

Caracterização espectral, físico-química e bio-óptica das águas sob a influência do Rio Amazonas

Gustavo Souto Fontes Molleri¹
Evelyn Márcia Leão de Moraes Novo¹
Milton Kampel¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
(molleri, evlyn, milton)@dsr.inpe.br

Abstract. The large amount of dissolved and particulate material discharged by the Amazon River into the Atlantic Ocean cause its waters to have a distinct spectral response when compared with the nearby ocean waters. This paper shows the application of k-means clustering algorithm in classify, through the spectral behavior, water masses in the region under the Amazon River plume influence. Salinity and temperature data from 67 oceanographic stations were related to Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS), remote sensing reflectance values and bio-optical products: (i) chlorophyll-*a* concentration, (ii) water attenuation coefficient and (iii) absorption coefficient of dissolved and particulate material. Four different water masses were identified such as: (1) oceanic water, (2) intermediary oceanic water, (3) intermediary river plume water and (4) Amazon River plume water. Based on the spectral behavior of these water masses the results suggest that the main active optical component of the waters in that region is the dissolved and particulate organic material originated mostly from the Amazon River.

Palavras-chave: remote sensing, amazon river, salinity plume, spectral behavior, cluster analysis, sensoriamento remoto, rio amazonas, pluma de salinidade, comportamento espectral, análise por agrupamento.

1. Introdução

As descargas dos rios correspondem a importantes fontes de nutrientes, materiais orgânicos e inorgânicos, dissolvidos e particulados para as regiões costeiras adjacentes e, conseqüentemente, para os oceanos (Dagg et al., 2004; Geyer et al., 2004). Estes aportes têm grandes influências nos processos geomorfológicos, biogeoquímicos e bio-ópticos destas regiões (DeMaster e Pope, 1996; Froidefond et al., 2002; Hu et al., 2004; Richey et al., 1990; Smith e DeMaster, 1996; Vecchio e Subramaniam, 2004). No caso do Rio Amazonas, que se destaca a nível global pelo volume de água ($630 \times 10^{10} \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$), sedimentos ($115 \times 10^7 \text{ ton ano}^{-1}$) e pelas dimensões da bacia de drenagem ($6,1 \times 10^6 \text{ km}^2$), as influências alcançam proporções regionais e globais, conforme demonstrado anteriormente (Geyer et al., 1996; Milliman e Meade, 1983; Nittrouer e DeMaster, 1996). Portanto, a pluma de salinidade do Rio Amazonas no oceano caracteriza-se não só pela baixa salinidade (Lentz, 1995), mas também, pela grande quantidade de material dissolvido e particulado.

Os diversos componentes opticamente ativos (COA) – fitoplâncton, partículas orgânicas e inorgânicas a clorofiladas e matéria orgânica dissolvida colorida ‘yellow substance’ (Kirk, 1983; Prieur e Sathyendranath, 1981) presentes na pluma deste rio fazem com que esta feição apresente um comportamento espectral distinto em relação às águas do Oceano Atlântico Equatorial e região costeira adjacente conforme demonstrado por Froidefond et al. (2002) e Vecchio e Subramaniam (2004).

Acredita-se, portanto, que este comportamento espectral permita identificar as águas sob a influência deste rio a partir de dados adquiridos por sensoriamento remoto orbital. Neste sentido, o presente artigo teve como objetivos: (1) identificar, a partir do algoritmo k-médias, massas de águas com características espectrais distintas existentes na região do Oceano Atlântico Equatorial sob a influência do Rio Amazonas, (2) caracterizar as propriedades físico-químicas e bio-ópticas dos diferentes tipos de massas de água identificados, e (3) propor curvas de reflectância características das massas de água identificadas (*endmembers*).

2. Metodologia de Trabalho

A seqüência de procedimentos realizados neste estudo é apresentada na Figura 1. A descrição de cada procedimento é apresentada a seguir.

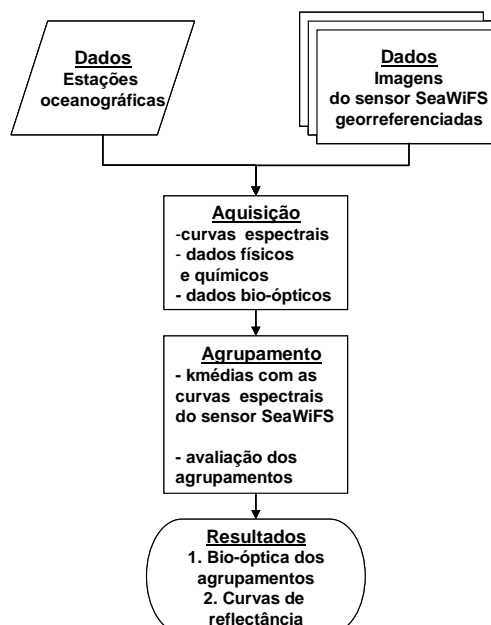


Figura 1. Seqüência de procedimentos realizados neste estudo.

2.1. Dados de estações oceanográficas

Foram utilizados dados superficiais (< 4m) de salinidade e temperatura de 67 estações oceanográficas realizadas entre as coordenadas 20° N - 5° S de latitude e 59° O - 40° O de longitude entre os anos 1999-2007 (Figura 2 – A). Estes dados foram adquiridos nas seguintes fontes: *World Ocean Database* (<http://www.nodc.noaa.gov/>), e Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil (Projeto Revizee III).

2.2. Imagens de sensoriamento remoto orbital

As coordenadas referentes aos dados das estações oceanográficas foram utilizadas para extrair os seguintes dados das imagens nível 2 do sensor *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* – SeaWiFS: (1) reflectância de sensoriamento remoto (Rrs) nas bandas 412, 443, 490, 510, 555 e 670nm (Figura 2 – B), (2) concentração de clorofila *a* – CHL- (mg·m⁻³) estimada pelo algoritmo OC4 versão 4 (O'Reilly et al., 1998), (3) coeficiente de atenuação vertical da luz difusa na água - K₄₉₀ (m⁻¹) (O'Reilly et al., 2000) e (4) coeficiente de absorção pela matéria orgânica dissolvida e detritos - a_{dg443} (Maritorena et al., 2002).

Os dados das imagens foram extraídos utilizando-se a média de uma janela 3x3 pixels centrada nas coordenadas da estação oceanográfica da mesma data. Esta abordagem visa minimizar possíveis erros de georreferenciamento das imagens e falta de dados decorrentes da cobertura de nuvens na área de estudo.

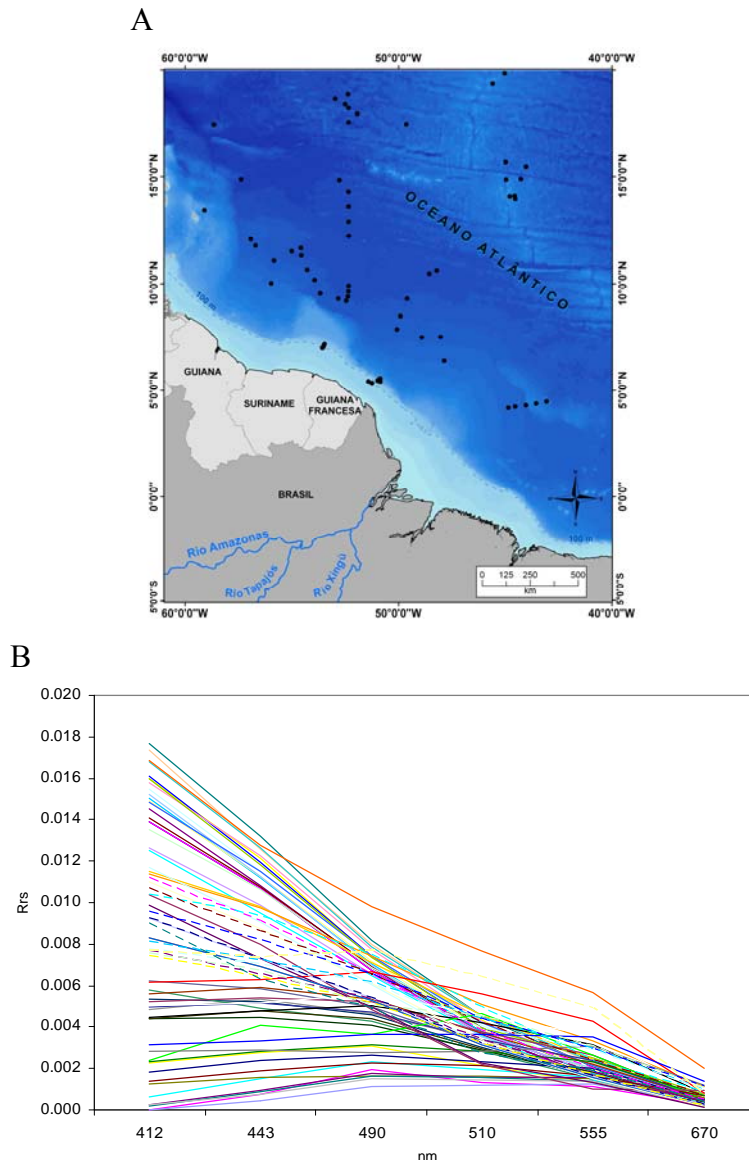


Figura 2. (A) Mapa de localização das estações oceanográficas utilizadas no estudo. (B) 67 curvas de Rrs extraídas das bandas do sensor SeaWiFS nas coordenadas referentes às estações oceanográficas (ver item 2.1).

2.3. Análise por agrupamentos ‘cluster analysis’

Análises por agrupamentos são importantes ferramentas de análise exploratória de dados (Vesanto, 2001). O algoritmo k-médias é bastante utilizado neste tipo de análise por não necessitar da definição prévia de classes, ou seja, é um método não-supervisionada, e por apresentar resultados significativos quanto à distribuição dos dados (Mather, 1999). Neste estudo foi aplicada a técnica k-médias para o agrupamento das 67 curvas de Rrs extraídas das imagens SeaWiFS referentes a cada estação oceanográfica (Figura 2 - B) (ver item 2.1).

Entretanto, definir o número de grupos que será utilizado na análise de agrupamentos é um dos problemas encontrados na aplicação desta técnica (Maxwell, 1971; Still e Bialek, 2004). Portanto, a fim de identificar qual o número de grupos que melhor explicaria o agrupamento das curvas de Rrs foram realizados testes com a aplicação da equação denominada *silhouette* (Equação 1), no software Matlab 7, para agrupamentos com 2 até 7 grupos (ver Figura 3).

$$s(i) = \frac{\min((b(i, v)) - a(i))}{\max(a(i), \min(b(i, v)))} \quad (1)$$

Onde, i é a curva de Rrs analisada, $s(i)$ é o valor *silhouette*, $a(i)$ é a distância média da curva i para outras curvas no agrupamento em que esta se encontra, $b(i)$ é a distância média da curva i para as curvas em outros agrupamentos e (v) é referente ao número de variáveis analisadas (e.g. bandas de Rrs). A Figura 3 resultante desta função permite identificar a distância de cada curva classificada em um determinado grupo em relação às curvas dos demais grupos. As medidas positivas e próximas a +1 indicam que as curvas em um determinado grupo estão distantes das curvas dos demais grupos. Valores próximos a 0 sugerem curvas que não apresentam grandes distâncias em relação aos demais grupos. Valores negativos e próximos a -1 indicam curvas que foram agrupadas de forma errada (ver Figura 3).

Neste estudo, portanto, foi utilizado como critério de definição do número de agrupamentos, o número de grupos de curvas que não apresentaram valores negativos, ou seja, resultaram em grupos em que as curvas de Rrs eram mais semelhantes entre si.

3. Resultados e Discussão

Na Figura 3 observa-se que as curvas de Rrs distribuídas em 4 grupos não ocorrem valores negativos indicando, portanto, um melhor agrupamento. Contudo, mesmo corretamente agrupadas em alguns casos os valores das curvas foram baixos (<0,3). Isto indica que muitas curvas não apresentaram grandes distâncias em relação às curvas dos demais grupos, características que também foram identificadas nos demais agrupamentos.

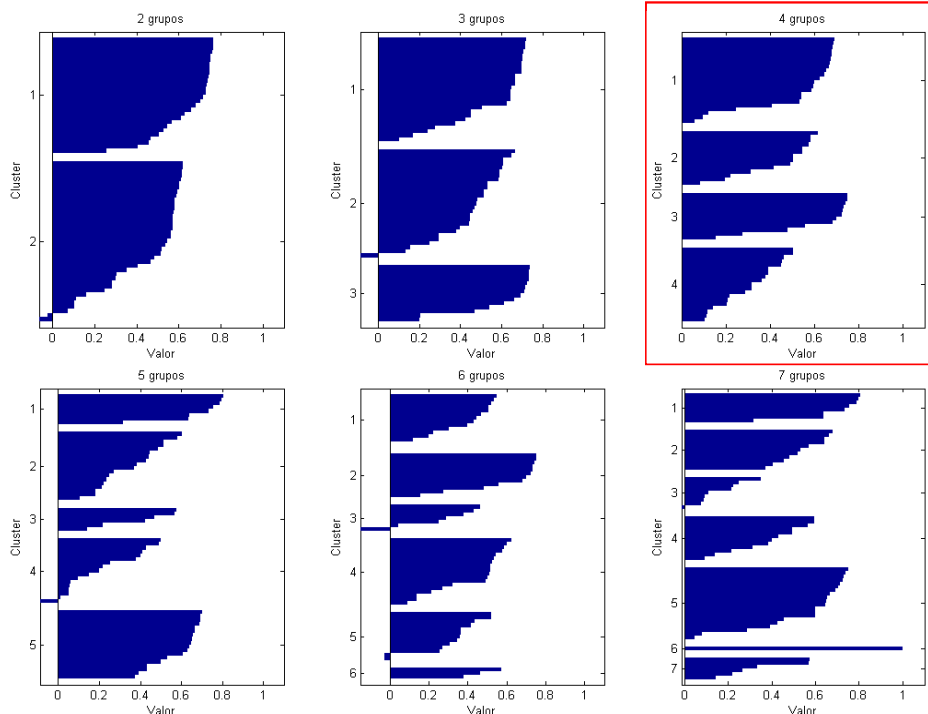


Figura 3. Gráfico *silhouette* (ver texto) utilizado para identificar o número de grupos que melhor explicaria a distribuição dos dados. O agrupamento realizado com 4 grupos (retângulo vermelho) apresentou os melhores resultados por ser o único a apresentar todos os valores positivos.

Este resultado indicou a presença de 4 tipos diferentes de massas de água na região de estudo. A Figura 4 apresenta as curvas de Rrs representativas das 4 massas de água identificadas pelo algoritmo k-médias.

A curva referente à massa de água 1 apresentou um comportamento espectral de águas denominadas de “puras” (Prieur e Sathyendranath, 1981), ou seja, com baixa concentração de constituintes dissolvidos ou particulados, o que é demonstrado pelas baixas valores de CHL, K490 e a_{dg443} (Figuras 4 e 5 – C, D e E). Esta massa de água apresentou valores de salinidade entre 35-38 psu e temperaturas entre 20-32 °C (Figura 5 – A e B). Com base nestes dados físico-químicos, esta pode ser considerada como uma massa de água oceânica.

A curva da massa de água 4 apresentou os menores valores relativos de Rrs (Figura 4). Este comportamento é característico de águas com elevada concentração de matéria orgânica dissolvida o que foi comprovado pelos altos valores de a_{dg443} nesta massa de água (Figura 5 - F). As altas concentrações de CHL identificadas nesta massa de água (Figura 5 – D) podem ter sido causadas por problemas do algoritmo OC4 v4 em águas do Caso 2 (Prieur e Sathyendranath, 1981), como é o caso das águas na região de estudo (Hu et al., 2004; Muller-Karger et al., 1995; Vecchio e Subramaniam, 2004). A massa de água 4 apresentou temperaturas entre 26-29 °C e salinidades entre 28-34 psu (Figura 5 – A e B). Esta característica sugere que estas águas são influenciadas pela pluma de salinidade do Rio Amazonas.

As águas referentes aos grupos 2 e 3 apresentaram características espectrais, físico-químicas e bio-ópticas de massas de água intermediárias entre os dois grupos mencionados anteriormente (Figura 4). A massa de água 2 mostra valores de salinidade e concentração de matéria orgânica dissolvida e particulada mais próxima ao de águas oceânicas (Figura 5). A massa de água 3 por sua vez apresenta uma maior influência da pluma do Rio Amazonas principalmente pelos baixos valores de salinidade (Figura 5-B) e altas concentrações de matéria orgânica dissolvida e particulada (Figura 5-E).

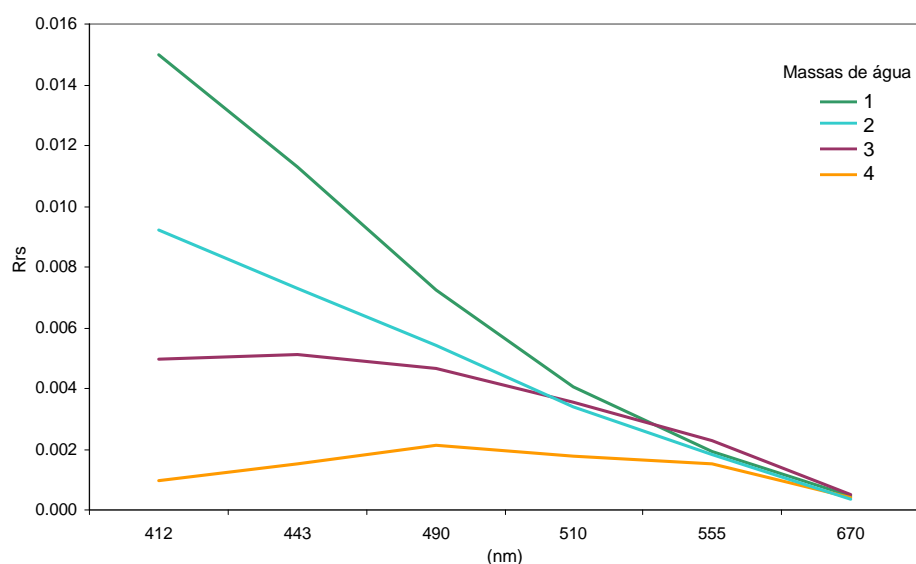


Figura 4. Curvas de Rrs representativas das massas de água: (1) oceânica, (2) oceânica intermediária, (3) pluma de salinidade intermediária, e (4) pluma de salinidade do Rio Amazonas.

De maneira geral, ao analisarmos os espectros característicos de cada grupo pode-se observar que as maiores variações nos valores de Rrs estão localizadas nos menores comprimentos de onda 412-443nm. Nesta região do espectro eletromagnético ocorre forte absorção pela matéria orgânica dissolvida colorida (Kirk, 1983; Morel e Prieur, 1977; Prieur e

Sathyendranath, 1981). Observa-se, também, que os valores de Rrs diminuem em direção a comprimentos de onda maiores. Este comportamento permite inferir que o principal COA atuando nas propriedades ópticas dessas águas é a matéria orgânica dissolvida.

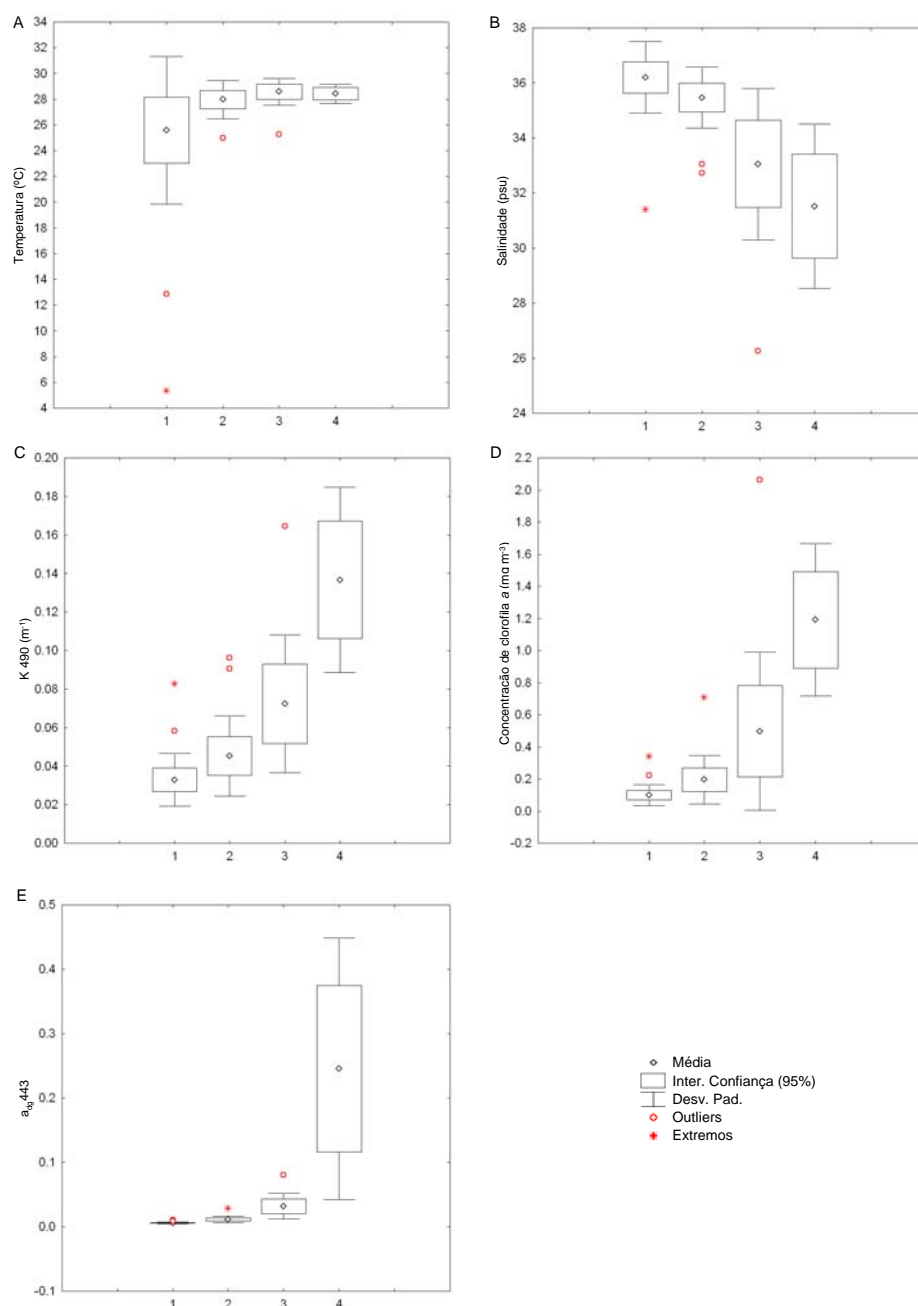


Figura 5. Informações estatísticas relativas às propriedades físico-químicas - (A) temperatura, (B) salinidade e bio-ópticas (C) K 490, (D) CHL e (E) a_{dg443} (ver texto) dos 4 grupos de massas de água identificados na análise por k-médias.

4. Conclusões

O algoritmo de agrupamento k-médias aplicado a um conjunto de 67 curvas de reflectância de sensoriamento remoto, adquiridas a partir de imagens do sensor SeaWiFS, identificou 4 tipos diferentes de massa de água na região sob influência do Rio Amazonas. As massas de água classificadas mostraram diferentes propriedades físico-químicas e bio-ópticas. Estas apresentaram características de águas: (1) oceânicas, (2) oceânica intermediária, (3) pluma de salinidade intermediária, e (4) pluma de salinidade do Rio Amazonas. Os resultados

obtidos neste estudo sugerem que a matéria orgânica dissolvida colorida é o principal COA atuando nas propriedades ópticas da água na área de estudo. Supõem-se, portanto, que esta matéria orgânica dissolvida e detritos são originários, principalmente, do Rio Amazonas.

Agradecimentos

Gustavo Souto Fontes Moller é bolsista de Desenvolvimento Tecnológico Industrial do CNPq - Nível 7D.

5. Referências Bibliográficas

Dagg, M.; Benner, R.; Lohrenz, S.; Lawrence, D. Transformation of dissolved and particulate materials on continental shelves influenced by large rivers: plume processes. **Continental Shelf Research**, v. 24, n. 7-8, p. 833–858, 2004.

DeMaster, D. J.; Pope, R. H. Nutrient dynamics in Amazon shelf waters: results from AMASSEDS. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 3, p. 263-289, 1996.

Froidefond, J. M.; Gardel, L.; Guiral, D. I.; Parra, M.; Ternon, J. F. Spectral remote sensing reflectances of coastal waters in French Guiana under the Amazon influence. **Remote Sensing of Environment** v. 80, n. 2, p. 225–232, 2002.

Geyer, W. R.; Beardsley, R. C.; Lentz, S. J.; Candela, J.; Limenburner, R.; Johns, W. E.; Castro, B. M.; Soares, I. D. Physical oceanography of the Amazon shelf. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 5-6, p. 575-616, 1996.

Geyer, W. R.; Hill, P. S.; Kineke, G. C. The transport, transformation and dispersal of sediment by buoyant coastal flows. **Continental Shelf Research**, v. 24, n. 7-8, p. 927-949, 2004.

Hu, C.; Montgomery, E. T.; Schmitt, R. W.; Muller-Karger, F. E. The dispersal of the Amazon and Orinoco River water in the tropical Atlantic and Caribbean Sea: observation from space and S-PALACE floats. **Deep-Sea Research II**, v. 51, n. 10-11, p. 1151–1171, 2004.

Kirk, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 401 p.

Lentz, S. J. Seasonal variations in the horizontal structure of the Amazon Plume inferred from historical hydrographic data. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. C2, p. 2391-2400, 1995.

Maritorena, S. p.; Siegel, D. A.; Peterson, A. R. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. **Applied Optics**, v. 41, n. 15, p. 2705-2714, 2002.

Mather, P. M. **Computer processing of remotely sensed images: an introduction**. Ed. 2. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1999. 292 p.

Maxwell, A. E. Multivariate Statistical Methods and Classification Problems. **The British Journal of Psychiatry**, v. 119, n., p. 121-127, 1971.

Milliman, J. D.; Meade, R. H. World-wide delivery of river sediment to the oceans. **Journal of Geology**, v. 91, n. 1, p. 1-21, 1983.

Morel, A.; Prieur, L. Analysis of variations in ocean color. **Limnology and Oceanography**, v. 22, n. 4, p. 709-722, 1977.

Muller-Karger, F. E.; Richardson, P. L.; McGillicuddy, D. On the offshore dispersal of the Amazon's Plume in the North Atlantic: Comments on the paper by A. Longhurst, "Seasonal cooling and blooming in tropical oceans". **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 42, n. 11-12, p. 2127-2131, 1995.

Nittrouer, C. A.; DeMaster, D. J. The Amazon shelf setting: tropical, energetic, and influenced by a large river. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 5-6, p. 553-573, 1996.

O'Reilly, J. E.; Maritorena, S.; Mitchell, B. G.; Siegel, D. A.; Carder, K. L.; Garver, S. A.; Kahru, M.; McClain, C. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. C11, p. 24,937–24,954, 1998.

O'Reilly, J. E.; Mueller, J. L.; Mitchell, B. G.; Kahru, M.; Chavez, F. P.; Strutton, P.; Cota, G. F.; Hooker, S. B.; McClain, C. R.; Carder, K. L.; Muller-karger, F.; Harding, L.; Magnunson, A.; Phinney, D.; Moore, G. F.; Aiken, J.; Arrigo, K. R.; Letelier, R.; Culver, M. **SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses**. Part 3, Vol. 11. NASA Tech, NASA Goddard Space Flight Center, 2000. 49 p.

Prieur, L.; Sathyendranath, S. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials. **Limnology and Oceanography**, v. 26, n. 4, p. 671-689, 1981.
Richey, J. E.; Hedges, J. I.; Devol, A. H.; Quay, P. D.; Victoria, R.; Martinelli, L.; Forsberg, B. R. Biogeochemistry of carbon in the Amazon River. **Limnology and Oceanography**, v. 35, n. 2, p. 352-371, 1990.

Smith, W. O.; DeMaster, D. J. Phytoplankton biomass and productivity in the Amazon River plume: correlation with seasonal river discharge. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 3, p. 291-319, 1996.

Still, S.; Bialek, W. How Many Clusters? An Information-Theoretic Perspective. **Neural Computation**, v. 16, n., p. 2483-2506, 2004.

Vecchio, R. D.; Subramaniam, A. Influence of the Amazon River on the surface optical properties of the western tropical North Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. C11001, p. 1-13, 2004.

Vesanto, J. Importance of Individual Variables in the k-Means Algorithm. In: Pacific-Asia Conference Advances in Knowledge Discovery and Data Mining, 2001, **Proceedings**. 2001. p. 513–518.