



Análise temporal e cálculo de áreas construídas usando método BAEM a partir de imagens de sensoriamento remoto

**Nº 20241112
Novembro - 2024**

Sonia Maria Lima Silva - UERJ/Universidade do Estado do Rio de Janeiro;

Elisângela Silva de Paula - UERJ/Universidade do Estado do Rio de Janeiro;

Luiz Carlos Teixeira Coelho Filho - IPP/Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, UERJ/Universidade do Estado do Rio de Janeiro;



PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO
Secretaria Municipal de Urbanismo
Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos
Secretaria Municipal da Casa Civil

EXPEDIENTE

A **Coleção Estudos Cariocas** é uma publicação virtual de estudos e pesquisas sobre o Município do Rio de Janeiro, vinculada ao portal de informações do Instituto Pereira Passos (IPP) da Secretaria Municipal da Casa Civil da Prefeitura do Rio de Janeiro: www.data.rio

Seu objetivo é divulgar a produção de técnicos da Prefeitura sobre temas relacionados à cidade do Rio de Janeiro e à sua população. Está também aberta a colaboradores externos, desde que seus textos, bem como os dos colaboradores internos, sejam aprovados pelo Conselho Editorial.

Periodicidade: A periodicidade é anual, mas o número de artigos por edição é variável, pois depende da produção de textos por parte dos técnicos do IPP, de outros órgãos e de colaboradores.

Conselho Editorial: Luis F. Valverde Salandía, Rosemary Compans da Silva.

Revisão de Texto: ASCOM / IPP

ANÁLISE TEMPORAL E CÁLCULO DE ÁREAS CONSTRUÍDAS USANDO MÉTODO BAEM A PARTIR DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Sonia Maria Lima Silva¹, Elisângela Silva de Paula², Luiz Carlos Teixeira Coelho Filho³

Resumo

O presente estudo trata da análise temporal e cálculo de áreas construídas usando o método BAEM. Como fonte de dados, foram utilizadas imagens do sistema de satélite Landsat 8 do Parque Estadual da Serra da Tiririca, em Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, referente aos anos de 2013 e 2018. O método BAEM utiliza o Índice de Vegetação com Diferença Normalizada (NDVI), o Índice de Água com Diferença Normalizada Modificada (MNDWI) e o Índice de Construção com Diferença Normalizada Modificada (NDBIm). Além disso, análises de componentes principais (ACP) foram aplicadas para eliminar redundâncias de dados presentes nas bandas multiespectrais, permitindo o refinamento dos resultados. O resultado da quantificação de áreas construídas nos dois anos avaliados mostrou que houve um aumento de construções irregulares dentro dos limites do parque. O método BAEM mostrou-se eficiente na determinação das áreas construídas em comparação com os resultados obtidos, individualmente, por cada índice, comprovando que esse método pode ser usado para avaliar e monitorar o crescimento urbano em áreas de preservação e em outras áreas.

Palavras-chave: Landsat 8. Método BAEM. ACP.

Abstract

The present study deals with the temporal analysis and calculation of built-up areas using the BAEM method. As data source, images from the Landsat 8 satellite system of the Serra da Tiririca State Park, in Niterói, Rio de Janeiro, Brazil, referring to the years 2013 and 2018 were used. The BAEM method uses the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) and the Modified Normalized Difference Building Index (NDBIm). In addition, principal component analyses (PCA) were applied to eliminate data redundancies present in the multispectral bands, allowing the refinement of the results. The result of the quantification of built-up areas in the two years evaluated showed that there was an increase of irregular constructions within the park boundaries. The BAEM method proved to be efficient in determining the built-up areas in comparison with the results obtained individually by each index, proving that this method can be used to evaluate and monitor urban growth in preservation areas and in other areas.

Keywords: Landsat 8. BAEM Method. PCA.

¹Engenheira Cartógrafa (UERJ), Mestre em Sistemas e Computação (IME), Doutora em Geologia (UFRJ) e em Geografia Física (Universität Tübingen), Professora Adjunta da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. E-mail: sonia.silva@eng.uerj.br

<https://orcid.org/0000-0002-2414-1516>

<http://lattes.cnpq.br/1793088031692319>

²Engenheira Cartógrafa (UERJ). E-mail: elisangeladepaula@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3638-2085>

³Engenheiro Cartógrafo (IME), Licenciado em Matemática e Geografia (Claretiano), Mestre em Informática (UFAM), Doutor em Planejamento Urbano e Regional (UFRJ), servidor lotado na Cordenadoria Técnica de Informações da Cidade do Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos (IPP) da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro e Professor Adjunto da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. E-mail: lcteixeiracoelho@prefeitura.rio

<https://orcid.org/0000-0002-4466-9772>

<http://lattes.cnpq.br/6920722851435707>

1. INTRODUÇÃO

As cidades, em sua maioria, sofrem com o crescimento desordenado e a redução de suas áreas verdes. Com a expansão urbana e a falta de um monitoramento ambiental em áreas protegidas, essas áreas podem ser afetadas, significativamente, com a perda de biodiversidade do ecossistema. Em muitos casos, essa situação é irreversível.

Segundo Neves (2006), a Mata Atlântica é uma área de desmatamento antigo e, por ter poucas áreas preservadas, é um dos biomas mais ameaçados. A área florestal remanescente, de acordo com dados da Fundação SOS Mata Atlântica (1998) é de aproximadamente 7% do seu valor original.

No estado do Rio de Janeiro, a Mata Atlântica ocupava 98,6% da área total do Estado de 43.305 km² (ISA, 2001). Atualmente, acima de 500 m, concentra os maiores fragmentos florestais nas cadeias montanhosas da Serra do Mar. Analisando, em conjunto com os fragmentos menores, estima-se que restam cerca de 8.000 km² de florestas (TANIZAKI-FONSECA; MOULTON, 2000). Dados levantados pelo SOS Mata Atlântica, em 2000, apontaram uma área correspondente a 16,7% do estado do Rio de Janeiro ocupada pelo que restou da Mata Atlântica, sendo que 29,8% encontram-se em Unidades de Conservação (SOS MATA ATLÂNTICA, 2002).

Dentre as principais causas da perda de diversidade biológica, devido a atividades antrópicas, verificam-se: a destruição dos habitats naturais, a introdução de espécies exóticas, a fragmentação, a exploração excessiva de espécies e o aumento da ocorrência de doenças das espécies (PRIMACK; RODRIGUES, 2001).

A região do Parque Estadual da Serra da Tiririca (PESET), situado no Estado do Rio de Janeiro, é um exemplo do que foi exposto anteriormente. O PESET possui alto grau de impacto na população local e, por isso, foi o primeiro parque criado através de movimento popular (SILVA, 2017). Segundo pesquisa desenvolvida no período de 2009 a 2012, pelo Grupo de Trabalho de Turismo em Áreas Protegidas (GTTAP), da Universidade Federal Fluminense, 57,34% dos visitantes moram em Niterói, cidade onde o parque está localizado. Do restante, 19% são de cidades vizinhas de Maricá e São Gonçalo.

Segundo Barros e Seoane (1999), uma das principais causas da perda de diversidade biológica na área de estudo, é a especulação imobiliária. Apesar de existirem muitas informações sobre fauna e flora do PESET, a falta de mapas temporais de crescimento urbano, tanto dentro do Parque, como no seu entorno, além de uma base cartográfica mais sólida, configuram um problema para sua preservação e conservação. Aliado ao que foi exposto anteriormente, devido à extensão da área do parque, não é possível dispor da quantidade de pessoas necessárias para seu monitoramento e proteção, sendo necessária a busca de novas formas e técnicas para atender essa necessidade.

Nesse contexto, a utilização do sensoriamento remoto torna-se uma ferramenta importante, pois as imagens orbitais oferecem uma valiosa fonte de dados que permitem analisar e monitorar áreas de preservação. Através das imagens, é possível realizar diversos estudos e utilizar diferentes métodos para se obter indicadores, tais como: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI); Índice por Diferença Normalizada para Áreas Construídas Modificada (NDBIm); e Índice de Diferença Normalizada da Água Modificado (MNDWI). Esses índices permitem monitorar o crescimento do espaço urbano e/ou a degradação do meio ambiente.

O objetivo desse estudo é: (1) determinar as áreas de ocupação urbana no Parque Estadual da Serra da Tiririca (PESET) para os anos de 2013 e 2018, utilizando imagens do sistema de satélite Landsat 8, e (2) quantificar as áreas construídas para avaliação do crescimento urbano nesses dois anos. Os objetivos específicos deste estudo são: (1) Calcular os índices do NDVI, MNDWI e NDBIm, definindo classes específicas que melhor representem esses indicadores; (2) Gerar componentes principais, de bandas correlacionadas, para análise e cálculo do NDBIm; (3) Obter as áreas construídas utilizando o método BAEM.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

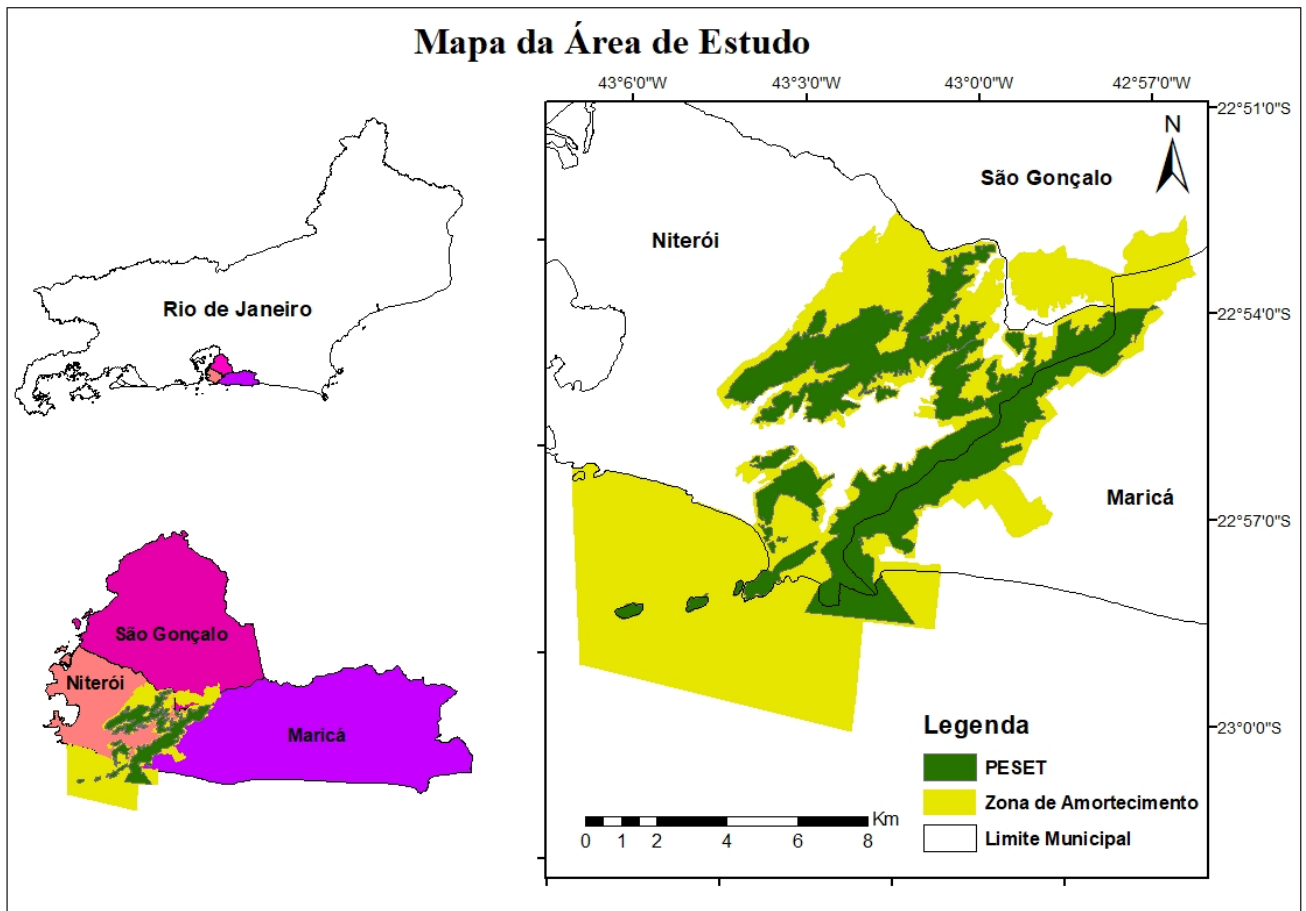
A área selecionada para esse estudo corresponde ao Parque Estadual da Serra da Tiririca (PESET), que possui uma área de 3.492,25 ha e está localizado no Estado do Rio de Janeiro, Brasil, abrangendo os municípios de Niterói e Maricá.

O PESET surgiu a partir da iniciativa da sociedade civil organizada. Ele foi criado pela Lei Estadual nº 1901, de 29/11/1991, e sua administração é responsabilidade da Fundação Instituto Estadual de Florestas (IEF-RJ). A criação do parque teve o intuito de proteger remanescentes da Mata Atlântica que se encontravam extremamente ameaçados pela especulação imobiliária, entre outras formas de atividades antrópicas (BARROS, 2008).

O Parque corresponde a uma área de reserva florestal que, segundo o INEA (2013), são regidas pela legislação nacional e devem incluir três esferas de zoneamento: (1) Zona Núcleo; (2) Zona de Amortecimento e (3) Zona de Transição. A Zona de Amortecimento prevê, além de ações educacionais, iniciativas econômicas com utilização limitada de recursos para desenvolvimento de comunidades locais. A Zona de Amortecimento do Parque possui uma área de 7.601,23 ha e abrange áreas dos municípios de Niterói, Maricá e São Gonçalo.

Para uma melhor avaliação da região, serão consideradas a área do parque e a Zona de Amortecimento, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Limites geográficos do PESET e de sua Zona de amortecimento



Fonte: Os autores (2019)

De acordo com Oliveira (1995), a Serra da Tiririca está inserida no Bioma Mata Atlântica e no âmbito internacional, segundo o código numérico, a nomenclatura e a classificação biogeográfica mundial, a Mata Atlântica do Estado do Rio de Janeiro é enquadrada na região fitogeográfica nº 8 (Região Neotropical), na província biogeográfica nº 7 (Serra do Mar) e no grupo nº 01 (Floresta Tropical Úmida). Recebe a notação 8.07.01, para fins de caracterização e localização planetária.

A cobertura vegetal, segundo Pontes (1987), apresenta, nos trechos mais elevados, porções significativas de matas em bom estado, mesmo não possuindo as características de uma formação primária de Mata Atlântica. Basicamente, a Serra é revestida por matas secundárias em vários estágios de sucessão, vegetação de costão rochoso e bananais e, em pequena escala, por pastagens. Embora existam poucos estudos botânicos abrangentes, acredita-se que a vegetação da Serra da Tiririca possua uma flora composta majoritariamente por espécies nativas da Mata Atlântica.

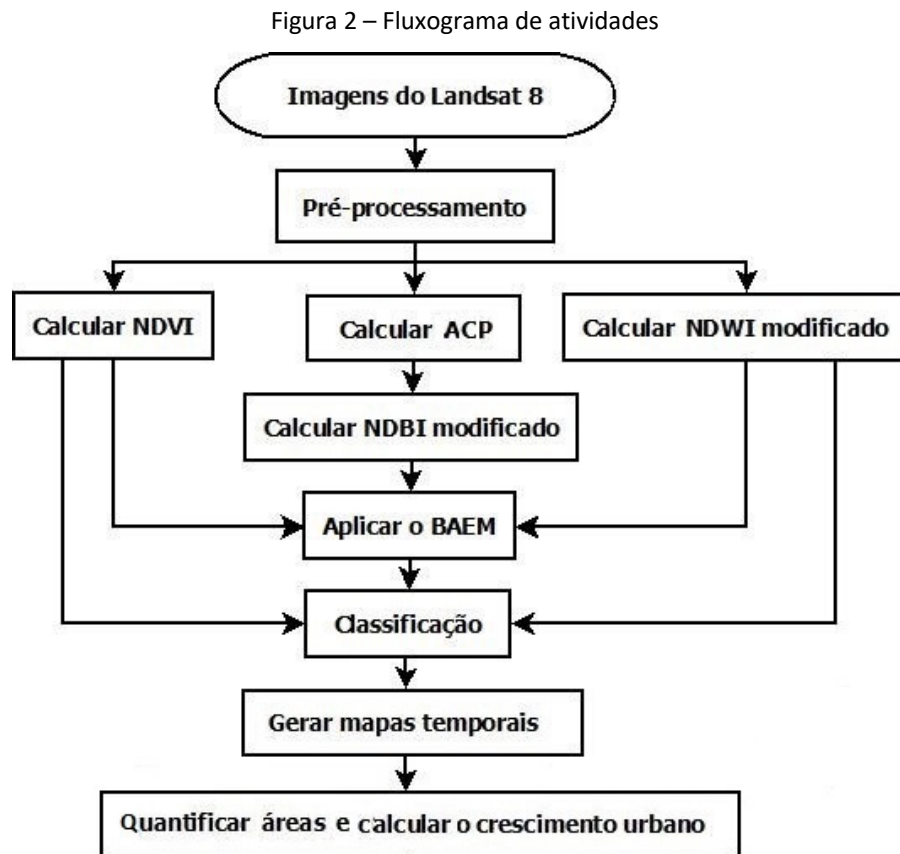
2.2 Materiais e Métodos

No desenvolvimento do estudo foram utilizadas imagens dos sensores OLI e TIRS do sistema de satélite Landsat 8, obtidas do site da *United States Geological Survey* (USGS). As imagens, em formato GEOTIFF, foram referentes às datas de 2/08/2013 e 12/08/2018. As bandas do sensor multiespectral (1 a 7 e 9) possuem resolução espacial de 30 m, enquanto que a banda 8, do sensor pancromático, possui resolução espacial de 15 m. As bandas 10 e 11, referentes ao sensor termal TIRS, possuem resolução espacial de 100m.

Além das imagens de satélites, foram usados dados em formato vetorial, cedidos pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA), das seguintes áreas: (1) limites do PESET, do ano de 2008; (2) zona de amortecimento do PESET; (3) limites municipais do estado do Rio de Janeiro; e (4) uso e cobertura da terra do estado do Rio de Janeiro, de 2011.

As aplicações de software usadas foram: software livre Quantum GIS, ArcGIS Desktop v10.6 e Google Earth Pro.

Os procedimentos usados nesse trabalho, representados na Figura 2, compreenderam às seguintes etapas: pré-processamento das imagens de satélite; cálculo de índices; identificação das áreas construídas usando o método BAEM; e quantificação de áreas construídas para os anos escolhidos.



Fonte: Os autores (2019)

2.2.1 Pré-Processamento das Imagens

A fase de pré-processamento incluiu as correções radiométricas, atmosféricas e geométricas. Como as imagens provenientes do sistema de sensor óptico orbital já estavam corrigidas da radiometria e ortorretificadas (correção geométrica), não foi necessário efetuar esses passos.

Inicialmente, todas as imagens foram recortadas usando como referência os dados dos limites da área de estudo, em formato vetorial. Para execução desta operação, foi usada a aplicação de *software* QGIS.

De acordo com USGS (2018), os dados da faixa espectral do sensor OLI podem ser convertidos em refletância planetária do Topo da Atmosfera (TOA) usando coeficientes de reescalonamento de refletância,

fornecidos no arquivo de metadados do produto. A Eq. (1) é usada para converter os valores de ND em refletância de TOA.

$$\rho\lambda' = M_p Q_{cal} + A_p \quad (1)$$

onde $\rho\lambda'$ é a refletância planetária TOA; M_p corresponde ao fator multiplicativo de reescalonamento para cada banda; Q_{cal} é número digital (ND) para cada pixel; e A_p corresponde ao fator aditivo de reescalonamento para cada banda.

A refletância de TOA com uma correção para o ângulo do Sol é dada pela Eq. (2).

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{\rho\lambda'}{\sin(\theta_{SE})} \quad (2)$$

onde $\rho\lambda$ é a refletância planetária no TOA corrigida; θ_{SE} é o ângulo de elevação solar; e θ_{SZ} é o ângulo zenital solar local (calculado a partir de $\theta_{SZ} = 90^\circ - \theta_{SE}$).

Segundo a USGS (2018), os dados da banda do sensor termal TIRS podem ser convertidos de radiância espectral para a temperatura de brilho da atmosfera, em graus Celsius (°C). Entretanto, faz-se necessário, primeiramente, converter os números digitais (ND) das bandas para radiância espectral de TOA. A primeira conversão usa os fatores de redimensionamento de radiância, fornecidos no arquivo de metadados do produto e é obtida pela Eq. (3).

$$L_\lambda = M_L Q_{cal} + A_L \quad (3)$$

onde, L_λ é a radiância espectral no topo da atmosfera; M_L corresponde ao fator multiplicativo de reescalonamento para cada banda; e Q_{cal} corresponde ao número digital para cada pixel;

O cálculo da temperatura de brilho da atmosfera é feito usando as constantes térmicas fornecidas no arquivo de metadados do produto e a Eq. (4).

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} - 1\right)} - 273,15 \quad (4)$$

onde T é o topo da temperatura de brilho da atmosfera (C); L_λ é a radiância espectral da atmosfera de TOA (Watts / (m² * srad * μm)); K_1 é a constante de conversão térmica específica da banda dos metadados; e K_2 é a constante de conversão térmica específica da banda a partir dos metadados.

2.2.2 Cálculo de índices

Os índices de vegetação são dados radiométricos adimensionais, que indicam a abundância relativa e a atividade da vegetação verde. Esses índices procuram maximizar a sensibilidade à parâmetros biofísicos das plantas; normalizar ou modelar os efeitos da geometria de aquisição, interferência atmosférica, topografia e solos, visando a análises mais consistentes (JENSEN, 2009).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é utilizado, com sucesso, para classificar a distribuição global de vegetação, inferir variabilidades ecológicas e ambientais, produção de fitomassa, radiação fotossintética ativa e a produtividade de culturas (LIU, 2007). Os valores do NDVI variam de -1 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, maior a densidade da cobertura vegetal (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010). Valores mais próximos de 0 indicam superfícies não vegetadas e valores negativos, corpos hídricos (ROSENDO, 2005).

O cálculo do NDVI foi feito empregando a Eq. (5), proposta por ROUSE et al. (1973)

$$NDVI = \frac{(B5 - B4)}{(B5 + B4)} \quad (5)$$

onde B5 refere-se aos valores de refletância na banda do infravermelho próximo; e B4 refere-se aos valores de refletância na banda do vermelho.

A etapa seguinte ao cálculo do índice NDVI correspondeu à definição dos intervalos de classes. Essa etapa foi feita usando a ferramenta ArcToolbox>SpatialAnalyst>Reclassify e tendo como critérios os intervalos definidos por Sousa et al. (2016).

Outro índice utilizado foi o Índice de Umidade por Diferença Normalizada Modificado (MNDWI), que é utilizado para detectar e monitorar o conteúdo de água. Esse índice é considerado um NDWI modificado, pois no seu cálculo, a banda do infravermelho próximo (NIR) é substituída pela banda do infravermelho médio (MIR). Xu (2006) propôs que o cálculo do MNDWI produzirá três resultados: (1) a água terá maiores valores positivos do que no NDWI, uma vez que absorve mais luz MIR do que a luz NIR; (2) terrenos construídos terão valores negativos; e (3) o solo e a vegetação ainda terão valores negativos, já que o solo reflete a luz MIR mais do que a luz NIR e a vegetação reflete a luz MIR ainda mais que a luz verde (JENSEN, 2004).

A Eq. (6), empregada no cálculo do MNDWI foi proposta por Xu (2006). De forma similar, após o cálculo do índice, foi efetuada a classificação, baseada nos intervalos propostos por Meheub et al. (2015).

$$MNDWI = \frac{(B3-B7)}{(B3+B7)} \quad (6)$$

onde, *B3* refere-se aos valores de reflectância na banda do verde; e *B7* refere-se aos valores de reflectância na banda do infravermelho médio.

Gao (1996) propôs o NDWI para detectar e monitorar o conteúdo de água utilizando dois canais do infravermelho próximo. Segundo Ji, Zhang e Wylie (2009), a concepção de um índice espectral de água foi baseada no fato de que a água absorve energia em comprimentos de onda do infravermelho próximo (NIR) e ondas curtas de infravermelho (SWIR).

McFeeters (1996) propôs que os parâmetros de valores de NDWI podem variar entre -1 e 1. Assim, segundo Pereira e Morais (2015), para $NDWI \geq 0$ (zero) tem-se áreas com presença de água e para $NDWI \leq 0$ (zero) não ocorre a presença de água na superfície do terreno.

Dando continuidade, a Análise de Componentes Principais (ACP) foi aplicada, com o intuito de remover informações redundantes entre bandas. As imagens multiespectrais, geralmente, exibem alta correlação entre si e essa correlação advém do efeito de sombras resultantes da topografia, da sobreposição das janelas espectrais entre bandas adjacentes e do próprio comportamento espectral dos objetos. Ao aplicar esse modelo matemático nas bandas, um novo conjunto de imagens será produzido, não correlacionáveis entre si. As novas imagens são ordenadas de tal maneira que cada componente tem a variância menor do que a componente anterior. Essa técnica melhora a extração das informações desejadas.

O ACP é um método matemático que, ao remover a redundância, preserva toda a informação necessária em conjuntos de dados correlacionados (JOLLIFFE, 2002; RICHARDS, 2013). Um conjunto de *N* imagens de entrada vai produzir, quando processadas através da ACP, um outro conjunto de *N* imagens de saída sem nenhuma correlação entre si (CRÓSTA, 1992). De acordo com Crósta (1992), duas imagens são ditas correlacionadas quando, dada a intensidade de um determinado pixel em uma delas, pode-se deduzir, com razoável aproximação, a intensidade do pixel correspondente na outra imagem. Se as duas imagens são absolutamente idênticas, as imagens são ditas 100% correlacionadas. Se uma delas é o negativo da outra, essa dedução também pode ser feita precisamente, mas neste caso as imagens não possuem nenhuma correlação.

A Análise de Componentes Principais foi empregada para as bandas 6 e 7, referentes aos dois intervalos do infravermelho curto (SWIR) e para as bandas 10 e 11, referentes aos dois intervalos do infravermelho termal, altamente correlacionadas entre si. Para o cálculo das principais componentes, foi usada a ferramenta ArcToolbox>SpatialAnalyst>PrincipalComponents.

O último índice calculado foi o Índice por Diferença Normalizada para Áreas Construídas modificado (NDBIm). Esse índice é utilizado para identificação de áreas construídas. De acordo com Bhatti e Tripathi (2014), para aumentar a resposta de extração das áreas construídas, ao invés de serem usadas as bandas originais, foram usadas as Componentes Principais das bandas 6 e 7 (SWIR) e das bandas 10 e 11 (TIR), altamente correlacionadas entre si. O cálculo do NDBIm foi feito usando a fórmula mostrada na Eq. (7), de Zha, Gao e Ni (2003).

$$NDBIm = \frac{(CP\ 6,7 + CP\ 10,11) - B5}{(CP\ 6,7 + CP\ 10,11) + B5} \quad (7)$$

onde, *CP 6,7* corresponde à primeira componente principal das bandas 6 e 7; *CP 10,11* corresponde à primeira componente principal das bandas 10 e 11; e *B5* refere-se aos valores de reflectância da banda do infravermelho próximo.

Segundo Bhatti e Tripathi (2014), o *NDBIm* usa as bandas termais 10 e 11, pois, de acordo com Oke (1973), Weng (2001), Yuan e Bauer (2007) e Lo (2004), a temperatura da superfície terrestre em áreas construídas é maior. Portanto, como esse fato está diretamente relacionado à intensidade urbana, pode ser usado como um indicador adicional dessas áreas para mapeamento. Conforme Zhangyan, Yunhao e Jing (2006), Tran et al. (2006), Mallick, Kant e Bharath (2008), a cobertura terrestre com áreas construídas tem resposta diferente na faixa termal do espectro eletromagnético. O efeito da ilha de calor urbano é basicamente responsável por valores de temperatura mais elevados das áreas construídas, em comparação com seus arredores (JUSUF et al., 2007; WENG; LU; SCHUBRING, 2004; KIM, 1992; GARTLAND, 2010).

Todos os cálculos de índices foram efetuados empregando a ferramenta ArcMap>SpatialAnalyst>RasterCalculator

2.2.3 Cálculo BAEM

De acordo com Bhatti e Tripathi (2014), o método BAEM é uma integração de dados de temperatura, Análise de Componentes Principais (ACP), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de umidade por diferença normalizada modificado (MNDWI) e índice por diferença normalizada para áreas construídas modificado (NDBIm), cuja finalidade é melhorar a precisão geral da extração de área construída. A operação aritmética entre os diferentes índices permite remover as assinaturas de água da imagem de saída e aumentar o contraste espectral entre áreas construídas, terras nuas e outras classes de cobertura de solo, reduzindo a confusão espectral entre áreas construídas e nuas e levando em consideração que, as áreas nuas (superfícies permeáveis) provavelmente terão um maior teor de água do que as áreas construídas (superfícies impermeáveis). A Eq. (8) do BAEM, proposta por Bhatti e Tripathi (2014), é apresentada abaixo:

$$BAEM = NDBIm - NDVI - MNDWI \quad (8)$$

onde *NDBIm* corresponde ao índice por diferença normalizada para áreas construídas modificado; *NDVI* corresponde ao índice de vegetação por diferença normalizada; e *MNDWI* corresponde ao índice de umidade por diferença normalizada modificado.

Os valores mais elevados de número digital, obtidos com o método BAEM, indicam uma maior probabilidade desses pixels representarem áreas construídas. Da mesma forma, valores mais baixos representam classes de cobertura de terra diferentes de áreas construídas (BHATTI; TRIPATHI, 2014).

O processo de definição dos intervalos de classes envolveu a análise de vários pixels, em diferentes áreas das imagens, correspondentes a regiões de vegetação, água, areia, solo exposto, formação rochosa e área construída. A identificação dos pontos foi feita utilizando o comando Identify do ArcMap. A aplicação de software Google Earth Pro serviu como ferramenta de apoio para visualizar melhor cada área analisada. A definição das classes e os intervalos correspondentes foi feita usando a ferramenta ArcToolbox>SpatialAnalyst>Reclassify.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados obtidos dos índices NDVI e MNDWI

As Tabelas 1 e Tabela 2 mostram os intervalos de classes definidos para os índices NDVI, MNDWI, respectivamente.

Tabela 1: Intervalo de classes do NDVI para os anos de 2013 e 2018

Classes	Intervalos
Água	-1 a 0,07
Área construída	0,07 a 0,42
Afloramento rochoso	0,42 a 0,60
Vegetação	0,60 a 1

Elaboração: Os autores (2019)

Tabela 2 - Intervalo de classes do MNDWI para os anos de 2013 e 2018.

Classes	Intervalos
Área não molhada	-1 a 0
Solo úmido	0 a 0,3
Água	0,3 a 1

Elaboração: Os autores (2019)

3.2 Resultados obtidos do método BAEM

A Tabela 3 mostra os intervalos adotados para classificação utilizando o método BAEM, para os anos de 2013 e 2018.

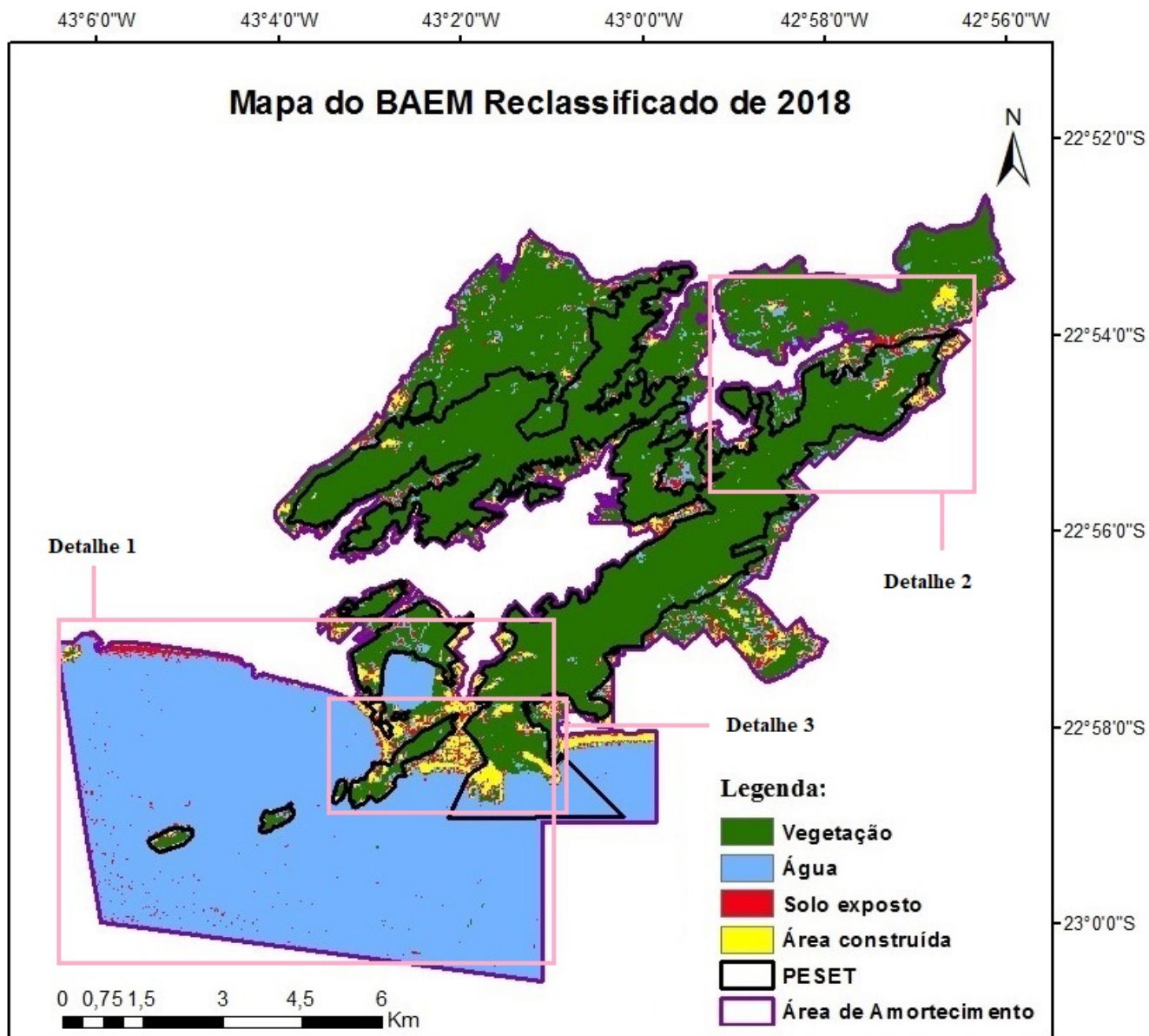
Tabela 3 - Intervalo de classes do BAEM para os anos de 2013 e 2018.

Classes	Intervalos	
	2013	2018
Vegetação	-1 a 0,408	-1 a 0,346
Água	0,408 a 0,530	0,346 a 0,509
Solo exposto	0,530 a 0,700	0,509 a 0,681
Área construída	0,700 a 1,200	0,681 a 1,200

Elaboração: Os autores (2019)

Como as ocorrências de classificação indevida se manifestaram de forma similar para os dois anos avaliados: 2013 e 2018, para as próximas discussões optou-se por apresentar somente os problemas ocorridos na classificação referente ao ano de 2018. A Figura 3 mostra o resultado da classificação de áreas utilizando o método BAEM.

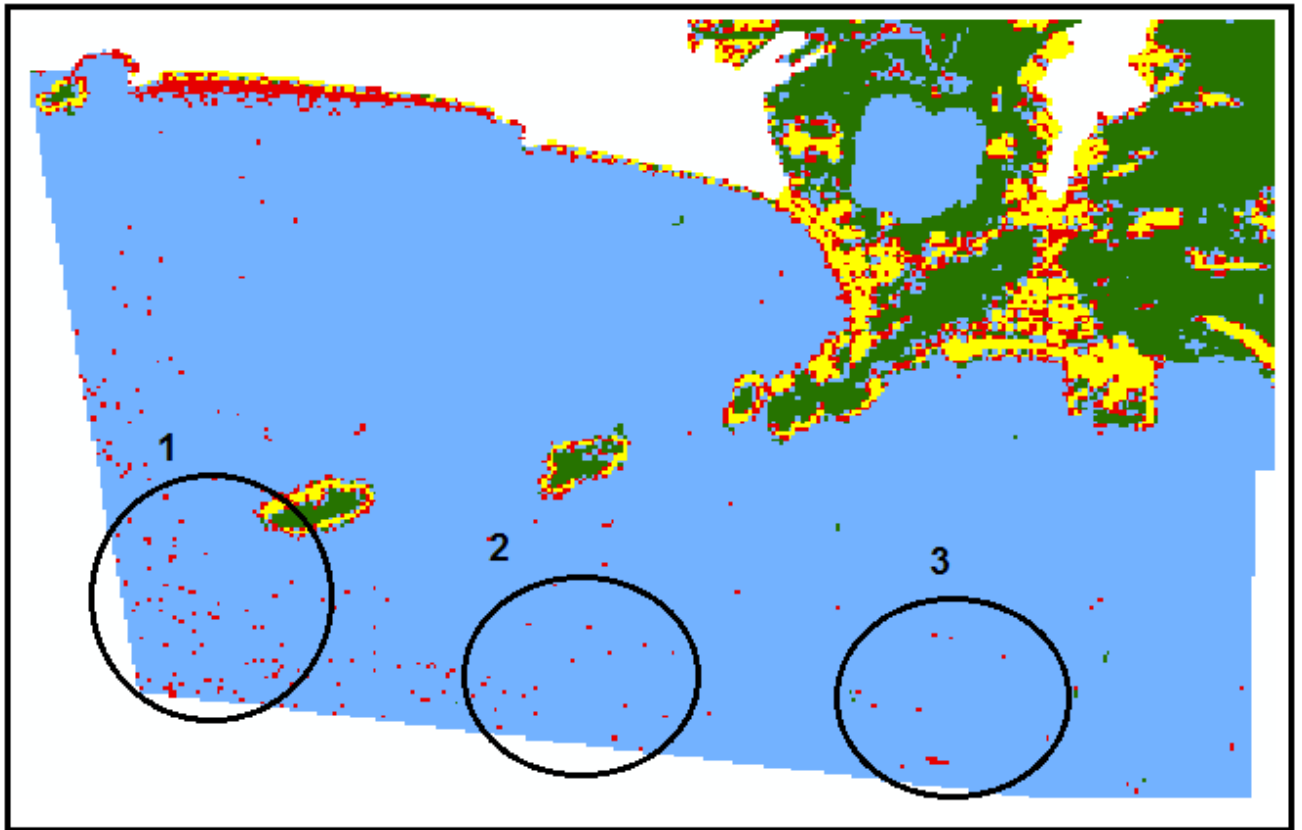
Figura 3 - Classificação de áreas, usando o método BAEM, para o ano de 2018.



Fonte: Os autores (2019)

As Figura 4, Figura 5 e Figura 6 mostram as ocorrências das áreas correspondentes aos Detalhe 1, Detalhe 2 e Detalhe 3, respectivamente.

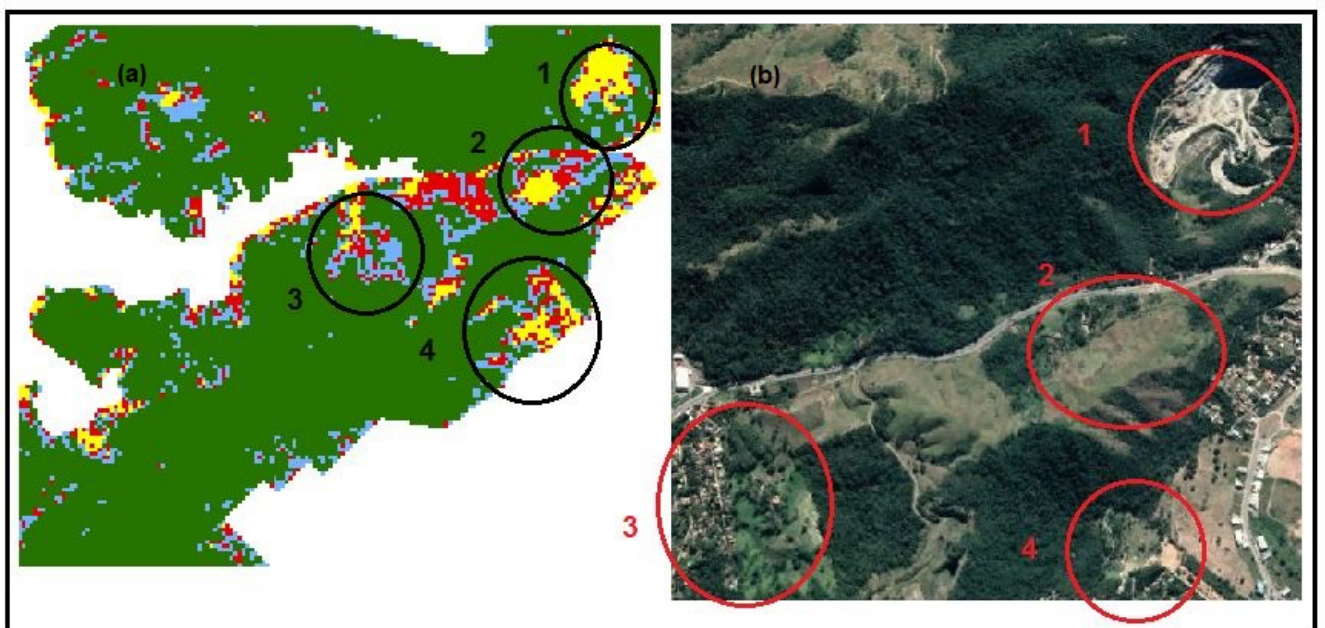
Figura 4 - Área correspondente ao Detalhe 1 da Figura 3, mostrando classes de solo exposto dentro do oceano.



Fonte: Os autores (2019)

Como pode ser visto na Figura 4, alguns pontos do oceano foram classificados como solo exposto. Apesar desse fato, optou-se por manter os intervalos de classificação iniciais, já que a sua alteração acarretaria em um maior número de áreas de solo exposto classificados de forma incorreta como classe água.

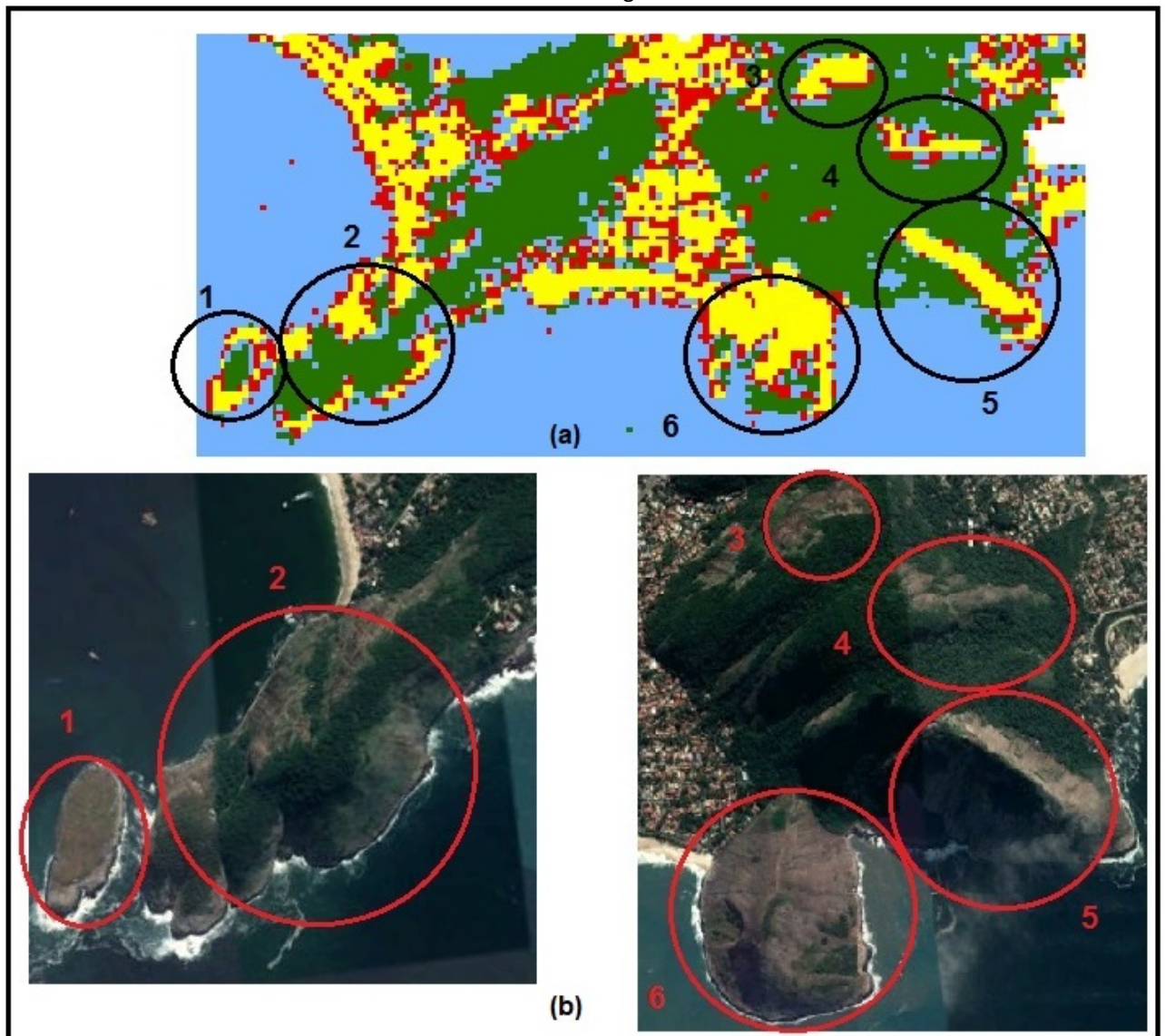
Figura 5 - (a) Área correspondente ao Detalhe 2 da Figura 3, mostrando: (a) resultado da classificação usando o Método BAEM e; (b) Imagens das respectivas áreas, obtidas do Google Earth Pro.



Fonte: Os autores (2019)

A Figura 5(a) mostra áreas que foram classificadas, de forma equivocada, como água, mas que na realidade referem-se à vegetação rasteira, conforme mostra a imagem da Figura 5(b), obtida do Google Earth Pro. Muitas dessas ocorrências são resultado da utilização do índice MNDWI no cálculo do BAEM.

Figura 6 - (a) Área correspondente ao Detalhe 3 da Figura 3, da área classificada de 2018 e; (b) Imagens das respectivas áreas obtidas do Google Earth Pro.



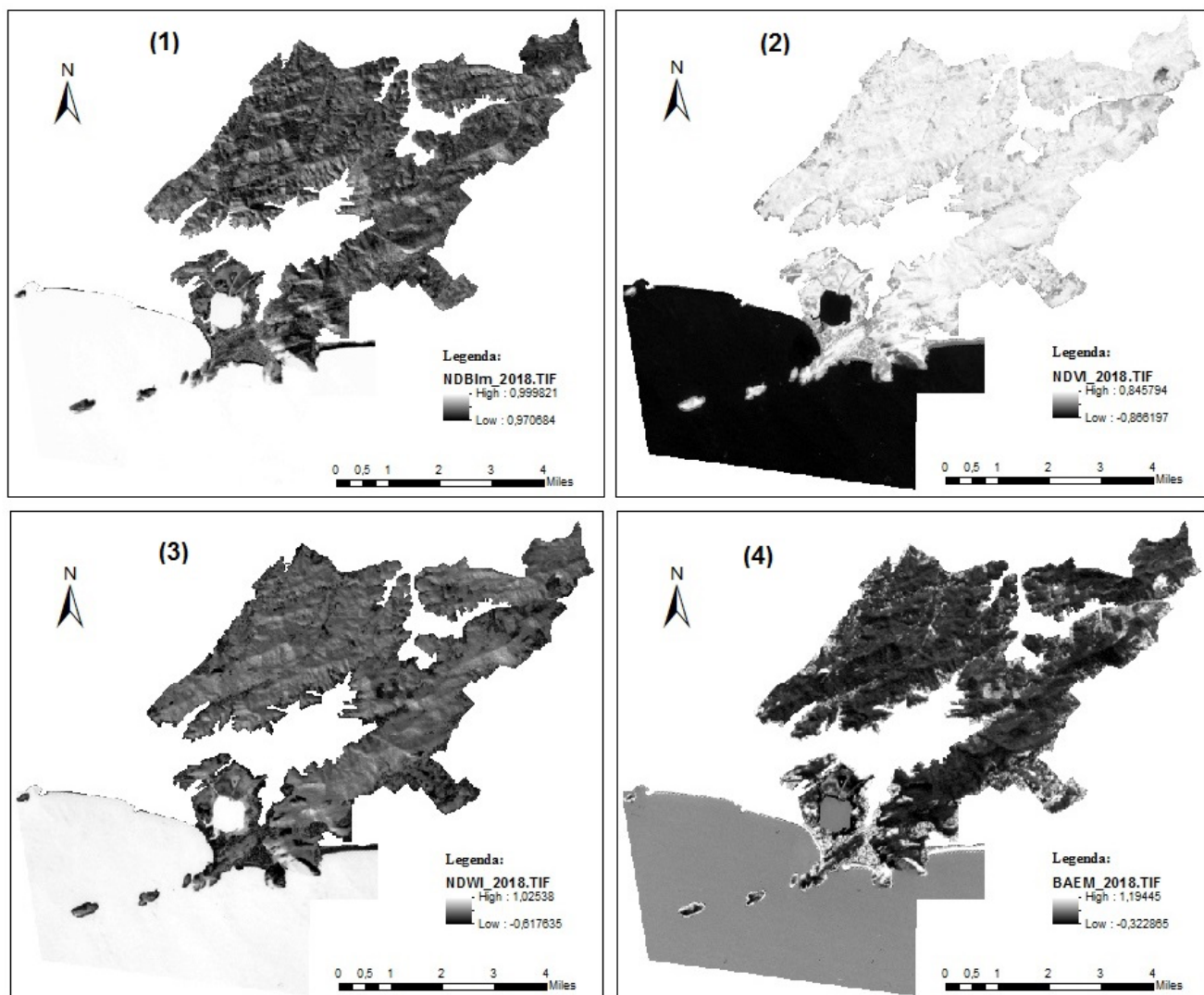
Fonte: Os autores (2019)

A Figura 6(a) mostra o resultado da classificação usando o Método BAEM, em três tipos de classes: solo exposto; afloramento rochoso; e áreas construídas. Observando a imagem da mesma região, obtido do Google Earth Pro e mostrada na Figura 6 (b), é possível ver que os afloramentos rochosos foram classificados como área construída na Figura 6(a). Esse fato ocorre devido à semelhança entre as características espectrais desses três tipos de cobertura terrestre.

3.3 Comparação entre os resultados dos índices NDBIm, NDVI e MNDWI e método BAEM

Na figura 7 é feita uma comparação visual dos mapas obtidos a partir dos três índices e do mapa resultante da aplicação do método BAEM, para o ano de 2018.

Figura 7 – Resultados classificação por: (1) NDBIm; (2) NDVI; (3) MNDWI; e (4) BAEM.



Fonte: Os autores (2019)

No NDBIm, conforme ilustrado na Figura 7 (1), os pixels com tons brancos mostram áreas com água e os tons cinza claros e escuros mostram áreas com outros tipos de cobertura terrestre. A imagem referente ao NDVI, apresentada na figura 7 (2), os pixels com tons brancos e tons brilhantes mostram vegetação, os com tons de cinza moderados a escuros mostram outras coberturas de terra e os com tons pretos estão associados à água. Neste resultado, é evidente a separação entre a vegetação e outros tipos de cobertura terrestre. Na imagem MNDWI, ilustrada na figura 7 (3), a água é mostrada como pixels brancos, enquanto outros tipos de cobertura terrestre são retratados em tons de cinza e preto. As áreas com vegetação densa aparecem cinza claro, enquanto que as áreas construídas são mostradas em tons de cinza escuros. Na Figura 7(4), os resultados obtidos com o método BAEM mostram os pixels com tons brancos representando área construída ou afloramento rochoso, enquanto que os pixels com tons cinza escuro mostram vegetação e os com tons de cinza claros são água. Para a extração da área construída, utilizando o método BAEM, tanto a vegetação quanto a água foram filtradas do índice do NDBIm.

Ao comparar os resultados dos três índices com o resultado obtido pelo método BAEM, verifica-se que tanto as regiões de vegetação, como as de áreas construídas e água estão bem mais definidas e evidentes no mapa obtido pelo método BAEM. Isso ocorre devido ao cálculo de BAEM ser obtido a partir da operação de subtração dos resultados obtidos pelos índices NDBIm, NDVI e MNDWI, que realçam diferenças entre os mesmos. Esse resultado corrobora o que foi apontado por Bhatti e Tripathia (2014), de que é necessário utilizar uma outra fórmula para se extrair informações de área construída do Landsat 8, ao invés do NDBI, como são feitas para as imagens de sensor TM. O fato do sensor OLI, do Landsat 8, possuir mais bandas que o sensor TM,

acarreta numa redundância na resposta espectral dos alvos, sendo necessário a aplicação do método de análise de componentes principais para eliminação dessa redundância.

3.4 Cálculo das áreas construídas

A Tabela 4 mostra os valores da área total do PESET e das áreas construídas nos anos de 2013 e 2018. A Zona de Amortecimento não entrou no cálculo de áreas construídas, pois ela se encontra fora dos limites do parque.

Tabela 4 - Área total do PESET e de áreas construídas dos anos 2013 e 2018.

Nome	Área Total (m ²)
PESET	34.922.484,26
Área construída 2013	888.546,60
Área construída 2018	931.902,30

Elaboração: Os autores (2019)

Devido à presença, dentro do Parque, de muitas áreas de afloramento rochoso e devido ao método BAEM, empregado nesse estudo, ter classificado essas áreas como área construída, fez-se necessário a remoção dessas áreas de forma a não comprometer o resultado final. Para esse processo foi criado um arquivo vetorial, no formato shapefile, com diversos polígonos, delimitando as áreas de afloramento rochoso, a serem extraídos do cálculo de área construída. O mesmo arquivo foi usado para fazer a remoção de outras áreas que apresentaram resultado correspondente à área construída, e que se tratavam de solo exposto, próximo a Lagoa de Itaipu.

A Tabela 5 mostra os valores das áreas construídas, antes e depois da extração das áreas de afloramento rochoso e solo exposto para os anos de 2013 e 2018. Verifica-se que o valor das áreas construídas diminuiu significativamente.

Tabela 5 - Área total de áreas construídas com e sem afloramento rochoso e solo exposto dos anos 2013 e 2018.

	Com rocha e solo exposto	Sem rocha e solo exposto
Área construída 2013	888.546,60 m ²	156.681,80 m ²
Área construída 2018	931.902,30 m ²	157.115,00 m ²

Elaboração: Os autores (2019)

4. CONCLUSÃO

A análise dos resultados de classificação do NDVI mostrou que houve uma pequena perda de vegetação dentro dos limites do PESET, devido à expansão urbana crescente em volta do parque.

Os resultados do MNDWI mostraram que esse índice foi capaz de distinguir, com clareza, regiões impermeáveis das permeáveis. Em contrapartida, esse índice apresentou problemas na classificação de áreas com sombra, que apresentaram resultados falsos, semelhantes às áreas molhadas.

A análise de componentes principais foi importante para a eliminação das informações redundantes entre as bandas 6 e 7, do sensor multiespectral, e entre as bandas 10 e 11, do sensor termal, permitindo um refinamento melhor dos resultados. O uso das bandas termais 10 e 11 contribuiu para uma melhor diferenciação entre as classes de áreas “não construídas” e “construídas”, visto que essas últimas emitem mais calor.

O resultado da quantificação de áreas identificadas como “construídas”, obtidas pela aplicação do método BAEM, mostrou um aumento de construções dentro dos limites do PESET nos anos considerados, configurando uma irregularidade.

O resultado da classificação pelo método BAEM permitiu uma melhor distinção entre áreas “construídas” e “não construídas”. Da mesma forma, a combinação de diferentes índices na sua formulação, possibilitou distinguir outras classes como: “vegetação”; “água”; e “construção”.

Em contrapartida, o método BAEM apresentou problemas com a classificação de “afloramento

rochoso”, devido à resposta espectral ser similar à de “áreas construídas”. Esse problema também foi verificado nos resultados obtidos com os índices separadamente.

Os bons resultados obtidos nesse estudo indicam que o uso do Método BAEM, junto com técnicas que permitam o refinamento dos resultados, e a utilização de outros sistemas de sensores, com melhores resoluções espaciais, podem melhorar a precisão da identificação de áreas construídas, podendo gerar informações importantes para subsidiar medidas de preservação das áreas cobertas por vegetação e/ou medição do crescimento urbano de uma determinada área.

REFERÊNCIAS

BARROS, A. A. M. **Análise Florística e estrutural do Parque Estadual da Serra da Tiririca, Niterói e Maricá, RJ, Brasil.** 237 f. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Botânica e Diversidade Vegetal, Escola Nacional de Botânica Tropical, Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2008.

BARROS, A. A. M.; SEOANE, C. E. S. A problemática da conservação do Parque Estadual da Serra da Tiririca, Niterói/Maricá, RJ, Brasil. In: Vallejo, L.R. & Silva, M.T.C. (eds) Os (Des)Caminhos do Estado do Rio de Janeiro Rumo ao Século XXI. Anais... Niterói: Instituto de Geociências da UFF, 1999. p. 114–124.

BHATTI, S. S.; TRIPATHI, N. Built-up Area Extraction Using Landsat 8 OLI Imagery. **GIScience & Remote Sensing**, Tailândia, Vol. 51, No. 4, 445–467, <http://dx.doi.org/10.1080/15481603.2014.939539>, 2014.

CRÓSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto.** Campinas, SP: IG/UNICAMP, 1992. ISBN 85-85369-02-7.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Atlas da evolução dos remanescentes florestais e ecossistemas associados no Domínio de Mata Atlântica no período 1985-1995.** São Paulo: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e Instituto Socioambiental, 1998.

GAO, B. A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257-266, 1996.

GARTLAND, L. **Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas.** London: Earthscan, 2010.

ISA. **Dossiê Mata Atlântica 2001. Monitoramento participativo da Mata Atlântica.** Instituto Sócio Ambiental. 409p, 2001.

JENSEN, J. R. **Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective.** 3rd Edition. NJ: Prentice Hall Logicon Geodynamics, Inc, 2004.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente – Uma Perspectiva em Recursos Terrestres.** 2ª Edição. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

Jl, L.; ZHANG, L.; WYLIE, B. Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Vol. 75, No. 11, pp.1307-1317, 2009.

JOLLIFFE, I. T. *Graphical Representation of Data Using Principal Components.* In: Principal Component Analysis, edited by I. T. Jolliffe, 78–110. New York: Springer, 2002.

JUSUF, S. K.; WONG, N. H.; HAGEN, E.; ANGGORO, R.; HONG, Y. The Influence of Land Use on the Urban Heat Island in Singapore. **Habitat International**, 31 (2): 232–242. doi:10.1016/j.habitatint.2007.02.006, 2007.

KIM, H. H. Urban Heat Island. **International Journal of Remote Sensing**, 13 (12): 2319–2336.

doi:10.1080/01431169208904271, 1992.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: Editora UNIDERP, 2007.

LO, C. P. Testing Urban Theories Using Remote Sensing. **GiScience & Remote Sensing**, 41 (2): 95–115. doi:10.2747/1548-1603.41.2.95, 2004.

MALLICK, J.; KANT, Y.; BHARATH, B. D. Estimation of Land Surface Temperature over Delhi Using Landsat-7 ETM+. **Journal of Indian Geophysical Union**, 12 (3): 131–140, 2008.

MCFEETERS, S. K. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, n.7, p.1425-1432, 1996.

MEHEBUB, S.; RAIHAN, A.; NUHUL, H.; HAROON, S. Assessing Flood Inundation Extent and Landscape Vulnerability to Flood Using Geospatial Technology: A Study of Malda District of West Bengal, India. Volume XIV, Issue 2, pp. 156-163 (8) <http://dx.doi.org/10.5775/fg.2067-4635.2015.144.d>, 2015

NEVES, A. C. **Determinantes do Desmatamento na Mata Atlântica: Uma Análise Econômica**. 94 p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Econômicas do Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

OKE, T. R. City Size and the Urban Heat Island. **Atmospheric Environment** (1967) 7 (8): 769–779. doi:10.1016/0004-6981(73)90140-6, 1973.

OLIVEIRA, R. F. Mata Atlântica: Reserva da biodiversidade no Estado do Rio de Janeiro. **Revista FEEMA**, 4(18): 46-50, 1995

PEREIRA, G. C.; MORAIS, F. de. Índice NDWI e imagem SRTM aplicados ao mapeamento das áreas inundáveis do entorno da Lagoa da Confusão – TO. In: Territórios brasileiros: dinâmica, potencialidade e vulnerabilidades, p. 511 a 518, Teresina – Piauí, 2015.

PONTES, J. A. L. Serra da Tiririca, RJ. Necessidade de conservação (1a Contribuição). Bol. FBCN, Rio de Janeiro, n. 22, p. 89 – 94, 1987.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos, SP: Ed. Parêntese, 2010.

PRIMACK, R. B.; RODRIGUES, E. **Biologia da Conservação**. Londrina: E. Rodrigues, 2001.

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction**. 5th ed. New York: Springer, 2013.

ROSENDO, J. dos S. **Índices de Vegetação e Monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na Bacia do rio Araguari -MG - utilizando dados do sensor Modis**. 130 p. Dissertação (Mestrado em Geografia e Gestão do Território) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite). In: PROCEEDINGS OF THE THIRD ERTS SYMPOSIUM, SP – 351 Goddard Space Flight Center. Washington: NASA, 1973, p. 309–317.

SILVA, C. C. S. **Monitoramento da Ocupação Urbana por meio de Índices NDVI e NDBI a partir de Imagens Landsat-5 do Parque Estadual da Serra da Tiririca**. 72 f. Monografia – Faculdade de Engenharia, UERJ, Rio de Janeiro, 2017.

SOS Mata Atlântica. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica período 1995 – 2000**. Relatório parcial. Estado do Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <http://www.sosmatatlantica.org.br/atlas2001/dados/relatorioatlas.pdf>. Acesso em: 13 janeiro. 2019.

TANIZAKI-FONSECA, K. & MOULTON, T. P. A Fragmentação da Mata Atlântica no Estado do Rio de Janeiro. In: Bergalo, H.G.; Rocha, C.F.D.; Alves, M.A.D. & Sluys, M.V. (eds) A fauna ameaçada de extinção do estado do Rio de Janeiro. EDUERJ: p. 23–35, 2000.

TRAN, H.; UCHIHAMA, D.; OCHI, S.; YASUOKA, Y. Assessment with Satellite Data of the Urban Heat Island Effects in Asian Mega Cities. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 8 (1): 34–48. doi:10.1016/j.jag.2005.05.003, 2006.

USGS. Landsat Data Access. Disponível em: <https://landsat.usgs.gov/landsat-8-mission> Acesso em 15 abril. 2018

WENG, Q. A Remote Sensing-GIS Evaluation of Urban Expansion and Its Impact on Surface Temperature in the Zhujiang Delta, China. **International Journal of Remote Sensing**, 22 (10): 1999–2014, 2001.

WENG, Q.; LU D.; SCHUBRING, J. Estimation of Land Surface Temperature–Vegetation Abundance Relationship for Urban Heat Island Studies. **Remote Sensing of Environment**, 89 (4): 467–483. doi:10.1016/j.rse.2003.11.005, 2004.

XU, H. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. **International Journal of Remote Sensing**, ISSN 0143-1161 print/ISSN 1366-5901, China, online - 2006 Taylor & Francis. DOI: 10.1080/01431160600589179, 2006.

YUAN, F.; BAUER M. E. Comparison of Impervious Surface Area and Normalized Difference Vegetation Index as Indicators of Surface Urban Heat Island Effects in Landsat Imagery. **Remote Sensing of Environment**, 106 (3): 375–386. doi:10.1016/j.rse.2006.09.003, 2007.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. Use of Normalized Difference Built-Up Index in Automatically Mapping Urban Areas from TM Imagery. **International Journal of Remote Sensing**, 24 (3): 583–594. doi:10.1080/01431160304987, 2003.

ZHANGYAN, J.; YUNHAO, C.; JING, L. On Urban Heat Island of Beijing Based on Landsat TM Data. **Geo-Spatial Information Science**, 9 (4): 293–297. doi:10.1007/BF02826743, 2006.