



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Delimitação de zona ripária em planícies através do Índice Normalizado de Diferença da Água (NDWI) e série multitemporal Landsat

Rafael Cardão Augusto¹, Carla Bernadete Madureira Cruz², Vinícius da Silva Seabra³, Jéssica Silva Martins⁴

¹ Doutorando em Geografia (Planejamento e Gestão Ambiental) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e-mail cardao.geo.uerj@gmail.com (correspondente).

² Engenheira Cartógrafa (UERJ), Mestre em Sistemas e Computação (IME-RJ), Doutora em Geografia (UFRJ).

³ Possui graduação em Geografia, licenciatura e bacharelado, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, mestrado em Geologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, doutorado em geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro.

⁴ Doutoranda em Geografia do programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Artigo recebido em 05/07/2021 e aceito em 09/02/2022

RESUMO

As zonas ripárias constituem-se em áreas sazonalmente saturadas, sendo as áreas mais dinâmicas das bacias hidrográficas, determinando o estabelecimento da mata ciliar e possuindo grande importância no equilíbrio natural da bacia. Sua delimitação possui uma literatura consolidada em áreas declivosas e pequenas bacias, porém é ainda abstrata e carece de métodos em áreas planas. O presente trabalho propõe a delimitação de zonas ripárias em áreas de planícies, através de modelagem multitemporal que considera o máximo valor do índice NDWI por pixel na série histórica de imagens do satélite Landsat, apresentando também um estudo de caso aplicado às bacias hidrográficas dos rios Macacu e Caceribu, no estado do Rio de Janeiro. A metodologia encontra-se em consonância com o conceito da máxima superfície de inundação em 50 anos como critério de definição da zona ripária e com diversas aplicações do NDWI para identificação de solos úmidos relacionados a dados pluviométricos. Os resultados constataram que somente uma área de 62% da planície em tais bacias é sazonalmente alagável, ao invés de sua totalidade, com o índice apresentando coerência em sua resposta, delimitando como áreas úmidas as menos elevadas e mais próximas aos rios.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, áreas úmidas, índices espectrais, análise temporal.

Delineation of riparian zones in plains using the Normalized Difference Water Index (NDWI) and Landsat multitemporal series

ABSTRACT

The riparian zones are constituted in seasonally saturated areas, being the most dynamic areas of the hydrographic basins, determining the establishment of the riparian forest and having great importance in the natural balance of the basin. Its delimitation has a consolidated literature in sloping areas and small basins, however it is still abstract and lacks methods in flat areas. The present work proposes the delimitation of riparian zones in plains areas, through multitemporal modeling that considers the maximum value of the NDWI index per pixel in the historical series of images from the Landsat satellite, also presenting a case study applied to the hydrographic basins of the Macacu rivers and Caceribu, in the state of Rio de Janeiro. The methodology is in line with the concept of maximum flood surface in 50 years as a criterion for defining the riparian zone and with several applications of NDWI for the identification of wet soils related to rainfall data. The results found that only an area of 62% of the plain in such basins is seasonally floodable, instead of its totality, with the index showing consistency in its response, delimiting the lowest and closest to the rivers as wet areas.

Keywords: remote sensing, wetlands, spectral index, temporal analysis.

Introdução

As zonas ripárias podem ser consideradas como as áreas sazonalmente saturadas que margeiam os cursos d'água e suas cabeceiras, e que podem se expandir durante chuvas prolongadas (Lima et al., 2006), constituindo-se como as áreas mais dinâmicas da paisagem numa bacia

hidrográfica, em termos hidrológicos, ecológicos e geomorfológicos (Gregory, 1991; Lima e Zakia, 2000; Lima, 2008), possuindo grande importância no equilíbrio natural da bacia. O termo não deve ser confundido com o da vegetação ripária, também chamada de ribeirinha ou mata ciliar, a qual pode ser considerada como o resultado da atuação da

umidade do solo na seletividade das espécies, sendo indicadora das condições de saturação da zona ripária (Attanasio, 2006), possuindo a importância de proteção dos cursos fluviais.

A delimitação de zonas ripárias se depara com um cenário de dificuldade metodológica, relativa abstração e escassa literatura, sobretudo ao se tratar de seus limites em áreas planas. No Brasil, tal delimitação foi desenvolvida, entre outros autores, por Zakia (1998), Attanasio (2006), Santos e Kobiyama (2008), Zakia et al. (2009), Hung et al. (2017), Bressiani et al. (2018), através de modelos hidrológicos utilizando atributos ou índices topográficos, ambos em pequenas ou microbacias hidrográficas de características declivosas. Em geral, tais índices caracterizam a totalidades de áreas planas como zonas saturáveis.

Pesquisas mais recentes no tema definiram os limites de áreas úmidas através de tais índices topográficos, como em Guasseli et al. (2020), ou através do hidromorfismo dos solos (Barbosa et al., 2019), ambas aplicadas em bacias pequenas e declivosas ou demandando maior dedicação metodológica *in loco*.

Na literatura estrangeira, Ilhardt et al. (2000), definiram o conceito da *50-year flood inundation zone*, determinando que a máxima área alagada na planície de inundação nos últimos 50 anos numa bacia hidrográfica se configura como o descritor ideal de delimitação da zona ripária, associando isto a planícies de inundação ativas, onde os canais fluviais ainda realizam a deposição de sedimentos e o escoamento e vazão fluvial exercem a dinâmica de inundação na planície da bacia hidrográfica como resposta aos eventos de precipitação.

Desde então, diversos autores internacionais utilizaram do conceito para identificar e caracterizar zonas ripárias, através de diferentes métodos, em geral envolvendo mensurações em campo, bases temáticas, modelos hidrológicos, modelos digitais de elevação, ou imagens de sensores ópticos ativos, como radares, e em geral também aplicadas a pequenas ou microbacias hidrográficas (Verry et al., 2004; Aunan et al., 2005; Mason, 2007; Holmes e Goebel, 2010; Abood et al., 2011; Fernandez et al., 2012; Abood et al., 2012; Salo et al., 2016).

As imagens de sensores orbitais proporcionam uma visão multitemporal de extensas áreas da superfície terrestre. A avaliação quantitativa e qualitativa das feições terrestres utilizando imagens orbitais tem sido feita, dentre

outras formas, através do uso dos índices de vegetação. Os índices são valores radiométricos calculadas através de operações envolvendo diferentes bandas das imagens orbitais, e suas aplicações fornecem parâmetros capazes de investigar propriedades espectrais, identificando determinados tipos de informações compostas de distintos materiais, como água, edificações ou vegetação (França et al., 2012).

Em geral, os índices são razões envolvendo valores de reflectância das regiões espectrais do visível e do infravermelho, já que estas são sensíveis a fatores de estrutura física, área foliar, umidade e biomassa fotossinteticamente ativa (Ponzoni et al., 2012). Diferentes índices têm sido desenvolvidos, aplicados e analisados com o objetivo de explorar mais a fundo as propriedades espectrais da vegetação. Dentre os índices mais usados destacam-se: NDVI, SAVI, EVI, NDBI e NDWI.

Entre tais índices destacam-se também os que possuem objetivo específico de analisar a dinâmica de corpos hídricos ou fatores de umidade na vegetação e nos solos, como o NDWI, MNDWI e NDMI. Os cálculos de tais índices geram resultados com valores de -1 a 1, e quanto mais próximo de 1 estiver o valor, mais teor de água há no alvo analisado.

O Índice de Diferença Normalizada da Água, ou *Normalized Difference Water Index* (NDWI) possui duas formulações, propostas por McFeeters (1996) e Gao (1996). O NDWI de McFeeters (1996) é uma razão envolvendo as bandas do verde (ρ_{green}) e do infravermelho próximo (ρ_{nir}), muito utilizado para ressaltar corpos hídricos e minimizar a resposta dos demais alvos (Brenner e Guasseli, 2015; Pereira et al., 2018).

Já o NDWI proposto por Gao (1996), apesar do mesmo nome, possui diferentes conceitos do elaborado por McFeeters (1996). Também chamado de Índice de Diferença de Umidade Normalizado, ou *Normalized Difference Water Index* (NDMI), o índice é utilizado para estimar o teor de umidade da vegetação, e é calculado a partir da razão entre as bandas do infravermelho próximo (ρ_{nir}) e infravermelho médio (ρ_{swir}), expressado pela fórmula:

$$NDWI = (\rho_{nir} - \rho_{swir}) / (\rho_{nir} + \rho_{swir})$$

A umidade dos solos pode ser definida como a quantidade de água armazenada nos solos, sendo uma importante variável para aprimorar estudos e modelos hidrológicos. Epiphanyo et al. (1992) constataram que, até 10cm de profundidade, há grande relação entre a umidade dos solos e a reflectância captada pelos sensores orbitais, e que os comprimentos de onda de 750 a 1050 (bandas do infravermelho próximo ao médio) são os que apresentam maior sensibilidade, destacando que, em condições de solos brasileiros, esta abordagem traz perspectivas de trabalhos de mensuração da umidade dos solos.

A umidade dos solos também pode ser medida através de dados de sensores ativos (Ahmad et al., 2011; Haubrok et al., 2008; Lakshmi, 2013; Mohanty et al., 2017; Ahlmer, 2018; Jucá et al., 2019), porém tais dados muitas vezes possuem custo de aquisição, resolução espacial inadequada para médias escalas, resolução temporal limitada, e produtos recém-lançados, o que inviabiliza um estudo que objetiva analisar a dinâmica de áreas inundáveis em uma larga escala de tempo. Desta forma, a utilização de sensores orbitais passivos pode constituir uma ferramenta de grande potencial neste sentido.

Isto posto, diversos estudos tem utilizado o NDWI de Gao (1996) para caracterizar a umidade dos solos utilizando imagens orbitais de sensores passivos, correlacionando as variações dos valores do índice com dados de precipitação (Maffra, 2004; Gonzaga et al., 2011; Brubacher e Guasselli, 2013; Machado et al., 2014; Penachio et al., 2017; Rodrigues et al., 2017; Pereira et al., 2018; Silva, 2018; Silva Junior et al., 2018).

Entre tais pesquisas, Pereira et al. (2018) constataram que o NDWI de Gao (1996) possui maior sensibilidade de distinção do teor de umidade no solo se comparado ao NDWI de McFeeters (1996). O estudo comparou os dois índices aplicados em imagens dos sensores MODIS, e definiu o valor entre 0.52 e 0.85 do NDWI de Gao (1996) como a faixa espectral de identificação do solo úmido em gramíneas, aferindo com dados coletados em campo. Pereira et al. (2018) destacaram um trecho de confusão entre as respostas de vegetação arbórea e de solo úmido em gramíneas, entre 0,52 e 0,75 do índice. Além das coberturas arbóreas, cabe destacar também que em áreas urbanas o NDWI não apresenta sensibilidade à umidade dos solos presentes abaixo das edificações, respondendo sempre com valores baixos (Gao, 1996).

Diante disso, propõe-se a partir da presente pesquisa a delimitação de zonas ripárias em áreas de planícies, através da modelagem multitemporal de cálculo do máximo valor do índice NDWI na série histórica de imagens Landsat, com um estudo de caso aplicado às bacias hidrográficas dos rios Macacu e Caceribu, no estado do Rio de Janeiro.

Modelagem do Máximo NDWI por Pixel na Série Multitemporal como Proposta de Delimitação de Zona Ripária em Planícies

A metodologia propõe uma modelagem que identifique e delimite a zona ripária em planícies considerando a aplicação do índice NDWI (Gao, 1996) sobre a série histórica de imagens orbitais de sensores passivos, selecionando as datas utilizadas de acordo com critérios pluviométricos de períodos secos e chuvosos. A modelagem tem como objetivo gerar um dado matricial que contenha o máximo valor de NDWI por pixel da série histórica, onde seja possível delimitar a zona ripária de acordo com um limiar definido em pesquisas anteriores que relacionaram os valores espectrais do índice com a umidade dos solos existente *in loco*.

A geração de tal dado está relacionada ao conceito da máxima superfície de inundação em 50 anos (Ilhardt et al., 2000), podendo ser adaptada a um período menor devido às limitações temporais do sensor escolhido. Para a modelagem, propõe-se o uso dos satélites Landsat, sensores TM e OLI, por serem os que apresentam uma quantidade de imagens geradas no maior período de tempo possível entre os sensores passivos existentes, numa mesma resolução espacial, 30 metros por pixel, com uma considerável resolução temporal, 16 dias de revisita, e uma resolução espectral que inclui as bandas do infravermelho próximo (NIR) e médio (SWIR), necessárias para o cálculo do índice NDWI (Quadro 1).

O satélite TM Landsat 5 foi lançado em 1984, enquanto que o OLI Landsat 8 foi lançado em 2013, dando continuidade à série de imagens geradas pelo primeiro. A coleção contínua de imagens geradas por ambos apresenta um recorte temporal de 35 anos entre 1984 e 2018, enquanto que demais sensores passivos estão a bordo de satélites orbitais que foram lançados mais recentemente, possuindo séries temporais mais limitadas.

Quadro 1. Bandas e intervalos espectrais do NIR e SWIR por sensores Landsat

Bandas e intervalos espectrais por sensores Landsat		
Classe	TM Landsat (1984-2012)	OLI Landsat (2013-2018)
NIR	B4 (0.76 - 0.90 μm)	B5 (0.85 - 0.88 μm)
SWIR-2	B7 (2.08 - 2.35 μm)	B7 (2.11 - 2.29 μm)

Para a metodologia, propõe-se, num primeiro momento, a aquisição de dados de estações pluviométricas para a análise dos dados mensais de precipitação acumulada, seguida da identificação dos períodos chuvoso e seco em cada ano, com o objetivo de escolher, ao final de cada período, uma imagem Landsat para ser utilizada na modelagem. O período chuvoso corresponde ao período de no mínimo três meses com maior volume de precipitação acumulada, enquanto que o período seco o período de no mínimo de três meses com menores valores.

Após a escolha de uma imagem por ano ao final de cada período, uma coleção de imagens deve ser criada para cada período considerando toda a série histórica. Tais imagens devem estar em valores de reflectância, possibilitando a geração de índices, sendo necessária também a aplicação de normalização radiométrica entre as imagens dos diferentes sensores, que apresentam distintas resoluções radiométricas: 8 Bits no sensor TM, e 16 Bits no sensor OLI.

Para a constatação do NDWI como índice mais adequado frente às condições da área, propõe-se a escolha de três anos para a aplicação de diferentes índices na imagem e extração da média dos valores, com o objetivo de comparar a sensibilidade espectral de cada um dos índices às variações pluviométricas dos períodos úmido e seco, sendo de preferência dois anos nas extremidades da série histórica e um no meio. Os índices indicados são o de NDWI de Gao (1996), o NDWI de McFeeters (1996), o NDVI e a banda do Termal, com a hipótese de que o NDWI (Gao, 1996) será o índice de maior sensibilidade às variações de precipitação observadas nos períodos. Constatada a sensibilidade, para cada uma das imagens de todas as coleções deve ser calculado o índice NDWI (Gao, 1996), utilizando as bandas do infravermelho próximo (NIR) e médio (SWIR), apresentada na revisão teórica.

Após aplicação do índice, devem ser realizadas análises de correlação entre os resultados do NDWI de cada imagem e os dados pluviométricos acumulados do período chuvoso,

para cada ano. As análises devem ser de duas formas: quantitativas e qualitativas, utilizando amostras sobre a área de planície na forma de pontos aleatórios. Para realizar as análises, devem ser extraídos, para cada um dos pontos, os valores de NDWI de cada imagem da série histórica do período chuvoso.

Para a análise qualitativa, propõe-se calcular as medianas de NDWI do total das amostras por ano, e os valores comparados com a precipitação acumulada de 3 meses no período chuvoso que antecede a data de cada imagem. Já para a análise quantitativa propõe-se computar a quantidade de amostras que possuem valores superiores a 0,52 em cada ano, o que corresponde ao NDWI muito úmido (Pereira et al., 2018), e também comparadas com a precipitação acumulada de 3 meses no período chuvoso que antecede a data de cada imagem. O objetivo de realizar tais análises é reforçar a relação existente entre as imagens com valores de NDWI mais altos e os anos com maior precipitação acumulada nos períodos chuvosos.

Após tais análises, deve ser calculado o valor máximo do NDWI por pixel das duas coleções (TM e OLI) nos dois modelos de períodos (chuvoso e seco), a fim de obter a máxima área úmida por período. A partir destes resultados, propõe-se gerar as frequências de valores do NDWI em cada período, e comparadas em histograma. A comparação entre eles reforça a relação entre os valores de NDWI e as diferentes quantidades de precipitação por período.

Constatadas todas as relações, o resultado obtido, por períodos, deve passar por uma classificação: classe de valores inferiores a 0,52 e de valores iguais ou superiores a 0,52 por pixel. Tais valores correspondem a um limiar de áreas úmidas identificadas a partir do NDWI de Gao (1996) por Pereira et al. (2018), e discutidos na revisão bibliográfica, onde os valores iguais ou superiores a 0,52 correspondem a solos que responderam com grande umidade à períodos acumulados de grande precipitação (Figura 1), definindo, dessa forma, a zona ripária.

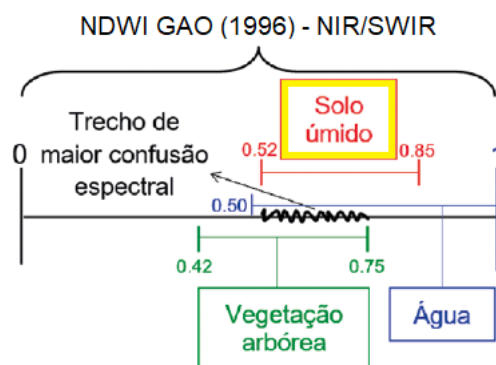


Figura 1. Valores de NDWI de Gao relacionados com solo úmido. Fonte: Pereira et al. (2018)

Após isso, propõe-se a aplicação de filtros espaciais sobre as duas áreas geradas para que haja a redução de pixels isolados de classe, menores que 1 ha, sendo absorvidos pela classe do entorno. Por fim, propõe-se extrair os valores médios de declividade e altitude por classes obtidas, utilizando modelos digitais de elevação, com o objetivo de verificar as características

geomorfológicas de cada classe, sendo essa uma forma de constatação da relação entre os resultados obtidos e as características do terreno. Por fim, caso necessário, o resultado deve ser recortado pelo dado espacial que corresponda a área de planícies na bacia onde está sendo aplicada a modelagem. A Figura 2 apresenta o fluxograma geral do método proposto.

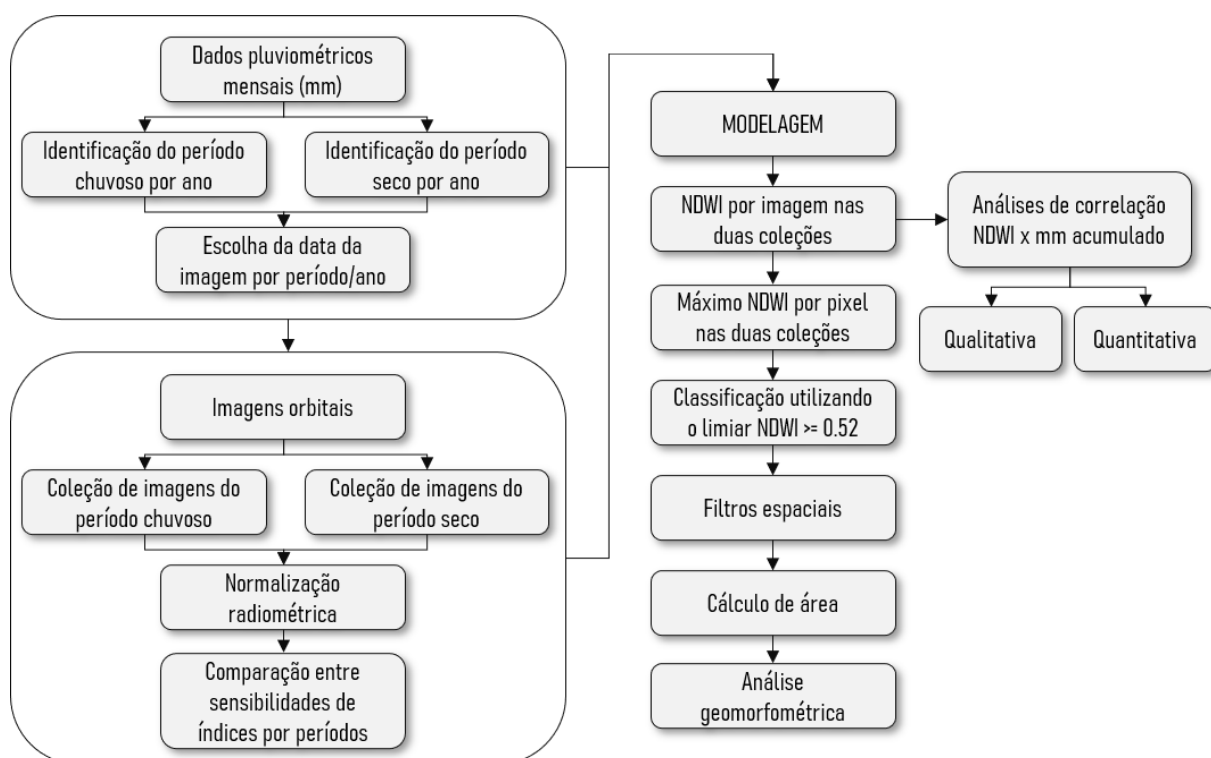


Figura 2. Fluxograma metodológico

Cabe destacar o trecho de confusão entre solo úmido e vegetação arbórea apontado por Pereira et al. (2018). Da mesma forma, o NDWI não apresenta sensibilidade à variação dos períodos

em áreas urbanas, que respondem com valores sempre inferiores (Gao, 1996). O ideal é que a totalidade ou quase totalidade da área onde o método será aplicado seja composta pela vegetação

de gramíneas, como pastagens naturais ou plantadas, além de similares formações vegetais, como gramíneo-lenhosas.

Delimitação de zonas ripárias em planícies das bacias hidrográficas dos rios Macacu e Caceribu / RJ

A partir da discussão teórica e da metodologia proposta para delimitação de zonas ripárias em planícies, as bacias hidrográficas dos rios Macacu e Caceribu, no estado do Rio de Janeiro, foram selecionadas como área de estudo para aplicação do método de modelagem, utilizando dados pluviométricos, e a plataforma web gratuita *Google Earth Engine* (2020), para acesso à coleção de imagens Landsat e construção do modelo através da linguagem *javascript*,

considerando as características da paisagem das bacias no método.

Caracterização da área de estudo

A área de estudo corresponde aos domínios de planícies das Bacias Hidrográficas dos rios Macacu e Caceribu (BHRMC), localizadas na Região Metropolitana do estado do Rio de Janeiro (RMRJ), a leste da Baía de Guanabara, compreendida entre as longitudes S 22°43'30'' e S 22°42'01'', e as latitudes O 42°40'37'' e O 42°59'42''. A BHRMC possui uma área de 2.104 Km², enquanto o domínio de planícies possui 564 Km², ou 27% da área das bacias. O domínio de planícies foi delimitado em metodologia empregada por Augusto e Seabra (2017) no mapeamento dos domínios de relevos da BHRMC (Figura 3).

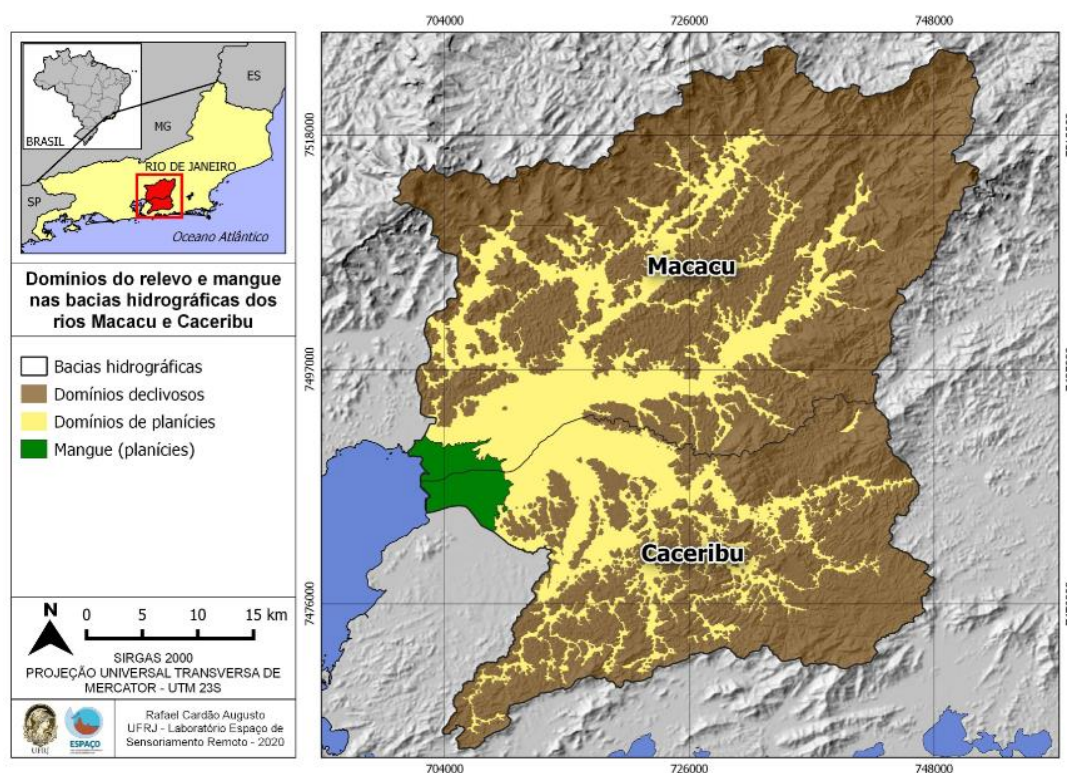


Figura 3. Localização da área de estudo. Macacu e Caceribu-RJ

As planícies da BHRMC abrangem parte dos municípios de Cachoeiras de Macacu, Guapimirim, Itaboraí, Tanguá e São Gonçalo, sendo parte das denominadas baixadas fluminenses (INEA, 2010), com a presença de solos aluviais, gleissolos e organossolos (EMBRAPA, 2016), associados a áreas de várzea e deposição fluvial ou fluvio-marinha (EMBRAPA, 2006; IBGE, 2007; Jacomine, 2009), por onde fluem os principais rios

da bacia, em direção a seus deságües na Baía de Guanabara.

A precipitação média anual é de 1.000 mm, com temperatura média anual de 25°C (INEA, 2010), dois dos fatores que condicionam o estabelecimento do tipo de vegetação. A vegetação original em sua maior parte era composta por Floresta Ombrófila Densa, além de significativas áreas de mangue às margens da Baía de Guanabara

(INEA, 2010), porém, por estar localizada na Região Metropolitana, as planícies da BHRMC apresentam-se quase totalmente desprovidas de sua vegetação original, possuindo grandes áreas rurais e alguns núcleos urbanos, sendo também cortada por importantes eixos rodoviários como a BR-101 e a RJ-124 (Via Lagos). As planícies da BHRMC possuem como cobertura predominante a classe de pastagens, apresentando os rebanhos bovinos como principal atividade pecuária (UFF, 2010).

Material e métodos

Para a aplicação da metodologia, foi descontada do domínio de planícies a área de mangue da Área de Proteção Ambiental de Guapimirim (45 Km²), localizada à jusante do domínio, além dos núcleos urbanos (28 Km²) já existentes em 1984. A máscara de mangue e as áreas urbanas foram delimitadas a partir de interpretação visual de imagem TM Landsat de 1984, restando ao domínio de planícies uma área de 491 Km², ou 87% de sua área original. Tais áreas foram descontadas devido ao índice NDWI não apresentar sensibilidade espectral ao teor de umidade dos solos sob tais classes de cobertura da terra (Gao, 1996).

A metodologia envolveu uma modelagem que aplicou o método proposto através da plataforma web gratuita *Google Earth Engine* (2020), ou GEE, que permite o processamento geoespacial e contém um catálogo de diversas imagens de satélite e conjuntos de dados espaciais

localizados na nuvem, permitindo ao usuário visualizar, manipular, editar e criar dados e informações através do seu editor de códigos e das linguagens *javascript* ou *python*, sem a necessidade de download dos dados.

Os dados pluviométricos foram adquiridos a partir do SNIRH (2020), utilizando a plataforma web Hidroweb. Foi feito o download dos dados de precipitação captados e compilados mensalmente, desde 1967, pelo pluviômetro Fazenda do Carmo, de código 2242013, localizado em Cachoeiras de Macacu, coordenada -22,44;-42,76, na cabeceira norte da bacia hidrográfica do rio Macacu, operado pela Agência Nacional de Águas (ANA). A escolha do pluviômetro deu-se por sua posição estratégica, localizado nas vertentes da BHRMC, onde a precipitação sobre essa área contribui com a vazão de toda a extensão da bacia.

A partir dos dados do pluviômetro foram analisados mensalmente, de 1984 a 2018, o valor médio e máximo de chuva, a fim de identificar em cada ano o período chuvoso e seco, com o objetivo de escolher, no final acumulado de cada período, uma imagem Landsat. Em geral os períodos chuvosos se localizaram entre dezembro e março, e os secos entre junho e setembro de cada ano. A escolha das imagens de cada ano seguiu critérios como os exemplificados no Quadro 2, onde a imagem do período chuvoso de 1997 localiza-se no final de um período acumulado de 1.261mm de chuva em 4 meses (janeiro), e a do período seco um acumulado de 107 mm de chuva em 3 meses (julho)

Quadro 2. Dados pluviométricos e imagens selecionadas em 1997

Mês	Máxima	Total	Dias de Chuva	Imagem Selecionada
10/1997	54,9	144,9	8	
09/1997	22,2	99,4	11	
08/1997	21,2	59,0	4	
07/1997	12,3	29,4	4	<u>LT05 L1TP 217076 19970721 20161230 01 T1</u>
06/1997	6,4	13,2	3	
05/1997	18,1	64,5	7	
04/1997	41,3	125,3	6	
03/1997	70,1	290,6	11	
02/1997	27,3	95,0	7	
01/1997	65,1	434,8	18	<u>LT05 L1TP 217076 19970110 20170101 01 T1</u>
12/1996	74,5	331,8	15	
11/1996	81,4	374,6	11	
10/1996	27,6	120,4	12	

Cabe destacar que a escolha das imagens apresentou limitações, como quantidade de nuvens sobre a área da bacia, geralmente mais problemática no período chuvoso, sendo apenas possível escolher a mais próxima da data desejada. Além disso, em alguns anos não foi possível selecionar imagens devido a tal limitação. No total foram selecionadas 26 imagens do período chuvoso e 28 imagens do período seco, no período de 35 anos analisado, todas da órbita-ponto 217-076, que abrange a região metropolitana do RJ e seus arredores.

Para ambos os casos foi possível escolher imagens de 1984 e 2018, primeiro e último ano da série temporal. O percentual de nuvens não é conveniente a nível de informação já que o analisado foi a quantidade de nuvens sobre a BHRMC, de forma visual, e não sobre a totalidade da imagem. A escolha das imagens, utilizando tais critérios, foi feita a partir da plataforma GEE, criando uma lista para ser utilizada na modelagem.

Após a seleção das imagens, os anos de 1984, 1997 e 2018 foram escolhidos para a aplicação e análise dos índices sensíveis a umidade e discutidos na bibliografia: NDWI de Gao (1996); NDWI de McFeeters (1996); NDVI; banda Termal do sensor. Índices como o MNDWI ou o NDPI não foram aplicados já que são variações do NDWI de McFeeters (1996) justamente para minimizar demais efeitos e destacar mais ainda a lâmina d'água de corpos hídricos, objeto que não é de interesse nessa pesquisa.

Os resultados evidenciaram o NDWI de Gao (1996) como o mais sensível às diferenças pluviométricas existentes entre os períodos chuvoso e seco, conforme exemplificado na Figura 4 para o ano de 1997, onde a amplitude dos valores médios do NDWI de Gao (1996) foi maior que a dos demais índices, apresentando um valor médio de 0,53 no período chuvoso, e mínimo de 0,30 no período seco.

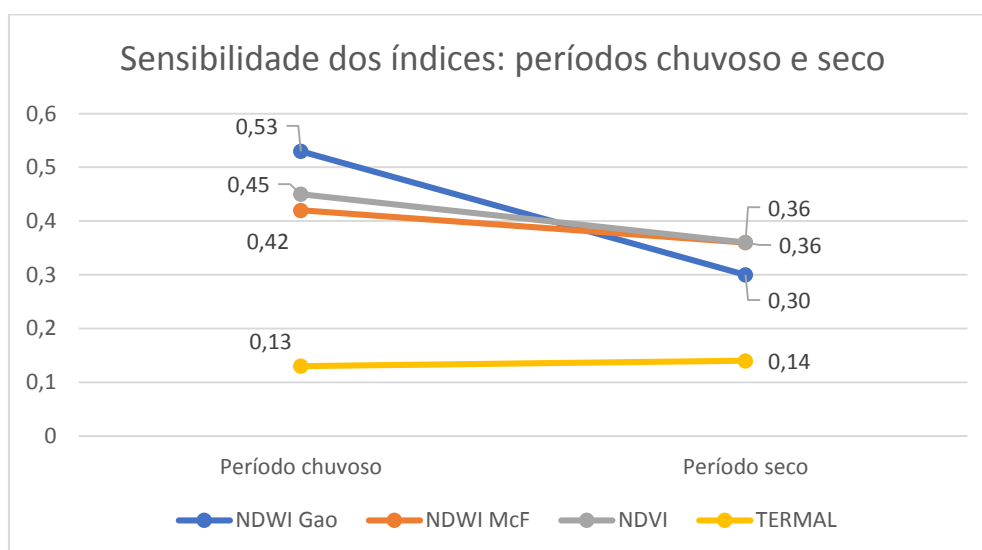


Figura 4. Sensibilidade dos índices nos períodos chuvoso e seco de 1997 na BHRMC

Isto posto, foi dado início à modelagem utilizando as imagens selecionadas pelos critérios pluviométricos nos dois períodos de cada ano. Tanto para o período chuvoso quanto para o período seco foram criadas, no editor de códigos do GEE, variáveis contendo os nomes das imagens escolhidas dos sensores TM e OLI Landsat, 26 no modelo do período chuvoso e 28 no modelo do período seco, importadas das coleções de imagens Landsat do GEE.

As imagens foram importadas das coleções *Surface Reflectance Tier 1*, tanto do sensor TM

quanto do OLI, já corrigidas radiometricamente, sendo normalizadas segundo o método de Potapov et al. (2020) e apresentando valores de reflectância de superfície. Após a criação das variáveis, foi criada uma função para o cálculo do NDWI.

Em seguida foi construída, para cada período, uma nova coleção de imagens a partir das variáveis iniciais do primeiro passo, contendo os nomes das imagens escolhidas. Sobre esta coleção, foi aplicado o cálculo do NDWI sobre cada imagem. Feito isso, foram geradas 420 amostras na forma de pontos aleatórios sobre a área de planícies

da BHRMC, calculadas as medianas do NDWI por ano, e realizadas as análises de correlação entre os resultados do NDWI de cada imagem e os dados pluviométricos acumulados de 3 meses no período chuvoso que antecede a data de cada imagem.

A primeira análise de correlação dos resultados com os dados de precipitação tem o caráter de avaliação qualitativa de resposta dos

valores do índice ao acumulado de chuvas. Tal avaliação apresentou uma forte relação entre as medianas de NDWI das amostras e o acumulado de precipitação de 3 meses antecedentes de cada imagem, observados no pluviômetro, para cada ano. Em geral, os anos com maior acumulado de precipitação no período chuvoso foram também os que os valores médios de NDWI das amostras foram mais altos (Figuras 5 e 6).

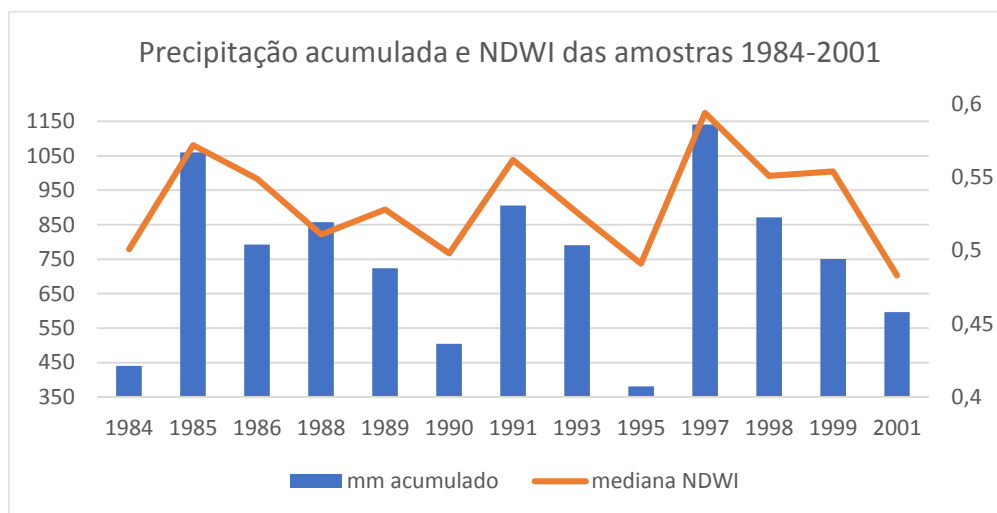


Figura 5. Precipitação acumulada e NDWI das amostras por ano de 1984 a 2001

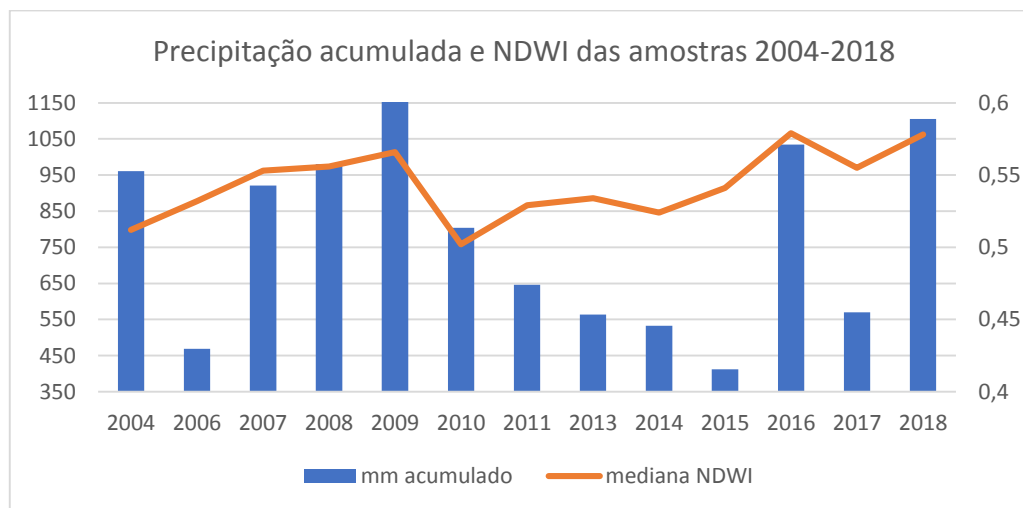


Figura 6. Precipitação acumulada e NDWI das amostras por ano de 2004 a 2018

A segunda análise possui um caráter espacial, ou quantitativo, da quantidade de amostras que respondem com um valor alto de NDWI, e também apresentou a mesma relação

entre os dados, com uma maior quantidade de amostras com valor superior a 0,52 nos anos onde o acumulado de precipitação foi maior no período chuvoso (Figuras 7 e 8).

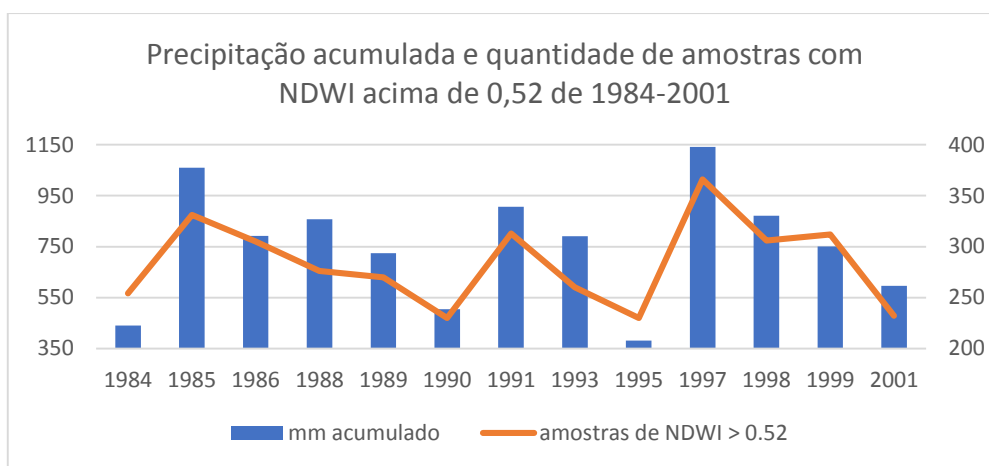


Figura 7. Precipitação acumulada e quantidade de amostras com alto NDWI de 1984 a 2001

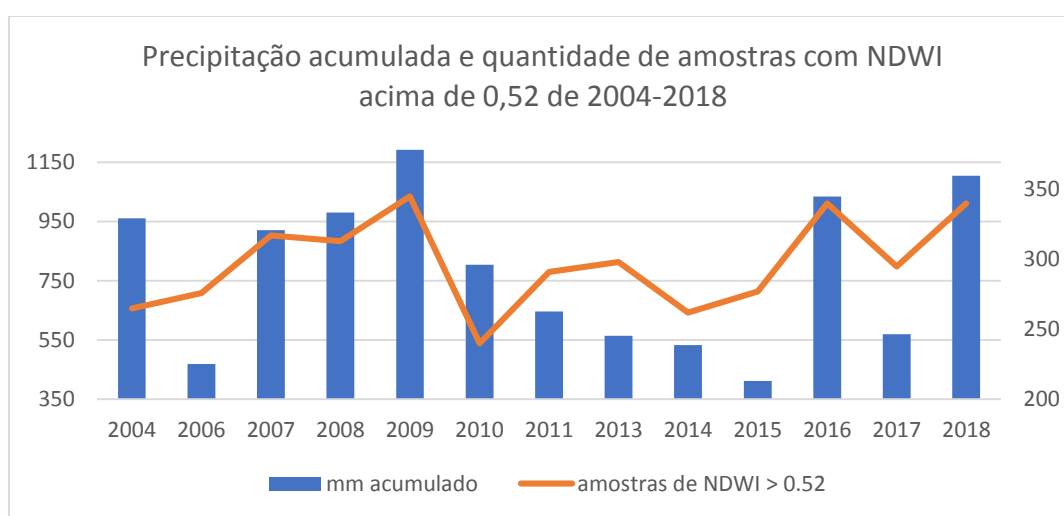


Figura 8. Precipitação acumulada e quantidade de amostras com alto NDWI de 2004 a 2018

Após tais constatações, foram calculados os valores máximos do NDWI por pixel das duas coleções (TM e OLI) nos dois modelos de períodos (chuvoso e seco), a fim de obter a máxima área úmida por período. A partir destes resultados, foram geradas as frequências de valores de NDWI por período e comparadas em histograma, que apresentou a maior sensibilidade do NDWI na BHRMC no período seco entre os valores 0,3 e 0,4, e no período chuvoso na faixa de 0,5 (Figura 9).

Em seguida, o resultado obtido foi recortado pelo dado espacial de planícies da BHRMC, e passou pela reclassificação utilizando

o limiar 0,52 com o objetivo de mapear três classes: áreas não úmidas; áreas úmidas somente no período chuvoso; áreas úmidas nos períodos chuvoso e seco, com a zona ripária correspondendo às duas classes de áreas úmidas. Por fim, as três classes mapeadas passaram pela aplicação de filtros espaciais para remoção de pixels isolados, e foram extraídas das classes os valores médios de altitude e declividade utilizando o MDE SRTM (USGS, 2020) através de operações de estatísticas espaciais em SIG, a fim de constatar a relação entre as classes e as características do relevo.

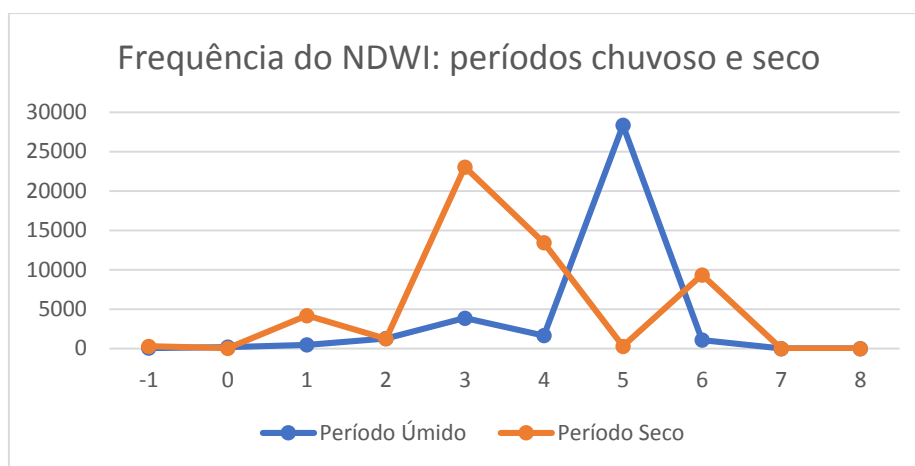


Figura 9. Frequência dos valores de NDWI nos períodos chuvoso e seco

TOTAL	491	100%
--------------	-----	------

Resultados e discussão

No domínio de planícies da BHRMC, a área não úmida correspondeu a 188 Km², ou 38% do domínio; a área úmida somente no período chuvoso correspondeu a 219 Km², ou 45%, enquanto que nos períodos chuvoso e seco apresentou 84 Km², ou apenas 17% da área (Tabela 1), havendo uma relevante diferença de área ao considerar os períodos (Figura 10). O mapa que apresenta as classes de umidade de área, ou as zonas ripárias dos domínios de planícies da BHRMC, está representado na Figura 11.

Tabela 1. Área das classes NDWI na planície, com períodos unificados

Área (km ²) das classes NDWI na planície		
Classe	Área	%
Não úmido	188	38%
Úmido somente no chuvoso	219	45%
Úmido no chuvoso e seco	84	17%

Em relação às principais características geomorfométricas, a área não úmida da planície apresentou uma altitude média de 23m e declividade de 1,77°. A área úmida somente no período chuvoso apresentou 17m de altitude média e declividade de 1,41°, enquanto que a área úmida nos dos períodos apresentou 12m de altitude média e declividade de 1,26° (Tabela 2).

Os valores estão correspondentes aos padrões apresentados pelas classes, já que a área não úmida está presente mais próxima ao sopé dos domínios declivosos do entorno, a área úmida no período chuvoso encontra-se na parte mais central da planície e dos vales intramontanos, por toda a planície, enquanto que a área úmida nos dois períodos apresenta o mesmo padrão, porém mais concentrada na grande porção à jusante da planície fluvial de deposição dos rios Macacu e Caceribu, com alguns pontos isolados mais à montante da bacia do rio Macacu.

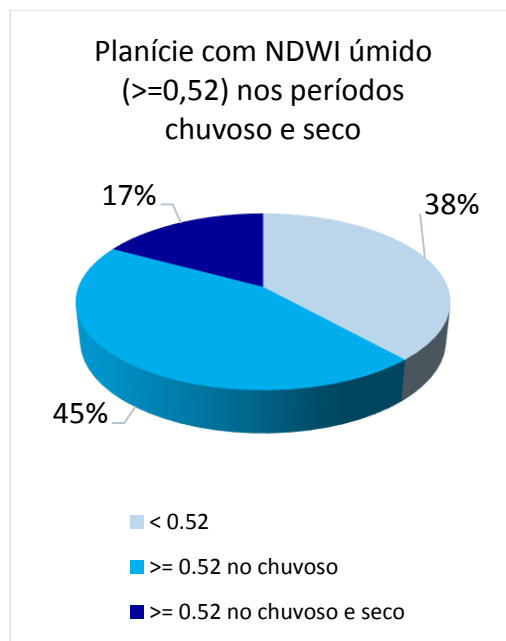


Figura 10. Planície com NDWI úmido nos períodos chuvoso e seco

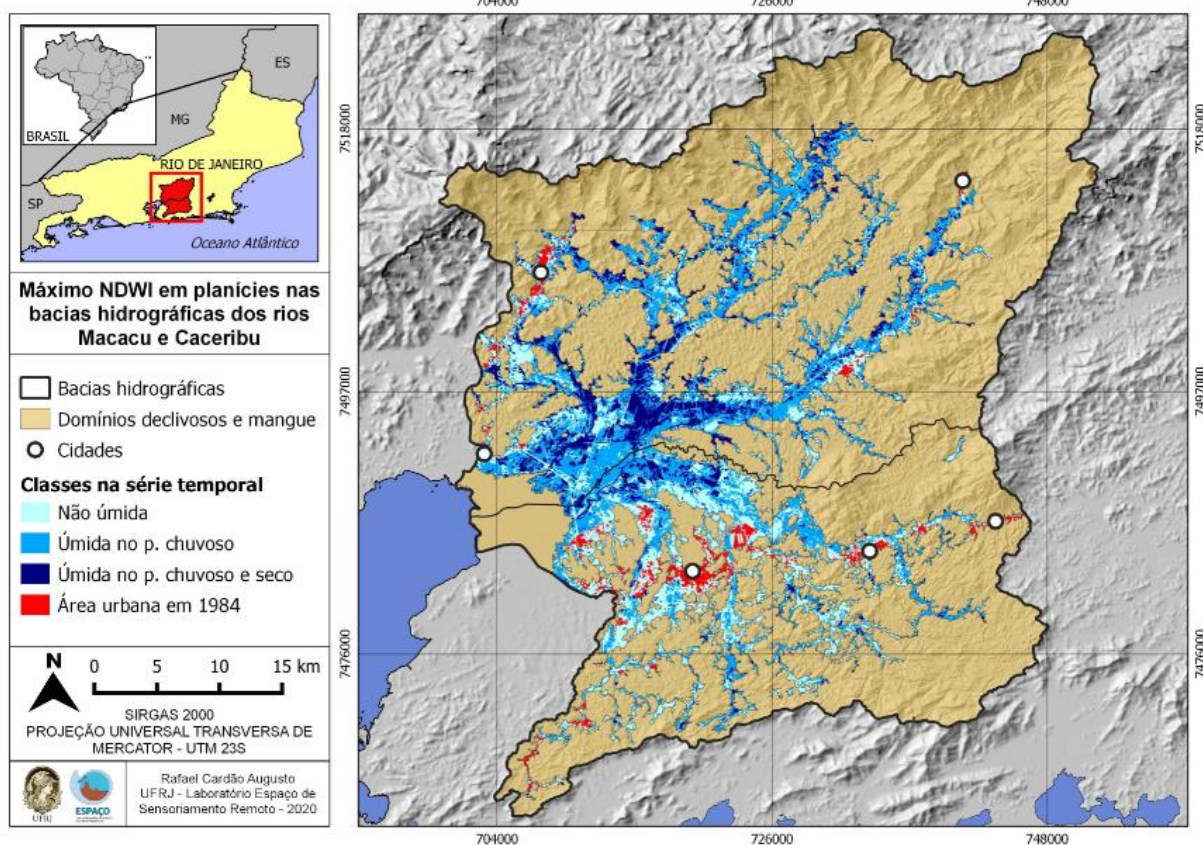


Figura 11. Áreas úmidas mapeadas na planície da BHRMC

Tabela 2. Altitudes e declividades das classes NDWI na planície

Altitude (m) e declividade das classes NDWI na planície		
Classe	Média	Declividade
Não úmido	23	1,77°
Úmido somente no chuvoso	17	1,41°
Úmido no chuvoso e seco	12	1,26°

Conclusões

A modelagem do máximo NDWI por pixel da série temporal de 35 anos aplicada aos domínios de planícies apresenta-se como um método inovador em consonância com a bibliografia e com o conceito de zonas ripárias. Com o estudo de caso aplicado à BHRMC, os objetivos foram atingidos e evidenciaram o potencial dos índices e a temporalidade de imagens orbitais de sensores passivos para a identificação e caracterização de áreas periodicamente saturadas como reflexo das variações de precipitação nos períodos chuvoso e úmido, ao longo e uma série de décadas.

A área úmida identifica pelo NDWI na planície atingiu o objetivo, restringindo para um percentual bem menor a área que pode ser considerada zona ripária em tal domínio, ao contrário dos índices topográficos que definiriam a totalidade da planície como uma área totalmente saturável. Diante do resultado, a zona ripária corresponderia à totalidade da área úmida, com a distinção entre períodos – somente no chuvoso ou no chuvoso e seco – apenas elucidando as diferentes dinâmicas contidas na área.

As limitações da pesquisa nesse sentido envolvem a dificuldade de validação *in loco* de um modelo temporal da forma como foi proposto, além da volumosa presença de nuvens em imagens próximas às datas mais favoráveis para a utilização em cada um dos períodos, o que forçou a exclusão de alguns anos na análise da série temporal, e do limite de 35 anos da série temporal de imagens Landsat, que se aproxima aos 50 anos propostos por Ilhardt et al. (2000).

Além disso, a não sensibilidade do índice NDWI à umidade dos solos sob a cobertura de vegetação arbórea, que responde com constantes valores altos, e sob núcleos urbanos, que respondem com constantes valores baixos, limitaram a extensão de análise das variações do NDWI na área de planície, restrita somente a coberturas de gramíneas, em geral pastagens.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação (PPGG) da UFRJ e à equipe do Laboratório Espaço de Sensoriamento Remoto da UFRJ.

Referências

- Abood, S., Maclean, A., 2011. Modeling riparian zones utilizing DEMs, flood height data, digital soil data and wetland inventory via GIS, in: American Society of Photogrammetry and Remote- Sensing (ASPRS) Annual Conference. ASPRS, Milwaukee, Wisconsin, 1-5.
- Abood, S.A., Maclean, A.L., Mason, L.A., 2012. Modeling riparian zones utilizing DEMs and flood height data. Photogramm. Eng. Rem. Sens. 78, 259-269.
- Ahlmer, A.K., Cavalli, M., Hansson, K., Koutsouris, A.J., Crema, S., Kalantari, Z., 2018. Soil moisture remote-sensing applications for identification of floodprone areas along transport infrastructure. Environmental Earth Sciences 77, 533. 17p.
- Ahmad, A., Zhang, Y., Nichols, S., 2011. Review and evaluation of remote sensing methods for soil-moisture estimation. Spie Reviews. Vol2. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. USA. 18p.
- Attanasio, C.M., 2006. Método para a identificação da zona ripária: microbacia hidrográfica do Ribeirão São João (Mineiros do Tietê, SP). Scientia Forestalis 71, 131-140.
- Augusto, R.C., Seabra, V.S., 2017. Mapeamento dos domínios geomorfológicos da bacia hidrográfica do rio Caceribu-RJ. REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA (ONLINE) 69, 315-326. Disponível em: < <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44020/23271> /> Acesso em: 02 mar. 2020.
- Aunan, T., Palik, B.J., Verry, E.S., 2005. A GIS approach for delineating variable-width riparian buffers based on hydrological function,

- Research Report 0105, Minnesota Forest Resources Council, Grand Rapids, MN, 1-14.
- Barbosa, R.A., Ferreira, A.C. F, Silveira, L. J., Dias, H. C. T., 2019. Hidromorfismo como parâmetro para delimitação de zonas ripárias em nascentes. *Anais do V Simpósio Brasileiro de Ciência do Solo*, 15, 1, 6p.
- Brenner, V.C., Guasselli, L.A., 2015. Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) para identificação de meandros ativos no leito do canal do rio Gravataí - RS, Brasil. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, João Pessoa - PB. *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 3693-3699.
- Bressiani, J.X., Schmidt, M.A.R., Pereira, C. E., 2018. Identification of Urban Areas Flooded by the Evaluation of Variable Areas of Afluence. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ* 41, 677-684.
- Brubacher, J.P., Guasselli, L.A., 2013. Mapeamento da área inundável da planície do rio dos Sinos a partir de NDWI, São Leopoldo - RS. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu - PR. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2006. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2Ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI. 306p.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2016. Mapa de solos do estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://geoinfo.cnps.embrapa.br/maps/461>>
- Epiphany, J.C.N., Formaggio, A. R., Valeriano, M., Oliveira, J. B., 1992. Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo. São José dos Campos: INPE, 131p.
- Fernandez, D., Barquín, J., Alvarez-Cabria, M., Peñas, F.J., 2012. Quantifying the performance of automated GIS-based geomorphological approaches for riparian zone delineation using digital elevation models. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 3851-3862.
- França, A.F., Tavares Junior, J.R., Moreira Filho, J.C.C., 2012. Índices NDVI, NDWI E NDBI como ferramentas ao Mapeamento temático do entorno da lagoa Olho D'água, em Jaboatão dos Guararapes-PE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 4, Recife-PE, 001-009.
- Gao, B.C.. 1996. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3): 257-266.
- Google Earth Engine, 2020. Editor de códigos. Acesso em 2020. Disponível em: <<https://code.earthengine.google.com/>>
- Gonzaga, E.P., Nicacio, R. M., Santos, V. V., 2011. Análise do comportamento do NDVI e NDWI em períodos de diferentes intensidades pluviométricas no Sertão alagoano. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Florianópolis. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*.
- Gregory, S.V., Swanson, F.J., McKee, A.W., Cummins, K.W., 1991. An ecosystem perspective of riparian zones. Focus on links between land and water. *BioScience*, Washington 41, 540-551.
- Guasseli, L. A., Simioni, J. P. D., Laurent, F., 2020. Mapeamento e classificação de áreas úmidas usando Topographic Wetness Index (TWI) a partir dos modelos digitais de elevação na bacia hidrográfica do rio Gravataí – Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 1, 3, 639-659.
- Haubrock, S.N., Chabrillat, S., Lemmnitz, C., Kaufmann, H., 2008. Surface soil moisture quantification models from reflectance data under field conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 1, 3-29.
- Holmes, K.L., Goebel, P.C., 2011. A functional approach to riparian area delineation using geospatial methods. *J. For.* 109, 233-241.
- Hung, M.N.W.B., Marangon, F.H.S., Santos, I., 2017. Comparação entre o índice topográfico e o Tasseled Cap Wetness na estimativa da umidade do solo na bacia hidrográfica do Rio Corredeiras - SC. In: Archimedes, P. F. R. R. A. (Org.). *Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento*. 1ed.: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP, 1, 442-453.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2007. Manual Técnico de Pedologia. Rio de Janeiro, 92p.
- Ilhardt, B.L., Verry, E.S., Palik, B.J., 2000. Defining Riparian Areas, Riparian Management. In: Verry, E. S., Hornbeck, J. W., Dolloff, C. A. (Orgs) *Forests of the Continental Eastern United States*. Lewis Publishers, New York, NY, 23-42.
- INEA. Instituto Estadual do Ambiente, 2010. O estado do ambiente: Indicadores ambientais do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: SEA; INEA. 160p.
- Jacomine, P.K.T., 2009. A nova classificação brasileira de solos. *Anais da Academia*

- Pernambucana de Ciência Agrônômica, Recife, 5/6, 161-179.
- Jensen, J.R., 2009. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parêntese, 672p.
- Juca, M.V.Q., Souza, A.G.S.S., Ribeiro Neto, A., 2019. Avaliação de produtos de sensoriamento remoto de umidade do solo em relação a dados in situ em diferentes regiões climáticas de Pernambuco. In: XXIII SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu-PR.
- Lakshmi V., 2013. Remote Sensing of Soil Moisture. ISRN Soil Science, 33p.
- Lima, W. P., 2008. Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas. Piracicaba: USP, 2 Ed, 245p.
- Lima, W.P., Zakia, M.J.B., 2000. Hidrologia de matas ciliares. In: Rodrigues, R. R., Leitão Filho, H. F. (Orgs). Matas ciliares: conservação e recuperação. São Paulo: EDUSP/ Fapesp, 33-44.
- Lima, W.P., Righetto, A.M., Ferraz, F. F. B., Zakia, M. J. B., 2006. Delimitação da zona ripária em uma microbacia. In: Lima, W. P., Zakia, M. J. B. (Org.). As florestas plantadas e a água: implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento. 1ed.São Carlos: Rima, 1, 89-106.
- Machado, T.S., Caioni, C., Fernandes, R.S., Neves, R.J., Neves, S.M.A.S., 2014. Análise de NDVI e NDWI em diferentes intensidades pluviométricas para bacia hidrográfica do rio Cachoeirinha - Mato Grosso, Brasil. In: 5º Simpósio de geotecnologias no Pantanal, 2014, Campo Grande. Interação Planalto e Planície, Sistema Produtivo e Sustentabilidade.
- Maffra, C.Q.T., 2004. Modelagem da umidade do solo a partir de dados multiespectrais dos sistemas Landsat, Aster e Modis. 151 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná.
- Mason, L., 2007. GIS Modeling of Riparian Zones Utilizing Digital Elevation Models and Flood Height Data, M. S. Thesis, Michigan Technological University, Houghton, Michigan, 75p.
- McFeeters, S.K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 17, 1425-1432.
- Mohanty, B.P., Cosh, M.H., Lakshmi, V., Montzka, C., 2017. Soil Moisture Remote Sensing: State of the Science. Vadose Zone Journal. USA. 9p.
- Penachio, S.M., Oliveira, S.A.S., Tagliarini, F.S. N., Barros, A.C., Zimback, C.R.L., 2017. Índices de vegetação para obtenção de umidade do solo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2017, Santos - SP. Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5991-5997.
- Pereira, L.E., Marques E.A., Grigio, A.M., Paranhos Filho, A.C., 2018. Comparative Analysis of Normalized Difference Water Index (NDWI) Methods in Continental Wetland. ANUÁRIO DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS (UFRJ. IMPRESSO) 41, 654-662.
- Ponzoni, F.J., Kuplich, T.M., Shimabukuro, Y.E., 2012. Sensoriamento remoto da vegetação. São José dos Campos, São Paulo: Oficina de Textos, 160 p.
- Potapov, P., Hansen, M.C., Kommareddy, I., Kommareddy, A., Turubanova, S., Pickens, A., Adusei, B., Tyukavina, A., Ying, Q., 2020. Landsat Analysis Ready Data for Global Land Cover and Land Cover Change Mapping. Remote Sens 12, 426.
- Rodrigues, W.B., Morais, F., Paschoal, L.G., 2017. Índice de diferença normalizada da água (NDWI) calculado para estações chuvosas e secas na bacia do Córrego Barreiro, Lagoa da Confusão - TO. In: XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada / I Congresso Nacional de Geografia Física, 2017, Campinas, SP. Os desafios da geografia física na fronteira do conhecimento. Campinas, SP: Instituto de Geociências, v. único, 254-263.
- Salo, J.A., Theobald, D.M., Brown, T.C., 2016. Evaluation of methods for delineating riparian zones in a semi- arid montane watershed. Journal of the American Water Resources Association 52, 632-647.
- Santos, I., Kobiyama, M., 2008. Aplicação do TOPMODEL para determinação de áreas saturadas da bacia do rio Pequeno, São José dos Pinhais, PR, Brasil. Revista Ambiental Água, Taubaté 3, 2, 77-89.
- Silva, R.A., 2018. Modelagem da umidade do solo utilizando imagem de satélite para análise do solo/vegetação em Floresta-PE. 68p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió.
- Silva Júnior, J.A., Moraes, V.S., Candeias, A.L. B., Tavares Junior, J.R., 2018. Análise do NDVI e NDWI e umidade local no município de Água Branca - AL. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC, Maceió. Anais do ConTECC 1.

- SNIRH. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, 2020. Plataforma Hidroweb. ANA. Acesso em 2020. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>
- UFF. Universidade Federal Fluminense, 2010. Planejamento Estratégico da Região Hidrográfica dos Rios Guapi-Macacu e Caceribu-Macacu. Niterói, RJ: UFF/FEC, (Coordenadoria de Geoprocessamento CGP). 544p.
- USGS. United States Geological Survey: Earth Explorer, 2020. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>> Acesso em: 2020
- Verry, E.S., Dolloff, C.A., Manning, M.E., 2004. Riparian ecotone: A functional definition and delineation for resource assessment, Water, Air, and Soil Pollution: Focus 4, 67–94.
- Zakia, M.J.B., 1998. Identificação e caracterização da zona ripária em uma microbacia experimental: implicações no manejo de bacias hidrográficas e na recomposição de florestas. 98p. Tese (Doutorado). São Carlos: USP.