XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE
XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

MAPEAMENTO DA VEGETAÇÃO CILIAR EM RIOS URBANOS A PARTIR DE ÍNDICES ESPECTRAIS RGB DERIVADOS DE IMAGENS DE VANT

Gabriel Henrique Santos da Silva[1] ; Ubiratan Joaquim da Silva Junior [2]; Juarez Antônio da Silva Junior [3]; Fabricio Eduardo Silva de Lima [4]; Diego Cezar dos Santos Araujo [5]; Anderson Luiz Ribeiro de Paiva [6]; Sylvana Melo dos Santos [7] & Leidjane Maria Maciel de Oliveira[8]

RESUMO – A degradação das Áreas de Preservação Permanente (APPs) em ambientes urbanos destaca a necessidade de ferramentas eficientes e de baixo custo para monitoramento da vegetação ciliar. Este estudo avaliou o potencial de índices de vegetação RGB obtidos por drones no mapeamento da mata ciliar em área urbana no Pontal de Afogados, Recife–PE, sob intensa pressão antrópica no rio Capibaribe. Foram utilizadas imagens de alta resolução (GSD ≈ 0,30 cm) adquiridas com o drone DJI Phantom 4 Pro. Os índices GLI e VIgreen foram calculados a partir das bandas RGB e classificados por limiares definidos por estatística zonal no QGIS, sendo avaliados quanto à sensibilidade espectral. Os resultados indicaram melhor desempenho do GLI, com maior separabilidade (≈ 0,63) e representação contínua da vegetação, enquanto o VIgreen apresentou maior suscetibilidade a ruídos e fragmentação. Ambos mostraram limitações em ambientes heterogêneos, especialmente na distinção entre água, solo exposto e resíduos, evidenciando desafios na aplicação operacional.

ABSTRACT– The degradation of Permanent Preservation Areas (PPAs) in urban environments highlights the need for efficient and low-cost tools for monitoring riparian vegetation. This study evaluated the potential of RGB vegetation indices derived from drones for mapping riparian vegetation in an urban area in Pontal de Afogados, Recife–PE, under intense anthropogenic pressure along the Capibaribe River. High-resolution images (GSD ≈ 0.30 cm) acquired using a DJI Phantom 4 Pro drone were used. The GLI and VIgreen indices were calculated from RGB bands and classified using thresholds defined by zonal statistics in QGIS and evaluated in terms of spectral sensitivity. Results indicated better performance of GLI, with higher separability (≈ 0.63) and more continuous vegetation representation, whereas VIgreen showed greater susceptibility to noise and fragmentation. Both indices showed limitations in heterogeneous environments, particularly in distinguishing water, exposed soil, and waste, highlighting challenges for operational application.

Palavras-Chave –Índices de vegetação RGB; drones; Mata ciliar.

[1]) Graduando em Licenciatura em Geografia, Departamento de Ciências Geográficas – DCG, Centro de Filosofia e Ciências Humanas – CFCH, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, 50.740-530 - Recife - PE – Brasil. Fone: +55 81 2126.8000. E-mail: gabriel.hssilva@ufpe.br
[2]) Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – DECIV, Centro de Tecnologia e Geociências – CTG, UFPE, E-mail: Ubiratan.joaquim@ufpe.br
[3]) Doutorando, PPGEC, DECIV, CTG, UFPE. E-mail: juarez.silvajunior@ufpe.br
[4]) Doutorando, PPGEC, DECIV, CTG, UFPE. E-mail: fabricio.eduardo@ufpe.br
[5]) Pós-doutorado, PPGEC, DECIV, CTG, UFPE. E-mail: diego.caraujo@ufpe.br
[6]) Professor Associado, DECIV, CTG, UFPE. E-mail: anderson.paiva@ufpe.br
[7]) Professora Titular, DECIV, CTG, UFPE. E-mail: sylvana.santos@ufpe.br
[8]) Professora Adjunto, DECIV, CTG, UFPE. E-mail: leidjane.oliveira@ufpe.br

1- INTRODUÇÃO

Mata ciliares atuam como corredores naturais para a fauna, contribuem para a purificação da água e reduzem a vulnerabilidade a inundações (Cole *et al.*, 2020; Chu *et al.*, 2025). O mapeamento preciso da vegetação nessas áreas é fundamental para a compreensão dos processos de superfície e para a gestão de ecossistemas de bacias hidrográficas (Burdon *et al.*, 2020).

O Sensoriamento Remoto constitui uma solução eficiente para a detecção, monitoramento e mapeamento da cobertura vegetal associada aos rios (Karunathilake *et al.*, 2025). Nesse contexto, Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) equipados com câmeras de alta resolução e sensores multiespectrais que superam as imagens de satélite tradicionais na coleta de dados sobre a saúde da vegetação, padrões de crescimento e fatores de estresse (Chu *et al.*, 2025). Dentre as aplicações de dados adquiridos com VANTs destacam-se os Índices de Vegetação (IVs) baseados no espectro visível (RGB), como VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*), GLI (*Green Leaf Index*) e VIgreen (*Visible Atmospherically Resistant Indices Green*), que representam uma alternativa de baixo custo em relação aos índices multiespectrais, com aplicabilidade comprovada na avaliação da saúde das plantas, teor de clorofila e estimativa de biomassa (Simões e Amaral, 2023; Rossi *et al.*, 2025), incluindo aplicações no mapeamento de vegetação ripária.

Estudos recentes reforçam o potencial desses índices, como Karunathilake *et al.* (2025) que demonstraram sua eficácia na predição de biomassa durante a floração do trigo-sarraceno (*Fagopyrum tataricum*); e Simões e Amaral (2023), que no contexto brasileiro, integraram IVs com algoritmos de aprendizado de máquina para o fenotipagem de variedades de cana-de-açúcar resistentes à ferrugem alaranjada e marrom. O presente estudo tem como objetivo avaliar a sensibilidade espectral de IVs baseados em RGB obtidos por VANTs, especificamente GLI e VIgreen, no mapeamento da paisagem espectral da vegetação em áreas de mata ciliar adjacentes aos manguezais em Recife, PE, Brasil.

2 – METODOLOGIA

A área de estudo é a faixa de mata ciliar ao longo das margens da Bacia do Pina e do meandro abandonado do rio Capibaribe na região de Vila Sul, onde trata-se de um território caracterizado por intensa fragmentação urbana e pela presença de assentamentos precários, inserido na região de manguezais de Recife, Pernambuco (Figura 1). Essa região tem passado por um processo de ocupação desordenada ao longo dos anos, resultando em significativa degradação ambiental. Vila Sul, que se tornou uma Zona Especial de Interesse Social (ZEIS) em 2025, apresenta, como é visível em muitos assentamentos urbanos informais, trechos de ocupação estabelecidos em áreas classificadas pela legislação ambiental brasileira como Áreas de Preservação Permanente (APPs).



Figura 1 – Área de estudo. (a) Delimitação geoespacial do Estado de Pernambuco e do município de Recife. (b) Ortofoto da área de estudo (ZEIS Vila Sul).

A área de estudo consiste principalmente em zonas de amortecimento ripárias adjacentes ao meandro do rio Capibaribe, cujas características hidrológicas e ecológicas definem um ambiente sensível, sujeito a restrições de uso do solo e passível de proteção legal (Barbosa, 2025).

A coleta de dados em campo foi realizada em 24 de outubro de 2024, utilizando um VANT *DJI Phantom 4 Pro*, gerando imagens com distância de amostragem do solo (GSD) de 0,30 cm, georreferenciadas ao sistema de coordenadas SIRGAS 2000. A partir do mosaico corrigido, os índices GLI (Louhaichi *et al.*, 2001) e VIgreen (Eng *et al.*, 2019) foram calculados no *software* de livre acesso QGIS 3.34, utilizando exclusivamente as bandas do espectro visível vermelho, verde e azul (RGB). Os índices GLI e VIgreen foram calculados de acordo com as Equações (1) e (2), respectivamente, derivadas das bandas do espectro visível: vermelho (Red), verde (Green) e azul (Blue), possibilitando a sensibilidade espectral dos índices na detecção do vigor vegetativo dos alvos mapeados:

$$VI_{Green} = \frac{(Green - Red)}{(Green + Red)} \quad (1)$$

$$GLI = \frac{(2Green - Red - Blue)}{(2Green + Red + Blue)} \quad (2)$$

em que Red, Green e Blue correspondem, respectivamente, aos valores de reflectâncias (ou níveis digitais normalizados) das bandas vermelha, verde e azul. Ambos os índices são adimensionais e, quando normalizados, assumem valores no intervalo de −1 a 1.

O VIgreen baseia-se na diferença normalizada entre as bandas verde e vermelha, explorando a maior reflectância da vegetação na região do verde e a forte absorção na região do vermelho para discriminar a vegetação de áreas não vegetadas (Hunt *et al.*, 2005). O GLI, adicionalmente, incorpora a banda azul, ampliando a faixa espectral considerada e conferindo maior robustez frente a variações de iluminação e à influência do fundo do solo (Louhaichi *et al.*, 2001). Os índices foram calculados *pixel* a *pixel* no ambiente raster do QGIS, com normalização prévia dos valores das bandas e tratamento de áreas sem dados (*NoData*), gerando mapas temáticos contínuos utilizados nas análises subsequentes. Esses valores foram analisados pelo teste de testes de Mann–Whitney. A classificação dos *pixels* foi realizada por meio de critérios baseados em limiar para separar as classes "Vegetação" e "Não Vegetação". O critério adotado seguiu a condição $f(x,y) < \sigma$ para atribuição do valor 1 (presença de vegetação) e $f(x,y) > \sigma$ para o valor 0 (ausência), onde $f(x,y)$ representa a imagem binarizada gerada pelo índice e σ corresponde à média obtida a partir das estatísticas zonais das amostras para cada classe.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os índices VIgreen e GLI (Figura 2) demonstraram comportamento consistente na discriminação entre classes de uso e cobertura da terra em regiões de manguezal, com áreas vegetadas apresentando valores positivos, e opostamente, as superfícies antrópicas e solo exposto concentraram-se em valores negativos em ambos os índices.

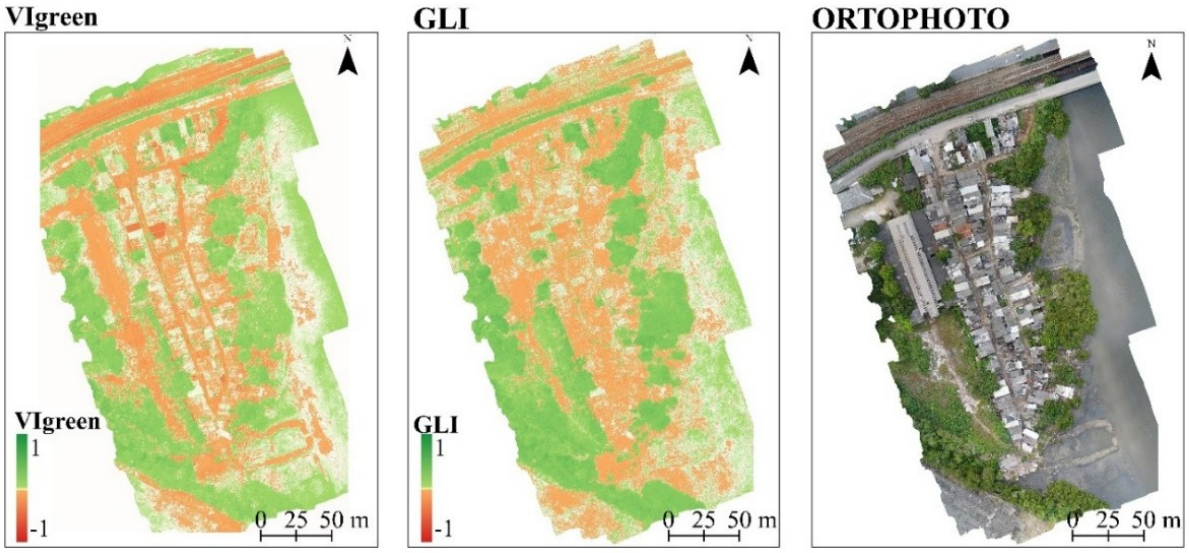


Figura 2 – Distribuição espacial dos índices na área de estudo. Fonte: Autores.

A classe de vegetação apresentou valores médios de 0,10 (VIgreen) e 0,23 (GLI), enquanto o solo exposto apresentou médias negativas (−0,047 e −0,007, respectivamente), um padrão consistente com a resposta espectral típica da vegetação, caracterizada por maior reflectância na banda do verde

e absorção na banda do vermelho (Eng *et al.*, 2019). O GLI apresentou maior separabilidade espectral, com amplitude máxima de aproximadamente 0,63 em comparação a 0,38 para o VIgreen, refletindo a incorporação da banda azul em sua formulação e o consequente aumento do contraste espectral. Em contraste, o VIgreen apresentou maior variabilidade nas classes não vegetadas (desvio padrão ≈ 0,10), indicando maior suscetibilidade a ruído e limitação inerente de índices de duas bandas, particularmente em ambientes com alta heterogeneidade de albedo, como manguezais (Karunathilake *et al.*, 2025). A classe água apresentou valores próximos de zero em ambos os índices (VIgreen ≈ 0,013; GLI ≈ 0,001), indicando dificuldades na separação dessa classe, possivelmente devido à reflectância variável associada à turbidez e à matéria orgânica dissolvida em ambientes estuarinos. Esse resultado reforça as limitações dos índices RGB na ausência da banda do infravermelho próximo (NIR) (Chu *et al.*, 2025; Karunathilake *et al.*, 2025). Esses resultados foram condizentes com Simões e Amaral (2023), que destacaram o desempenho satisfatório de índices baseados em bandas do visível para a detecção do vigor vegetativo, com ressalvas para condições de alta complexidade estrutural.

A Figura 3 apresenta a distribuição dos valores de pixels dos índices VIgreen e GLI por classe de cobertura da terra, por meio da combinação de gráfico de violino e *boxplot* com entalhe, que representam o intervalo de confiança de 95% em torno da mediana, de modo que entalhes não sobrepostos entre classes indicam diferenças estatisticamente significativas ao nível de 5%. Uma abordagem que permite visualizar simultaneamente a densidade de probabilidade, medidas de tendência central e dispersão (mediana e quartis) e a presença de *outliers*.

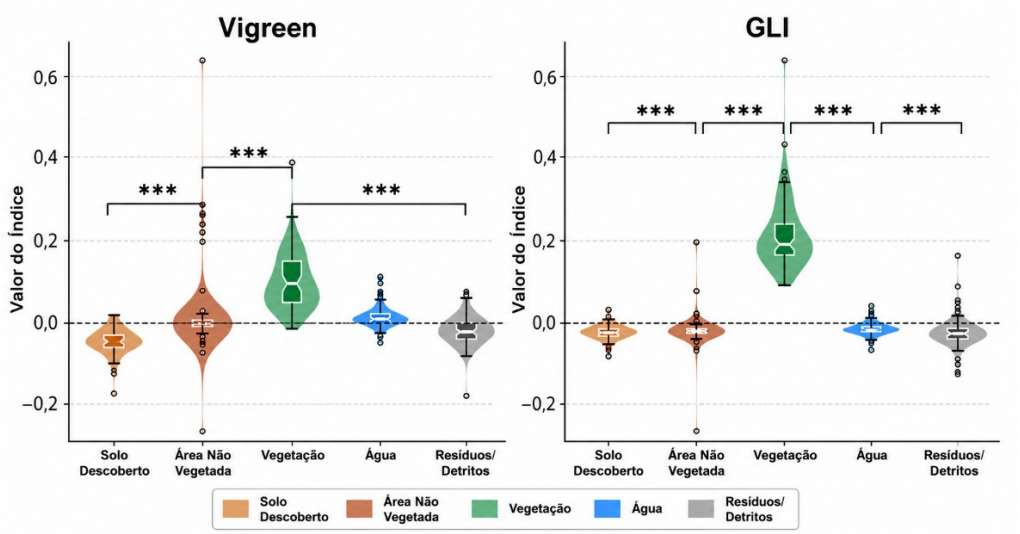


Figura 3 – Distribuição dos valores de VIverde e GLI por classe de cobertura do solo, com indicação de diferenças estatisticamente significativas entre as classes. (** p < 0.001). Os marcadores (***) indicam os resultados de testes de Mann–Whitney pareados entre a classe Vegetação e todas as demais. Fonte: Autores.

A análise dos índices VIgreen e GLI evidenciou separação espectral consistente da classe Vegetação em relação às demais (Mann–Whitney, p < 0,001). No VIgreen, a Vegetação apresentou

valores positivos (mediana ≈ 0,090), enquanto o Solo Exposto registrou os menores valores (≈ −0,045), associado à maior influência da banda do vermelho em substratos lamosos presentes em manguezais. A classe Água manteve valores próximos de zero, com baixo IQR, indicando homogeneidade espectral. O GLI apresentou medianas mais elevadas para Vegetação (≈ 0,200) e maior amplitude, indicando maior sensibilidade à variabilidade estrutural do dossel. Áreas não vegetadas (edificações) mostraram alta variabilidade em ambos os índices, enquanto a classe Resíduos/Lixo apresentou sobreposição com Solo Exposto e Água, especialmente no GLI, evidenciando limitações dos índices RGB. A variabilidade espectral e casos de confusão entre classes são ilustrados na Figura 4.

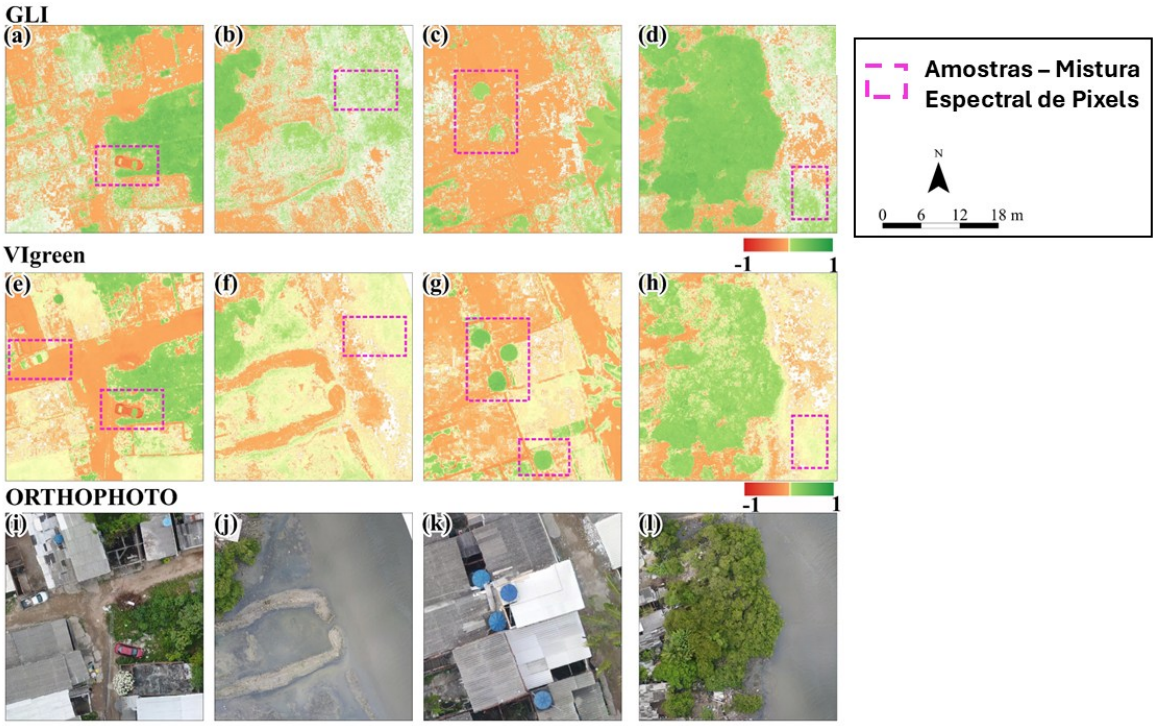


Figura 4 – Mistura espectral de *pixels* causada por confusão na classificação entre índices.

A análise visual dos mapas do VIgreen em comparação com as ortofotos correspondentes indica limitações na discriminação espectral de alvos em ambientes com alta heterogeneidade de superfície. A Figura 4 (a), (e) e (i), correspondente a um ambiente urbano com vias, solo exposto e vegetação fragmentada, superfícies impermeáveis e substratos úmidos adjacentes à cobertura vegetal apresentam valores intermediários do índice, indicando sobreposição espectral entre classes, particularmente entre vegetação esparsa e pavimentos com reflectância semelhante no espectro visível. Nas Figuras (b), (f) e (j), correspondente a uma planície de maré com vegetação de mangue e resíduos sólidos, observam-se dificuldades na separação das classes água, solo exposto e detritos orgânicos, que compartilham respostas espectrais semelhantes no espaço RGB, resultando em padrões inconsistentes no mapa do índice. Nas Figuras (g) e (k), tem-se a confusão entre superfícies

artificiais, como telhados e caixas d'água, e classes de vegetação ou solo, com alternância irregular de valores positivos e negativos de VIgreen, evidenciando a sensibilidade do índice em superfícies espectralmente ambíguas. Em contraste, nas Figuras 4 (d) e (h), caracterizada por floresta ripária densa e contínua, ambos os índices apresentaram bom desempenho, com valores positivos elevados alinhados à cobertura arbórea na ortofoto Figuras 4 (l), confirmando sua adequação para dosséis homogêneos.

Contudo, esse contraste entre os resultados indica uma limitação dos índices RGB em ambientes heterogêneos devido à mistura espectral, uma vez que a ausência da banda do infravermelho próximo (NIR) aumenta a ambiguidade entre alvos com reflectância semelhante no visível (Chu *et al.*, 2025; Karunathilake *et al.*, 2025). Nesse contexto, devem ser consideradas também limitações adicionais associadas à saturação espectral, à influência da umidade do solo e à variabilidade das condições de iluminação durante o voo. Após a extração e os ajustes de classificação, as áreas de floresta ripária mapeadas foram apresentadas na Figura 5:

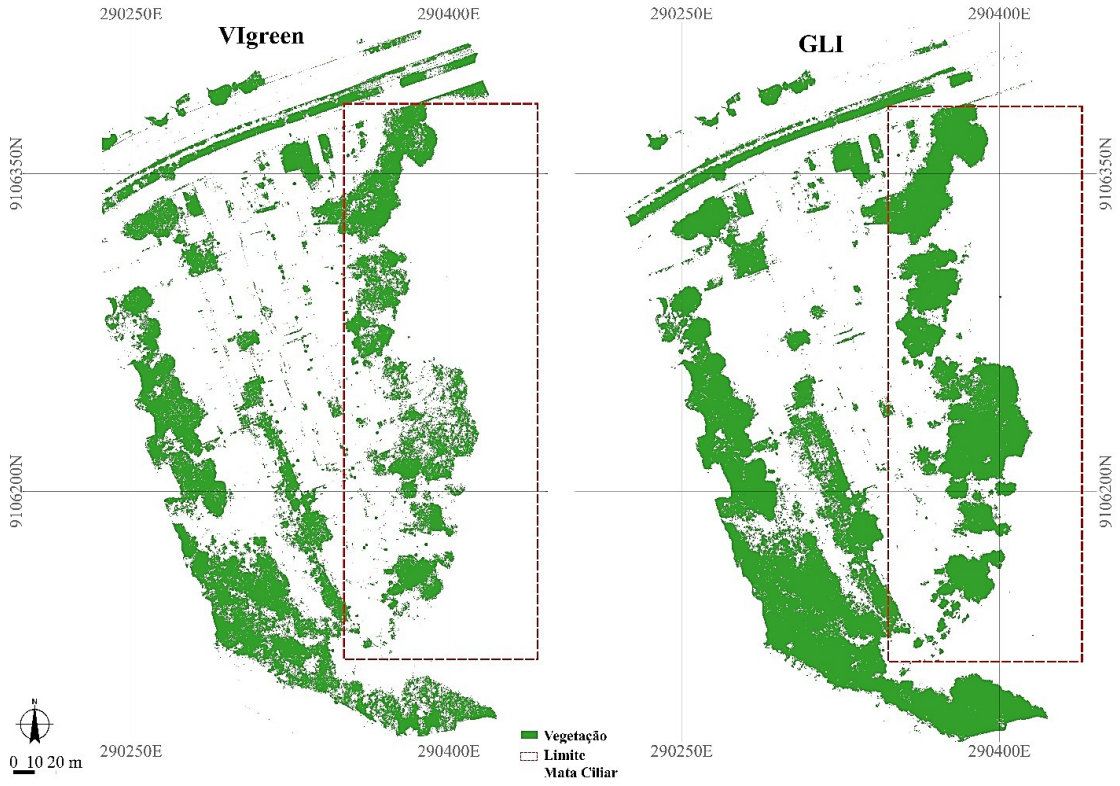


Figura 5 – Extração da área de mata ciliar: comparação entre índices. Fonte: Autores.

A comparação entre os mapas gerados pelos índices VIgreen e GLI apresentou diferenças substanciais no desempenho dos índices para o mapeamento de matas ciliares. O GLI mapeou uma cobertura vegetal mais contínua e homogênea, com menor fragmentação interna e polígonos mais coesos dentro do limite ciliar, enquanto o VIgreen resultou em um mapeamento mais fragmentado, com numerosos *pixels* não classificados em áreas de cobertura densa, um padrão possivelmente

associado à maior sensibilidade desse índice as variações de iluminação e umidade do dossel em ambientes estruturalmente complexos, como manguezais.

Fora da faixa ciliar, ambos os índices identificaram fragmentos vegetados dispersos na área urbana, embora o GLI tenha mapeado uma extensão ligeiramente maior dessas feições. Esses resultados reforçam a maior eficiência do GLI na extração contínua da vegetação ciliar a partir de imagens de VANT de alta resolução, tornando-o o índice mais adequado para aplicações de mapeamento e monitoramento de florestas ripárias em ambientes de manguezal. Recortes comparativos de VIgreen, GLI e ortofoto em duas áreas de detalhe ilustram as diferenças de desempenho entre os índices na extração da vegetação de mangue na interface terra–água (Figura 5).

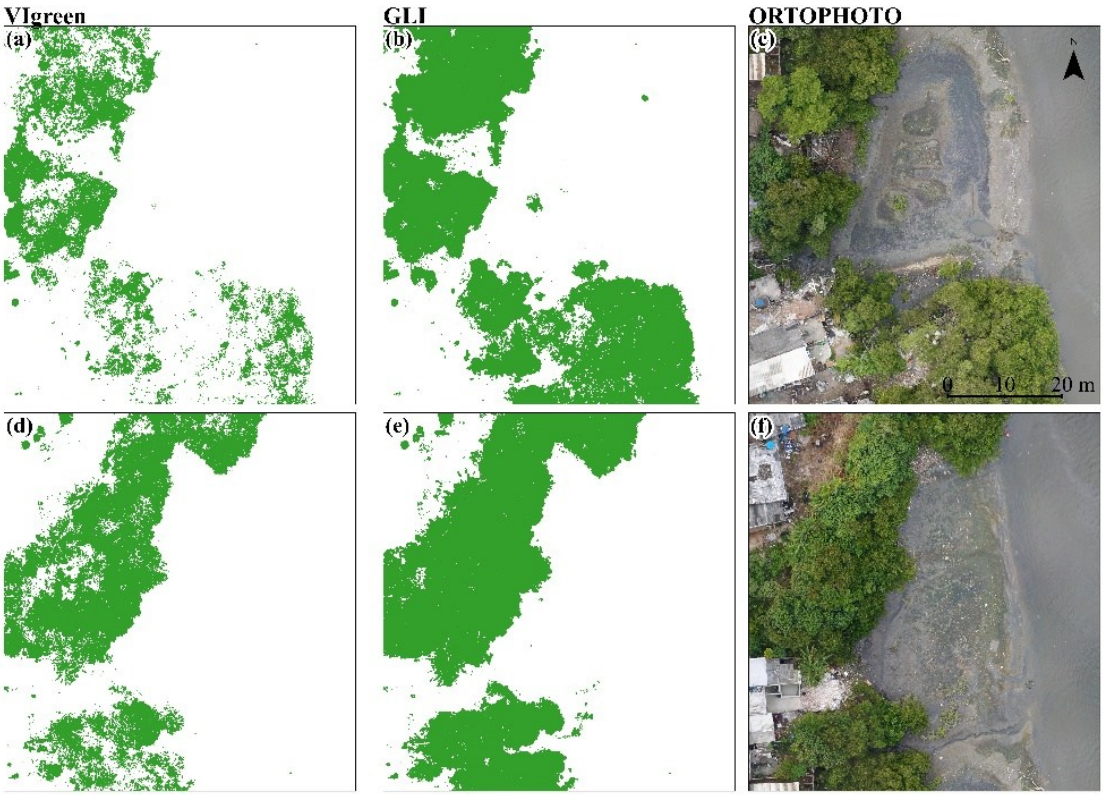


Figura 5 – Amostras comparativas de extração de área de mata ciliar. Fonte: Autores.

Nas Figuras 5c e 5f, observa-se uma faixa de vegetação densa e contínua margeando o corpo hídrico, com edificações e solo exposto na porção terrestre. O VIgreen (Figuras 5a e 5d) produziu mapeamentos fragmentados, com alta quantidade de *pixels* não classificados dentro de manchas contínuas de vegetação, possivelmente por uma subestimação da cobertura vegetal, comportamento atribuído à maior sensibilidade desse índice a variações de sombreamento, umidade do dossel e heterogeneidade interna do manguezal. O GLI (Figuras 5b e 5e) gerou polígonos mais coesos, com melhor correspondência visual com as ortofotos, embora ainda persistam lacunas em zonas de transição entre vegetação e solo úmido, onde a mistura espectral reduz a capacidade discriminatória do índice. No contexto de manguezais, o GLI mostrou-se mais eficiente na identificação de vegetação

densa e contínua, enquanto o VIgreen apresentou melhor contraste entre solo exposto e vegetação. Quanto ao grau de conservação da floresta ripária, tem-se um elevado nível de pressão antrópica sobre as APPs, com a classe resíduos/lixo superando, em determinados locais, tanto a cobertura vegetal quanto o solo exposto, padrão intensificado pela expansão urbana desordenada em curso. Segundo Barbosa (2025), dos 28 lotes situados na faixa de APP ao longo do meandro do rio Capibaribe, 18 encontram-se parcialmente e 10 totalmente inseridos na área protegida.

4 - CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que os índices GLI e VIgreen, derivados de imagens de VANT de alta resolução, constituem ferramentas viáveis para o mapeamento de matas ciliares em ambientes urbanos de manguezal. O GLI destacou-se pela maior separabilidade espectral e consistência no mapeamento contínuo da vegetação, sendo o índice mais recomendado na ausência da banda do infravermelho próximo (NIR). Ambos os índices, no entanto, apresentaram limitações em ambientes espectralmente heterogêneos, reforçando a necessidade de integração com sensores multiespectrais em estudos futuros. A delimitação da vegetação ciliar do rio Capibaribe evidencia o potencial da metodologia empregada, baseada em sensoriamento remoto por VANT de baixo custo e ferramentas de geoprocessamento de acesso aberto, para subsidiar diagnósticos ambientais em escala local e contribuir para a gestão integrada de bacias hidrográficas urbanas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Comunidade Interdisciplinar de Ação, Pesquisa e Aprendizagem (CIAPA) e ao Observatório Pernambuco – Núcleo Recife do INCT/CNPq Observatório das Metrópoles pelo suporte técnico-científico e pela disponibilização dos dados utilizados nesta pesquisa. Os autores também agradecem o apoio do Projeto de Pesquisa Universal [CNPq/MCTI nº 10/2023 – Universal], intitulado “As ZEIS do Recife em seus 40 anos: quais contribuições aportam às cidades brasileiras e latino-americanas como instrumento em prol do Direito à Cidade e de enfrentamento das desigualdades socioespaciais?”, que contribuiu para o desenvolvimento deste estudo. Este estudo foi financiado, em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – por meio de bolsas de doutorado concedidas aos autores sob os seguintes números de concessão: nº 88887.13500/2025-00 (segundo autor) e 88887.910305/2023-00 (terceiro autor). O financiamento também foi fornecido, em parte, pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), por meio da bolsa de doutorado do quarto autor, e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio da bolsa de Iniciação Científica - PIBIC, processo nº 146250/2025-7 concedida ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, T. S. (2025). "*REURB-S e direito à cidade: proposta de Plano Urbanístico-Ambiental para a Vila Sul, Afogados, Recife"*. Trabalho de Conclusão de Curso (Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 118 p.

BURDON, F.J.; RAMBERG, E.; SARGAC, J.; FORIO, M.A.E.; SAEYER, N.; MUTINOVA, P.T.; MOE, T.F.; PAVELESCU, M.O.; DINU, V.; CAZACU, C. (2020). "*Assessing the Benefits of Forested Riparian Zones: a qualitative index of riparian integrity is positively associated with ecological status in european streams*". **Water** 12 (4), pp. 1178-1186.

CHU, C.; HU, Y.; WU, W.; LI, Y.; LI, T.; ZHAO, J.; LI, J.; LI, X.; WANG, Z. (2025). "*Enhanced wheat yield estimation with UAV multi-source remote sensing and optimized ensemble learning*". *Smart Agricultural Technology* 12, pp. 101-486.

COLE, L.J.; STOCKAN, J.; HELLIWELL, R. (2020). "*Managing riparian buffer strips to optimise ecosystem services: A review*". **Agriculture, Ecosystems & Environment** 296, pp. 106-891.

ENG, L.S.; ISMAIL, R.; HASHIM, W.; BAHARUM, A. (2019). "*The Use of VARI, GLI, and VIgreen Formulas in Detecting Vegetation in Aerial Images*". **International Journal of Technology** 10 (7), pp. 1385-1394.

KARUNATHILAKE, E.M.B.M.; THAI, T.T.; MANSOOR, S.; LE, A.T.; BALOCH, F.S.; CHUNG, Y.S.; KIM, D.W. (2025). "*Limitation of RGB-Derived Vegetation Indices Using UAV Imagery for Biomass Estimation during Buckwheat Flowering*". **Phyton94** (7), pp. 2215-2228.

LOUHAICHI, M.; BORMAN, M.M.; JOHNSON, D.E. (2001). "Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat". **Geocarto International** 16 (1), pp. 65-70.

ROSSI, A.; TAVARINI, S.; TOGNONI, M.; ANGELINI, L.G.; CLEMENTE, C.; CATUREGLI, L. (2025). "*Reliable NDVI estimation in wheat using low-cost UAV-derived RGB vegetation indices*". **Smart Agricultural Technology** 12, pp. 101452.

SIMÕES, I.O.P.S.; AMARAL, L.R. (2023). "*UAV-based multispectral data for sugarcane resistance phenotyping of orange and brown rust".* **Smart Agricultural Technology** 4, pp. 100-144.