

Integração geotecnologías e lógica Fuzzy na identificação de fragmentos florestais e rotas de corredores ecológicos

Integración de geotecnologías y lógica difusa Fuzzy para identificar
fragmentos forestales y rutas de corredores ecológicos

Integration geotechnologies and Fuzzy logic to identify forest fragments
and ecological corridors

Ivo Augusto Lopes Magalhães¹, Carlos Roberto Lima Thiago² e Alexandre Rosa dos Santos²

¹ Universidade de Brasília (UnB), Instituto de Geociências
Brasília, Brasil

² Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Programa de Pós-graduação
Vitória, Espírito Santo, Brasil

ivosrmagalhaes@gmail.com; tucca119@hotmail.com; mundogeomatica@yahoo.com.br

Magalhães: <https://orcid.org/0000-0003-4136-1972>

Thiago: <https://orcid.org/0000-0003-4413-7482>

Santos: <https://orcid.org/0000-0003-2617-9451>

Resumo

O objetivo deste estudo foi integrar o uso de geotecnologias e lógica *Fuzzy* na identificação de fragmentos florestais potenciais e propor rotas de corredores ecológicos na bacia hidrográfica do rio Itapemirim no estado do Espírito Santo. A delimitação dos fragmentos florestais foi executado por meio do classificador Maxver na imagem Landsat 8 OLI obtida por meio do endereço eletrônico da United States Geological Survey – USGS. Para o cálculo das métricas de ecologia da paisagem utilizou-se o V-LATE 2.0 e lógica *Fuzzy*. Já para delimitar os corredores ecológico utilizou técnicas de geoprocessamento. A classificação dos fragmentos apresentou alta acurácia, com índice Kappa de 0,82 e 0,91 de Exatidão Global. Os corredores totalizaram 70.879,65 m de comprimento, com comprimento médio de 746,10 m. As técnicas de geoprocessamento e lógica *Fuzzy*, mostrou-se eficiente, ao desenvolver rotas de corredores ecológicos de forma automatizada, dimensões dos fragmentos e a distribuição espacial da paisagem.

PALAVRAS CHAVE: sensoriamento remoto; recursos florestais; Mata Atlântica; geoprocessamento.

Resumen

El objetivo de este estudio fue integrar el uso de geotecnologías y lógica difusa (*Fuzzy*) para identificar fragmentos forestales potenciales y proponer rutas de corredores ecológicos en la cuenca del río Itapemirim, en el estado de Espírito Santo. Los fragmentos de bosque fueron delimitados utilizando el clasificador *Maxver* sobre la imagen Landsat 8 OLI obtenida del sitio web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Se utilizó V-LATE 2.0 y lógica difusa para calcular las métricas de ecología del paisaje. Se utilizaron técnicas de geoprocésamiento para delimitar los corredores ecológicos. La clasificación de los fragmentos fue muy precisa, con un índice Kappa de 0,82 y una precisión global de 0,91. Los corredores totalizaron 70.879,65 m de longitud, con una longitud media de 746,10 m. Las técnicas de geoprocésamiento y lógica difusa demostraron su eficacia para elaborar rutas de corredores ecológicos de forma automatizada, las dimensiones de los fragmentos y la distribución espacial del paisaje.

PALABRAS CLAVE: teledetección; recursos forestales; Mata Atlántica; geoprocésamiento.

Abstract

The objective of this study is to integrate the use of geotechnologies and Fuzzy logic in the identification of potential forest fragments and to propose ecological corridor routes in the Itapemirim river basin in the state of Espírito Santo. The delimitation of forest fragments was carried out using the Maxver classifier on the Lansat 8 OLI image obtained through the electronic address of the United States Geological Survey – USGS. To caculate landscape ecology metrics, V-LATE 2.0 and Fuzzy logic were used. To delimit the ecological corridors, geoprocessing techniques were used. Fragment classification showed high accuracy, with a Kappa index of 0.82 and 0.91 Global Accuracy. The corridors totaled 70,879.65 m in length, with an average length of 746.10 m. Goprocessing and Fuzzy logic techniques proved to be efficient, when developing ecological corridor routes in an automated way, fragment dimensions and the spatial distribution of the landscape.

KEYWORDS: remote sensing; forest resources; Atlantic forest; geoprocessing.

1. Introdução

O bioma Mata Atlântica possui aproximadamente 14,5 % da sua vegetação original do bioma que está distribuída espacialmente em formatos de fragmentos florestais com tamanho reduzido a menos de 100 hectares (Fundação SOS Mata Atlântica, 2014).

Conforme esse instituto, o estado do Espírito Santo possui a sua totalidade territorial sob o domínio do Bioma Mata Atlântica, com área aproximada de 12,2 % de seu território ocupado por fragmentos florestais.

A fragmentação florestal é definida como um processo, em escala de paisagem, que envolve tanto a perda de habitat quanto a ruptura da continuidade, e como resultado dessa combinação, forma-se paisagens com pequenos ecossistemas nativos e isolados dos demais com grande proporção de borda (Fahrig, 2003).

O processo de fragmentação florestal é impulsionado pela atividade desordenada de uso e ocupação da terra e pelo crescimento populacional. Os aspectos mais graves do processo de fragmentação florestal são a perda da biodiversidade e o efeito de borda (Pirovani, 2010). Com a fragmentação florestal ocorrem modificações nas condições abióticas e bióticas, consequentemente na distribuição dos organismos no espaço. Suas implicações dependem de alterações na estrutura da paisagem dos fragmentos florestais, que seja na área, na forma, na posição na paisagem e no grau de isolamento (Castro, 2004).

De acordo com Thiago *et al.* (2020), as barreiras criadas pela fragmentação florestal dificultam a dispersão entre as espécies, diminuindo o fluxo gênico, a variabilidade genética, logo, a capacidade de adaptação das mesmas. Esses efeitos podem ser mitigados se as populações não ficarem isoladas. Sendo assim, é de fundamental importância o desenvolvimento de ações direcionadas para promover a conexão entre os fragmentos.

Os corredores ecológicos são apontados como uma das soluções viáveis tanto para a ligação de ecossistemas fragmentados como para a manutenção da biodiversidade (Seoane *et al.*, 2010). Uma vez que os corredores ecológicos,

referem-se às extensões de terra com manchas contínuas de vegetação que visam permitir o trânsito e o fluxo gênico entre as populações (Ayres *et al.*, 2005). Dentre as suas principais funções destacam-se a redução da fragmentação das florestas existentes, a restauração da conectividade da paisagem e a manutenção dos recursos hídricos (Muchailh *et al.*, 2010).

Mediante o cenário de fragmentação florestal e de perda da biodiversidade no bioma Mata Atlântica, é imperioso compreender as relações espaciais entre os fragmentos florestais, indicar aqueles fragmentos com maior potencial bem como estudar rotas alternativas de corredores ecológicos que busquem a manutenção e conservação do referido bioma.

Os recursos florestais ganharam grandes aliados, adivindos das imagens de sensoriamento remoto e de sistemas de informações geográficas – SIG, o que atualmente contribuem para o monitoramento florestal com imagens de alta resolução espacial e temporal. Os aplicativos computacionais são fundamentados na matemática, de forma que as possibilidades são infinitas, e dentre os aplicativos, a metodologia da lógica Fuzzy vem agregar possibilidades de melhoria de interpretação dos dados. Entretanto, os produtos obtidos via lógica Fuzzy diferem da álgebra de mapas que utiliza lógica booleana, que expressa seus resultados de forma binária, não sendo possível a condição “talvez”. O ideal é que as evidências que representam importância relativa diferente recebam pesos de diferentes valores e não sejam tratadas igualmente (Zadeh, 1965; Câmara *et al.*, 2001; Silva *et al.*, 2019).

Um conjunto Fuzzy é caracterizado por uma função de pertinência que apresenta a cada elemento um grau de certeza, variando entre 0 e 1. Cada valor real de uma variável próximo do ponto central do conjunto será indicada como 1, os valores que não fazem parte do conjunto recebem o valor 0. Os valores que situam entre os dois limites se encontram na zona de transição do conjunto. O valor fuzzificado de 0,5 é o ponto médio e o valor Fuzzy superior a 0,5 indica a maior possibilidade de o valor da variável pertencer a um membro do conjunto e um valor

Fuzzy inferior indica a menor possibilidade (Silva *et al.*, 2019).

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo integrar o uso de geotecnologias e lógica Fuzzy na identificação de fragmentos florestais potenciais e propor rotas de corredores ecológicos na bacia hidrográfica do rio Itapemirim no estado do Espírito Santo. Até onde sabemos, não há nenhum estudo que realizou a integração de técnicas de sistemas de informações geográficas e lógica Fuzzy para mapear, fragmentos florestais, identificar e propor corredores ecológicos na Mata Atlântica capixaba. Neste contexto, abordamos a seguinte questão de pesquisa neste estudo: A integração entre técnicas de geoprocessamento e lógica Fuzzy são eficientes para delimitar fragmentos florestais e desenvolver de rotas dos corredores ecológicos em uma bacia hidrográfica no bioma Mata Atlântica?

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Itapemirim - BHRI localiza-se na região Sul do estado do Espírito Santo, situada entre as seguintes coordenadas geográficas: 20° 10' e 21° 00' latitude Sul e 41° 00' e 41° 30' longitude Oeste na projeção Universal Transverse Mercator (UTM), Zona 24 Sul, no sistema de referência World Geodesic System (WGS-84). Com área de 5.913,69 km² a BHRI abrange os municípios de Alegre, Atílio Vivacqua, Cachoeiro de Itapemirim, Castelo, Conceição de Castelo, Ibatiba, Ibitirama, Irupi, Itapemirim Júna, Jerônimo Monteiro, Muniz Freire, Muqui, Presidente Kennedy, Vargem Alta, Venda Nova do Imigrante (FIGURA 1).

O clima da BHRI caracteriza-se, segundo a classificação climática de Köppen, pelos tipos Cw, que corresponde ao clima subtropical de altitude, com inverno seco e verão ameno (Cwb), clima subtropical de inverno seco (com temperaturas inferiores a 18°C) e verões quente, com temperaturas superiores a 22°C (Cwa), e Aw, clima tropical, com estação chuvosa no verão (Alvares *et al.*, 2013).

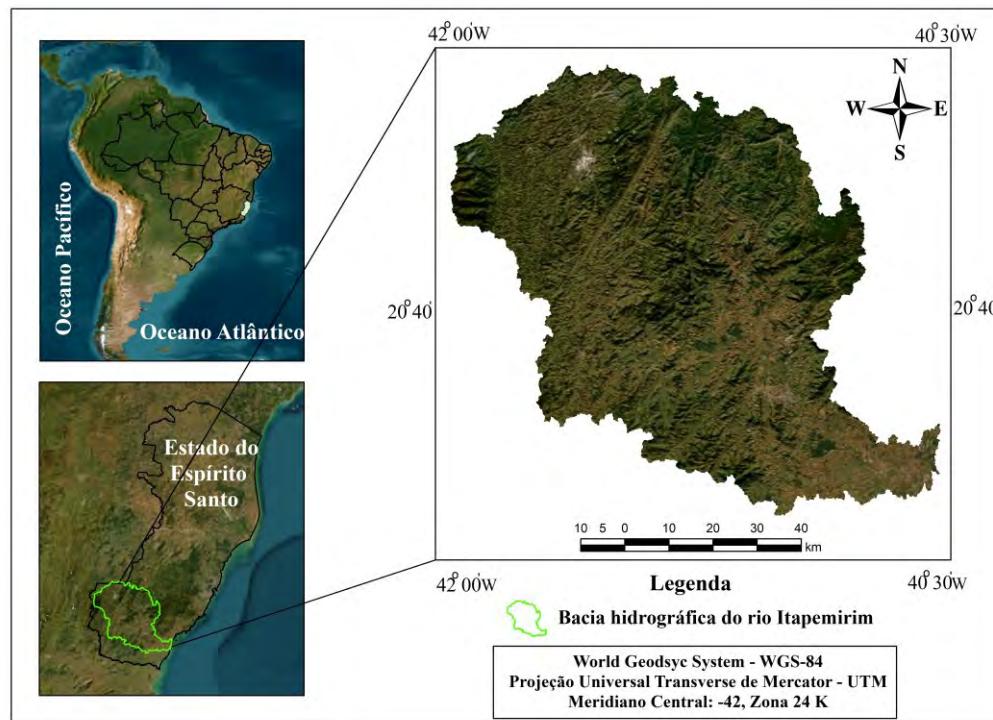


FIGURA 1. Localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Itapemirim, no estado do Espírito Santo, Brasil

2.2 Aquisição de dados de sensoriamento remoto

A seleção da imagem do satélite Landsat 8 OLI foi realizada por meio do catálogo de imagens do instituto *United States Geological Survey* (USGS), com boas condições atmosféricas, no período em estiagem, com cobertura menor que 10%. A imagem que compõe a área de estudo é

referente à órbita 216, ponto 74, com data de 17 de junho de 2020, disponível no endereço eletrônico: arthexplorer.usgs.gov (USGS, 2020).

2.3 Classificação dos fragmentos florestais

O fluxograma metodológico contendo as etapas utilizadas para a delimitação dos fragmentos florestais é apresentado por meio da (FIGURA 2).

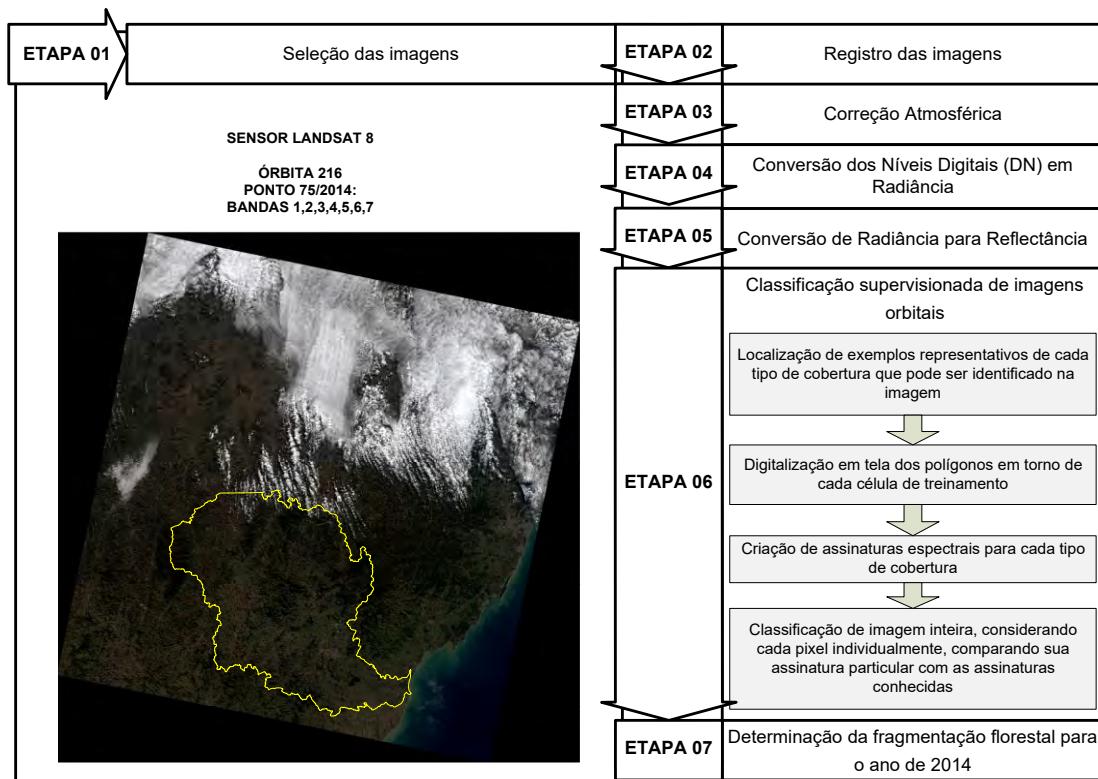


FIGURA 2. Fluxograma metodológico com as etapas utilizadas para o mapeamento da fragmentação florestal na bacia hidrográfica do rio Itapemirim

A classificação supervisionada de imagens utilizam algoritmos cujo reconhecimento das assinaturas espectrais são realizados com base na amostragem da região de interesse que é fornecida ao software de SIG no momento da classificação (Moreira, 2011; Jensen, 2011). As sub-etapas metodológicas utilizadas para realização da classificação supervisionada foi desenvolvida na sequência metodológica: 1. localização de exemplos representativos de cada tipo de uso e cobertura da terra que pode ser identificado na imagem; 2. fotointerpretação dos polígonos em torno de cada célula de

treinamento; 3. coleta de assinaturas espectrais para cada tipo de cobertura; e 4. classificação de imagem, considerando cada pixel individualmente, comparando-o a assinatura particular com as assinaturas conhecidas.

Utilizou-se o algoritmo da máxima verossimilhança visando realizar a classificação supervisionada da imagem. Neste algoritmo é possível calcular a probabilidade estatística de um dado valor de pixel pertencer a uma classe particular de cobertura da terra (Lillesand e Kieffer, 1994).

A acurácia da classificação foi analisada por meio da matriz de confusão, erros de omissão e comissão, acurácia global e índice Kappa (Congalton e Green, 1993). A acurácia global (OA) e o índice Kappa foram calculados por meio das equações. 1 e 2:

$$OA = \sum_{i=1}^m \frac{n_{ii}}{n}$$

Em que: n_{ii} = elementos diagonais da matriz de confusão; n = número total de observações; e m : número de temas mapeados.

$$Kappa = \frac{\sum_{i=1}^M x_i - \sum_{i=1}^M (x_i + x + i)}{n^2 - \sum_{i=1}^M (x_i + x + i)}$$

Em que: n = número total de observações; e x_i e $x+i$ são as somas em linha e coluna. Kappa é um coeficiente que varia de zero a um, representando um índice de concordância geral. Os valores Kappa estão associados à qualidade da classificação. Os valores das células foram considerados para medir erros de omissão e comissão. As células marginais nas linhas indicam a quantidade de pixels que não foram incluídos em uma determinada categoria, ou seja, expressam o erro conhecido por padrão. As células nas diagonais representam os pixels que não foram incluídos em nenhuma categoria, expressando o erro de comissão (Congalton e Green, 1993). Foram calculados o erro de omissão (OEi) e o erro de comissão (CEj) para as classes temáticas da classificação conforme equações 3 e 4:

$$OEi = \frac{\sum X_{ij} - X_{ii}}{\sum X_{ij}} \quad CEj = \frac{\sum X_{ij} - X_{jj}}{\sum X_{ij}}$$

Em que: $\sum X_{ij} - X_{ii}$ = somatório de resíduos por linha; $\sum X_{ii} - X_{jj}$ = somatório de resíduos por coluna; e $\sum X_{jj}$ = marginal da linha ou coluna.

2.3 Modelagem do potencial espacial dos fragmentos florestais

O desenvolvimento da modelagem do potencial espacial dos fragmentos, foi utilizado a extensão V-LATE 2.0 (Land e Tiede, 2003) e lógica Fuzzy no

aplicativo computacional ArcGis 10.5. A cada conjunto *Fuzzy*, representado pela imagem matricial da variável de entrada, foi definida uma função de pertinência que apresenta a cada elemento do conjunto, um grau de certeza, variando entre 0 e 1, em que o maior potencial é indicado quando o valor real da variável assume 1 e nulo quando o valor real da variável assume 0. Dessa forma, o potencial é determinado no intervalo [0, 1].

As camadas de informação foram criadas usando um tamanho de célula de 15 x 15 m, a fim de permitir uma análise mais aprofundada do valor da função *Fuzzy*. Para as variáveis distância do vizinho mais próximo, índice de forma e dimensão fractal, foi definida uma função de pertinência *Fuzzy Small*. Essa função permite representar a variação gradual em torno da imagem matricial com valores de entrada menores com maior possibilidade ser um membro do conjunto e assumir valor 1. O valor definido no ponto central confere um grau de pertinência de 0,5 com um grau de propagação de 1 – 10 que define a forma e a característica da zona de transição conforme a equação 5:

$$\mu(x) = 1/(1 + (x/c)^a)$$

Em que: x = grau de pertinência da função *Small* a partir das variáveis; a = parâmetro que determina a inclinação da curva; e c = corresponde ao valor no ponto médio que $\mu(x)$ adquire 0,5.

Para as variáveis área central, área do vizinho mais próximo e área do fragmento, foi definida uma função de pertinência *Fuzzy Large*. A função permite representar a variação gradual em torno da imagem matricial com valores de entrada maiores com maior possibilidade de ser um membro do conjunto e assumir valor 1. O valor definido no ponto central confere um grau de pertinência de 0,5 com um grau de propagação de 1 – 10 que define a forma e a característica da zona de transição conforme equação 6:

$$\mu(x) = 1/(1 + (x/c)^{-a})$$

Em que: x = grau de pertinência da função *Large* a partir das variáveis; a = parâmetro que determina a inclinação da curva; e c = valor no ponto médio que $\mu(x)$ adquire 0,5. Na modelagem do potencial espacial dos fragmentos em ambiente SIG, as variáveis analisadas que exercem influência sobre o potencial espacial do fragmento, foram combinadas por meio da análise de sobreposição para indicar a possibilidade da célula da imagem matricial de uma variável ser um membro de cada conjunto *Fuzzy* das demais variáveis pelos critérios múltiplos de entrada. Desse modo, o tipo de sobreposição indica o método que permite combinar os dados com base na análise da teoria de conjuntos. O método de sobreposição escolhido para a entrada da imagem matricial foi o operador *Fuzzy Gamma* que é um produto algébrico do *Fuzzy Sum* e *Fuzzy Product*, ambos elevado a potência da gama conforme equação 7:

$$\mu(x) = \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right\}^y * \left\{ \prod_{i=1}^n \pi_i \right\}^{1-y}$$

Em que: μ_i = valores de associação *Fuzzy* para $i = 1, 2, 3, \dots, 5$; n = camada de dados matriciais, ou seja, o número de variáveis no estudo; y = coeficiente com valores entre 0 e 1.

O coeficiente foi definido com valor padrão de 0,9 para alcançar o efeito combinado entre o total e o produto *gamma*. O *Fuzzy Gamma* permite combinar o efeito crescente do *Fuzzy Sum* e o efeito decrescente do *Fuzzy Product* e não simplesmente retorna o valor de um único conjunto *Fuzzy*.

2.4 Delimitação de corredores ecológicos

Para análise mais detalha dos corredores, a bacia hidrográfica foi dividida em três setores: Cachoeiro/Itapemirim; Vargem Alta/Conceição do Castelo e Muniz Freire/Ibitirama. Criou-se um banco de dados e uma base cartográfica digital utilizados como base, arquivos no formato “shapefiles” (.shp): hidrografia, manchas urbanas, vias urbanas e vias interurbanas. Foram considerados fatores tais como: uso e ocupação da terra, áreas de preservação permanente,

declividade e potencial espacial dos fragmentos, de posse desses dados utilizou-se a técnica de pesos de menor custo (Louzada *et al.*, 2012).

O mapa de uso e ocupação da terra foi desenvolvido por meio da fotointerpretação das aeroftos do Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo – IEMA. Para cada classe de uso da terra foi determinado o peso de adequabilidade, numa escala de 1 a 100, sendo os pesos mais elevados atribuídos àqueles por onde os corredores não deveriam passar, conforme as diferentes formas de uso, dando origem ao mapa de fricção, o qual foi obtido com a soma de todos os pesos atribuídos para cada elemento considerado. A esse procedimento, objetivou-se gerar uma superfície de custo nas quais as classes com maiores pesos teriam maiores custos, para o caso de conservá-los ou recuperá-los. O mapa de APPs totais, foi desenvolvido em duas classes, sendo uma a de APPs Totais com peso 1 e a classe de Outras áreas com peso 100, uma vez que o objetivo maior é que a rota dos CEs passe pelas APPs, estas receberam o peso menor. Após a atribuição dos pesos, as imagens matriciais foram multiplicadas pelo seu respectivo peso estatístico, utilizando método AHP proposto por Saaty (1977) e, posteriormente somados gerando a Imagem Matricial de Custo Total de acordo com a equação 8:

$$\text{CustoTotal} = P_1 \times \text{UsoTCusto} + P_2 \times \text{APPsCusto} + P_3 \times \text{DecCusto};$$

Em que: Custo Total = Imagem Matricial de custo total; P_1 = Peso estatístico da imagem matricial de custo de uso e cobertura da terra; P_2 = Peso estatístico da imagem matricial de custo de APPs; P_3 = Peso estatístico da imagem matricial de custo de declividade; UsoTCusto = Imagem Matricial de custo de uso e cobertura da terra; APPsCusto = Imagem Matricial de custo de APPs; e DecCusto = Imagem Matricial de custo de declividade.

Para traçar os caminhos ótimos, os quais representam menores custos entre os fragmentos, utilizou-se a técnica do caminho mais curto (função *Shortest Path*). Esta função

utiliza as imagens matriciais de distância e direção de custo para determinar uma rota de menor custo entre os fragmentos. Posteriormente, fez-se a interligação entre os fragmentos com os corredores possuindo largura igual a 10% de seu comprimento seguindo a orientação descrita pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 1996) na Resolução nº 09, de 24 de outubro de 1996, Art. 3º.

3. Resultados e discussão

3.1 Caraterização da fragmentação florestal

A classificação de imagem por Maxver apresentou valores de coeficiente Kappa de 0,82 (TABELA 1). Observou-se 1.619 amostras distribuídas sistematicamente na área de estudo, dentre essas amostras, 1.488 foram classificadas corretamente, resultando numa Exatidão Global de 0,91, Erro de Omissão (EO) de 0,06 e erro de Comissão (EC) de 0,16.

TABELA 1. Coeficiente Kappa, Exatidão Global e Erros de omissão e comissão na imagem Landsat 8 OLI obtido por meio do classificador Maxver

Classificação		Real Fragmento	Outros	Total	Erro de Comissão (EC)
Fragmentos	487	98	585		0,16
Outros	33	1001	1034		
Total	520	1099			
Erro de Omissão (EO)	0,06				

Foram identificados 11.749 fragmentos florestais em toda área representativa da bacia hidrográfica do rio Itapemirim, ES, que somados correspondem a uma área de 1.292,12 km². Esse valor corresponde a 22 % de cobertura florestal remanescente na área de estudo. O maior fragmento mensurado possui área de 8.100,94 ha, localizado entre os municípios de Ibitirama, Iúna e Irupi, correspondente ao Parque Nacional

do Caparaó. As classes definidas como grandes fragmentos, com área maior que 1.000 ha, são raros dentro da área analisada, sendo delimitados em apenas 07 fragmentos. Entretanto, delimitou-se 28 fragmentos com área maior que 500 ha.

A localização dos fragmentos florestais identificados hidrográfica do rio Itapemirim e as classes de tamanho são mostrados na FIGURA 3.

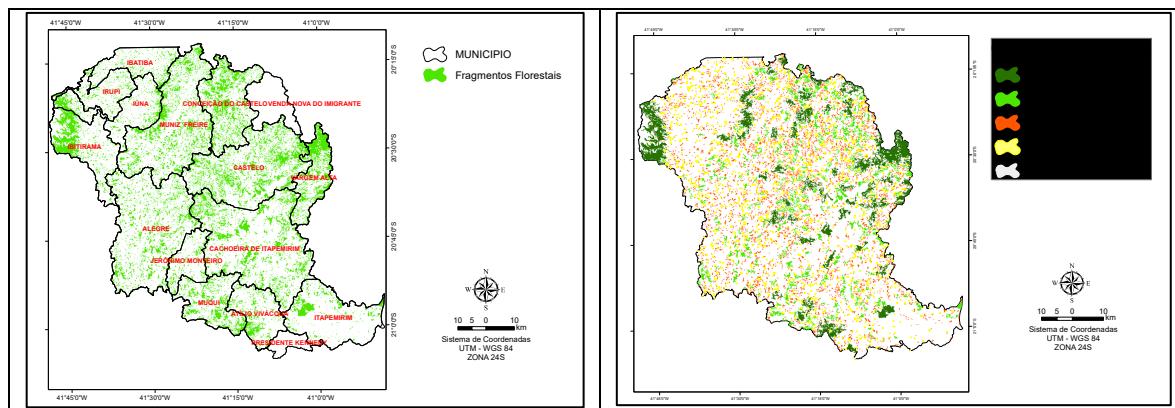


FIGURA 3. Fragmentos florestais identificados e classes de tamanho na bacia hidrográfica do rio Itapemirim obtidos por meio da classificação supervisionada de imagem Landsat-8 OLI

A maior parte dos fragmentos florestais mapeados possui área inferior a 5 ha, 72 % do número total de fragmentos identificados,

entretanto representam 10,3 % da cobertura florestal total. Por outro lado, os fragmentos de tamanho grande, maiores que 50 ha, refletem 3

% do número total de fragmentos, mas constituem 52,3 % da cobertura florestal.

Os grandes fragmentos possuem menor percentual em número, porém representam uma parcela maior da área total dos remanescentes florestais mapeados (52,3 %), enquanto, embora os fragmentos da classe de tamanho pequenos possuam maior número de unidades, a soma de suas áreas representa o menor percentual da área total de fragmentos florestais mapeados (10,3 %). A relação inversa entre número e área de fragmentos florestais observados neste estudo, também concorda com o trabalho realizado por Almeida (2008) e Pirovane (2010), em que autores constataram que os fragmentos grandes embora

em menor número, são responsáveis pela maior cobertura florestal em área.

Dentro dos limites dos municípios inseridos na área de estudo, Vargem Alta destaca-se com 44,54 % de sua área ocupada por fragmentos florestais, totalizando 9.580,91 ha. Entretanto, o município de Castelo com 18.367,63 ha, apresentou a maior área de remanescentes florestais. Presidente Kennedy é o município com menor área, 866,23 ha. Ibitirama possui o maior fragmento florestal da área de estudo, 6.391,29 ha. Na TABELA 2 é apresentado os resultados da análise da fragmentação florestal nos municípios inseridos na área de estudo.

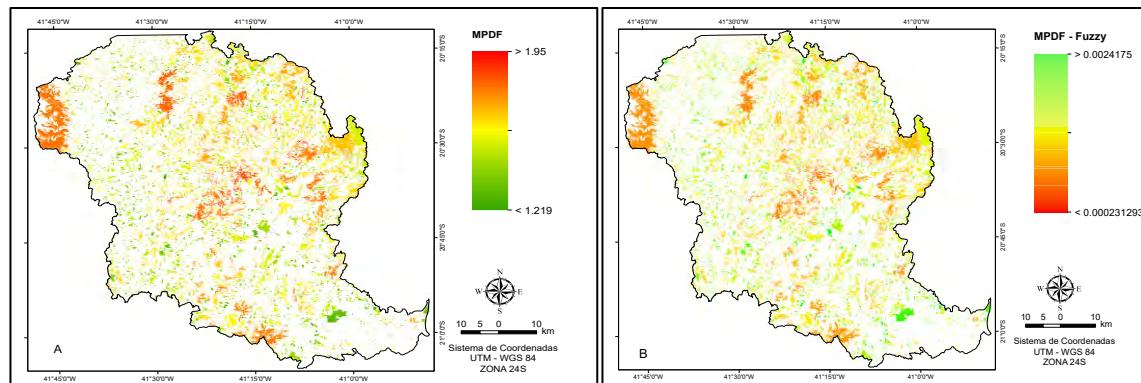
TABELA 2. Análise da fragmentação florestal nos limites dos municípios inseridos na bacia hidrográfica do rio Itapemirim, ES

Municípios	Municípios		Fragmentos Florestais		
	Área total (ha)	Área/Fragmentos (%)	Nº de fragmentos	Área Total (ha)	Maiores (ha)
Alegre	77.298,26	16,12	1.658	12.459,18	465,14
Atílio Vivácqua	22.686,00	19,04	419	43.20,07	1.232,17
Cachoeira de Itapemirim	87.597,27	20,46	1479	17.920,39	718,75
Castelo	66.879,60	27,46	1494	18.367,63	1.588,76
Conceição do Castelo	36.361,78	31,83	926	11.572,75	1.393,74
Ibatiba	20.976,65	12,35	573	2.591,62	314,55
Ibitirama	32.995,21	25,89	490	8.543,76	6.391,29
Irupi	18.372,34	12,64	474	2.321,70	209,91
Itapemirim	42.343,16	11,06	464	4.681,88	656,16
Iúna	27.863,93	16,87	613	4.701,77	1.463,25
Jerônimo Monteiro	16.230,85	14,62	374	2.372,43	99,62
Muniz Freire	67.887,06	23,17	1.752	15.726,40	1.700,40
Muqui	26.096,66	25,21	526	6.579,92	766,15
Presidente Kennedy	6.737,70	12,86	120	866,23	262,58
Vargem Alta	21.510,11	44,54	436	9.580,91	2.044,30
Venda Nova do Imigrante	18.690,83	34,01	400	6.356,19	865,90

3.2 Identificação de fragmentos potenciais para a delimitação de corredores ecológicos

Na FIGURA 4 são apresentados os mapas dos fragmentos florestais potenciais para a variável

dimensão fractal da mancha média (MPFD) e a imagem matricial da variável (MPFD), definidas por meio da função *Fuzzy Small*.



Como resultado o conjunto fuzzy assumiu menor valor (0,00023) em substituição ao maior valor (1,95), de dimensão fractal, e maior valor (0,0024) em substituição ao menor valor (1,21). A função de pertinência *Fuzzy Small*, permite representar a variação gradual em torno da imagem matricial com valores de entrada menores com maior

possibilidade ser um membro do conjunto e assumir valor 1.

Na FIGURA 5 é apresentado em (A), o mapa dos fragmentos florestais para a variável distância média do vizinho mais próximo (MNN). Em (B), a imagem matricial da variável (MNN), definida pela função *Fuzzy Small*.

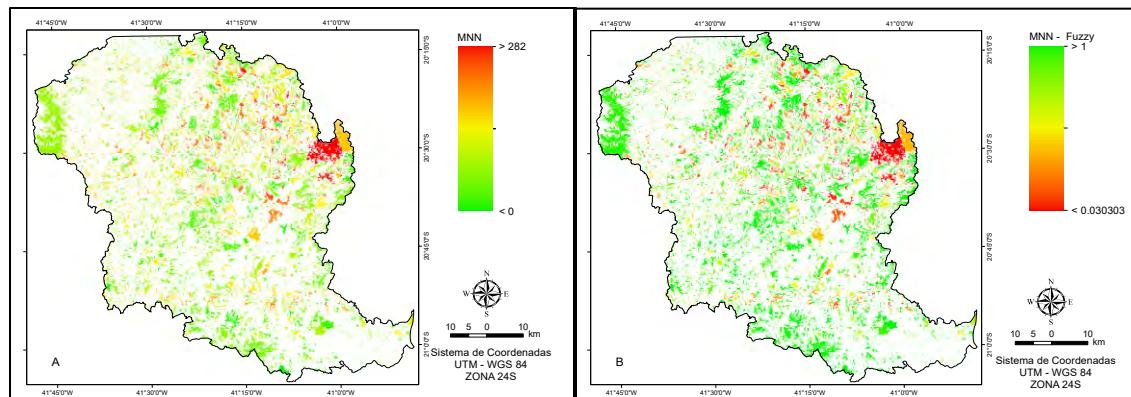
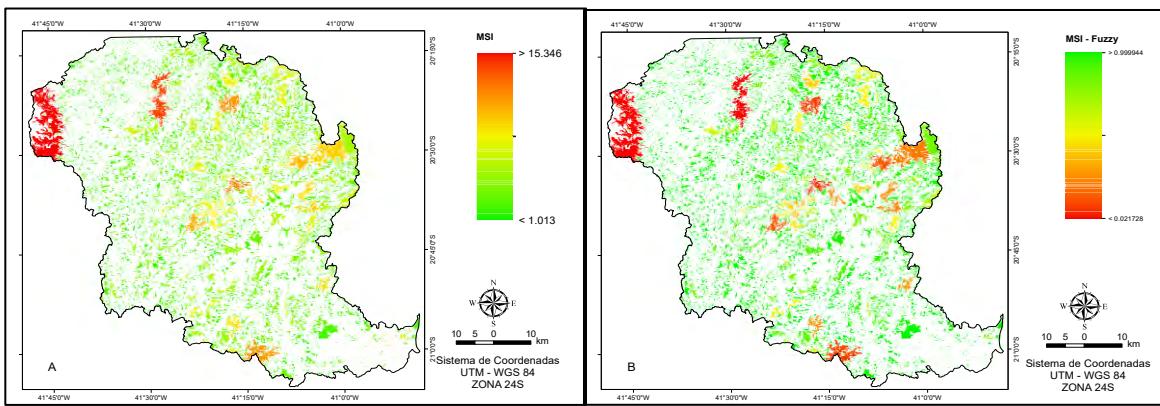


FIGURA 5. (A) Fragmentos florestais para a variável distância média do vizinho mais próximo (MNN), obtidos por meio de processamento dos índices métricos da paisagem florestal. (B) Imagem matricial da variável (MNN), definida pela função *Fuzzy Small*

A métrica distância média do vizinho mais próximo apresentou zero como menor valor e 282 m como a maior distância média entre os fragmentos. Para efeito de cálculo do potencial espacial dos fragmentos, menores valores representam menores distâncias entre os fragmentos, logo, maior potencial para conexão. Dessa forma o conjunto fuzzy assumiu como

menor valor (0,03) em substituição a maior distância média (282) e (1) em substituição a menor distância (zero). Na FIGURA 6, é apresentado em (A), o mapa dos fragmentos florestais para a variável índice de forma médio (MSI). Em (B), a imagem matricial da variável (MSI), definida pela função *Fuzzy Small*.



O índice de forma médio (MSI) apresentou (1,01) como menor valor e (15,34) como a maior valor entre os fragmentos. Para efeito de cálculo do potencial espacial dos fragmentos, menores valores representam geometrias mais próximas de um círculo, e por esse motivo, maiores áreas núcleos e menor efeito de borda, logo, maior potencial espacial para conexão. Sendo assim, o conjunto fuzzy assumiu como menor valor (0,02) em substituição ao maior valor encontrado para

o índice de forma (15,34), e (0,99) em substituição ao menor índice de forma (1,01).

Por intermédio da função de pertinência Fuzzy Large, foram produzidos mapas de potencial espacial dos fragmentos para as variáveis, área central (CA), área do vizinho mais próximo (NNA) e área total do fragmento (TA). Na FIGURA 7 é apresentado em (A), o mapa dos fragmentos florestais para a variável área central (CA). Em (B), a imagem matricial da variável (CA), definida pela função Fuzzy Large.

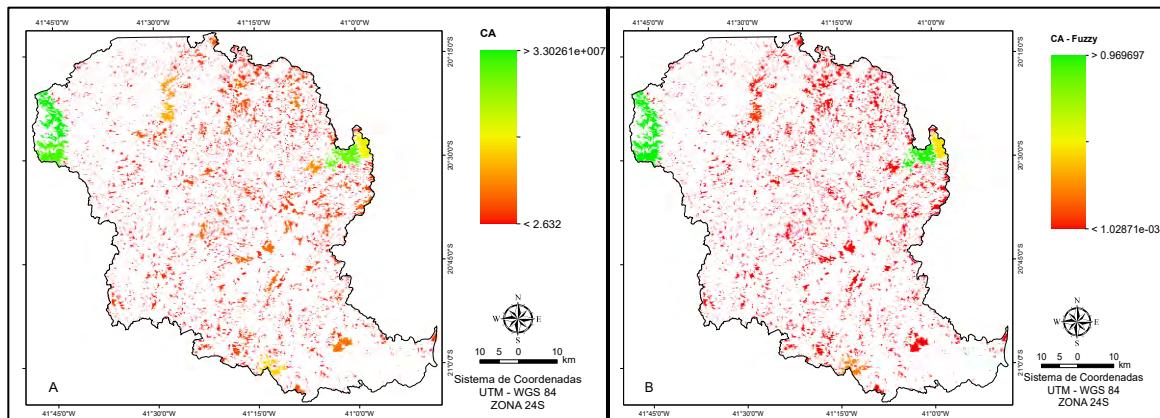


FIGURA 7. (A) Fragmentos florestais para a variável área central (CA), obtidos por meio de processamento dos índices métricos da paisagem florestal. (B) Imagem matricial da variável (CA), definida pela função Fuzzy Large

A variável área central (AC), obtida considerando uma distância de borda de 40 m, apresentou 2,63 m² como menor área e 33.026.117,30 m² como a maior área central entre os fragmentos. Valores maiores que 40 m, eliminariam por completo os fragmentos menores que 5 ha, fragmentos estes

essenciais para conexão dos fragmentos potenciais. Para o cálculo do potencial espacial dos fragmentos, menores valores de área central, representam fragmentos com menor capacidade de abrigar espécies de interior e fragmentos mais suscetíveis ao efeito de borda, logo, com menor

potencial espacial para conexão. Sendo assim, o conjunto fuzzy assumiu como menor valor $1,02871 \times 10^{-34}$ em substituição a menor área central $2,63 \text{ m}^2$, e 0,96 em substituição a maior área central.

A função de pertinência *Fuzzy Large*, permite representar a variação gradual em torno da

imagem matricial com valores de entrada maiores, adotando maior possibilidade de ser um membro do conjunto. Na FIGURA 8 é apresentado em (A), o mapa dos fragmentos florestais para a variável área do vizinho mais próximo (NNA). Em (B), a imagem matricial da variável (NNA), definida pela função *Fuzzy Large*.

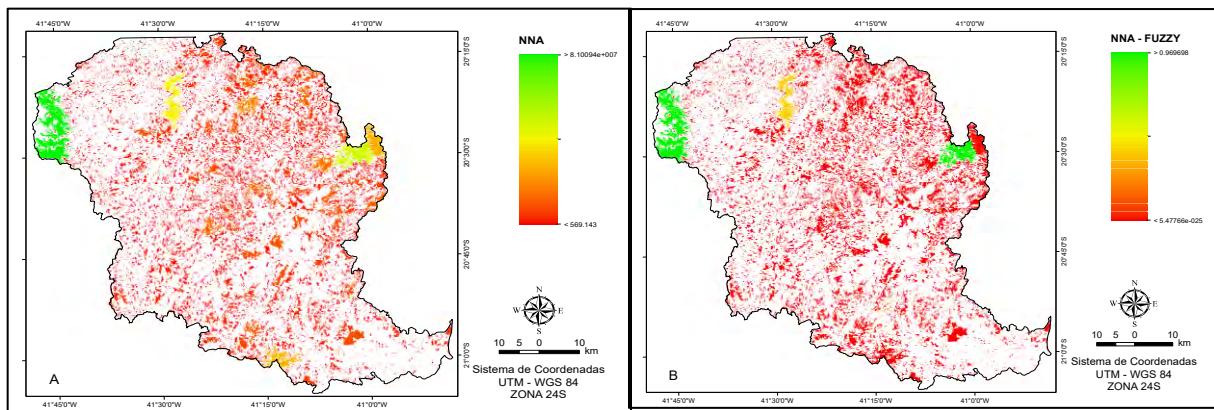


FIGURA 8. (A) Fragmentos florestais para a variável área do vizinho mais próximo (NNA), obtidos por meio de processamento dos índices métricos da paisagem florestal. (B) Imagem matricial da variável (NNA), definida pela função *Fuzzy Large*

A variável área do vizinho mais próximo (NNA) exibiu $569,14 \text{ m}^2$ como menor área do vizinho mais próximo e $81.009.424,15 \text{ m}^2$ como a maior (NNA) entre os fragmentos. Para o cálculo do potencial espacial dos fragmentos, menores valores de (NNA), foram tratados como fragmentos com menor potencial espacial para conexão. Sendo assim, o conjunto fuzzy assumiu

como menor valor $5,47766 \times 10^{-25}$ em substituição a menor área central e 0,96968 em substituição a maior área do vizinho mais próximo. Na FIGURA 9 é apresentado em (A), o mapa dos fragmentos florestais para a variável área total do fragmento (TA). Em (B), a imagem matricial da variável (TA), definida pela função *Fuzzy Large*.

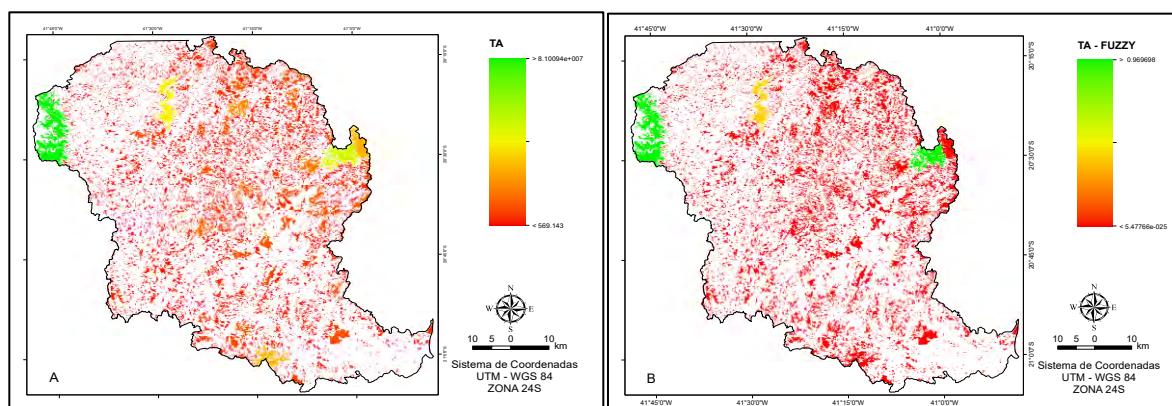


FIGURA 91. (A) Fragmentos florestais para a variável área total do fragmento (TA), obtidos por meio de processamento dos índices métricos da paisagem florestal. (B) Imagem matricial da variável (TA), definida pela função *Fuzzy Large*

A variável área total do fragmento (TA) apresentou resultados semelhantes aos resultados obtidos para a área do vizinho mais próximo. Este comportamento era esperado, entretanto, as variáveis fornecem informações distintas, uma vez que, a (TA), nos indica apenas o tamanho do fragmento, já a (NNA) nos informa a área do fragmento mais próximo. Para o cálculo do potencial espacial dos fragmentos, os menores valores de (TA), foram tratados como fragmentos com menor potencial espacial para conexão, visto que, a área do fragmento relaciona-se como a diversidades de espécies e a capacidade de mantê-las em seu interior.

As variáveis estudadas que exercem influência sobre o potencial espacial dos fragmentos foram

combinadas por meio do operador *Fuzzy Gamma*, com o objetivo de simular o potencial espacial dos fragmentos para conexão. A análise de sobreposição indica a possibilidade de uma célula da imagem matricial de uma variável ser um membro de cada conjunto *Fuzzy*. Dessa forma, foram selecionados para conexão os fragmentos que apresentaram maior potencial espacial para conexão, ou seja, aqueles com valores mais próximos de 1. Delimitou-se 10 fragmentos florestais com atributos espaciais que sugerem melhor conservação, com área total de 20.018,10 ha. O maior fragmento apresentou uma área de 8.100,94 ha e o menor 385,17 ha (FIGURA 10).

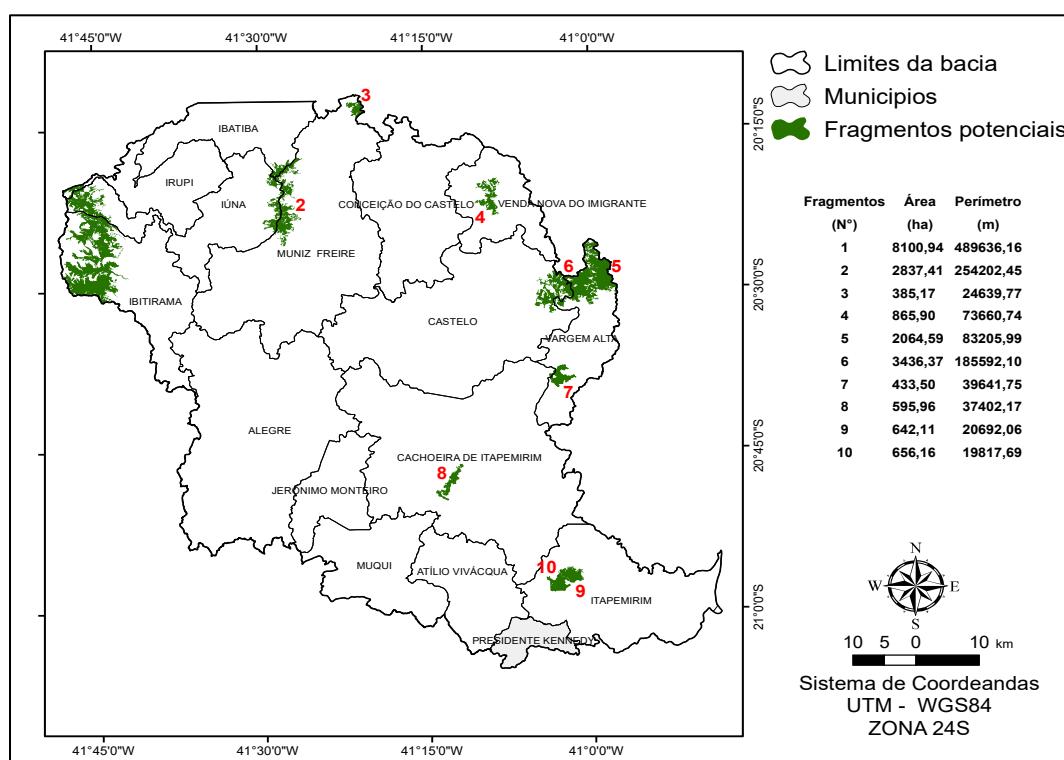


FIGURA 10. Fragmentos florestais com alto e médio potencial espacial, identificados e selecionados na bacia hidrográfica do rio Itapemirim, obtidos por meio da utilização de índices da paisagem e lógica *Fuzzy*

3.3 Delimitação de corredores ecológicos

Foram identificadas 95 propostas de corredores, totalizando, 70.879,65 m de comprimento. O comprimento médio foi de 746,10 m, e largura

média de 74,61 m. A área total dos corredores foi de 2.500,23 ha, com área média de 26,32 ha.

Os corredores propostos consideraram outros fragmentos com menor potencial espacial, estes, denominados neste estudo de fragmentos

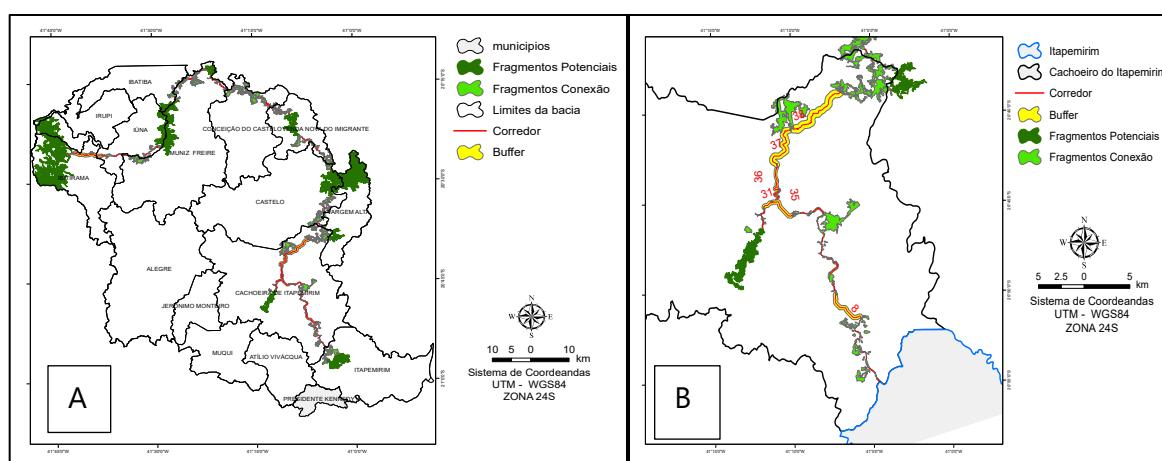
conexão. Foram utilizados 196 fragmentos com área total de 9.414, 52 ha, média de 48,03 ha. Esses resultados revelam que os fragmentos ora denominados fragmentos de conexão, independente de sua diversidade ou área, neste estudo, atuaram com trampolins ecológicos, destacando sua importância como facilitadores na implantação de corredores ecológicos. Na FIGURA 11A são apresentados os corredores, os fragmentos conexão e os fragmentos com maior potencial para conexão.

O setor Cachoeiro do Itapemirim/Itapemirim, FIGURA 11B, identificou-se 91 fragmentos conexão, totalizando 2710,35 ha de área. Entretanto, apesar do número de fragmentos conexão relativamente elevado quando comparado aos fragmentos dos demais setores, estes não foram suficientes como elementos de conexão, fato apoiado na área e comprimento dos corredores deste setor. Os corredores deste setor totalizaram 1.633,74 ha, 65,34 % da área total de todos os corredores propostos para bacia hidrográfica. O comprimento foi de 40.716,65 m, 57,44 % do comprimento total dos corredores da bacia. Destacam-se os corredores 8, 31, 35, 36, 37 e 38, que representam 60,26 % da área total dos corredores do setor Cachoeiro/Itapemirim e 39,25 % do seu comprimento total. Este comportamento apresentou como consequência maiores custos para implantação do corredor. O desempenho exibido é explicado em função das maiores distâncias entre os fragmentos,

refletidos na extensão dos corredores propostos para este setor

Já para o setor Vargem Alta/Conceição do Castelo, FIGURA 11C, composto pelos municípios de Vargem Alta, Venda Nova, Conceição do Castelo e Castelo, foram identificados 43 fragmentos conexão, com área total 4735,07 ha. Os valores de área, 45,36 ha e comprimento, 8294,80 metros ocupados pelos corredores, demonstrando apresentar menores áreas quando comparados com o setor Cachoeiro/Itapemirim. Os valores de área e comprimento do setor representam concomitantemente 1,85 % e 11,60 % do total dos corredores propostos. Os resultados obtidos neste setor foram bastante satisfatórios, visto que, os corredores apresentaram área e comprimento relativamente pequenos, refletindo menores custos para sua implantação.

Para o setor, Muniz Freire/Ibitirama, FIGURA 11D, delimitou 62 fragmentos conexão, com área total de 1969,70 ha, distribuídos entre os municípios de Muniz Freire, Iúna, Irupi e Ibitirama. Os corredores ecológicos possuem área total de 821,15 ha e 22169,03 metros de comprimento. Estes valores representam área de 32,79 %, e em comprimento, 31 % do total dos corredores propostos para a bacia do rio Itapemirim, com destaque ao corredor 94, ocupando 88,13 % da área e 38,12 % do comprimento total dos corredores propostos para o setor.



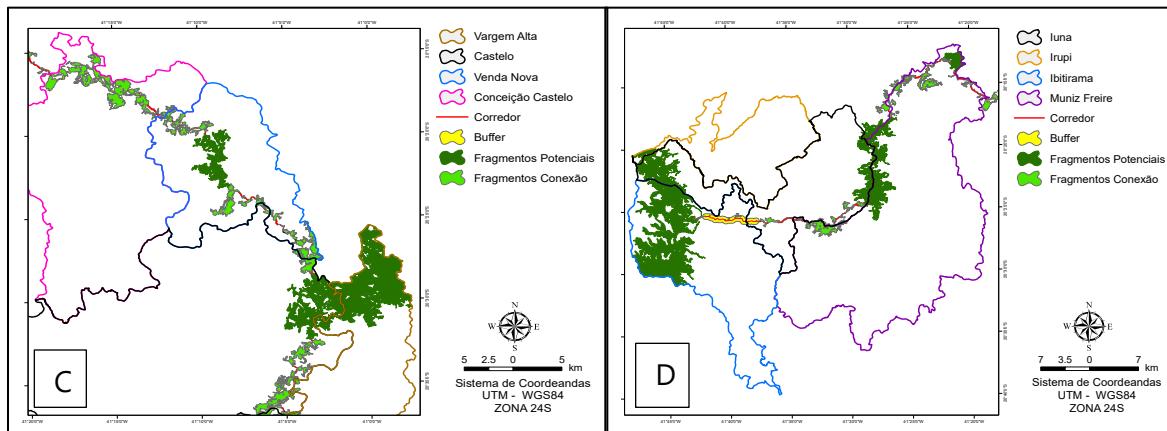


FIGURA 2. A. Mapa dos corredores ecológicos, dos fragmentos conexão e dos fragmentos com maior potencial espacial para conexão na bacia hidrográfica do rio Itapemirim, ES. B: setor Cachoeiro / Itapemirim. C: setor Vargem alta/Conceição do Castelo e D: setor Muniz Freire/Ibitirama

4. Conclusões

Os fragmentos florestais na bacia hidrográfica do rio Itapemirim foram mensurados em sua maioria, por fragmentos pequenos, menores que 5 ha, indicando um alto grau de fragmentação do bioma local.

A metodologia baseada em Lógica Fuzzy possibilitou o criação do mapa de fragmentos florestais com potencial espacial para a delimitação de corredores ecológicos, identificando os fragmentos potenciais, como também, eliminando o artifício subjetivo do

processo no qual o analista fornece pesos probabilísticos às variáveis.

Os corredores ecológicos propostos apresentaram relevância ambiental ao conectar 206 fragmentos, representando 24,72 % da área total dos fragmentos remanescentes na bacia hidrográfica.

A metodologia utilizada por meio de técnicas de geoprocessamento e lógica Fuzzy, mostrou-se eficiente no desenvolvimento de rotas de corredores ecológicas automatizados, informações sobre dimensões e a distribuição espacial da paisagem.

5. Referências citadas

- ALMEIDA, C. G. 2008. *Análise espacial dos fragmentos florestais na área do Parque Nacional dos Campos Gerais, Paraná*. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Estado de Paraná, Brasil. Tese Mestrado.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C. & J. L. M. GONÇALVES. 2013. "Köppen's climate classification map for Brazil". *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6): 711-728.
- AYRES, J. M.; FONSECA, G. A.; RYLANDS, A. B.; QUEIROZ, H. L.; PINTO, L. P.; ... e R. B. CAVALCANTI. 2005. *Os corredores ecológicos das florestas tropicais do Brasil*. Sociedade Civil de Mamirauá. Belém, Brasil.
- CÂMARA, C.; MOREIRA, F. R.; BARBOSA FILHO, C. R. A. e S. BÖNISCH. 2001. *Introdução à Ciência da Geoinformação*. INPE. São José dos Campos, Brasil.

- CASTRO, G. C. 2004. *Análise da estrutura, diversidade florística e variações espaciais do componente arbóreo de corredores de vegetação na região do Alto Rio Grande, MG*. Universidade Federal de Lavras. Lavras, Minas Gerais, Brasil. Tese Mestrado.
- CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). 1996. Resolução nº 09, 24 de outubro 1996. *Dispõe sobre corredor de vegetação entre remanescentes como área de trânsito para a fauna*. Brasília, Brasil.
- CONGALTON, R. G. & K. A. GREEN. 1993. "A practical look at the sources of confusion in error matrix generation". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 59(5): 641-644.
- FAHRIG, L. 2003. "Effects of habitat fragmentation on biodiversity". *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 34: 487-515.
- FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. 2014. *Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica*, Brasília, Brasil.
- JENSEN, J. R. 2011. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. Parêntese. São Paulo, Brasil.
- LANG, S. e D. TIEDE. 2003. "V-LATE Extensão für ArcGIS - vektorbasiertes Ferramenta zur quantitativen Landschaftsstrukturanalyse". *Geoinformatics*, 1-10.
- LILLESAND, T. M. & R. W. KIEFER. 1994. *Remote sensing and image interpretation*. Wiley Chichester. New York. United States of América.
- LOUZADA, F. L.; RUBINI, O.; SANTOS, A. R.; GOMES, S. A.; MENDES, O. O.; GARCIA, O. G.; ... e E. P. J. BATISTA. 2012. "Proposta de corredores ecológicos para interligação de parques estaduais utilizando geotecnologia, Espírito Santo (ES)-Brasil". *Revista Geográfica Venezolana*, 53(2): 239-254.
- MOREIRA, M. A. 2011. *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. UFV. Viçosa, Minas Gerais, Brasil.
- MUCHAILH, M. C.; RODERJAN, C. V.; CAMPOS, J. B.; MACHADO, A. L. T. e G. R. CURCIO. 2010. "Metodologia de planejamento de paisagens fragmentadas visando a formação de corredores ecológicos". *Revista Floresta*, 40(1): 147-162.
- PIROVANI, D. B. 2010. *Fragmentação florestal e dinâmica da ecologia da paisagem na bacia hidrográfica do rio Itapemirim*. Universidade Federal do Espírito Santo. Brasil. Tese Mestrado.
- SAATY, T. L. 1977. "A scaling method for priorities in hierarchical structures". *Journal of Mathematical Psychology*, 15: 234-281.
- SEOANE, C. E.; DIAZ, V. S.; SANTOS, T. L. e L. C. M. FROUFE. 2010. "Corredores ecológicos como ferramenta para a desfragmentação de florestas tropicais". *Pesquisa Florestal Brasileira*, 30(63): 207-216.

- SILVA, L. M.; SILVA, E. J. A.; FERREIRA, L. M.; GONÇALVES, R. M. e B. Q. SILVA. 2019. "Estado da arte dos fundamentos e ideias da Lógica Fuzzy aplicada as Ciências e Tecnologia". *Revista Brasileira de Geomática*, 7(3): 149-169.
- THIAGO, C. R. L.; MAGALHÃES, I. A. L. e A. R. SANTOS. 2020. "Identificação de fragmentos florestais potencias para a delimitação de corredores ecológicos na bacia hidrográfica do rio Itapemirim, ES por meio técnicas de sensoriamento remoto". *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(2): 595-612. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.2.p595-612>.
- UNITED SERVICE GEOLOGICAL SURVEY (USGS). 2020. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov>. [Consulta: dezembro, 2020].
- ZADEH, L. A. 1965. "Fuzzy Sets". *Inform. and Control*, 8: 338-353.

Local e data de finalização do artigo:
Brasília (DF) Brasil; setembro, 2023