos de levantamento de dados em campo.

A aplicação das técnicas de geoprocessamento e de sensoriamento remoto em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) permite o desenvolvimento de pesquisas com enfoque em avaliações ambientais, bem como daquelas voltadas aos recursos florestais. Essas técnicas permitem a construção de um banco de dados georreferenciados de arquivos vetoriais e

matriciais que podem ser processados e combinados, permitindo uma série de aplicações (JAMALI et al., 2014; LOPES e REUSS-STRENZEL, 2015).

Dentre os arquivos vetoriais é possível avaliar diversos fatores que interferem na dinâmica dos fragmentos florestais designados por Viana e Pinheiro (1998), como: tamanho, forma, vizinhança, posição do relevo e exposição solar; e dentre os arquivos matriciais, as imagens de satélite permitem a aplicação de índices de vegetação a partir de combinações matemáticas de valores de reflectância das radiações refletidas, como o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) (HUETE, 1988) e o Índice de Área Foliar (IAF) (ALLEN et al., 2002), que são capazes de explorar as propriedades espectrais da vegetação, estando relacionados aos parâmetros biofísicos e ao vigor vegetativo (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007; JENSEN, 2009; GALVÍNCIO, 2012).

Portanto, esta pesquisa objetivou elaborar um indicador que pudesse refletir os estágios de sucessão de fragmentos florestais, localizados em área de Mata Atlântica, por meio do estudo dos parâmetros que interferem na dinâmica dos fragmentos florestais e de características biofísicas, utilizando modelagem matemática ambiental através de recursos de geoprocessamento e sensoriamento remoto, buscando-se oferecer uma alternativa científica e tecnológica que se mostre eficaz na diferenciação dos estágios de sucessão de fragmentos florestas e que possam contribuir com políticas de planejamento e gestão dos recursos florestais.

1 Material e métodos

O desenvolvimento das etapas de análise espacial foi realizado através da construção de um SIG, tendo como *software* de aplicação o ArcGIS 10.5 (ESRI, 2016).

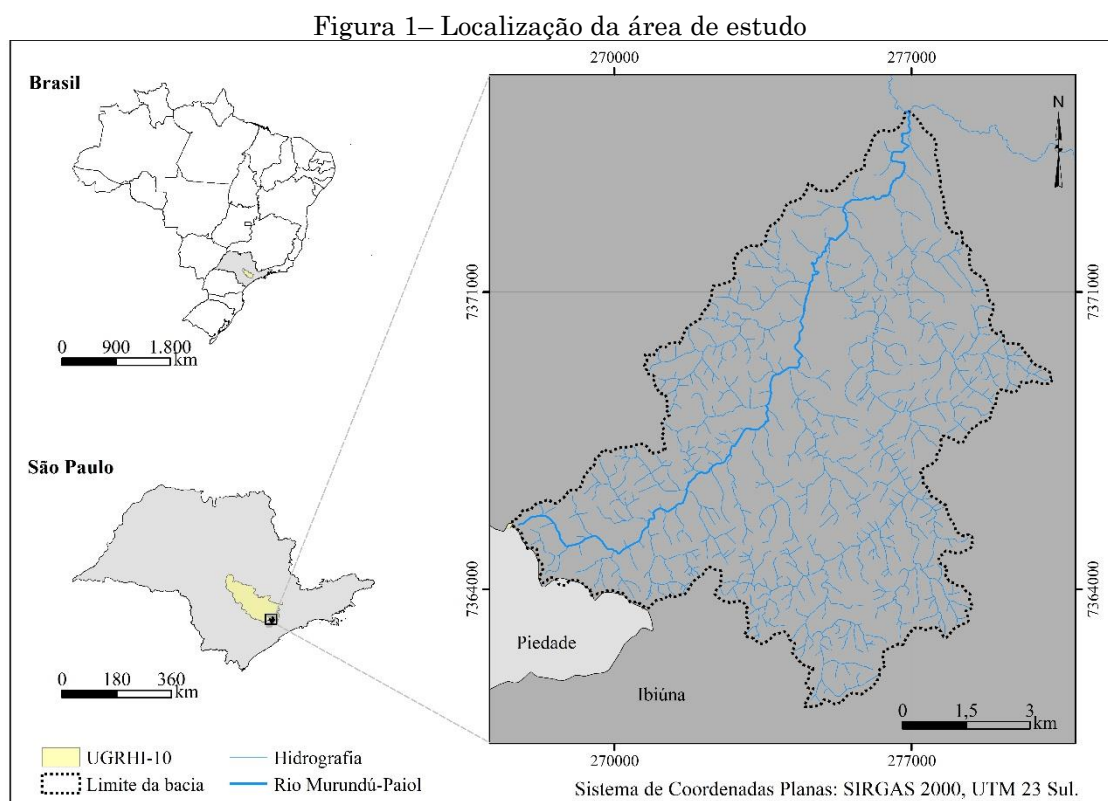
Além disso, foram utilizadas cartas topográficas digitalizadas do município de Ibiúna, em escala 1:10.000 (IGC, 1979); ortoimagens do sensor *Vexcel Ultracam*, do ano de 2010, disponibilizadas pelo Instituto Geográfico e

Cartográfico (IGC), com resolução espacial de 0,45 metros; e imagens do satélite *RapidEye*, do mês agosto de 2014, com resolução espacial de 5 metros, disponibilizadas por meio de convênio com o Ministério do Meio Ambiente (MMA).

1.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do rio Murundú-Paiol, que está localizada na área rural do município de Ibiúna, situada na Décima Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (UGRHI-10), sudeste do estado de São Paulo (Figura 1).

A bacia hidrográfica possui uma extensão territorial de 81,9 km² e está inserida, em sua totalidade, na Área de Preservação Ambiental de Itupararanga, no domínio do bioma Mata Atlântica, onde encontram-se importantes fragmentos florestais remanescentes.



Fonte: Elaborada pelos autores.

1.2 Construção da base cartográfica de apoio

Esta etapa se baseou na vetorização, por meio do *software* ArcGIS 10.5 (ESRI, 2016), dos dados planialtimétricos referentes às curvas de nível, pontos cotados, limite da bacia hidrográfica e hidrografia de cartas topográficas do município de Ibiúna (IGC, 1979).

1.3 Avaliação das métricas e do efeito antrópico no entorno dos fragmentos florestais

Inicialmente foi realizado mapeamento do uso e cobertura da terra da área da bacia hidrográfica, para extrair os fragmentos florestais e avaliá-los quanto as suas métricas e efeito antrópico no seu entorno.

Este mapeamento foi realizado utilizando a técnica de interpretação visual de imagens e procedida no *software* ArcGIS 10.5 (ESRI, 2016), a partir da sobreposição do limite vetorial da bacia hidrográfica às ortoimagens do sensor *VexcelUltracam*. Posteriormente, estes usos foram confirmados, editados e reambulados a partir da conferência pelo *Google Earth Pro*, que permite a visualização de imagens recentes e com alta resolução, e por meio de trabalhos de verificação em campo, no ano de 2018. As classes de mapeamento foram adaptadas do Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013), em oito categorias: área urbanizada, campo, cultura temporária, cultura permanente, pastagem, reflorestamento, mata e lâmina d'água.

Os fragmentos florestais foram extraídos do mapeamento do uso e cobertura da terra, onde cada polígono da classe 'Mata' separado por uma barreira antrópica ou natural, configurou a divisão entre um fragmento florestal e outro (VIANA, 1990). Estes fragmentos foram classificados quanto a sua área, conforme adaptação de Santos et al. (2017), no qual foram considerados aqueles a partir de 5 hectares (ha), adotando-se as seguintes denominações: pequenos (de 5 a 10 ha), médios (> 10 a 50 ha) e grandes (> 50 ha). Para avaliação do efeito antrópico no entorno dos fragmentos florestais

foi aplicado Indicador de Exposição Antrópica (IEA) (Equação 1), proposto por Lourenço et al. (2014).

$$IEA = ((1 - IC) + (2 * IEB))/3 \quad (1)$$

onde: IC – índice de circularidade (Equação 2); IEB – índice de efeito de borda (Equação 3).

$$IC = 2 * \sqrt{\pi A}/P \quad (2)$$

onde: A – área do fragmento florestal; P – perímetro do fragmento florestal.

$$IEB = \sum_{i=1}^n U_i * P_i/P \quad (3)$$

onde: U_i – peso atribuído ao uso vizinho; P_i – perímetro de divisa do uso vizinho com o fragmento florestal; P – perímetro total do fragmento.

Os pesos dos usos vizinho foram considerados de acordo com o nível de intervenção ao fragmento, sendo 0 quanto menor o dano e 1 quanto maior o dano: 1 para área urbanizada, 0,8 para cultura temporária, 0,7 para pastagem, 0,5 para cultura permanente, 0,4 para reflorestamento, 0,3 para campo, 0,1 para lâmina d'água e 0 para mata. Os fragmentos florestais com o IEA menor que 0,4 apresentam baixo efeito antrópico, os valores iguais ou menores que 0,7 possuem médio efeito antrópico e os valores iguais ou maiores que 0,7 exibem alto efeito antrópico no seu entorno (LOURENÇO et al., 2014; SALES et al., 2017).

1.4 Avaliação das condicionantes físicas do terreno

Nesta etapa foram avaliadas a altitude, o relevo e a orientação do terreno dos fragmentos florestais no *software* ArcGIS 10.5 (ESRI, 2016). Estes três parâmetros apresentam significativas influências na manutenção dos

fragmentos florestais (MARQUES et al., 2004; BISPO, VALERIANO e KUPLICH, 2009; SILVEIRA e SILVA, 2010). Segundo os referidos autores, existe uma tendência de os fragmentos maiores e mais conservados estarem localizados em altitudes mais elevadas e relevos mais acentuados, devido à dificuldade de acesso e elevação dos custos para efetivação de atividades antrópicas. Enquanto a orientação do terreno permite avaliar o grau de insolação e indicar as áreas mais favoráveis à regeneração natural da vegetação.

As altitudes foram obtidas a partir da geração do Modelo Digital de Terreno (MDT). Para a obtenção deste modelo fez-se a interpolação das curvas de nível e dos pontos cotados, vetorizados das cartas topográficas, submetidos à geração de uma rede triangular irregular (TIN) e sua conversão em arquivo matricial. O relevo foi avaliado a partir do processamento do MDT na ferramenta ‘*Slope*’, para a obtenção da declividade em percentuais e classificados conforme a Embrapa (2006) em: 0 - 3% (relevo plano); > 3 - 8% (suavemente ondulado); > 8 - 20% (ondulado); > 20 - 45% (fortemente ondulado); > 45 - 75% (montanhoso); >75% (escarpado).

Para a avaliação destes parâmetros, as altitudes e declividades geradas foram associadas aos fragmentos florestais e processadas na ferramenta ‘*Zonal Statistics as Table*’. Esta ferramenta permitiu a obtenção dos dados de altitude média e de declividade média para cada fragmento florestal.

Para a obtenção da orientação do terreno, o MDT foi processado na ferramenta ‘*Aspect*’, posteriormente reclassificado conforme os graus de orientação, e a eles foram atribuídas as classes de grau de insolação (Quadro 1).

Quanto menor o grau de insolação, menor será a evapotranspiração e maior será a taxa de umidade, sendo esta a melhor condição para a regeneração florestal. No hemisfério sul, tem-se que as faces voltadas para o sul apresentam menor grau de insolação e às voltadas para o norte apresentam maior grau de insolação, enquanto às faces voltadas para o leste recebem maior insolação no período da manhã, onde a umidade do ar

encontra-se mais elevada, e a oeste maior grau de insolação no período da tarde, quando a umidade do ar já diminuiu, independente da época do ano (TONELLO et al., 2006; LIMA e MARIANO, 2014; CORRÊA e FRANCELINO, 2015; AMORIM, 2017).

Quadro 1 – Classes de orientação do terreno e grau de insolação

Grau de orientação	Orientação do terreno	Grau de insolação
-1 a 0°	Plano	Médio
> 0 a 45°	Norte	Alto
> 45 a 135°	Leste	Médio/Baixo
> 135 a 225°	Sul	Baixo
> 225 a 315°	Oeste	Médio/Alto
> 315 a 360°	Norte	Alto

Fonte: Adaptado de Esri (2016); Tonello et al. (2006); Lima e Mariano (2014); Corrêa e Francelino (2015); Amorim (2017).

A relação da orientação do terreno com o grau de insolação foi obtida pela porcentagem de ocorrência de cada orientação no interior dos fragmentos florestais. Considerou-se que o percentual de ocorrência acima de 50% para o norte possui alto grau de insolação; para o sul, baixo grau; para leste, médio/baixo grau; e para oeste, médio/alto grau. Os fragmentos que não apresentaram predominância em uma face (menos de 50% de ocorrência na mesma orientação), fez-se a soma de porcentagens norte/oeste com médio/alto grau e soma sul/leste com médio/baixo grau. Para os fragmentos que possuem influência do relevo plano em que as somas não ultrapassam 50% de ocorrência, considerou-se como médio grau de insolação.

1.5 Avaliação espectral dos fragmentos florestais

A avaliação espectral dos fragmentos florestais consistiu na aplicação dos índices SAVI (Equação 4) (HUETE, 1988) e IAF (Equação 5) (ALLEN et al., 2002). A aplicação destes índices foi realizada a partir álgebra de mapas no *software* ArcGIS 10.5 utilizando as bandas 3 (RED) e 4 (NIR), do satélite *RapidEye*.

$$SAVI = (1 - L)(NIR - RED)/(L + NIR + RED) \quad (4)$$

onde: NIR – banda do sensor referente ao infravermelho próximo; RED – banda do sensor referente ao vermelho; L – fator de ajuste para o substrato do dossel.

O fator L varia de 0 a 1 onde geralmente utiliza-se 0,25 em áreas com alta densidade de vegetação, 0,5 quando há média densidade de vegetação e 1 para áreas com baixas densidades de vegetação. Neste estudo foi utilizado L=0,5, pois a área de estudo apresenta médias densidades de vegetação (HUETE, 1988; BOEGH, SOEGAARD e THOMSEN, 2002; PONZONI e SHIMABUKURO, 2007).

$$IAF = -\ln((0,69 - SAVI')/0,59))/0,91 \quad (5)$$

onde: SAVI' é o SAVI recalculado com os valores de reflectância do topo da atmosfera para as bandas RED e NIR (Equação 6).

$$SAVI' = (1 - L)(\rho NIR - \rho RED)/(L + \rho NIR + \rho RED) \quad (6)$$

onde: ρ NIR – reflectância do topo da atmosfera da banda NIR; ρ RED – reflectância do topo da atmosfera da banda RED; L – fator de ajuste para o substrato do dossel (0 a 1).

Os valores de reflectância do topo da atmosfera para as bandas foram calculados (Equação 7) (PLANET, 2016).

$$\rho(i) = (DN(i) * 0,01) * (\pi * SunDist^2 / EAI(i) * \cos(SolarZenith)) \quad (7)$$

onde: $\rho(i)$ – reflectância do topo da atmosfera; DN(i) – números digitais de cada banda; SunDist – distância Terra-Sol no dia de aquisição da imagem; EAI(i) – irradiância Exo-Atmosférica (RED: 1560,4 W/m²µm; NIR: 1124,4 W/m²µm); SolarZenith – ângulo expresso em graus (90°-ângulo de elevação solar).

Os índices de vegetação SAVI e IAF foram associados aos fragmentos florestais e processados na ferramenta ‘*Zonal Statistics as Table*’, para a obtenção das médias e desvio padrão destes índices (SAVI e IAF) em cada fragmento florestal.

1.6 Análise dos fragmentos florestais em campo

Para a avaliação dos estágios de sucessão dos fragmentos florestais em campo, foram selecionados apenas aqueles que estavam totalmente inseridos na bacia hidrográfica e que apresentavam as características espaciais distintas, definidas segundo os procedimentos anteriores. Para isso, todos os parâmetros foram classificados em classes numéricas crescentes, onde o menor valor representa a pior condição e o maior valor apresenta a melhor condição do fragmento florestal de acordo com a significância de cada parâmetro.

Aplicou-se na avaliação dos fragmentos florestais em campo a descrição de parâmetros qualitativos a partir de um levantamento ecológico e experiência de especialistas (CONAMA, 1994; SOUZA, VICENS e CRUZ, 2014). Nesta etapa foram avaliados os parâmetros qualitativos referentes à fisionomia florestal, estratos florestais, plantas epífitas, trepadeiras, serapilheira, sub-bosque e diversidade biológica.

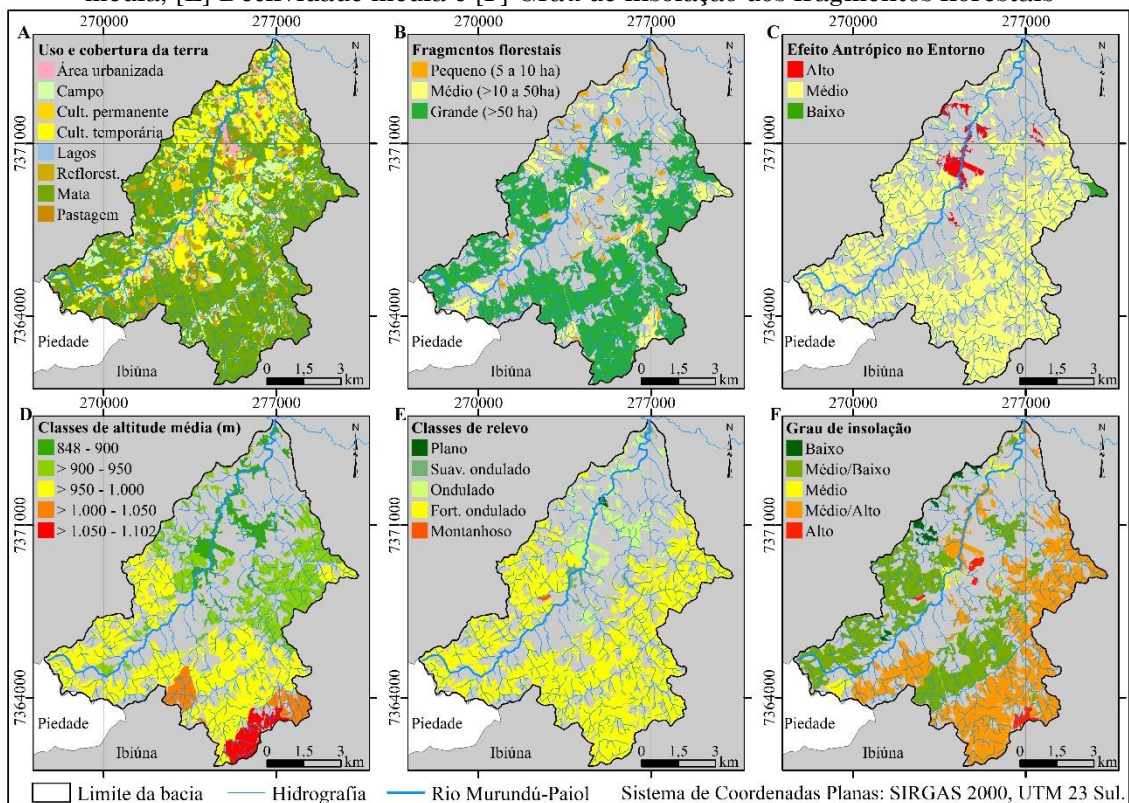
1.7 Construção do Indicador do Estágio de Sucessão (IES)

Para a construção do IES dos fragmentos florestais, todos os parâmetros avaliados espacialmente foram correlacionados utilizando a correlação de Pearson. O IES utiliza os parâmetros que obtiveram forte correlação entre si e juntamente com a avaliação dos fragmentos em campo foi possível chegar aos intervalos representativos dos estágios de sucessão dos fragmentos florestais inseridos no domínio do bioma Mata Atlântica.

2 Resultados

Inicialmente, os usos e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Murundú-Paiol foram mapeados (Figura 2A). Posteriormente, os fragmentos florestais a partir de 5 ha, foram extraídos e avaliados quanto aos fatores que interferem em sua dinâmica (Figura 2B, 2C, 2D, 2E e 2F).

Figura 2 – [A] Mapeamento do uso e cobertura da terra, [B] Fragmentos florestais nas classes de tamanho, [C] Efeito antrópico no entorno dos fragmentos florestais, [D] Altitude média, [E] Declividade média e [F] Grau de insolação dos fragmentos florestais



Fonte: Elaborada pelos autores.

No mapeamento do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica constatou-se 4,70% de área urbanizada, representadas pelas edificações rurais e residenciais; 14,82% de campo degradado, com predomínio de plantas rasteiras e espécies exóticas; 0,36% de culturas permanentes, representadas por cultivos frutíferos de ciclo de vida longo; 14,41% de culturas temporárias, onde predominam as olericulturas; 0,97% de lagos, lagoas e açudes; 57,88% de matas, especificamente formações arbóreas; 2,45% de pastagens, com solos

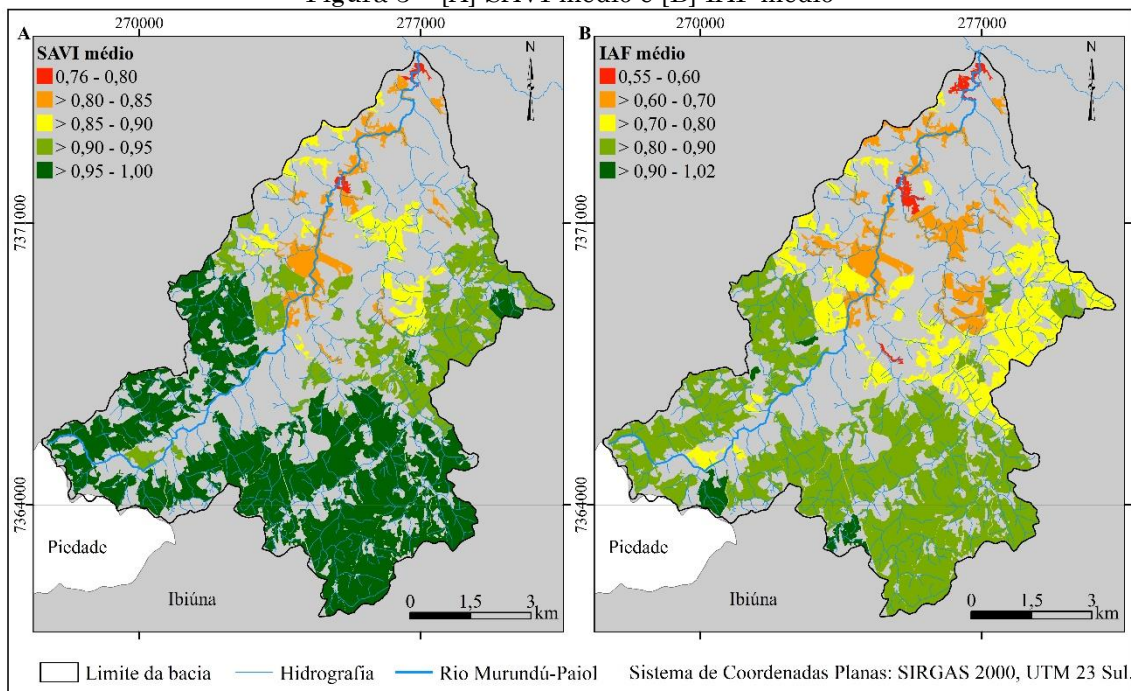
cobertos por gramíneas e destinadas ao pastoreio de animais de médio e grande porte; e 4,41 de reflorestamentos, predominantemente de eucaliptos (*Eucalyptus*) (Figura 2A). Verificou-se maior preservação das matas nas porções sul e periféricas da bacia hidrográfica, bem como uma maior fragmentação nas regiões norte e central da bacia hidrográfica.

Com um total de 72 fragmentos florestais, tem-se 25 fragmentos de tamanhos pequenos (164,6 ha), 28 médios (649,7 ha) e 19 grandes (3.460,7 ha), apresentando uma mancha total de 4.275,0 ha, 52,19% da área da bacia hidrográfica e 90,17% da classe de matas (Figura 2B). O efeito antrópico no entorno dos fragmentos florestais (Figura 2C), determinado conforme Lourenço et al. (2014), apresentou apenas um fragmento com baixo efeito, 66 fragmentos com médio efeito e 5 com alto efeito às atividades antrópicas no seu entorno.

Quanto à posição em que os fragmentos florestais estão inseridos (Figura 2D), as médias de altitudes variam de 848 a 1.102 metros, apresentando 16 fragmentos entre 853 e 900 metros, 35 entre 900 e 950 metros, 14 entre 950 e 1.000 metros, 5 entre 1.000 e 1.050 metros, 2 entre 1.050 e 1.102 metros de altitude média. As formas de relevos dos fragmentos florestais variam de plano a montanhoso (Figura 2E), sendo 2 fragmentos planos, 5 suavemente ondulados, 18 ondulados, 46 fortemente ondulados, apenas 1 montanhoso e não constando nenhum classificado como relevo escarpado. Quanto ao grau de insolação (Figura 2F), tem-se 7 fragmentos submetidos a baixo grau, 23 a médio/baixo grau, 5 em médio grau, 33 em médio/alto grau e 5 em alto grau de insolação.

Após a avaliação dos parâmetros que interferem na dinâmica dos fragmentos florestais, estes foram avaliados quanto às suas características biofísicas, a partir das médias dos índices SAVI (Figura 3A) e IAF (Figura 3B).

Figura 3 – [A] SAVI médio e [B] IAF médio



Fonte: Elaborada pelos autores.

O intervalo das médias do SAVI foi de 0,76 a 1,00, com desvios padrão variando de 0,04 a 0,09, enquanto as médias do IAF variaram de 0,55 a 1,02, com desvios padrão entre 0,10 a 0,24. Ao observar a distribuição espacial das médias destes dois índices aplicados aos fragmentos florestais, tem-se uma predominância dos maiores valores nas regiões sul e periféricas da bacia hidrográfica, ou seja, onde as altitudes são mais elevadas e os relevos são mais acidentados.

Todos os parâmetros avaliados foram classificados em classes numéricas crescentes, onde o menor valor representa a pior condição e o maior valor apresenta a melhor condição do fragmento florestal de acordo com a significância de cada parâmetro (Tabela 1) e posteriormente estes foram correlacionados (Tabela 2).

Tabela 1 – Classes numéricas dos parâmetros analisados

Características de tamanho e do efeito antrópico					
Tamanho	C_Tamanho	IEA	C_IEA		
Pequeno	1	Alto	1		
Médio	2	Médio	2		
Grande	3	Baixo	3		
Características físicas do terreno					
Altitude	C_Alti	Relevo	C_Relevo	Insolação	C_Insol
Até 900	1	Plano	1	Alta	1
> 900 – 950	2	Suav. ond.	2	M/A	2
> 950 – 1.000	3	Ondulado	3	Média	3
> 1.000 – 1.050	4	Fort. ond.	4	M/B	4
> 1.050	5	Montanhoso	5	Baixa	5
Características espectrais					
SAVI	C_SAVI	IAF	C_IAF		
Até 0,80	1	Até 0,60	1		
> 0,80 – 0,85	2	> 0,60 – 0,70	2		
> 0,85 – 0,90	3	> 0,70 – 0,80	3		
> 0,90 – 0,95	4	> 0,80 – 0,90	4		
> 0,95	5	> 0,90	5		

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 2 – Correlação entre as classes dos parâmetros analisados

Correlação	C_Tamanho	C_IEA	C_Alti	C_Relevo	C_Insol	C_SAVI	C_IAF
C_Tamanho	1						
C_IEA	-0,021	1					
C_Alti	0,303	0,298	1				
C_Relevo	0,310	0,268	0,582	1			
C_Insol	-0,066	0,074	-0,089	0,126	1		
C_SAVI	0,380	0,270	0,797	0,782	-0,031	1	
C_IAF	0,219	0,191	0,745	0,685	-0,094	0,910	1

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os índices de vegetação (SAVI e IAF) possuem a melhor correlação entre si, seguido da correlação entre as classes do SAVI com as classes de altitude e relevo, respectivamente. Dos 72 fragmentos florestais contidos na bacia hidrográfica, 53 estão totalmente inseridos na bacia e, desses, 14 foram selecionados para a avaliação em campo. Dos 14 fragmentos florestais avaliados em campo 6 foram classificados em estágio inicial, 6 em estágio médio e 2 em estágio avançado de regeneração.

O IES proposto (Equação 8) considerou a média ponderada entre as classes de altitude, de relevo e do SAVI. O SAVI é incluído com peso 2 na equação por ter apresentado a melhor correlação com as características físicas do terreno e por ser um índice representativo da qualidade do fragmento florestal.

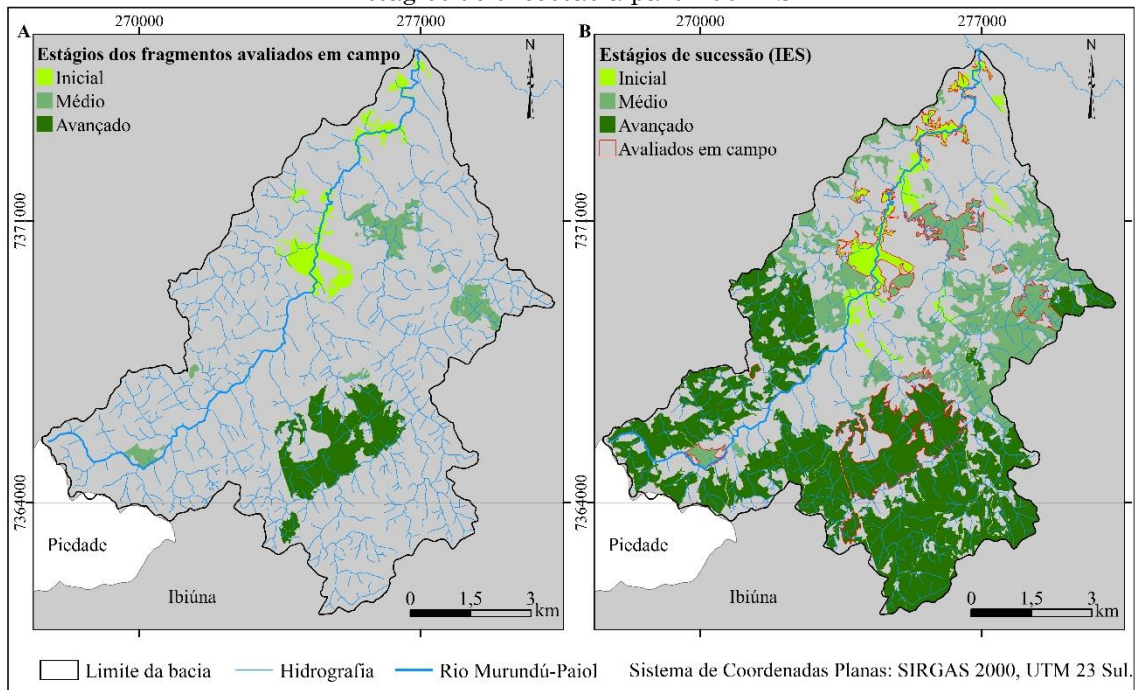
Os três parâmetros integrantes da equação variam de 1 a 5 (Tabela 1), portanto o IES também possui a mesma variação. O valor 1 significa a pior condição do fragmento florestal, associado neste estudo ao estágio inicial de sucessão, e o valor 5 a melhor condição do fragmento florestal, que está associado ao estágio avançado de sucessão.

$$IES = (C_{ALT} + C_{REL} + (2 * C_{SAVI}))/4 \quad (8)$$

onde: C_{ALT} – Classe de altitude; C_{REL} – Classe de relevo; e C_{SAVI} – Classe do SAVI.

A partir da aplicação do IES nos fragmentos florestais e a avaliação dos estágios de sucessão em campo, obteve-se os seguintes intervalos para cada estágio de sucessão: de 1 a 2,25 estágio inicial, > 2,25 a 3,5 estágio médio, e > 3,5 a 5 estágio avançado (Figura 4A e 4B).

Figura 4 – [A] Estágios de sucessão dos fragmentos florestais avaliados em campo e [B] Estágios de sucessão a partir do IES



Fonte: Elaborada pelos autores.

Para o IES tem-se um indicativo de 16 fragmentos florestais em estágio de sucessão inicial (322,6 ha), 31 em estágio médio (1.207,9 ha) e 25 em estágio avançado (2.744,5 ha). Cabe ressaltar que foi verificado uma acurácia de 85,7% dos fragmentos florestais avaliados pelo IES, pois dos 14 fragmentos avaliados em campo, apenas 2 apresentaram divergência com o indicador. Porém, esta divergência pode estar relacionada à presença significativa da espécie exótica e invasora bambu (*Bambuseae*), visualizada em campo.

3 Discussão

O fato da bacia hidrográfica em análise apresentar uma maior preservação das matas nas porções sul e periféricas está relacionado ao histórico de ocupação do território. Esse diagnóstico reflete as características físicas do terreno pertinentes ao relevo, corroborando com pesquisas que afirmam que nas áreas mais elevadas e com declives mais acentuados, o acesso da população torna-se dificultado (OLIVEIRA et al., 1997; CUNHA et

al., 2012; ABDALLA e CRUZ, 2015). Nestas áreas são acrescentados maior custo para a implantação de atividades antrópicas como para agriculturas e edificações, no entanto, elas proporcionam maior conservação dos fragmentos florestais.

Esse diagnóstico também é confirmado a partir da correlação entre os parâmetros que interferem na dinâmica dos fragmentos florestais e os índices de vegetação, pois as características físicas de altitude e relevo foram os fatores que melhor se correlacionaram com os índices SAVI e IAF. Nos lugares onde os índices de vegetação exibiram as melhores condições dos fragmentos florestais, estão situadas as altitudes mais elevadas e declives mais acentuados do terreno. Esta análise coincide com estudos como o de Marques et al. (2004), Bispo, Valeriano e Kuplich (2009) e Silveira e Silva (2010) que constataram que estes fatores topográficos influenciam na manutenção dos fragmentos florestais e na distinção entre a vegetação.

Estudos como os de Jesus et al. (2015) e Santos et al. (2017), realizados no domínio do bioma Mata Atlântica, mostram que é comum a ocorrência de grandes quantidades de fragmentos florestais de tamanhos pequenos (inferiores a 50ha) e poucos grandes (superiores a 50ha), assim como encontrados na área de estudo. Os fragmentos florestais pequenos apresentam padrões de sustentabilidade muito frágeis ao longo do tempo, em consequência da redução de sua área que acarreta em perda da sua biodiversidade, prejudicando sua capacidade de autossustentação e de regeneração natural, sobretudo, devido a sua maior exposição aos efeitos de borda, deixando susceptível à invasão de espécies exóticas. Entretanto, os fragmentos florestais maiores, geralmente favorecem a manutenção da sua biodiversidade, contribuindo com sua regeneração natural (VIANA e PINHEIRO, 1998; CALEGARI et al., 2010; SANTOS et al., 2017).

O efeito antrópico no entorno dos fragmentos florestais avaliados a partir do IEA, proposto por Lourenço et al. (2014), considera a forma do fragmento florestal e a interferência do uso vizinho. Segundo Nascimento et al. (2006), a vizinhança representa um dos fatores mais relevantes a serem

considerados no diagnóstico ambiental, pois este pode comprometer o equilíbrio desse ecossistema. Este parâmetro é capaz de apontar o nível de perturbação em que a borda do fragmento florestal está sujeita, no entanto, este efeito no fragmento é amortizado quando comparado com fragmentos grandes, pois geralmente têm maior área preservada no seu interior, apresentando uma condição mais adequada para sua conservação e regeneração natural (ABDALLA e CRUZ, 2015).

As dinâmicas da sucessão ecológica são influenciadas especialmente pelas condições locais e pelas interações entre as espécies. Os fatores que interferem na dinâmica dos fragmentos florestais (tamanho, forma, vizinhança, altitude, declividade e exposição solar), apresentam relações com fenômenos biológicos que afetam a natalidade e a mortalidade de plantas. Mesmo que a correlação entre estes fatores com os índices de vegetação tenha sido forte apenas para a altitude e o relevo, o conhecimento e a análise de todos são importantes para apontar medidas de conservação e recuperação do meio (VIANA e PINHEIRO, 1998; ARAÚJO et al., 2006).

Visto a importância e as dificuldades de se avaliar os estágios de sucessão dos fragmentos florestais, a proposição do indicador dos estágios de sucessão (IES) é relevante uma vez que integra parâmetros que se correlacionam e que são capazes de expressar sua dinâmica e a qualidade dos mesmos.

Acredita-se que a divergência da classificação do estágio de sucessão de dois fragmentos florestais avaliados em campo, resultando na acurácia de 85,7% do IES, se deve à intensa presença de bambu. O bambu é uma espécie exótica considerada invasora porque possui alta capacidade de dispersão vegetativa, sendo capaz de se desenvolver tanto nas bordas quanto no interior dos fragmentos florestais. Esta espécie é indicadora de degradação e compromete o desenvolvimento da regeneração natural de espécies nativas (FILGUEIRAS, 1988; PASTORE et al., 2012). Segundo Lacerda e Kellermann (2017), no estágio inicial de regeneração, os bambus desenvolvem-se

competindo com as espécies arbóreas nativas, comprometendo os demais estágios de regeneração do fragmento florestal.

4 Conclusões

O estudo dos parâmetros que interferem na dinâmica dos fragmentos florestais (tamanho, efeito antrópico no entorno, altitude, relevo e exposição solar) é essencial para sua avaliação, assim como para o apontamento de medidas de conservação e recuperação dos mesmos. Porém, estes parâmetros, quando correlacionados com os índices de vegetação (SAVI e IAF), mostraram que apenas os parâmetros de altitude e relevo apresentaram boa correlação.

O indicador dos estágios de sucessão dos fragmentos florestais proposto permite a replicação em outros fragmentos florestais do bioma Mata Atlântica, apresentando-se como uma alternativa científica viável e capaz de indicar o provável estágio de sucessão dos fragmentos florestais, otimizando tempo e recursos. Deste modo, essa pesquisa pode contribuir com o planejamento e gestão ambiental dos recursos florestais, uma vez que essa avaliação pode exercer o papel de orientar os procedimentos de licenciamento de exploração da vegetação nativa e na efetividade de planejamento e recuperação ambiental.

Por fim, recomenda-se atenção ao avaliar os fragmentos florestais espacialmente, já que pode ocorrer a presença de espécies exóticas invasoras, que interferem e prejudicam o processo de regeneração natural dos fragmentos florestais.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de

Financiamento 001. Números dos processos: 88887.337510/2019-00 e 88882.434503/2019-01.

Contribuição dos autores

O presente artigo é resultado da dissertação de mestrado da autora Amanda Trindade Amorim que é responsável pela coleta e processamento dos dados, análise e discussão dos resultados e elaboração do texto. A autora Jocy Ana Paixão de Sousa contribuiu na coleta de dados em trabalhos de campo, na análise e discussão dos resultados. O autor Roberto Wagner Lourenço contribuiu na função de orientador, desde a concepção da ideia principal até a revisão do artigo.

Referências

- ABDALLA, L.S.; CRUZ, C.B.M. Análise de fragmentação florestal no município de Silva Jardim, APA do Rio São João, RJ. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 67, n. 1, 2015. pp.169-184.
- ALLEN, R.; BASTIAANSEN, W.; WARTES, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **Surface energy balance algorithms for land (SEBAL), Idaho implementation - Advanced training and user's manual**, version 1.0, 2002, 97p.
- AMARAL, M.V.F.; SOUZA, A.L.; SOARES, V.P.; SOARES, C.P.B.; LEITE, H.G.; MARTINS, S.V. Avaliação e comparação de métodos de classificação de imagens de satélites para o mapeamento de estádios de sucessão florestal. **Revista Árvore**, vol. 33, n. 3, 2009. pp.575-582.
- AMORIM, M.C.C.T. **Teoria e método para o estudo das ilhas de calor em cidades tropicais de pequeno e médio porte**. Tese de livre-docência. Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, São Paulo, 2017. 178p.
- ARAÚJO, F.S.; MARTINS, S.V.; MEIRA NETO, J.A.A.; LANI, J.L.; PIRES, I.E. Estrutura da Vegetação Arbustivo-Arbórea Colonizadora de uma Área

- Degradada por Mineração de Caulim, Brás Pires, MG. **Revista árvore**, vol. 30, n. 1, 2006. pp.107-116.
- BISPO, P.C.; VALERIANO, M.M.; KUPLICH, T.M. Variáveis geomorfométrica locais e sua relação com a vegetação da região do interflúvio Madeira-Purus (AM-RO). **Acta Amazonica**, vol. 39, n. 1, 2009. pp. 81-90.
- BOEGH, E.; SOEGAARD, H.; THOMSEN, A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. **Remote Sensing of Environment**, vol. 79, n. 2-3, 2002. pp.329-343.
- CALEGARI, L.; MARTINS, S.V.; GLERIANE, J.M.; SILVA, E.; BUSATO, L.C. Análise da dinâmica de fragmentos florestais no município de Carandaí, MG, para fins de restauração florestal. **Revista Árvore**, vol. 34, n. 5, 2010. pp.871-880.
- CINTRA, D.P. **Classificação de estágios sucessionais florestais por meio de imagens de alta resolução (Ikonos) no Parque Estadual da Pedra Branca, RJ**. Dissertação de Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais. Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2007. 87p.
- CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 1, de 31 de janeiro de 1994. Define vegetação primária e secundária nos estágios pioneiro, inicial e avançado de regeneração da Mata Atlântica, a fim de orientar os procedimentos de licenciamento de exploração da vegetação nativa no Estado de São Paulo. Brasília, **Diário Oficial da União**, 31 de janeiro de 1994.
- CORRÊA, M.P.; FRANCELENO, M.R. Avaliação da influência da radiação na regeneração natural de Mata Atlântica. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, João Pessoa-PB, 2015. pp.6445-6450.
- COSTA, T.A.; GASPAR, R.O.; SOARES, V.P.; SOUZA, A.L.; MARIA, A.C.S.; AMARO, M.A. Avaliação de estágios sucessionais em um fragmento de mata natural de acordo com a resolução n. 392 do CONAMA e sua correlação com imagem Ikonos CCD. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, Curitiba-PR, 2011. pp.2091-2096.
- CUNHA, J.E.B.L.; RUFINO, I.A.A.; SILVA, B.B.; CHAVES, I.B. Dynamics of vegetal cover for São João do Rio do Peixe Basin (Paraíba) using remote sensing.

- Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 16, n. 5, 2012. pp.539-548.
- ESRI, Environmental Systems Research Institute. **ArcGis 10.5**. 2016.
- FILGUEIRAS, T.S. A floração dos bambus e seu impacto ecológico. **Eugeniana**, vol. 15, n. 1, 1988. pp.01-08.
- GALVÍNCIO, J.D. **Sensoriamento Remoto e Análise Ambiental**. Recife - PE: Editora Universitária – UFPE, 2012. 150p.
- HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, vol. 25, n. 3, 1988. pp. 95-309.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de uso da terra**. 3ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. 171 p.
- IGC, Instituto Geográfico e Cartográfico. **Carta topográfica**. Serviço Gráfico do IGC, 1979. Escala 1:10.000.
- JAMALI, S.; SEAQUIST, J.; EKLUNDH, L.; ARDÖ, J. Automated mapping of vegetation trends with polynomials using NDVI imagery over the Sahel. **Remote Sensing of Environment**, vol. 141, n. 5, 2014. pp.79-89.
- JENSEN, J.R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. 2ª ed., São José dos Campos/SP: Parêntese, 2009. 598p.
- JESUS, E.N.; FERREIRA, R.A.; ARAGÃO, A.G.; SANTOS, T.I.S.; ROCHA, S.L. Estrutura dos fragmentos florestais da Bacia Hidrográfica do Rio Poxim-SE, como subsídio à restauração ecológica. **Revista Árvore**, vol. 39, n. 3, 2015. pp.467-474.
- LACERDA, A.E.B.; KELLERMANN, C. Bambus nativos como espécies invasoras no sul do Brasil. In: DRUMOND, P.M.; WIEDMAN, G. **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. 1. ed., Rio de Janeiro: ICH, 2017. pp.179-196.
- LIMA, A.M.; MARIANO, Z.F. Análise microclimática no interior e fora das florestas estacionais semidecíduais na área da bacia da usina hidrelétrica de Caçu-GO. **Revista do Departamento de Geografia-USP**, vol. 27, 2014. pp.67-87.
- LOPES, E.R.N.; REUSS-STRENZEL, G.M. Geoprocessamento aplicado ao monitoramento da ocupação de unidades de conservação – um olhar sobre a Área de Proteção Ambiental de Guaibim. **Revista de Geografia (UFPE)**, vol. 32, n. 3, 2015. pp.43-59.

- LOPES, E.R.N.; SALES, J.C.A.; SOUSA, J.A.P. AMORIM, A.T.; ALBUQUERQUE FILHO, J.L.; LOURENÇO, R.W. Losses on the Atlantic Mata vegetation induced by land use changes. **CERNE**, vol. 24, n. 2, 2018. pp.121-132.
- LOURENÇO, R.W.; SILVA, D.C.C.; SALES, J.C.A.; CRESPO, G.C.; PIÑARODRIGUES, F.C.M. Geoprocessamento como ferramenta de gestão e planejamento ambiental: O caso da cobertura vegetal em áreas urbanas. In: SMITH, W.S.; MOTA JÚNIOR, V.; LIMA, J.C. **Biodiversidade do Município de Sorocaba**. Sorocaba, SP: Prefeitura Municipal de Sorocaba, Secretaria do Meio Ambiente; 2014. pp.65-78.
- MARQUES, O.; TIENNE, L.; CORTINES, E.; VALCARCEL, R. Atributos ambientais definidores de presença de fragmentos florestais de Mata Atlântica em microbacias instáveis. **Revista Universidade Rural Série Ciências da Vida**, vol. 24, n. 2, 2004. pp.145-150.
- MCT, Ministério da Ciência e Tecnologia. **Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica**: Período de 2015-2016. Fundação SOS Mata Atlântica e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São Paulo, 2017. 69p.
- NASCIMENTO, M.C.; SOARES, V.P.; RIBEIRO, C.A.A.S.; SILVA, E. Mapeamento dos fragmentos de vegetação nativa na bacia hidrográfica do Rio Alegre, Espírito Santo, a partir de imagens do satélite IKONOS II. **Revista Árvore**, vol.30, n. 3, 2006. pp.389-398.
- OLIVEIRA, L.M.T.; SILVA, E.; BRITES, R.S.; SOUZA, A.L. Diagnóstico de fragmentos florestais nativos, em nível de paisagem, Eunápolis-BA. **Revista Árvore**, vol. 21, n. 4, 1997. pp. 501-510.
- PASTORE, M.; RODRIGUES, R.S.; SIMÃO-BIANCHINI, R.; FILGUEIRAS, T.S. **Plantas exóticas invasoras na Reserva Biológica do Alto da Serra de Paranapiacaba, Santo André-SP**: guia de campo. São Paulo: Instituto de Botânica, 2012. 46p.
- PLANET. **Planet imagery product specification**: Planetscope & Rapideye. Planet, 2016. 52p. Disponível em: <https://www.planet.com/products/satellite-imagery/files/1610.06_Spec%20Sheet_Combined_Imagery_Product_Letter_ENGv1.pdf>.
- PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação**. 1ª ed., São José dos Campos: Parêntese, 2007. 135p.

- SALES, J.C.A.; LOPES, E.R.N.; SOUZA, J.C.; SOUSA, J.A.P.; PADOVANNI, N.G.; MORAIS, M.C.M., et al. Composição do índice de exposição antrópica de fragmentos florestais da bacia hidrográfica do Rio Una, Ibiúna/São Paulo. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, Santos-SP, 2017. pp. 249-256.
- SANTOS, J.F.C.; MENDONÇA, B.A.F.; ARAÚJO, E.J.G.; ANDRADE, C.F. Fragmentação florestal na Mata Atlântica: o caso do município de Paraíba do Sul, RJ, Brasil. **Revista Brasileira de Biociências**, vol. 15, n. 3, 2017. pp. 151-158.
- SILVEIRA, C.S.; SILVA, V.V. Dinâmica de regeneração e desmatamento da vegetação provocadas por fatores climáticos e geomorfológicos: uma análise geoecológica através de SIG. **Revista Árvore**, vol. 34, n. 6, 2010. pp. 1025-1034.
- SOUZA, E.R.; VICENS, R.S.; CRUZ, C.B. Estágios de conservação da vegetação em área de mata atlântica a partir de imagem hiperespectral. **Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFF**, vol. 16, n. 31, 2014. pp.101-122.
- TONELLO, K.C.; DIAS, H.C.T.; SOUZA, A.L.; RIBEIRO, C.A.A.S.; LEITE, F.P. Morfometria da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhanes – MG. **Revista Árvore**, vol. 30, n. 5, 2006. pp.849-857.
- VIANA, V.M. Biologia e manejo de fragmentos florestais. In: Congresso Florestal Brasileiro, 1990, Campos do Jordão-SP. **Anais...** Curitiba: Sociedade Brasileira de Silvicultura/Sociedade de Engenheiros Florestais, 1990. p. 113-118.
- VIANA, V.M.; PINHEIRO; L.A.F.V. Conservação da biodiversidade em fragmentos florestais. **Série Técnica IPEF**, vol. 12, n. 32, 1998. pp.25-42.
- VIDAL, M.M.; PIVELLO, V.R.; MEIRELLES, S.T.; METZGER, J.P. Produção de serapilheira em floresta Atlântica secundária numa paisagem fragmentada (Ibiúna, SP): importância da borda e tamanho dos fragmentos. **Revista Brasileira de Botânica**, vol. 30, n. 3, 2007. pp.521-532.