

RESULTADOS PRELIMINARES DA ANÁLISE MULTITEMPORAL (2015-2023) DO ESPELHO D'ÁGUA DE UM IGARAPÉ AFLUENTE DO LAGO VERDE, VILA DE ALTER DO CHÃO (SANTARÉM-PA) POR MEIO DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Cíntria Neves Nunes ¹
Gleiciane Menezes da Silva ²
Luiz Felipe Aquino Corrêa ³

RESUMO

Os elementos hídricos são constantemente afetados por ações humanas como as alterações do meio físico natural causando mudanças morfológicas dos sistemas fluviais. Este estudo analisou a dinâmica do espelho d'água de um igarapé afluente do Lago Verde (Bacia do Tapajós), localizado na Área de Proteção Ambiental (APA) Alter do Chão, distrito de Alter do Chão (Santarém-PA). Foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2 e aplicados os índices NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e NDWI (*Normalized Difference Water Index*) para os anos de 2015, 2017, 2019, 2021 e 2023, processados no software QGIS. Os resultados do NDWI apontaram uma variação expressiva na superfície hídrica, com um saldo positivo de +680.466 m² entre 2019–2017 e um recuo acentuado de –599.500 m² no período 2023–2021, associado ao menor volume pluviométrico da série (1.298,2 mm). A relação entre precipitação e dinâmica hídrica mostrou-se parcialmente correlacionada, indicando também a influência de outros possíveis fatores naturais ou antrópicos. O NDVI evidenciou uma redução da classe vegetação densa e o aumento das classes solo/areia e vegetação rasteira, o que pode contribuir para menor retenção hídrica e maior vulnerabilidade às oscilações sazonais. Os dados indicam que pode estar ocorrendo o assoreamento do igarapé; contudo, é necessária a realização de atividades de campo futuras para uma avaliação mais precisa. Além disso, é importante expandir as análises para os períodos de cheia (dezembro a junho) do Rio Tapajós, a fim de verificar se o mesmo padrão se repete em ambos os períodos (cheia e seca).

INTRODUÇÃO

O monitoramento ambiental por meio de técnicas de sensoriamento remoto tem se mostrado uma ferramenta eficaz e de baixo custo para compreender a dinâmica de ecossistemas naturais (Anderson *et al.*, 2010). O uso de índices espectrais, como o NDWI (*Normalized Difference Water Index*) e o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), permite a identificação e quantificação de áreas de vegetação e corpos hídricos ao longo do tempo, favorecendo análises multitemporais que auxiliam no entendimento das mudanças ambientais (McFeeters, 1996; Huete *et al.*, 2002). A detecção remota de alterações ambientais tem sido

¹ Graduanda do Curso de Licenciatura em Geografia da Universidade Federal do Oeste do Pará- UFOPA, cintria.neves@gmail.com;

² Graduanda do Curso de Licenciatura em Geografia da Universidade Federal do Oeste do Pará- UFOPA, gleicianemenezes1507@gmail.com

³ Professor orientador, Doutor, Curso de Bacharelado em Geologia da Universidade Federal do Oeste do Pará-UFOPA, luiz.correa@ufopa.edu.br



cada vez mais empregada na região amazônica, onde os desafios logísticos e a grande extensão territorial dificultam o monitoramento contínuo em campo (Aragão *et al.*, 2018).

A bacia amazônica, ao longo do último século, passou por intensas mudanças no uso e cobertura da terra, impulsionadas por políticas de ocupação, expansão urbana e exploração econômica (Fearnside, 2017; Silva Junior *et al.*, 2021). Consequentemente, impactos negativos são ocasionados, como o assoreamento de igarapés, a contaminação por resíduos sólidos e líquidos, além da supressão de áreas de recarga hídrica (Davidson *et al.*, 2012; Castello *et al.*, 2013). Esses impactos podem comprometer a manutenção ecológica de igarapés e lagos, afetando também a biodiversidade e os modos de vida tradicionais que deles dependem (Junk *et al.*, 2011; Castello & Macedo, 2016). Dessa forma, é importante o desenvolvimento de métodos para a identificação e monitoramento dessas alterações.

Na vila de Alter do Chão, situada no município de Santarém (PA- Brasil), esse contexto não é diferente, um crescente processo de antropização associado ao turismo desordenado e à expansão imobiliária é observado. O igarapé analisado neste estudo, afluente direto do Lago Verde, está localizado em uma Área de Proteção Ambiental (APA Alter do Chão) e inserido no contexto hidrográfico da Bacia do Tapajós. Apesar disso, carece de estudos que avaliem suas alterações morfológicas e a dinâmica sazonal ao longo do tempo.

O presente estudo teve como objetivo analisar, por meio de técnicas de sensoriamento remoto e verificação em campo, a dinâmica espacial do espelho d'água de um igarapé afluente do Lago Verde, na Vila de Alter do Chão (Santarém-PA), durante os anos de 2015 a 2023, e discutir os fatores que influenciaram nessas mudanças.

MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho se deu através da combinação de técnicas de sensoriamento remoto para analisar a dinâmica do espelho d'água de um igarapé afluente do Lago Verde, na vila de Alter do Chão, Santarém-PA (Figura 1), entre os anos de 2015 e 2023.

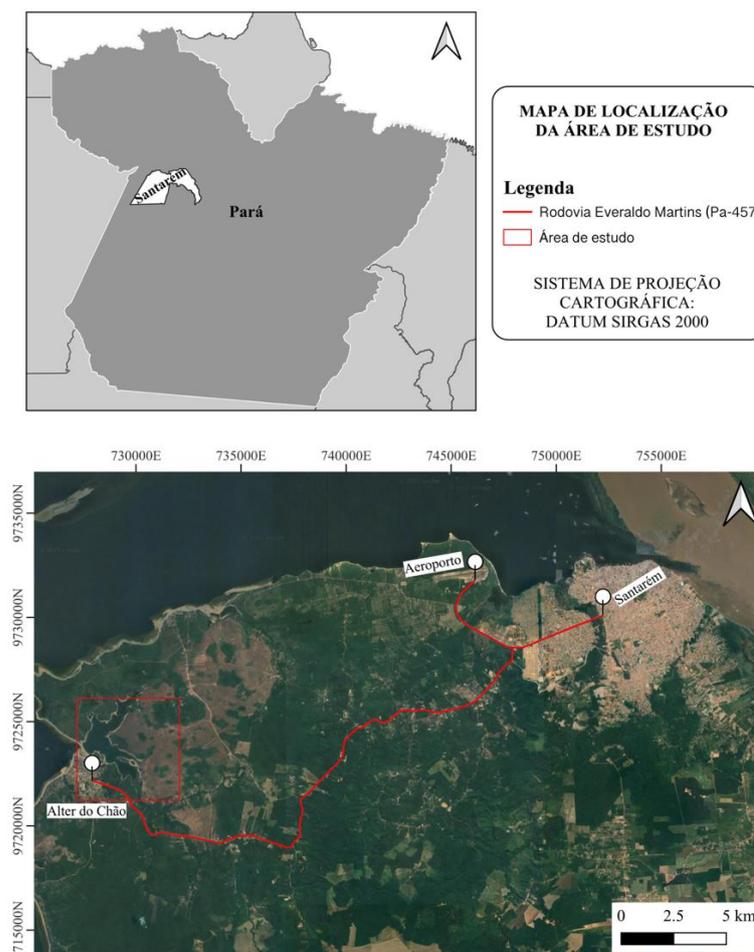
Foram utilizadas imagens dos satélites Sentinel-2A, cuja resolução espacial varia entre 10 e 60 metros. Os dados foram obtidos gratuitamente por meio da plataforma *Copernicus Browser*, da Agência Espacial Europeia (ESA). O intervalo escolhido (2015-2023) foi definido levando em conta a disponibilidade de dados, uma vez que o satélite Sentinel-2A foi lançado em junho de 2015 (Drusch *et al.*, 2012).

O intervalo temporal adotado para as análises foi de dois em dois anos. As imagens utilizadas correspondem às seguintes datas: 27/11/2015, 03/11/2017, 04/10/2019, 10/10/2021

e 02/11/2023. Considerando que a área de estudo é influenciada pelos ciclos de cheia e seca do rio Tapajós e de seus afluentes, optou-se por utilizar imagens obtidas durante o período de menor pluviosidade (junho a novembro), priorizando datas próximas entre si sempre que possível (Junk *et al.*, 2011).

Uma das principais limitações no uso de imagens de satélite na região amazônica é a elevada cobertura de nuvens, o que frequentemente inviabiliza a aquisição de cenas em datas específicas, mesmo quando há tentativa de manter a referência temporal entre os anos analisados. Destaca-se que todas as cenas possuem cobertura de nuvens inferior a 15% e pertencem ao produto “Level-2A”, o qual já passou por correções geométricas, radiométricas e atmosféricas (*BOA – Bottom Of Atmosphere*), estando, portanto, adequadas para a aplicação de índices espectrais (Main-Knorn *et al.*, 2017; Gascon *et al.*, 2017).

Figura 1- Mapa de localização da área de estudo - Alter do Chão distrito de Santarém (PA - Brasil)





Primeiramente, as imagens foram reprojatadas para o Datum Sirgas 2000/zona 21S e recortadas para o tamanho da área de interesse. Após isso, utilizando a calculadora *raster* foram aplicados os índices NDVI e NDWI.

O NDVI foi obtido a partir da fórmula $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$, em que NIR representa a banda do infravermelho próximo (B8 do Sentinel-2A) e R a banda do vermelho (B4 do Sentinel-2A) (Rouse *et al.*, 1973). Esse índice é amplamente utilizado para identificar e monitorar a cobertura vegetal. Os valores variam de -1 a 1, sendo que valores positivos indicam vegetação densa e vigorosa, enquanto valores próximos de zero apontam para áreas com pouca ou nenhuma vegetação. Já os valores negativos, em geral, correspondem a superfícies como solo exposto, corpos d'água, nuvens ou áreas urbanizadas.

O NDWI foi calculado pela equação $NDWI = (G - NIR) / (G + NIR)$, onde G é a banda do verde (B3 do Sentinel-2A) e NIR a banda do infravermelho próximo (B8 do Sentinel-2A), que permiti destacar áreas com presença de água superficial (McFeeters, 1996). Após o processamento, é gerado um mapa com valores que variam de -1 a 1, onde é interpretado que os valores abaixo de 0 refere-se a tudo que não é água e o valores acima de 0 água (Gao, 1996).

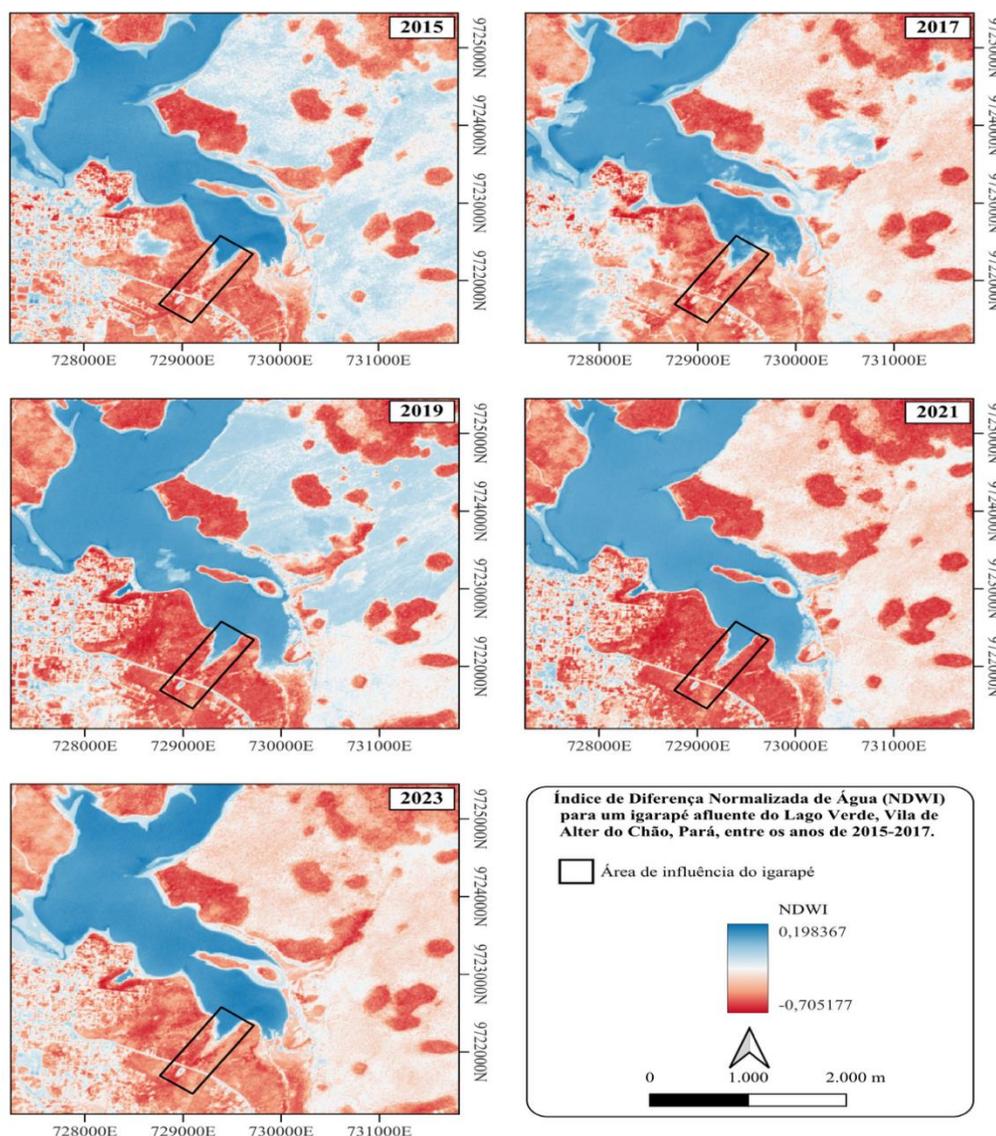
A fim de identificar as áreas ocupadas por corpos hídricos ao longo dos anos, foi aplicada uma limiarização ao índice NDWI. Esse processo foi realizado por meio da ferramenta "Calculadora *Raster*" no QGIS, utilizando a expressão $NDWI \text{ ano} > 0$. Como resultado, obteve-se um *Raster* binário, no qual os pixels com valor 1 representam áreas classificadas como água, enquanto os pixels com valor 0 correspondem às demais coberturas (não água). Esse procedimento foi repetido para cada uma das imagens temporais analisadas (2015, 2017, 2019, 2021 e 2023), resultando em mapas binários anuais da presença de água superficial.

Com os mapas binários gerados, foi possível calcular as variações espaciais dos corpos hídricos ao longo do tempo. Para isso, também utilizando a Calculadora *Raster*, foi realizada a subtração entre imagens binárias de anos consecutivos (por exemplo, Binário_2017 - Binário_2015) (Pekel *et al.*, 2016). A interpretação dos valores resultantes seguiu a lógica: valor 1 indica expansão do corpo hídrico (área que passou de "não água" para "água"), valor 0 representa estabilidade (sem alteração), e valor -1 corresponde ao recuo da água (área que deixou de ser classificada como "água"). Os resultados foram posteriormente representados em mapas temáticos com cores distintas para facilitar a visualização e interpretação das dinâmicas espaciais. Os dados pluviométricos foram obtidos no site do INMET, a partir da estação instalada no município de Belterra-PA, localizada a aproximadamente 15 km do Lago Verde.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

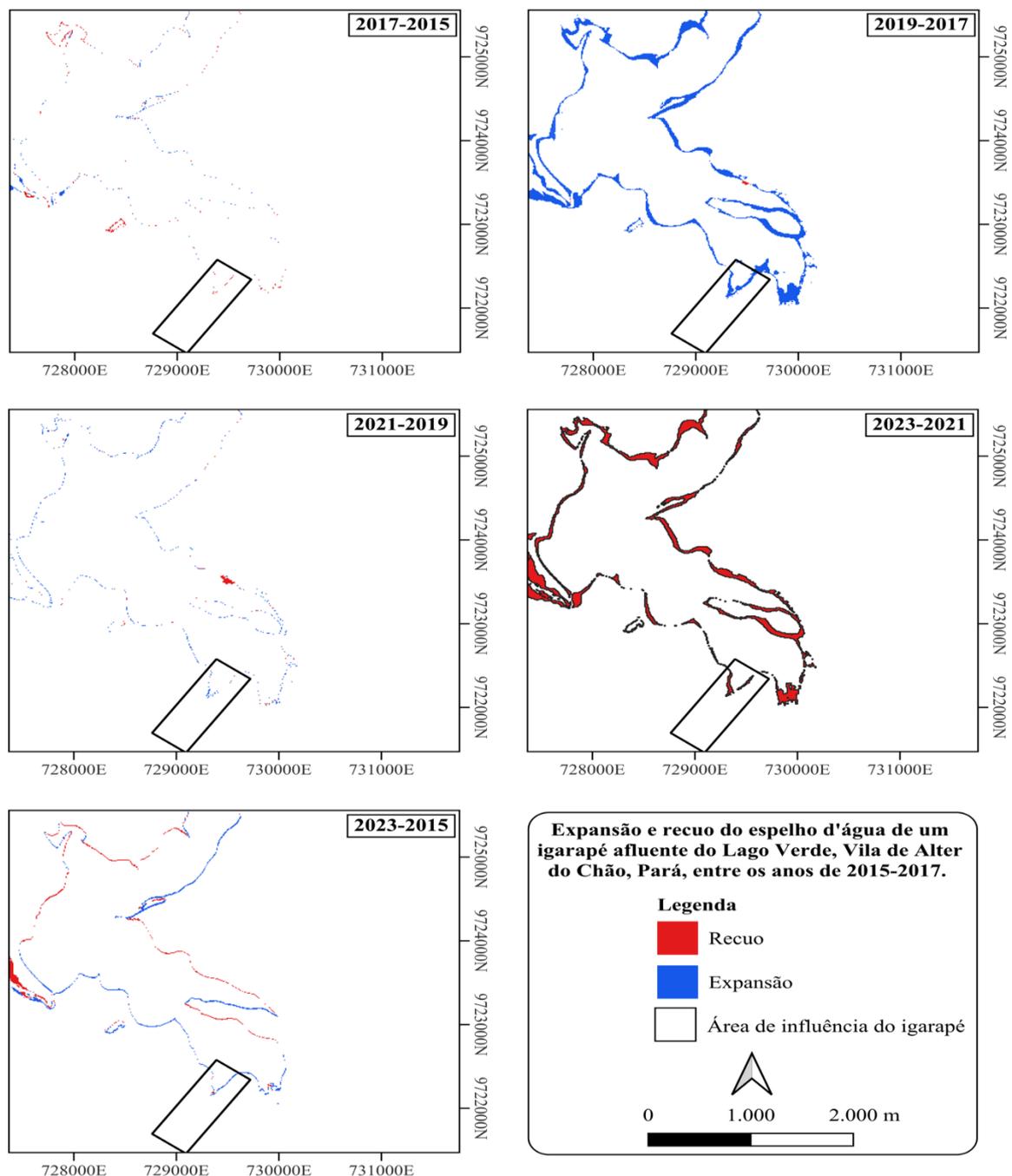
A análise multitemporal do *Normalized Difference Water Index* (NDWI), conforme ilustrado na Figura 2, permitiu identificar a dinâmica espacial do espelho d'água do igarapé afluente do Lago Verde e da região em volta do referido igarapé, entre os anos de 2015 e 2023. Observa-se que, embora o índice aponte variações naturais ligadas ao regime hidrológico da região, os padrões de retração e expansão da lâmina d'água ao longo do tempo pode estar ligada a ações antrópicas. Visualmente no mapa, o que percebemos principalmente são flutuações mais acentuadas nos valores negativos, que representam tudo que não é água, e uma redução dos *pixels* positivos em relação dos intervalos 2017-2015 e 2023-2021.

Figura 2- Mapa de Índice de *Normalized Difference Water Index* (NDWI) da região de influência da área estudada para os anos de 2015, 2017, 2019, 2021 e 2023.



A Figura 3 ilustra com maior precisão as áreas de recuo e expansão do corpo hídrico ao longo dos diferentes intervalos analisados. Entre 2017 e 2015, identificou-se um leve recuo (-1.500 m²), seguido de uma significativa expansão no intervalo 2019–2017, totalizando 680.466 m² de saldo positivo (tabela 1). Esse acréscimo pode estar associado à maior pluviosidade ou ao represamento local, indicado durante as observações de campo, mas não é suficiente para reverter a tendência geral de retração observada nos intervalos seguintes.

Figura 3- Mapa de recuo e expansão do espelho d'água da região estudada.



Entre os anos de 2021 e 2023, o espelho d'água apresentou o maior recuo registrado na série temporal (-599.500 m²), o que se refletiu negativamente no saldo total entre 2015 e 2023 (Tabela 1). Apesar de uma leve recuperação de 3.100 m² no acumulado do período, os dados indicam um ambiente em constante instabilidade hídrica.

Tabela 1- quantificação em m² da área de expansão e recuo.

Intervalo	Expansão (m ²)	Recuo (m ²)	Saldo (Expansão - Recuo) (m ²)
2017-2015	30.700	32.200	-1500
2019-2017	682.600	2.100	680.466
2021-2019	13.200	61.300	-48.100
2023-2021	10.500	610.000	-599.500
2023-2015	110.310	107.210	3.100

A análise comparativa entre os mapas de NDWI (Figura 2), as áreas de expansão e recuo do espelho d'água (Figura 3 e Tabela 1) e os dados pluviométricos (tabela 2) evidencia uma correlação parcial entre a variabilidade da precipitação e as dinâmicas de retração e expansão do corpo hídrico. O maior recuo registrado no intervalo 2023–2021 (-599.500 m²) coincide com o ano de 2023, que apresentou o menor total pluviométrico da série (1.298,2 mm), enquanto o intervalo 2019–2017, que registrou o maior saldo positivo de expansão (+680.466 m²), é precedido por 2019, ano de elevada precipitação (1.877,2 mm).

Tabela 2- Precipitação mensal dos anos estudados. Estação INMET do município de Belterra - PA.

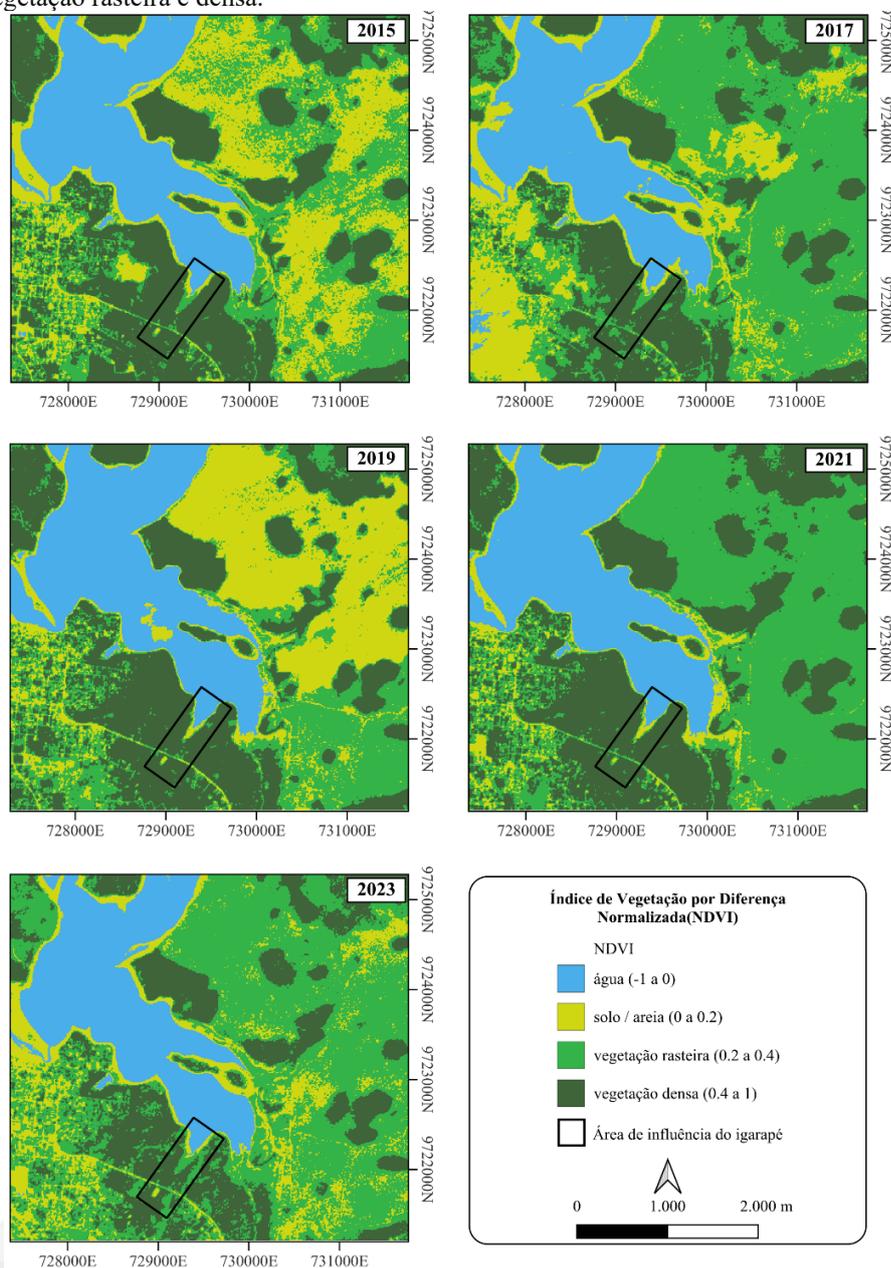
	Precipitação mensal (mm)				
	2015	2017	2019	2021	2023
Janeiro	108.3	247.3	359.3	132.3	265.2
Fevereiro	282.7	229.6	203.0	266.3	213.7
Março	267.7	255.5	334.6	452.6	200.4
Abril	209.1	221.8	177.0	254.4	115.0
Maio	165.7	116.1	330.8	225.1	182.0
Junho	107.3	138.9	103.2	153.4	54.3
Julho	138.3	42.4	31.7	210.9	102.1
Agosto	21.0	10.4	65.2	158.2	19.7
Setembro	112.5	68.1	44.8	24.3	35.0
Outro	22.2	10.0	62.8	111.6	13.9
Novembro	52.0	61.0	65.0	237.8	64.0
Dezembro	41.3	187.0	99.8	145.4	32.9
Total	1528,1	1588,1	1877,2	2372,3	1298,2

Entretanto, a relação entre chuva e dinâmica hídrica não se mostra linear. Apesar de 2021 ter sido o ano com maior volume pluviométrico (2.372,3 mm), o intervalo 2021–2019

apresenta um recuo de -48.100 m^2 . Esse comportamento pode indicar que outros fatores naturais (temperatura, evaporação, entre outros) ou antrópicos estejam influenciando de forma significativa a dinâmica do espelho d'água, reduzindo a capacidade de resposta do sistema ao regime de chuvas.

Por fim, a figura 4, referente ao NDVI, revela a distribuição e a densidade da cobertura vegetal na região ao longo do tempo. Quando comparamos, de forma visual no mapa a área de influência do igarapé do ano 2015 com o ano de 2023, podemos perceber uma redução da classe vegetação densa e o aumento das classes solo/areia e vegetação rasteira, o que pode contribuir para menor retenção hídrica e maior vulnerabilidade às oscilações sazonais.

Figura 4- Mapa de *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) com a interpretação dos valores do índice: água, solo e vegetação rasteira e densa.





CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise multitemporal evidenciou que o espelho d'água do igarapé afluente do Lago Verde apresentou variações significativas entre 2015 e 2023, refletidas nos saldos de expansão e recuo identificados pelo NDWI, com destaque para o aumento de +680.466 m² no período 2019–2017 e o recuo expressivo de –599.500 m² no intervalo 2023–2021. Esses padrões apresentaram correlação parcial com a variabilidade pluviométrica, sendo o menor volume de chuvas em 2023 (1.298,2 mm) associado ao maior recuo da série histórica. Entretanto, o comportamento não linear entre precipitação e área hídrica, especialmente em 2021, ano com maior pluviosidade (2.372,3 mm) mas com recuo de –48.100 m², indica a influência de outros possíveis fatores naturais ou antrópicos. Os resultados do NDVI corroboraram a tendência de redução da vegetação densa entre 2015 e 2023, com aumento de áreas de solo exposto e vegetação rasteira, o que contribui para menor infiltração e maior escoamento superficial, acentuando o recuo do espelho d'água.

Essa combinação de alterações ambientais e uso do solo sugere que as atividades humanas, somadas às variações sazonais de chuva, têm intensificado a instabilidade hídrica da área. Os dados indicam que pode estar ocorrendo o assoreamento do igarapé; contudo, é necessária a realização de atividades de campo futuras para uma avaliação mais precisa. Além disso, é importante expandir as análises para os períodos de cheia (dezembro a junho) do Rio Tapajós, a fim de verificar se o mesmo padrão se repete em ambos os períodos (cheia e seca).

Palavras-chave: sensoriamento remoto, Alter do Chão, igarapé, NDVI, NDWI

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, L. O. *et al.* O. *Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies*. *New Phytologist*, v. 187, n. 3, p. 733-750, 2010.
- ARAGÃO, L. E. *et al.* *21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions*. *Nature Communications*, v. 9, p. 536, 2018.
- CASTELLO, L., MACEDO, M. N. *Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems*. *Global Change Biology*, v. 22, n. 3, p. 990-1007, 2016.
- CASTELLO, L. *et al.* *The vulnerability of Amazon freshwater ecosystems*. *Conservation Letters*, v. 6, n. 4, p. 217-229, 2013.
- DAVIDSON, E. A *et al.* *The Amazon basin in transition*. *Nature*, v. 481, p. 321-328, 2012.
- DRUSCH, M *et al.* *Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services*. *Remote Sensing of Environment*, v. 120, p. 25–36, 2012.



- FEARNSIDE, P. Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science, 2017. *Deforestation of the Brazilian Amazon*
- GAO, B. C. *NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space*. Remote Sensing of Environment, v. 58, p. 257–266, 1996.
- GASCON, F. *et al. Copernicus Sentinel-2A calibration and products validation status*. Remote Sensing, v. 9, n. 6, p. 584, 2017.
- HUETE, A., *et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices*. Remote Sensing of Environment, v. 83, p. 195-213, 2002.
- JUNK, W. J. *et al. A classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands*. Wetlands, v. 31, p. 623–640, 2011.
- MAIN-KNORN, M. *et al. Sen2Cor for Sentinel-2. In: Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII*. SPIE, v. 10427, p. 1042704, 2017.
- 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.
- PEKEL, J. F. *et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes*. Nature, v. 540, p. 418–422, 2016.
- ROUSE, J. W. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. In: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Washington, DC: NASA, v. 1, p. 309–317, 1973.
- SILVA JUNIOR, C. H. *et al. The Brazilian Amazon deforestation rate in 2020 is the greatest of the decade*. Nature Ecology & Evolution, v. 5, p. 144–145, 2021.