

# **Caracterização da distribuição espacial de $p\text{CO}_2$ na margem equatorial da foz do Rio Amazonas**

## **Resumo**

O tamanho e o volume das águas do Rio Amazonas impressionam, responsável por aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de toda água doce despejada no oceano, a pluma do Rio Amazonas se estende por centenas de quilômetros dentro do Atlântico Tropical Ocidental. Durante o percurso da água em toda sua extensão, ocorrem diferentes processos biogeoquímicos e ao desaguar no oceano, o rio tem um impacto direto na salinidade e temperatura da água e além da biota local. Sendo assim, o Rio Amazonas tem um papel fundamental para o cenário de balanço carbono global. A região de transição rio-oceano é altamente dinâmica e complexa e sua compreensão pode ser beneficiada pelo uso do Sensoriamento Remoto. Nesse sentido para uma melhor compreensão desse sistema é importante uma caracterização ambiental detalhada. Recentes estudos demonstram que o Rio Amazonas é um emissor de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) ainda maior do que até então descrito na literatura e o sensoriamento remoto é uma eficaz ferramenta para estimar a pressão parcial de dióxido de carbono ( $p\text{CO}_2$ ) da região. Com a utilização de algoritmos aplicados a dados de satélite, foi possível entender a distribuição da  $p\text{CO}_2$  em uma região de transição entre o Rio Amazonas e o Oceano Atlântico.

## **Introdução**

A realização de amostragens clássicas na foz do Rio Amazonas representa um desafio pra ciência. Nesse sentido o sensoriamento remoto é uma ferramenta importante para qualquer estudo que utilize a abordagem espaço-temporal. O sensoriamento remoto viabiliza o monitoramento da variabilidade das concentrações de carbono e outros parâmetros biogeoquímicos nas águas amazônicas.

A pluma do rio Amazonas pode se estender por uma área de até 106 Km<sup>2</sup> no Atlântico Norte Tropical Ocidental (MOLLERI et al., 2010). A salinidade é altamente variável e dependente da sazonalidade. A extensão da pluma é o resultado de vários processos incluindo a descarga do Rio Amazonas que varia sazonalmente, processo de advecção causado pelas correntes marinhas, chuvas oceânicas e turbulência causada por ventos sazonais (GRODSKY et al., 2014).

De acordo com estudos prévios feitos na região (SAWAKUCHI et al., 2017; WARD et al., 2015; BITTENCOURT; AMADIO, 2007) o ciclo sazonal de descarga do Rio Amazonas é definido como: enchente (Janeiro, Fevereiro e Março), cheia (Abril, Maio e Junho), Vazante (Julho, Agosto e Setembro) e seca (Outubro, Novembro e Dezembro).

### **Área de Estudo**

O banco de dados foi recortado na abrangência da margem equatorial da foz do rio Amazonas (15°N-5°S; 60°W-45°W) e com a utilização do software SeaDAS 7.4 (<https://seadas.gsfc.nasa.gov/>) foram realizadas as álgebras de mapas e aplicação das técnicas de geoprocessamento que resultaram nos mapas de caracterização proposta.

### **CDOM**

As substâncias amarelas (matéria orgânica dissolvida colorida, CDOM) é um grupo de substâncias dissolvidas, orgânicas, compostas por ácidos húmicos e fúlvicos. Podem ter origem local, por exemplo, da degradação de células fitoplânctônicas e subprodutos, ou podem ser trazidas até uma localidade a partir de uma fonte distante. Por exemplo, rios que fluem dentro de matas fechadas e/ou sobre solos ricos em matéria orgânica acumulam carga de

CDOM em seu curso. O CDOM presente na água que tem como origem fontes terrígenas está em maior concentração e maior complexidade molecular do que quando originado por degradação do fitoplâncton (IOCCG, 2000).

Particularmente alto no domínio espectral do ultravioleta, o espectro de absorção do CDOM tem um aumento exponencial em comprimentos de ondas menores (BRICAUD et al., 1981).

### **Pressão parcial de dióxido de carbono ( $p\text{CO}_2$ )**

A degradação contínua da matéria orgânica dissolvida através de processos biológicos e fotoquímicos contribuem para o aumento da pressão parcial de dióxido de carbono ( $p\text{CO}_2$ ) acima do equilíbrio com a atmosfera. A supersaturação do  $\text{CO}_2$  leva a uma evasão do fluxo de gás da água para a atmosfera (KOEHLER et al., 2014). Alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos em sistemas lênticos boreais e temperados (LARSEN et al., 2011). Existe uma escassez de trabalhos sobre a utilização da relação entre o CDOM e a  $p\text{CO}_2$  principalmente em regiões tropicais.

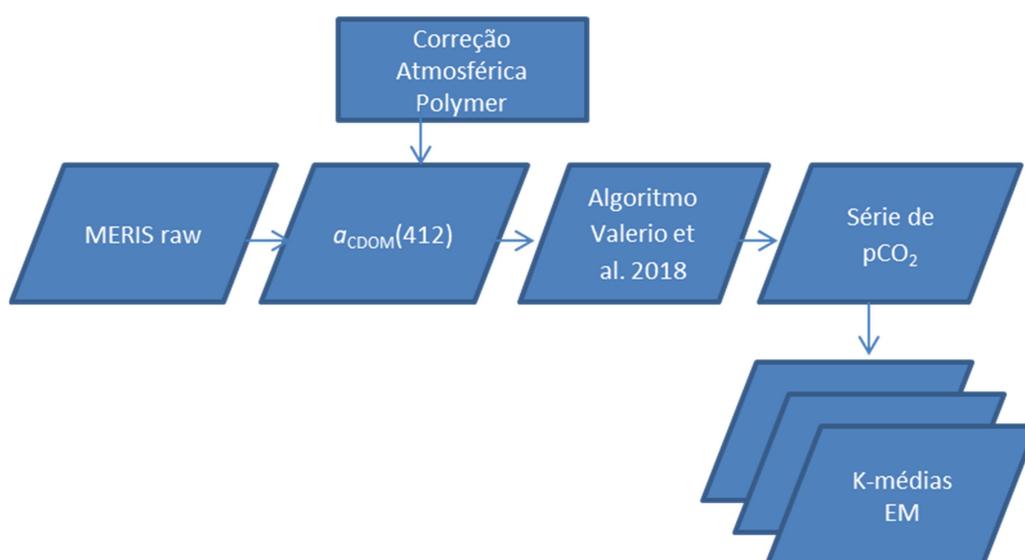
A utilização de algoritmos empíricos para a estimativa de parâmetros biogeoquímicos em oceanos vem amplamente sendo aplicada em séries de dados com diferentes aplicações científicas. O algoritmo utilizado para a estimativa do  $p\text{CO}_2$  foi desenvolvido no trabalho de Valério et. al., 2018, que realizou uma série de cruzeiros oceanográficos por toda a extensão do rio Amazonas e que com a utilização de técnicas estatísticas desenvolveu um modelo empírico para recuperação de valores de  $p\text{CO}_2$  utilizando dados de produtos de imagens de satélites.

Dessa forma, a região da pluma do rio Amazonas é determinante no balanço de carbono global e assim, o objetivo desse trabalho é a caracterização sazonal do  $p\text{CO}_2$  adquirido por dados de sensoriamento remoto.

## Materiais e Métodos

A Figura 1 apresenta o diagrama de classes do banco de dados (modelo OMT-G). O satélite ENVISAT (Environmental Satellite) desenvolvido pela Agência Espacial Européia (ESA) terminou suas operações no ano de 2012. Nele, o sensor MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer), um espectrômetro de média resolução espacial, operou na faixa do visível ao infravermelho próximo (400 a 900 nm) gerando um banco de dados muito representativo, de mais de uma década. Os dados MERIS são muito utilizados para a caracterização ambiental, principalmente em regiões costeiras e oceânicas. Um dos aspectos mais atraentes para a utilização desses dados para estimativas em ambientes aquáticos é a sensibilidade deste sensor aos principais componentes opticamente ativos da água, devido a sua configuração espectral planejada (MERIS, 2006). Nesse trabalho foi utilizado o banco de dados mensal do MERIS, para o período de Agosto de 2002 até Fevereiro de 2012. Onde foram feitas as médias sazonais para todo o período.

Figura 1 - Representação semântica do modelo de dados.



## Correção Atmosférica

A série de dados de satélites que foi utilizada nesse trabalho foi a do produto  $a_{CDOM}(412)$ , de nível 3, que foi adquirida pelo portal da ESA ([http://envisat.esa.int/level3/meris-level3/n412\\_2002.html](http://envisat.esa.int/level3/meris-level3/n412_2002.html)) e o algoritmo utilizado para a correção atmosférica desse banco foi o Polymer (STEINMETZ et al., 2011), onde as imagens com mais de 30% de dados espúrios não foram utilizadas nesse estudo.

## Algoritmo $pCO_2$

O trabalho de Valerio et al. (2018) descreve as relações entre a distribuição da  $pCO_2$  com outros parâmetros ambientais como clorofila, temperatura e CDOM. Um dos algoritmos empíricos propostos nesse trabalho é o que determina a recuperação dos dados de  $pCO_2$  por meio dos valores de  $a_{CDOM}(412)$ , que está descrito na equação 1.

Equação 1: 
$$pCO_2 = 1240 * a_{CDOM}(412) - 1845$$

## K Médias

O algoritmo de agrupamento (clustering) K-médias é um método de classificação não supervisionada e foi utilizado para classificar as imagens médias dos períodos de descarga (enchente, cheia, vazante e seca). Os algoritmos de classificação não supervisionada são utilizados quando não se conhece o comportamento do conjunto de dados utilizados para definir os clusters, o que o torna menos sujeito a erros do usuário (VANTREPOTTE, et al., 2012). O software seadas sugere uma quantidade mínima de classes (5)

para a realização do procedimento, buscou-se utilizar a mesma quantidade de classes para todos os períodos.

### **Expectation–maximization (EM)**

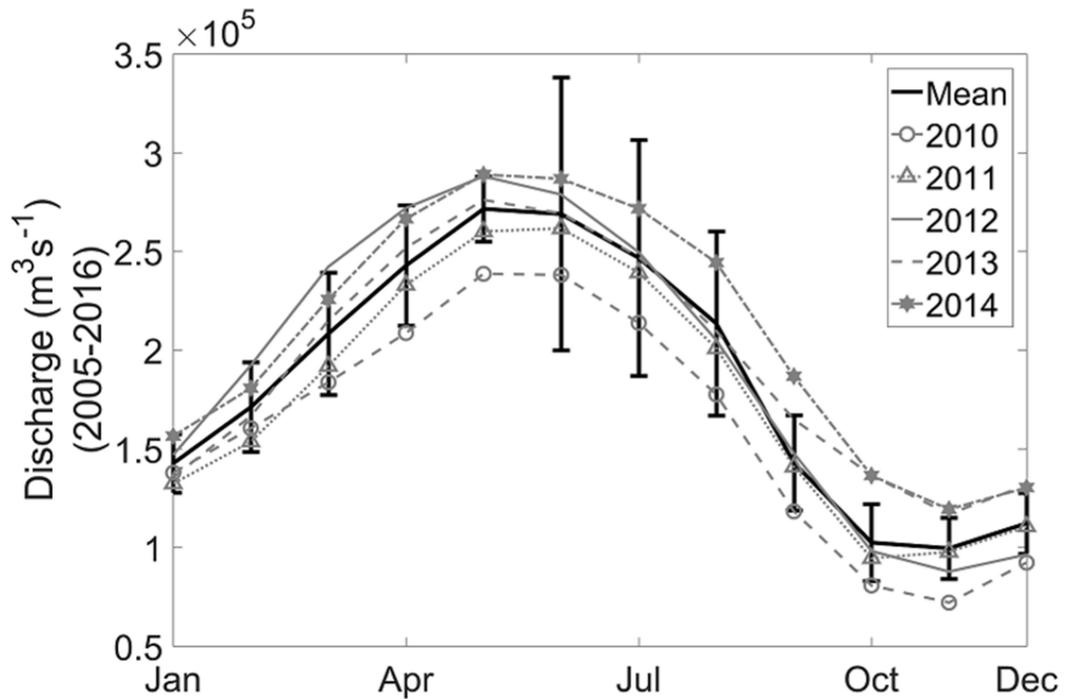
De acordo com Korting e Dutra. (2007), o algoritmo EM é baseado na teoria bayesiana onde um pixel de uma imagem pode se comportar de maneira diferente se vier da região de borda. Portanto, o comportamento global é provavelmente uma mistura dos dois comportamentos distintos. O objetivo das distribuições de misturas é produzir um modelo probabilístico composto por um conjunto de subclasses. Nessa abordagem, cada classe é caracterizada por um conjunto de parâmetros que descrevem a média e a variância dos componentes espectrais. Foi utilizada na classificação as probabilidades dos maiores valores de  $a_{CDOM}(412)$  na matriz, para isso foi estabelecido um limiar mínimo de de  $3500\mu\text{atm}$  na série.

### **Resultados e Discussão**

Todos os processamentos e análises foram feitos no software Seadas 7.4 da NASA (<https://seadas.gsfc.nasa.gov/>). Por meio da utilização da matemática de bandas, os algoritmos foram aplicados e as imagens médias foram geradas. Os valores foram selecionados de acordo com o período de descarga já descrito em trabalhos anteriores (figura 2). Com a aplicação do algoritmo K Médias sobre a série de médias foi gerada a Figura 2. É interessante notar a progressão do padrão da classe 4 no tempo (que são os pixels que têm o menor valor agrupados). Como o limiar de  $3500\mu\text{atm}$  (que foi a divisão de classe que agrupava os maiores valores de  $p\text{CO}_2$ ) não mostrou uma boa visualização do resultado da classificação, optou-se por aplicar o algoritmo Expectation–maximization, disponível no mesmo software. Então foram selecionadas as imagens de probabilidades da classe de maior valor,

evidenciando que o período de vazante que apresenta maior probabilidade de ter os maiores valores de  $p\text{CO}_2$  na parte adjacente a boca do rio, na entrada da pluma no oceano.

Figura 2 – Valores de descarga do Rio Amazonas entre os anos de 2010 e 2014. (Fonte: Adaptado de Valério et. al. 2018).



As matrizes de dados de  $a_{\text{CDOM}}(412)$  que possuíam menos de 70 % de valores válidos foram utilizadas no processamento. Da série, apenas 3 imagens não foram usadas.

Figura 3 – Aplicação da técnica de classificação por K-médias aplicado sobre as médias dos períodos representativos da descarga do rio Amazonas. A – Enchente, B – Cheia, C – Vazante e D – Seca.

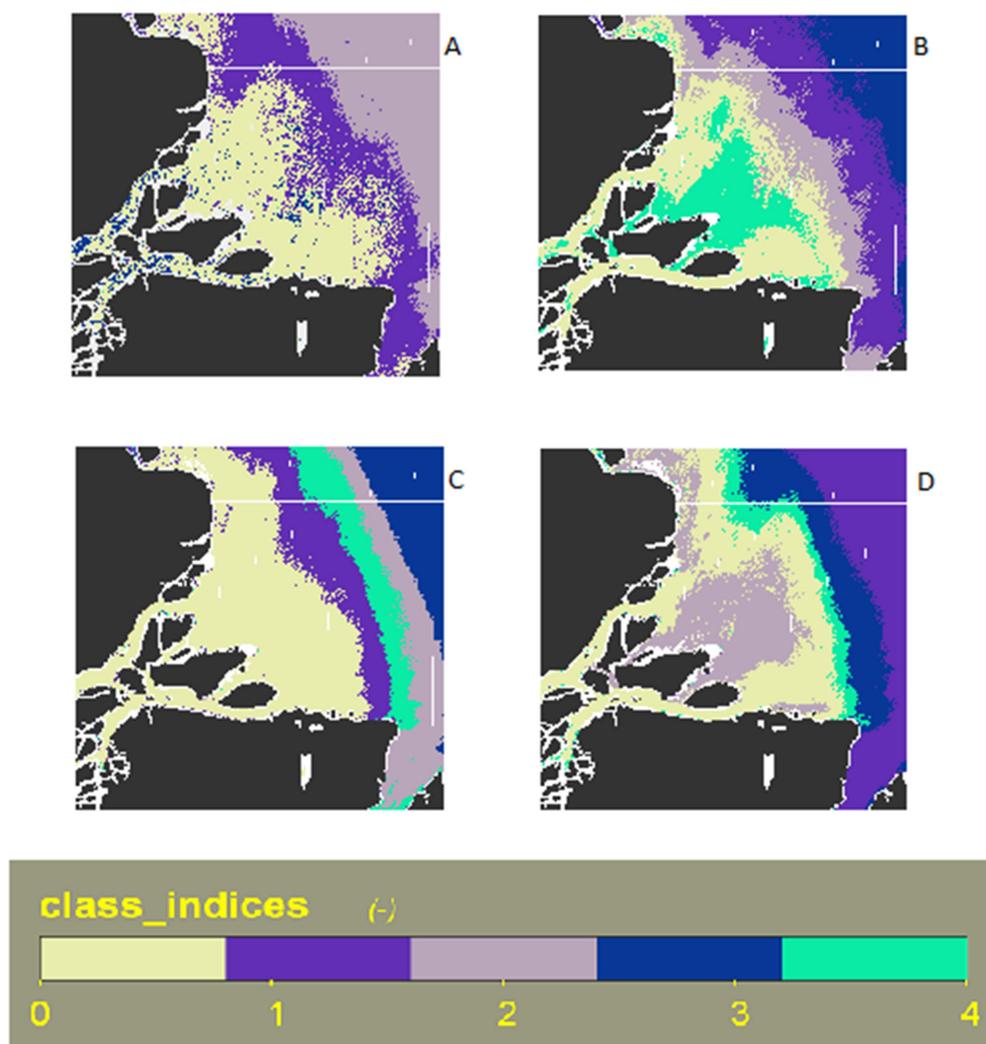
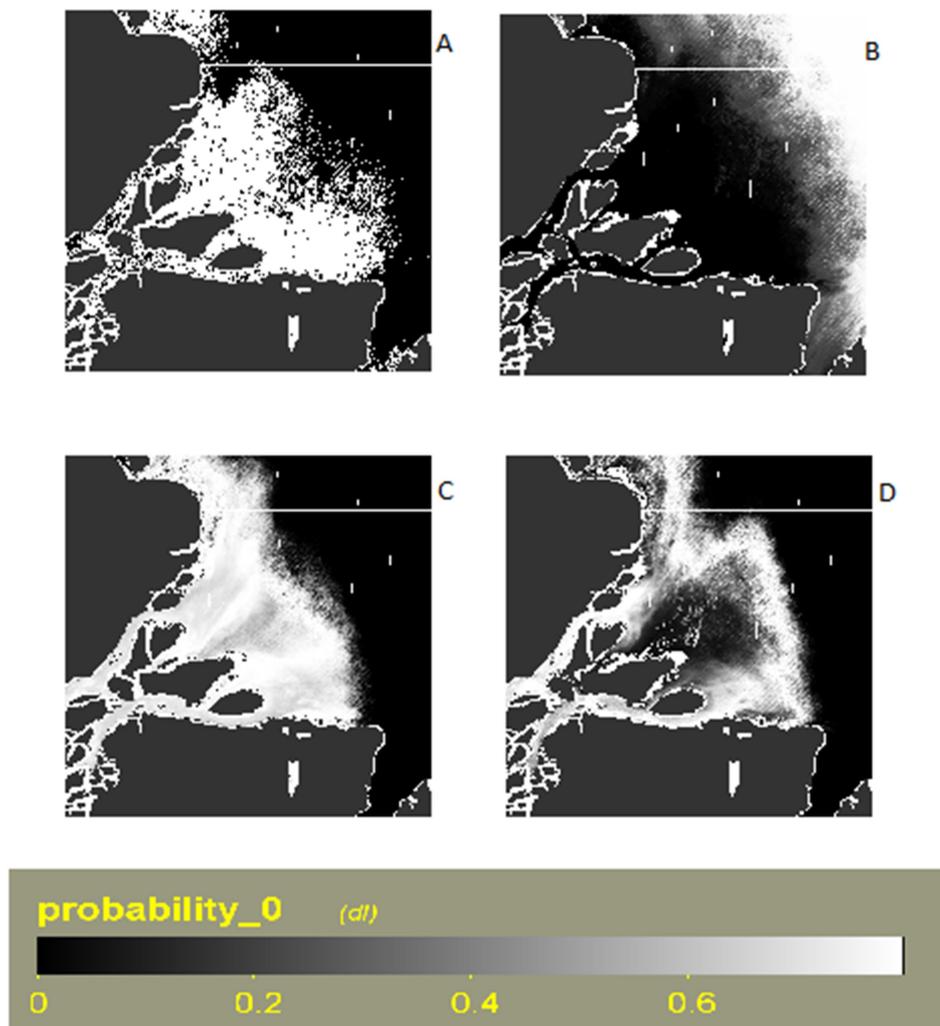


Figura 4 – Aplicação da técnica de Classificação por Expectation–maximization, aplicado sobre as médias dos períodos representativos da descarga do rio Amazonas. A – Enchente, B – Cheia, C – Vazante e D – Seca.



## Conclusão

Com a utilização de técnicas estatísticas e de geoprocessamento para análise de variabilidade espaço temporal foi feita a caracterização sazonal da  $p\text{CO}_2$  na

margem equatorial da foz do rio Amazonas utilizando dados de sensoriamento remoto. A classificação das imagens médias para o período de vazante apresentaram os maiores valores de  $p\text{CO}_2$  agrupados na boca do rio, a aplicação do Expectation–maximization serviu para confirmar esse fato.

## **Referências Bibliográficas**

BITTENCOURT, M. M.; AMADIO, S. A. Proposta para identificação rápida dos períodos hidrológicos em áreas de várzea Do Rio Solimões-Amazonas nas proximidades de Manaus. **Acta Amazonica** v. 37, n. 2, p. 303-308, 2007.

BRICAUD, A.; MOREL, A.; PRIEUR, L. Absorption by Dissolved Organic Matter of the Sea (Yellow Substance) in the UV and Visible Domains. **Limnology and Oceanography**, v. 26, n. 1, p. 43–53, 1981.

GRODSKY, S. A.; REVERDIN, G.; CARTON, J. A.; COLES, V. J. Year-to-year salinity changes in the Amazon plume: Contrasting 2011 and 2012 Aquarius/SACD and SMOS satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 140, p. 14–22, 2014.

International Ocean Colour Coordinating Group - IOCCG. **Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex waters**. Report Number 3. 2000. 139 p.

KOEHLER, B.; LANDELIUS, T.; WEYHENMEYER, G. A.; MACHIDA, N.; TRANVIK, L. J. Sunlight-induced carbon dioxide emissions from inland waters. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 28, p. 696–711, 2014.

KORTING, T. S., DUTRA, L. V. Improvements to Expectation-Maximization approach for unsupervised classification of remote sensing data. In: IX Brazilian Symposium on GeoInformatics, Campos do Jordão, Brazil, November 25-28, 2007, INPE, p. 3-11.

LARSEN, S.; ANDERSEN, T.; HESSEN, D. O. The pCO<sub>2</sub> in boreal lakes: Organic carbon as a universal predictor? **Global Biogeochemical Cycles**, v. 25, n. 2, p. 1–8, 2011.

MOLLERI, G. S. F.; NOVO, E. M. L. D. M.; KAMPEL, M. Space-time variability of the Amazon River plume based on satellite ocean color. **Continental Shelf Research**, v. 30, n. 3–4, p. 342–352, 2010.

MERIS. **Product handbook**. European Space Agency (ESA), 2006. Issue 2.1. 130 p. Disponível em: <[https://earth.esa.int/pub/ESA\\_DOC/ENVISAT/MERIS/meris.ProductHandbook.2\\_1.pdf](https://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/ENVISAT/MERIS/meris.ProductHandbook.2_1.pdf)>

SAWAKUCHI, H. O.; NEU, V.; WARD, N. D.; BARROS, M. D. L. C.; VALERIO, A.; GAGNEMAYNARD, W.; CUNHA, A. C.; FERNANDA, D.; DINIZ, J. E.; BRITO, D. C.; KRUSCHE, A. V.; RICHEY, J. E. Carbon dioxide emissions along the lower Amazon River. **Frontiers in Marine Science**, v. 4, p. 1–12, 2017.

STEINMETZ, F.; DESCHAMPS, P.-Y.; RAMON, D. Atmospheric correction in presence of sun glint: application to MERIS. **Opt Express**, v. 19, n. 10, p.9783-9800, 2011.

WARD, N. D.; KRUSCHE, A. V.; SAWAKUCHI, H. O.; BRITO, D. C.; CUNHA, A. C.; MOURA, J. M. S.; DA SILVA, R.; YAGER, P. L.; KEIL, R. G.; RICHEY, J. E. The compositional evolution of dissolved and particulate organic matter along the lower Amazon River Óbidos to the ocean. **Marine Chemistry**, v. 177, p. 244–256, 2015.

VALERIO, A. M., KAMPEL, M. VANTREPOTTE, V., WARD, N. D., SAWAKUCHI, H. O. LESS, D. F. S., NEU, V., CUNHA, A., RICHEY, J. "Using CDOM optical properties for estimating DOC concentrations and pCO<sub>2</sub> in the Lower Amazon River," **Opt. Express** v. 26, p. A657-A677, 2018.

VANTREPOTTE, V.; LOISEL, H.; DESSAILLY, D.; MÉRIAUX, X. Optical classification of contrasted coastal waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 123, p. 306–323, 2012.