

## COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO RIO NEGRO, AMAZONAS – BRAZIL

Rogério Ribeiro Marinho<sup>1</sup>, Jean-Michel Martinez<sup>2</sup>, Naziano Pantoja Filizola Junior<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Clima e Ambiente – INPA/UEA, Av. André Araújo, 2936, Petrópolis, 69067-375 - Manaus, AM, Brasil, rogeo@ufam.edu.br; <sup>2</sup>GET, UMR 5563, IRD/CNRS/Université Toulouse 3, Toulouse, France, Jean-michel.martinez@ird.fr; <sup>3</sup>Universidade Federal do Amazonas – UFAM, Departamento de Geociências, Av. General Rodrigo Octávio, 6200, Coroado I - 69077-000 Manaus-AM, Brasil. nazianofilizola@ufam.edu.br

### RESUMO

Este estudo analisa as propriedades ópticas aparentes do rio Negro durante o ano hidrológico 2016-2017. Foram avaliadas 130 medições de reflectância de sensoriamento remoto (Rrs) em conjunto com dados de sedimentos em suspensão e carbono orgânico dissolvido. Apesar da baixa resposta da água do rio Negro, devido a forte absorção da luz causado pela elevada quantidade de matéria orgânica dissolvida e baixa concentração de material inorgânico, foi possível identificar a variabilidade espacial e temporal da Rrs ao longo do baixo rio Negro. Identificamos a influência do material inorgânico em suspensão do rio Branco na alteração das propriedades ópticas aparentes do rio Negro no arquipélago de Anavilhanas. Nossos resultados indicam a possibilidade de uso de Rrs da região do vermelho ( $r$ : 0.86;  $R^2$ : 0.74 em 645 nm) para monitorar a dinâmica espacial e temporal do material inorgânico no baixo curso do rio Negro.

**Palavras-chave** — Reflectância de sensoriamento remoto, Água escura, Anavilhanas.

### ABSTRACT

*This study analyzes the apparent optical properties (AOP) of the Negro river during the hydrological year 2016-2017. We evaluated 130 remote sensing reflectance measurements (Rrs) in conjunction with suspended sediment and dissolved organic carbon data. Despite the low response of the Negro river water, due to the strong absorption of light caused by the high amount of dissolved organic matter and low concentration of inorganic material, it was possible to identify the spatial and temporal variability of the Rrs along the lower course of Negro river. We identified the influence of the inorganic material in suspension of the Branco river in the alteration of the AOP of the Negro river in the archipelago of Anavilhanas. Our results indicate the possibility of using Rrs of the red region (645 nm) to monitor the spatial and temporal dynamics of the inorganic material in the lower Rio Negro.*

**Key words** — Remote Sensing reflectance, Black water, Anavilhanas.

### 1. INTRODUÇÃO

Técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao estudo e monitoramento dos recursos hídricos têm seu uso consolidado pela comunidade científica. Com isso, diferentes abordagens são utilizadas em aplicações na área que se convencionou chamar de sensoriamento da água ou de hidrologia espacial.

Os grandes rios da bacia Amazônica é objeto pioneiro dos avanços obtidos nesta temática. Atualmente agências governamentais [1, 2] utilizam técnicas da hidrologia espacial para complementar o monitoramento dos recursos hídricos realizados *in situ*, uma vez que um grande conjunto de dados é adquirido com elevada frequência, por diferentes plataformas orbitais [3].

Na Amazônia, diferentes pesquisas foram desenvolvidas sobre as propriedades ópticas da água dos rios Madeira [4], Purus [5], Japurá [6], Solimões [7] e Amazonas [8]. No entanto, poucos estudos foram realizados a respeito do comportamento espectral de rios dominados por águas escuras, como o rio Negro, maior ecossistema de igapó da bacia Amazônica e maior sítio regional da convenção Ramsar. Para superar esta lacuna, atualmente o rio Negro é foco de investigações no escopo do pProjeto HIDROGEOS-NEGRO: contribuições do sensoriamento remoto no monitoramento dos recursos hídricos no Parque Nacional de Anavilhanas [9].

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar a variabilidade espacial e temporal da reflectância de sensoriamento remoto do rio Negro, o principal sistema fluvial de águas escuras da bacia Amazônica.

### 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado em um trecho de 300 km do baixo rio Negro, entre a região de confluência com o rio Branco até Manaus (Figura 1). O rio Negro é o segundo maior tributário de descarga líquida do rio Amazonas, com uma bacia de drenagem de 712.000 km<sup>2</sup> e elevada pluviosidade, o que lhe confere uma vazão média anual de quase 30 mil m<sup>3</sup>/s. Nesta bacia os solos são pobres de nutrientes, com a presença de podzol rasos, coberto por uma densa floresta equatorial com baixa taxa de erosão. Com exceção do rio Branco, a maioria dos rios nesta bacia contém baixo pH, grande quantidade de matéria orgânica

dissolvida e pouca carga de sedimentos em suspensão. O rio Branco é o principal sistema fluvial do estado de Roraima, contribui com aproximadamente 50% do fluxo sólido em suspensão no baixo rio Negro. Os sedimentos em suspensão são oriundos principalmente dos escudos das guianas e de áreas de savanas.

O clima da bacia é denominado tropical úmido, com precipitação média anual superior a 2.000 mm por ano. A variabilidade anual do nível da água chega a 11 metros, com período de inundação superior a sete meses, níveis máximos e mínimos ocorrendo nos meses de junho-julho e outubro-novembro, respectivamente.

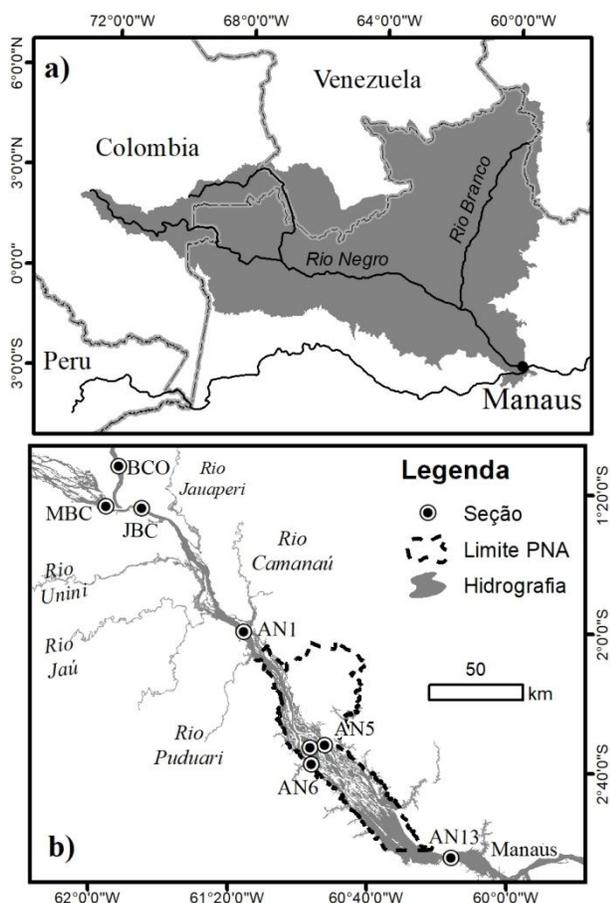


Figura 1. a) Localização da bacia do rio Negro. b) Localização das seções amostrais.

A Figura 1b apresenta a localização das oito seções amostrais. Nestas seções foram realizadas medições radiométricas e coleta de amostras de água em superfície durante sete campanhas no ano hidrológico 2016-2017. Um conjunto de 130 medições radiométricas da superfície da água foram realizadas utilizando radiômetros TriOS RAMSES que operam no intervalo espectral de 350-900 nm. A configuração dos equipamentos instalados na embarcação e a geometria de coleta dos dados radiométricos seguiu a proposta utilizada em trabalhos anteriores [4, 5, 7 e 10].

Em cada seção amostral foram coletadas nove amostras de água em suspensão a 30 cm de profundidade para determinar a concentração de material em suspensão (CSS) e três amostras para a concentração da matéria orgânica dissolvida (COD), seguindo os protocolos de [2] e [11-12], respectivamente.

Este trabalho buscou entender como as propriedades ópticas aparentes da superfície da água variam ao longo do rio Negro, em especial na região de confluência dos rios Negro-Branco e na região do arquipélago de Anavilhanas. Neste sentido, foram considerados os componentes opticamente ativos que modulam a cor da água, particularmente a CSS e o COD.

Foram realizadas medidas da Reflectância de Sensoriamento Remoto (Rrs) da superfície d'água para a simulação de imagens de sensores multiespectrais orbitais e aerotransportados, bem como a correlação com a CSS e COD em diferentes comprimentos de ondas. Para reduzir o efeito de *Sun Glint* foi assumido como zero a Rrs da água em 900 nm.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta o conjunto de medições de Rrs adquiridas pelo projeto em diferentes trechos do rio Negro e região de confluência com o rio Branco.

Tabela 1. Localização e data das campanhas realizadas pelo projeto.

Data	Período	Seção amostral	Medições
nov/2016	Seca	AN1	03
jan/2017	Seca	AN5 e AN6	06
mar/2017	Enchente	AN1	06
mai/2017	Cheia	AN1, AN4, AN5, AN6 e AN13.	23
jul/2017	Cheia	AN1, AN5, AN6, AN13, BCO, MBC, JBC.	37
out/2017	Seca	AN1, AN4, AN5 e AN6.	15
nov/2017	Seca	AN1, AN5, AN6, AN13, BCO, MBC, JBC.	40

Este conjunto de medições radiométricas permitiu registrar pela primeira vez a variabilidade espacial e temporal da Rrs no rio Negro. Apesar do baixo sinal registrado, e devido à forte absorção da luz ocasionada pela grande quantidade de matéria orgânica dissolvida, foi possível observar diferentes respostas espectrais ao longo da área de estudo.

A Figura 2 mostra os espectros de Rrs em função do comprimento de onda nas seções analisadas durante o ano hidrológico 2016-2017. A Figura 2a apresenta os espectros coletados na região de confluência dos rios Negro e Branco e a Figura 2b os espectros na região do arquipélago de Anavilhanas. Observamos uma clara redução nos valores de Rrs de montante para jusante, com maior resposta de Rrs no espectro do rio Branco e menor nas seções MBC, AN6 e AN13.

O comportamento espectral da reflectância típica do rio Negro pode ser observado na Figura 2a, com baixa Rrs (<0.002) ao longo do espectro da seção MBC devido a grande quantidade de matéria orgânica dissolvida e baixa concentração de material inorgânico presente na água, que ocasiona forte absorção da luz incidente na região entre 380-500 nm (violeta, azul e verde). Por outro lado, o espectro do rio Branco apresentou o maior valor de Rrs ( $\approx 0.015$ ) no intervalo verde-vermelho devido a maior carga material inorgânico em suspensão e a presença de fitoplâncton. O rio Branco apresentou máxima Rrs na banda do verde, por volta de 550 nm, feições de absorção em 609 e 676 nm, e um pico de menor intensidade em 810 nm.

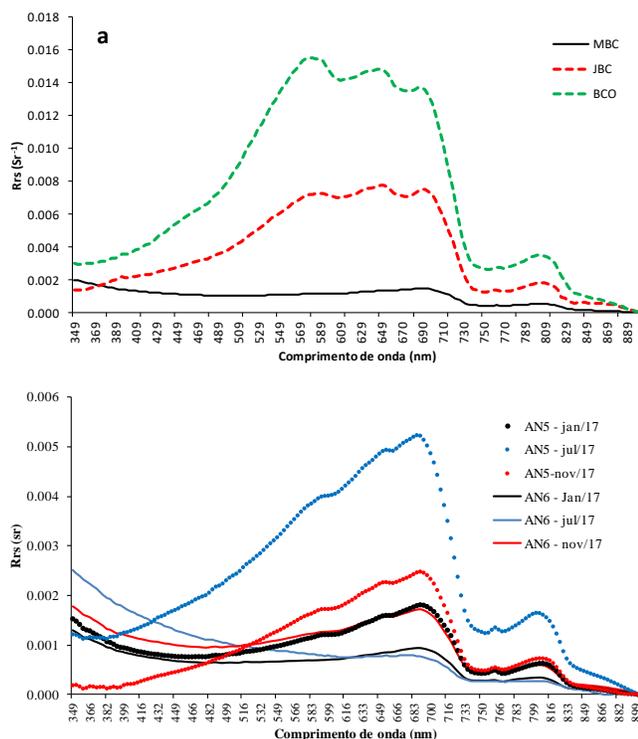


Figura 2. Rrs média observada na região de confluência dos rios Negro e Branco (a) e de Anavilhanas (b).

A Rrs observada no rio Negro após a confluência (seção JBC) apresentou maiores valores de Rrs nas bandas do verde e vermelho, assim como na seção BCO, mas de menor intensidade (Figura 2a). Foi observada uma diferença da ordem de 1.83 maior na Rrs em 690 nm entre as seções BCO e JBC, o que pode ser relacionado à diluição da carga suspensa do rio Branco após desaguar no rio Negro. Já a diferença em 690 nm entre os espectros das seções JBC e MBC foi da ordem de 5 vezes.

Os espectros de Rrs nas seções AN1, AN5 e AN4 mostram um crescimento rápido entre 470 e 650 nm, seguido por um pico na faixa entre 650 e 700 nm, uma rápida redução da Rrs entre 700 e 730 nm, e um pico de menor intensidade na região do infravermelho próximo (806

nm). As curvas das seções AN6 (canal da margem direita) e AN13 (Manaus) apresentou comportamento semelhante ao observado na seção MBC.

Nas seções analisadas próximo de Anavilhanas (Figura 2b) foi observado um pico principal de Rrs próximo de 690 nm (Infravermelho próximo). Estes picos de Rrs possuem intensidades diferentes, com maiores valores observados a montante de Anavilhanas (AN1), no canal da margem esquerda (AN5) e no lago Apacú (AN4), região com maior presença da CSS em relação às seções AN6 (margem direita) e AN13 (Manaus). A diferença de Rrs dos canais em Anavilhanas, entre as seções AN5 e AN6, foi da ordem de 2.7 vezes em 690 nm.

A variação temporal da Rrs em 657 nm antes e dentro dos canais de Anavilhanas pode ser observada na Figura 3, em conjunto com a variação do nível do rio Negro na estação fluviométrica de Novo Airão no período 2016-2017. Notamos que ao longo do ano a Rrs da seção AN6 (canal da margem direita) é sempre menor em relação ao observado nas seções AN1 (montante) e AN5 (canal da margem esquerda). Este padrão ocorre pelo fato de que ao longo do ano o transporte de sedimentos em suspensão possui um caminho preferencial pelo canal da margem esquerda de Anavilhanas, e isso contribui na alteração das propriedades ópticas do rio Negro nessa região.

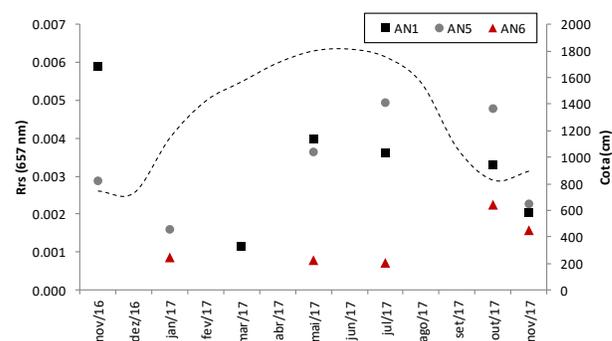


Figura 3. Variação temporal da Rrs em 657 nm nas seções localizada a montante e nos canais de Anavilhanas. Linha pontilhada corresponde ao nível do rio Negro.

Quanto a variabilidade temporal da CSS observamos um valor médio de 4.91 mg/L, com mínimo de 0.44 em AN1 na campanha de out/2017 e máximo de 18.67 na seção BCO em jul/17. Já os valores de COD no rio Negro foi de 9.15 mg/L, com mínimo de 4.24 mg/L na seção JBC em nov/2017 e máximo de 11.39 mg/L na seção AN1 em out/2017.

A Figura 4 apresenta os valores obtidos na correlação entre Rrs, CSS e COD em função do comprimento de onda. A análise da relação entre Rrs e a CSS das águas dos rios Negro e Branco indicam valores positivos de coeficientes de correlação, variando na região do visível de 0.37 (violeta) a 0.86 (vermelho). Por outro lado, a relação entre Rrs e a COD indicou valores negativos de coeficientes de

correlação na região do visível, variando de -0.04 em 380 nm e -0.61 em 703 nm. Observamos uma correlação negativa entre os valores de COD e CSS ( $r: -0.58$ ;  $R^2: 0.34$ ), comportamento que pode explicar parte do padrão observado na Figura 4.

Estes resultados indicam como a CSS e o COD influencia na resposta espectral da Rrs do rio Negro no visível e no infravermelho próximo, com uma clara relação entre o aumento da CSS e os maiores valores de Rrs, bem como na redução da Rrs em função da COD.

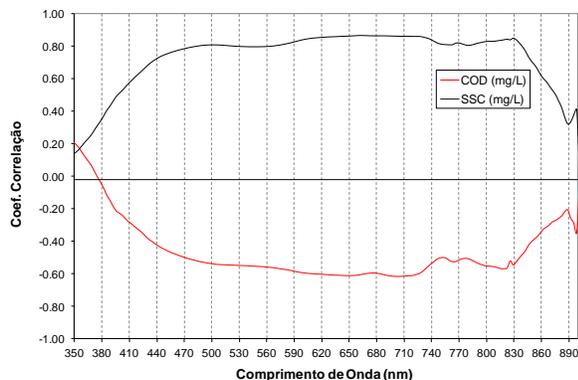


Figura 4. Correlograma entre Rrs, CSS e COD.

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os resultados do primeiro levantamento detalhado sobre as propriedades ópticas do rio Negro ao longo de um ciclo hidrológico. Apesar da baixa quantidade de carga inorgânica suspensa transportada, nossos resultados indicam a sensibilidade dos dados de refletância de sensoriamento remoto em detectar a variação espacial e temporal da CSS na água do rio Negro.

Foi possível detectar no arquipélago de Anavilhanas a influência do material em suspensão inorgânico oriundo do rio Branco, especialmente durante o período de água alta. Tal fato possibilitou identificar mudanças temporais nas propriedades ópticas do rio Negro, sobretudo no canal da margem esquerda do arquipélago.

Dois picos de Rrs foram identificados em todas as medições realizadas, um principal em 690 nm e outro de menor intensidade em 806 nm. Esta resposta indica que a banda do vermelho é a região espectral com maior possibilidade de detectar a dinâmica dos fluxos de matéria inorgânica suspensa no rio Negro. Modelos em desenvolvimento nesta pesquisa indicam que a CSS possui boa relação com a Rrs em 645 nm ( $r: 0.86$ ;  $R^2: 0.74$ ).

A biblioteca de espectros de Rrs coletada pelo projeto, em conjunto com dados de absorção, possibilitará ter um melhor conhecimento sobre as propriedades ópticas do rio Negro. Desta forma, poderemos identificar bandas espectrais de sensores orbitais e aerotransportados mais adequados para o monitoramento da qualidade dos recursos hídricos nesta região.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi desenvolvida com o apoio do CNPq, FAPEAM e IRD. Agradecemos a equipe gestora do Parque Nacional de Anavilhanas em Novo Airão pelo apoio logístico nas campanhas de campo. O primeiro autor agradece a Universidade Federal do Amazonas pela licença qualificação concedida.

#### 6. REFERÊNCIAS

- [1] Agência Nacional de Águas. Hidrosat - Monitoramento Hidrológico por Satélite. Disponível em < <http://hidrosat.ana.gov.br>>. Acesso em 06 de setembro de 2018.
- [2] SO HYBAM. Disponível < <http://www.ore-hybam.org/>>. Acesso em 06 de setembro de 2018.
- [3] Crétaux, J-F. Ocean and inland Waters. In: Cracknell, G.; Calvaud, R.; Roca, R. (Org.). *Climate Change & Satellites*. 1 ed. Paris: Sud[s] Concepts, 2015
- [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 remote-sensing images. *Journal of South American Earth Sciences*, v, 44, PP., 45–54, 2013.
- [5] Santos, A.L.M.R.; Martinez, J.M.; Filizola, N.P.; Armijos, E.; Alves, L.G.S. Purus River suspended sediment variability and contributions to the Amazon River from satellite data (2000–2015). *Comptes Rendus Geoscience*, v, 350, n, 1–2, pp., 13-19, 2018.
- [6] Novo, E.M.L.M.; Martins, V.S.; Affonso, A.G.; Montanher, O.C.; Carvalho, L.A.S.; Barbosa, C.C.F. Avaliação de imagens WFI/CBERS-4 no estudo dos tipos de água da Reserva de Desenvolvimento Sustentável de Mamirauá (AM). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18. (SBSR), 2017, Santos. Anais... São José dos Campos: INPE, 2017. p. 1020-1027.
- [7] 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, pp., 4-12, 2018.
- [8] Barbosa, C.C.F. Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas. Tese de doutorado em Sensoriamento Remoto. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2005.
- [9] Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Autorização para atividades com finalidade científica número: 56110-2. Data da Emissão: 14/11/2017. Brasília – DF.
- [10] Martinez, J.M.; Espinoza-Villar, R.; Armijos, E.; Silva M.L. The optical properties of river and floodplain waters in the Amazon River Basin: Implications for satellite-based measurements of suspended particulate matter. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v, 120, n, 7, pp. 1274-1287, 2015.
- [11] Forti, M.C.; Alcaide, R.L.M. Coletas, Preparação e análises de amostras de água. São José dos Campos: INPE, 2012.
- [12] Forti, M.C.; Alcaide, R.L.M. Manual de Procedimentos do Analisador de Carbono Total TOC -VCPN. São José dos Campos: INPE, 2012.