

RESPOSTA ESPECTRAL DE ÁGUAS ESCURAS AMAZÔNICAS EM AMBIENTE COM INFLUÊNCIA ANTRÓPICA NA CIDADE DE MANAUS - AM

Angélica Rodrigues Rocha¹, Flávio Wachholz², Rogério Ribeiro Marinho³, Waterloo Pereira Filho⁴
Ricardo Lima Serudo⁵

¹ Universidade do Estado do Amazonas – UEA, angelica.rocha@outlook.com; ² Universidade do Estado do Amazonas - UEA, fwachholz@uea.edu.br; ³ Universidade Federal do Amazonas - UFAM, rogeo@ufam.edu.br; ⁴ Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, waterloo@ufsm.br; ⁵ Universidade do Estado do Amazonas – UEA, rserudo@gmail.com

RESUMO

O estudo foi realizado em uma bacia hidrográfica periurbana na região central da Amazônia, localizada na cidade de Manaus, no estado do Amazonas. O objetivo da pesquisa foi caracterizar a resposta espectral das águas escuras nos períodos hidrológicos de vazante e enchente no baixo curso do rio Tarumã-açu. Medições radiométricas foram realizadas com o auxílio de radiômetros TriOS RAMSES (350-900nm) e amostras da água em subsuperfície foram coletadas para determinação de variáveis limnológicas com resposta espectral (*Transparência da água, Turbidez, Clorofila a e Totais de Sólidos em Suspensão*). Os parâmetros utilizados foram a Reflectância de Sensoriamento Remoto (Rrs) da superfície d'água e suas correlações com variáveis limnológicas passíveis de serem detectadas por alterações da cor da água. O estudo constatou que dentre as variáveis limnológicas estudadas, a *turbidez* foi a variável com maiores correlações nas curvas espectrais no baixo curso do rio Tarumã-açu nas duas campanhas, enquanto a *transparência* registrou correlações significativas apenas na vazante.

Palavras-chave — *Espectrometria de campo, Variáveis Limnológicas, Qualidade da água.*

ABSTRACT

The study was carried out in a periurban watershed in the central Amazon, located in Manaus, Amazonas. The objective of this research was to characterize the spectral response of black waters in the hydrological periods of low and high waters in the Tarumã-açu river. Radiometric measurements were performed with TriOS RAMSES radiometers (350-900nm) and subsurface water samples were collected to determine limnological variables (Water Transparency, Turbidity, Chlorophyll-a and Total Suspended Solids). The parameters used were the Remote Sensing Reflectance (Rrs) of the water surface and its correlations with limnologic variables that can be detected by changes in water color. The study show that among the optically active limnological variables studied, turbidity was the variable with the highest correlations in spectral curves of the lower course of the Tarumã-açu River in both campaigns, while transparency recorded significant correlations only in the ebb.
Key words — *Field spectrometry, Limnological variables, Water quality.*

1. INTRODUÇÃO

O gerenciamento eficiente de recursos hídricos no Brasil possui grandes desafios, como a sua distribuição desigual no território nacional e a degradação de sua qualidade da água em ambientes com forte influência das atividades humanas. Sendo assim, a utilização de ferramentas tecnológicas que possibilitem a redução de custos e maior acessibilidade a locais de difícil acesso, ainda que de forma remota, são de extrema importância.

A ciência relacionada ao sensoriamento remoto da qualidade da água, tanto em nível *orbital* quanto *In situ* em ambientes aquáticos continentais são amplamente divulgados em livros, trabalhos e artigos científicos [1]. Na região Amazônica, embora existam muitas pesquisas sobre propriedade óptica da água, elas são concentradas nos rios Amazonas [2], Solimões [3], Madeira [4] e Negro [5].

A existência de diferentes tipos de matéria orgânica dissolvida e grande variabilidade nas taxas de oxidação e de conversão da matéria orgânica dissolvida colorida em matéria orgânica inativa óptica exige que se obtenha um grande número de amostras, na medida do possível, em diferentes ambientes hídricos.

Nesse sentido, este trabalho apresenta resultados inéditos nesta área de estudo, que contém diversidade ambiental desde o natural até o domínio antrópico e tem como objetivo caracterizar a resposta espectral de águas escuras, nos períodos hidrológicos de vazante e enchente, no baixo curso do rio Tarumã-açu, na cidade de Manaus.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma bacia hidrográfica periurbana na região central da Amazônia, localizada na cidade de Manaus, no estado do Amazonas. As estações de amostragem foram distribuídas no baixo curso do rio Tarumã-açu, tributário da margem esquerda do rio Negro, com equidistâncias aproximadas de 1000 m (Figura 1). A bacia do rio Tarumã-açu é considerada uma unidade estratégica de gestão ambiental de recursos hídricos na região, por se inserir em contextos do plano de resíduos sólidos, da expansão do gasoduto, do polo industrial de Manaus, do turismo ecológico, do abastecimento de água e da nova fronteira habitacional local, além de possuir o único comitê de bacia atuante da cidade [6].

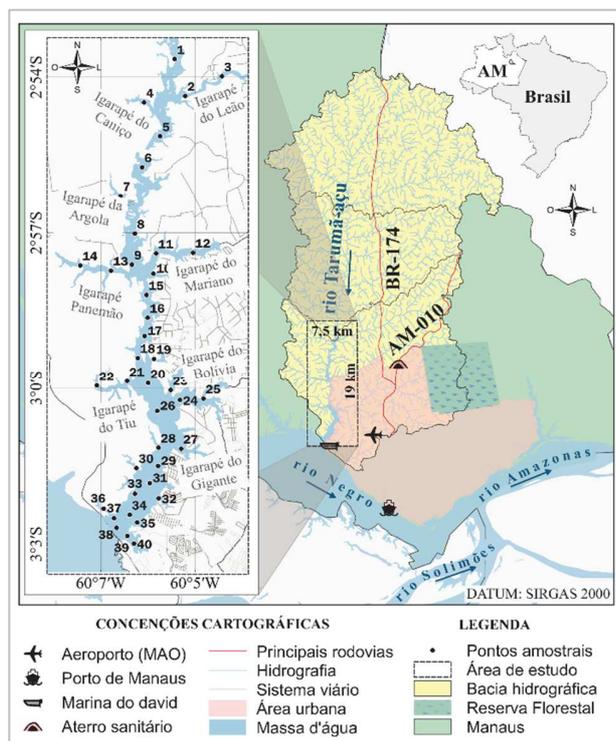


Figura 1. Localização da área de estudo no baixo curso do rio Tarumã-açu, Manaus – Amazonas.

O clima na área de estudo é classificado como *Superúmido* [7], com período de três meses de seca suave à moderada (julho a setembro), seis meses de período úmido (dezembro a maio) e dois meses de transição (junho e outubro), e temperatura média anual de 26 °C [6]. Os solos são do tipo Latossolo Amarelo nos platôs, Podzólico Vermelho-Amarelo nas encostas e Arenos hidromórficos nos baixios [8].

A morfometria da bacia é *alongada*, o fator de forma de 0,40 torna a resposta hidrológica da sua rede de drenagem mais lenta e com pouca tendência a episódios de enchentes. No entanto, por possuir pouca sinuosidade pode facilitar o carreamento de sedimentos e o surgimento de processos erosivos [9].

A dinâmica hidrológica do canal principal sofre impacto do fenômeno de barramento hidráulico natural provocado pelo rio Negro, quando esse ultrapassa a cota de 19 m, em uma extensão de ao menos 17 km do rio Tarumã-açu. Nos meses de outubro e novembro essa influência é reduzida, sendo registrada apenas nos primeiros 4 km à montante da foz [10].

O uso e a ocupação do solo na região, apesar de possuir a presença de áreas com forte interferência humana, como centro urbano, agricultura, indústria e comunidades tradicionais, é composta predominantemente por vegetação de campinaranas, floresta ombrófila e floresta aluvial (igarapós) [11] que periodicamente são inundadas por rios de águas escuras com baixo teor de pH e alta concentração de matéria orgânica dissolvida e particulada.

Neste estudo foram realizadas medições radiométricas e coletadas amostras da água em superfície para determinação de variáveis biogeofísica da água: Transparência (DS), Turbidez (TUR), Clorofila *a* (Chl-*a*) e Totais de Sólidos em Suspensão (TSS), nos períodos de vazante e de enchente.

Devido à ausência de dados hidrológicos na bacia, para caracterizar a variação sazonal do nível da água, foram analisados os registros da cota do rio Negro no porto de Manaus, sendo vazante o período de diminuição e enchente de aumento da cota. O detalhamento dessas campanhas é apresentado na tabela 1.

Período hidrológico	Data	Quantidade de estações amostrais	Cota do rio Negro
Vazante	12 e 13 de ago. de 2019	39	27,68 m
Enchente	12 e 13 de fev. de 2020	36	24,54 m

Tabela 1. Campanhas de campo do estudo.

Nas campanhas foram adquiridas o total de 75 medições radiométricas de superfície da água, com o auxílio de radiômetros TriOS RAMSES que operam no intervalo espectral de 350-900 nm. A configuração dos equipamentos instalados na embarcação e a geometria de coleta seguiu a proposta utilizada em outros trabalhos [4 e 3]. Os espectros foram submetidos a um filtro de média móvel de 3 pontos para remoção de ruídos e suavização de feições espúrias.

As coletas das variáveis limnológicas foram realizadas em subsuperfície (profundidade aproximada de 30 cm), com o auxílio de disco de Secchi de diâmetro de 30 cm (DS), turbidímetro digital Instrutherm TD-300 (TUR) e balde inox (Chl-*a* e TSS), e armazenado em recipientes identificados dentro de caixas térmicas com gelo para proteção contra luminosidade e redução de degradação da amostra no deslocamento até o laboratório de análise, como indicado no Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras [12].

Este trabalho se propôs a estudar de forma exploratória o comportamento espectral das águas escuras amazônicas de rios com influência antrópica, em dois períodos hidrológicos distintos. Em vista disso, foram trabalhados os parâmetros de Reflectância de Sensoriamento Remoto (Rrs) da superfície d'água e suas correlações com variáveis limnológicas passíveis de serem detectadas por alterações da cor da água.

3. RESULTADOS

Os espectros coletados na vazante e na enchente deste trabalho são apresentados na Figura 2. Apesar da baixa Rrs, menor que 0,003 Sr⁻¹ na vazante (Figura 2a) e menor que 0,012 Sr⁻¹ na enchente (Figura 2b), foi possível observar sua variação espacial e temporal na área da pesquisa. Possivelmente esse cenário foi devido à presença de alta concentração de matéria orgânica dissolvida na massa d'água, o que ocasiona forte absorção da luz, além de possível interferência do efeito *Glint* na superfície da água.

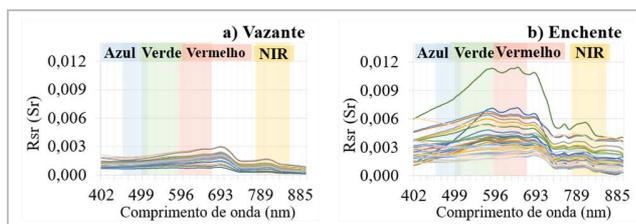


Figura 2. Espectros de reflectância a) vazante e b) enchente.

Os espectros de Rrs na vazante apresentaram aumento gradativo a partir da banda do azul até a banda do vermelho, onde há presença de duas inflexões de reflectância. Em aproximadamente 700 nm é observado o pico máximo (ponto 15) de resposta espectral e em seguida há forte decréscimo da Rrs, com profundidade máxima (ponto 5) próxima a 750 nm. Na região do infravermelho, há um segundo pico de elevação de Rrs, em aproximadamente 805 nm. Já nos espectros coletados na enchente, ao contrário da primeira campanha, observa-se um patamar de Rrs bem delimitado entre as faixas do verde e do vermelho (600 a 700 nm). Em relação a feições de absorção, foram detectadas duas inflexões, uma em 610 nm e uma segunda em 675 nm.

Quando analisadas as respostas espectrais de forma espacial, observam-se três grupos com padrões de resposta de sinal diferentes em cada período hidrológico (Figura 3): espectros com alta (curvas em vermelho), média (curvas em laranja) e baixa (curvas em azul) Rrs.

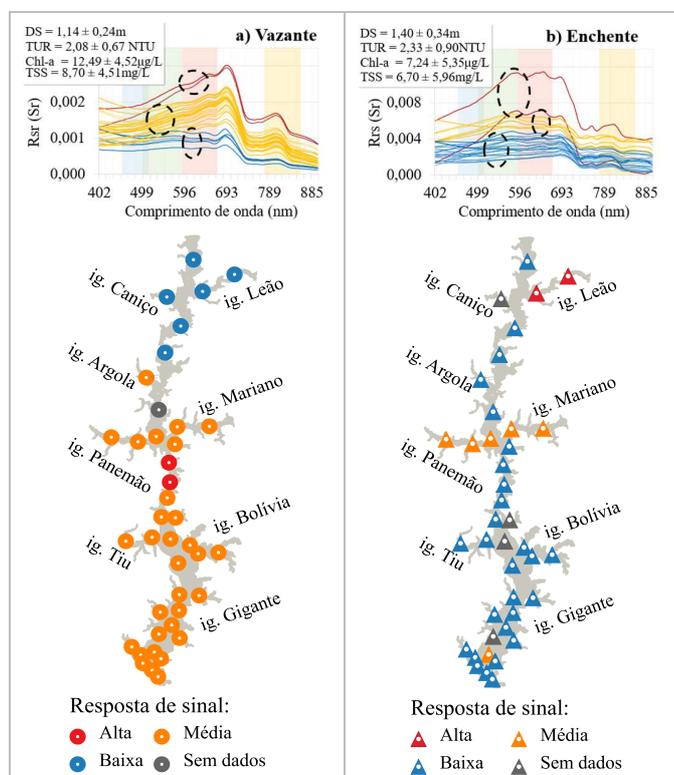


Figura 3. Espectros de reflectância em grupos espaciais no baixo curso do rio Tarumã-çu.

Na vazante (Figura 3a), as estações que apresentaram alta Rrs foram as dos pontos 15 e 16, localizados no rio Tarumã-çu, entre os ig. do Mariano e do Bolívia, que drenam densas áreas urbanas de Manaus. Os espectros de média resposta foram os pontos de 7 a 14 e 17 a 39, situados no setor intermediário e baixo curso da área de estudo. Por fim, o grupo com espectros com menores Rrs foram entre os pontos 1 a 6, localizados no alto curso do canal principal.

Na enchente (Figura 3b), dois pontos no ig. do Leão (2 e 3) destacam-se com alta resposta de Rrs, distoando dos demais espectros do conjunto amostral. Os pontos nos ig. do Panemão e do Mariano (9, 11 a 14) e a seção 34 foram as que registraram valores médios, enquanto os menores registros foram no rio Tarumã-çu (1, 5 a 8, 10, 15 a 32 e 35 a 40).

As relações entre variáveis limnológicas e Rrs, nos comprimentos de ondas entre 400 e 900 nm, estão demonstradas nos correlogramas da Figura 4. As correlações estatisticamente significativas para nível de confiança de 99,99%, encontram-se delimitadas no gráfico por linhas tracejadas (correlação $\pm 0,46$).

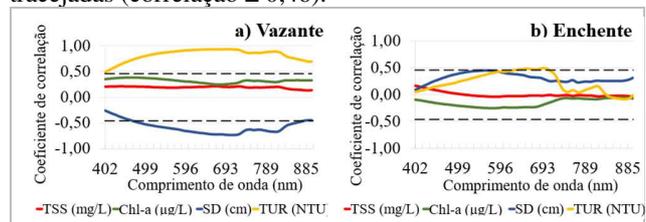


Figura 4. Correlações entre variáveis limnológicas e Rrs.

Na vazante foram obtidas valores mais altos de correlações para todas as variáveis, quando comparado aos espectros de Rrs coletados na enchente. Verifica-se que na primeira campanha, a TUR apresentou as maiores correlações positivas com os dados espectrais entre a faixa de 400 a 900 nm, com r máximo de 0,93 em 696 nm, sendo 87% da variação observada na Rrs explicada pela turbidez. Enquanto a DS obteve as melhores correlações negativas, com maior valor de correlação ($r = -0,73$, $r^2 = 0,54$) em 703 nm, indicando relação inversa entre as duas. Já os dados da Chl-a e TSS não apresentaram correlações estatisticamente significativas nos comprimentos de ondas estudados e entre si, com valor máximo de $r = 0,38$ para Chl-a, $r = 0,21$ para TSS e $r = 0,36$ entre as duas variáveis limnológicas.

Na enchente, por possuir tipos óticos distintos, as correlações entre os espectros de Rrs e as variáveis foram menores que na primeira campanha, apenas a TUR, na faixa entre 636 e 706 nm, obteve correlações estatisticamente significativas com r máximo de 0,50 e r^2 de 0,25 no comprimento de onda de 696 nm. Na Figura 5 são apresentados os diagramas de dispersão para a TUR com os melhores ajustes no comprimento de onda de 696 nm, nos dois períodos. Nota-se que na vazante o resultado da dispersão foi mais homogênea, quando comparado a enchente, que teve forte interferência de duas estações amostrais (2 e 3), localizadas no alto curso da área de estudo, no ig. do Leão.

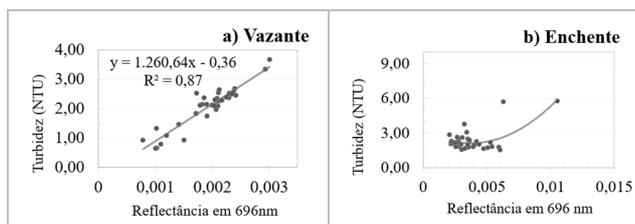


Figura 5. Dispersão da Turbidez e Rrs em 696 nm.

4. DISCUSSÃO

A partir da análise exploratória pode-se inferir a atuação de alguns componentes ópticos nas características espectrais aparentes d'água no rio Tarumã-açu, como o pico máximo de Rrs localizado nos comprimentos do vermelho (600-700 nm), que pode indicar a influência de sedimentos inorgânicos suspensos, deslocando o pico da Rrs em direção aos maiores comprimentos de onda [13]. Enquanto as feições de absorções localizadas próximas de 610 e 675 nm podem ser explicadas pela realização da fotossíntese de pigmentos fotossintético Chl-*a*, já demonstrados em outros estudos, uma forte absorção neste mesmo comprimento de onda [14].

Os espectros de Rrs coletados na vazante apresentaram comportamento espectral típicos de águas escuras amazônicas, com valores inferiores a 0,002 Sr⁻¹, característicos de águas compostas por alta presença de matéria orgânica dissolvida; enquanto o conjunto espectral da enchente se diferenciou com maior resposta de sinal e delimitação de patamares em seus comprimentos de ondas, possivelmente devido a menor concentração de matéria orgânica dissolvida [5], bem como pode ser relacionado a menor concentração de Chl-*a* e a condição de tempo [15], com nebulosidade e precipitação de chuvas, registradas nos dias da segunda campanha, principalmente no trecho que corresponde ao ig. do Leão; além de possível interferência pontual do efeito *sun glint*.

5. CONCLUSÕES

O estudo constatou que houve variação temporal e espacial da Rrs na área de estudo. Também observou-se que a TUR foi a variável que controlou a Rrs no baixo curso do rio Tarumã-açu nas duas campanhas desta pesquisa, enquanto a DS apresentou correlações significativas apenas no período de vazante. Os valores da Chl-*a* alteraram feições na banda do verde do espectro eletromagnético, no entanto, assim como descrito na literatura, baixos valores observados em alguns pontos ocasionaram fracas correlações com os espectros de Rrs da água.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio no desenvolvimento desta pesquisa a UEA, ao Prof.Água, a ANA, a CAPES, ao CNPq, a FAPEAM, ao HIDROGEO/UFAM, ao Geotap e ao laboratório HUB.

7. REFERÊNCIAS

- [1] BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. *Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: princípios e aplicações*. 1ª ed. São José dos Campos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2019.
- [2] Barbosa, C.C.F. *Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuaí/Rio Amazonas*. 2005. p281. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos: 2005.
- [3] Espinoza-Villar, R.; Martinez, J.M; Armijos, E.; Espinoza, J.C.; Filizola, N.P.; Santos, A.; Willems, B.; Fraizy, P.; Santini, W. Vauchel, P. Spatio-temporal monitoring of suspended sediments in the Solimões River (2000–2014). *Comptes Rendus Geoscience*, v, 350, n, 1–2, p. 4-12, 2018.
- [4] Espinoza-Villar, R.; Martinez, J.M.; Le Texier, M.; Guyot, J.L.; Fraizy, P.; Meneses, P.R.; Oliveira, E.D.. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remotesensing images. *Journal of South American Earth Sciences*, v.44, p.45–54, 2013.
- [5] MARINHO, R. R.; MARTINEZ, J. M. NAZIANO, P. F. J. *Comportamento espectral do rio Negro, Amazonas – Brazil*. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. v.19, 2019, Santos - São Paulo, p. 1-4.
- [6] MELO, S. F. F. *Gestão de Recursos Hídricos no Estado do Amazonas: o Caso da Bacia do Tarumã-Açu*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental). Pontifícia universidade católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p.110. 2017.
- [7] ANTONIO, I. C. Índices climáticos e caracterização climática do entorno de Manaus. *Revista brasileira de Geografia*. v. 50, n. 4, p. 1120–1133, 2017.
- [8] PROAMBIENTE. *Diagnóstico Rápido e Participativo do Pólo Pioneiro no Amazonas: Projeto de Assentamento Tarumã-Mirim*. Manaus: PROAMBIENTE, p.52. 2002.
- [9] COSTA, E. B. da S.; SILVA, C. L. da; SILVA, M. L. da. Caracterização física de bacias hidrográficas na região de Manaus – AM. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia v.4, n.46, p.93–100, 2013.
- [10] SIQUEIRA, L. F. *Estudo hidrológico do efeito de barramento hidráulico no rio Tarumã-açu, Manaus-AM*. Dissertação (Mestrado em Clima e Ambiente) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Manaus, p.67. 2019.
- [11] Vasconcelos, Mônica Alves de. *Estudo da paisagem do setor sul da Bacia Hidrográfica do Tarumã-Açu, Manaus, utilizando imagens multipolarizadas do radar ALOS/PULSAR*. Dissertação (Mestrado Ciências Florestais e Ambientais). Universidade federal do Amazonas. Manaus, p.77. 2012.
- [12] SÃO PAULO; BRASÍLIA. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB); Agência Nacional de Águas (ANA). *Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos*. São Paulo. 2011.
- [13] HAN, L.; RUNDQUIST, D. C.; Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: a case study in a turbid reservoir. *Remote Sensing of Environment*, v. 62, p. 253-261, 1997.
- [14] NOVO, E. M. L. M. Comportamento Espectral da Água. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. da S. (Org.). *Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais*. Brasília: ed. UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. p.203-224.
- [15] PEREIRA FILHO, W.; BARBOSA, C. C.; NOVO, E. M. L. M. *Influência das condições do tempo em espectros de reflectância da água*. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, v. 12, 2005, Goiânia - Goiás, p. 415-422.