

Monitoramento por satélite dos fluxos sedimentares na bacia do rio Purus, Amazônia, Brasil

Andre Luis Martinelli Real dos Santos ¹
Thiago Pimentel Marinho ⁴
Jean Michel Martinez ^{2,3}
Naziano Pantoja Filizola Junior ⁴
Achiles Eduardo Guerra de Castro Monteiro ¹

¹ Serviço Geológico do Brasil - CPRM
CEP 22290-240 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil
andre.santos@cprm.gov.br; achiles.monteiro@cprm.gov.br

² Université de Toulouse; UPS (SVT-OMP) - LMTG;
14 Av, Edouard Belin, F-31400 Toulouse, France.
jean-michel.martinez@ird.fr

³ IRD; LMTG;
Caixa Postal 7091, Lago Sul, 71619-970 Brasília, Brasil.
jean-michel.martinez@ird.fr

⁴ Universidade Federal do Amazonas - UFAM
Manaus - AM, Brasil
naziano.filizola@gmail.com; thp.marinho@gmail.com

Abstract. The Purus river one of the major tributaries of Solimões river, stretches over almost 3700 km, extends across twenty one municipalities, thirteen in Acre state and eight in Amazonas state. This river drains an area of almost 376000 km², 73% in Amazonas state, 21% in Acre state, 5,5% in Peru and 0,5% in Bolivia. Its sources are in Peru 500 meters high and flows into Solimões 200 km above Manaus. With others tributaries of Solimões's right bank, it drains the Fitzcarraldo Arc which represents the most inner deformation due to the contact of Nazca and Southamerican plates in South America's western coast. The dynamics of formation and erosion of this basin is not well studied yet if compared with neighboring basins of Ucayali and Madeira rivers. The aim of this paper is to present some insights over hydrological and sedimentological dynamics of Purus river. Recently, Martinez et al. (2009) using MODIS sensors showed that is possible to monitor Amazon river's sediment concentration and realize the balance between sediment discharge and time series of many years. The water's optical properties are strongly influenced by the sediments (type and chemical contents). The satellite's images from 2000 (MODIS images available) will be calibrated with radiometric data and sediments' samples from Purus near Beruri. It's also important to investigate and qualify the relationship between reflectance measured by satellite and water sediments in Purus river basin which is geomorphologically diverse compared to Solimões/Amazon river.

Palavras-chave: Remote sensing, Image processing, Sedimentology, Hidrology.

1. Introdução

O processo erosivo presente na superfície da Terra leva, anualmente para os Oceanos, cerca de 20 bilhões de toneladas de sedimento através dos rios (Allen, 2008). Contudo, nos sistemas tropicais, como o Amazônico, essa contribuição é mais significativa. Estas bacias associadas contribuem com 50% dos sólidos em suspensão e 38% dos sólidos dissolvidos que vão para os oceanos (Milliman e Meade, 1983; Guyot, 1993; Latrubesse et al., 2005).

Na Bacia Amazônica, 90% da descarga sedimentar, estimada em um bilhão de toneladas/ano, são decorrentes dos tributários Andinos (Latrubesse et al., 2005, Filizola e Guyot, 2011 e Filizola et al., 2011).

Além do transporte do material em suspensão, há uma forte variabilidade no estoque de material sedimentar dentro da bacia, especialmente nas áreas de várzea (Meade, 2007).

Dentro deste contexto, da grande Bacia Amazônica, o presente estudo se detem no caso específico da bacia hidrográfica do Rio Purus, um dos maiores tributários do Rio Solimões, que percorre aproximadamente 3.700 km, desde suas nascentes no Peru até a sua foz no Rio Solimões-Amazonas e drena uma área de aproximadamente 376.000,00 km².

A bacia do Rio Purus possui particularidades geomorfológicas pouco estudadas, dentre elas o Arco de Fitzcarraldo, apesar de recentemente discutido por Espurt et al. (2007). Por se tratar de uma zona de difícil acesso um monitoramento hidrometeorológico adequado se apresenta como bastante desafiador, sobretudo para ser realizado *in situ*.

A bacia do Rio Purus é pouco antropizada e seus impactos decorrentes da ocupação são relacionados principalmente a atividades agropecuárias e exploração de madeira. Essas atividades estão aumentando como atesta a classificação do município de Labrea dentre os que mais desmatam na Amazônia.

Segundo Filizola et al. (2012), as influências decorrentes do Arco de Fitzcarraldo na produção de sedimentos, assim como sua existência, ainda é assunto que demanda esforços em pesquisa, sobretudo trabalho de campo, monitoramento e levantamento bibliográfico, também uma análise biogeográfica, geocronológica da área pode ajudar a entender a situação do alto estrutural e sua influência. O monitoramento nesta área deveria ocorrer em intervalo de tempo regular, o suficiente para medir as variações das concentrações dos elementos geoquímicos e dos sedimentos depositados ao longo do ciclo hidrológico, em particular entre os períodos de águas baixas e altas.

Sabe-se que a precisão e a relevância do monitoramento hidrológico estão diretamente relacionadas ao número de parâmetros monitorados e à quantidade de dados adquiridos. A partir de Agosto de 2011, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM iniciou monitoramento mensal em uma estação hidrometeorológica localizada no município de Beruri, cerca de 30 km da foz, na margem direita do Rio Purus, a Figura 1 mostra o mapa que contém a área de estudo, incluindo Beruri e as demais estações fluviométricas existentes na área.

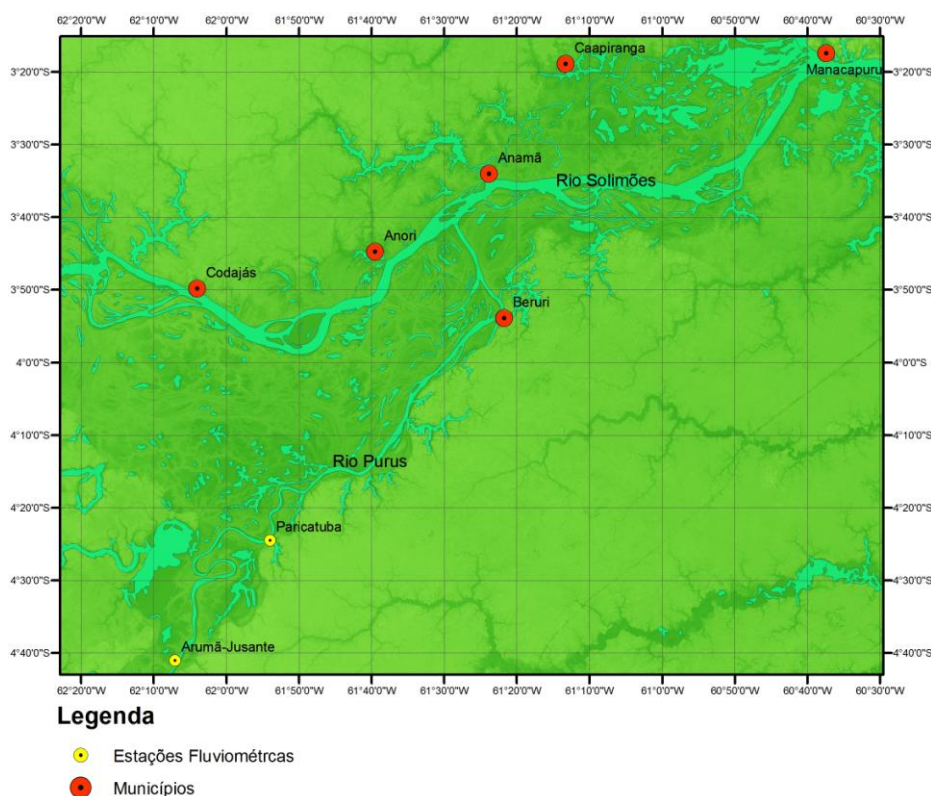


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo, atenção para o município de Beruri.

Das estações da Figura 1, quanto às de Paricatuba e Arumã-Jusante, a primeira é visitada trimestralmente pelo Serviço Geológico do Brasil, e nela ocorrem medições de vazão e coleta de sedimentos; a segunda foi uma estação utilizada por Filizola et al., 2012, em seu trabalho sobre fluxo de matéria em suspensão na Amazônia Ocidental e servem de referência para o presente estudo.

2. Metodologia de Trabalho

O trabalho foi desenvolvido em três etapas, coleta de dados em campo, análise das amostras em laboratório e o processamento dos dados no escritório. Mensalmente ocorre trabalho de campo na área de interesse através do Projeto Dinâmica Fluvial do Serviço Geológico do Brasil, onde são realizados trabalhos de: medição de vazão com um Perfilador Doppler-Acústico de Corrente (ADCP), coleta de dados radiométricos com sistema de radiômetros Trios, coleta de água para determinação de sedimentos em suspensão, com amostrador pontual hidrodinâmico, e nivelamento por GPS das réguas fluviométricas das estações do projeto. A Figura 2 ilustra os equipamentos mencionados.



Figura 2. Equipamentos utilizados no trabalho de campo: A) ADCP Rio Grande 600 Khz, marca Teldyne RD Instruments; B) sistema de espectro-radiômetros Trios; C) Amostrador de água para determinação de sedimentos em suspensão e D) GPS para nivelamento de réguas.

A seção de medição de descarga em Beruri tem coordenada de margem direita: S003,9125° e W061,3919°. Na seção transversal do Rio Purus nesta estação são utilizadas duas verticais (virtuais) onde se coletam as amostras de sedimentos. São retiradas, nestas verticais, amostras de dois litros na superfície, a 30%, 60% e 90% de profundidade.

Durante todo o processo de medição, o sistema com os espectro-radiômetros realiza aquisição de dados de reflectância, pois segundo Martinez et al. (2009), a medição da luz refletida pela água traz informação sobre sua qualidade.

Portanto, no campo são retirados dados de vazão líquida, reflectância para associar a cor da água com a concentração de sedimentos, amostras de água para as análises em laboratório de concentração de sedimentos em suspensão e de granulometria. O resultado deste trabalho associado permite que se calcule uma vazão sólida na área de estudo.

As amostras obtidas em campo são encaminhadas para o laboratório LAMIN da superintendência regional da CPRM em Manaus, que está acreditado e equipado com granulômetro-laser, espectrofotômetro e demais equipamentos capazes de realizar as análises e fornecer dados com qualidade, segurança e precisão..

O processamento dos dados de reflectância obtidos em campo é utilizado para calibração das imagens de satélite do sensor MODIS, o que é realizado no escritório

O sensor MODIS esta presente em dois satélites, o Terra (lançado em 18 de dezembro de 1999) e o Aqua (lançado em quatro de maio de 2002), ambos da NASA. Seus produtos são imagens com disponibilização gratuita. Novo et al., 2007 destaca que apesar do sensor MODIS ser especificado para atender aplicações em sistemas aquáticos marítimos, as pesquisas voltadas para os sistemas aquáticos continentais podem ser beneficiadas por essas imagens, a Tabela 1 exemplifica o exposto.

Tabela 1. Caracterização das possibilidades de estudos e produtos resultantes, com a utilização das imagens dos sensores MODIS, aplicados em águas continentais.

Fonte: Novo et al., 2007, p. 266.

Característica		Relevância
Órbita	Heliossíncroma	Geometria de iluminação padronizada.
Altitude	705 Km	
Horário de Passagem (Equador)	10:30/13:30	Resposta de curto prazo a forçantes climáticas tais como radiação, pressão e vento.
Bandas	36*	Quatro bandas para estudos da cor da água.
Resolução Especial	250m/500m	Limita as aplicações a grandes sistemas aquáticos – estudos regionais
Resolução Temporal	1 ou 2 vezes ao dia**	Aumenta a probabilidade de aquisição de imagens sem cobertura de nuvens e a frequência de dados úteis.
Resolução Radiométrica	Quantização em 12 bits	Aumenta a capacidade de detecção de mudanças sutis de reflectância da água, aspecto fundamental tendo em vista a baixa radiação pelos corpos d'água.
Largura da Faixa Imageada	2.230 Km	Permite o imageamento instantâneo de grandes corpos d'água, garantido a aquisição de dados antes que haja a modificação das propriedades do sistema.

* As bandas 1 a 7 são usadas para aplicações terrestres e as bandas de 8 a 36 foram projetadas, primeiramente, para estudos atmosféricos e oceanográficos.

** Considerando-se a existência de dois sensores idênticos nas duas plataformas passando em horários diferentes. A frequência da passagem sobre o mesmo ponto diminui nas baixas latitudes.

Uma primeira vantagem está na largura da faixa de recobrimento pelo sensor a qual permite a aquisição instantânea de dados sobre grandes extensões de rios e lagos. Se comparada com imagens do sensor TM do satélite Landsat-5, apenas uma imagem MODIS é suficiente para cobrir áreas de grande extensão, não necessitando de um conjunto de imagens para análise (NOVO et al., 2007).

Outra vantagem destacada por Novo et al., (2007) é a resolução radiométrica, o que permite registrar variações de intensidade de sinal discretizadas em 4.096 níveis (12 bits) tornando possível detectar variações de energia refletida pelos ambientes aquáticos (caracterizados por baixa intensidade de sinal). Ou seja, com as imagens MODIS é possível constatar uma maior riqueza de informações sobre a cor da água. Segundo Martinez .. (??), a

presença de material particulado e dissolvido nas águas, afeta os processos de absorção e espalhamento da luz, logo existe uma correlação entre as propriedades óticas e a qualidade ou conteúdo de sedimentos presentes nelas.

Portanto o que se pretende é estabelecer relações consistentes entre o sinal de radiância (luz espalhada pela água) com os componentes óticamente ativos. Para isso será medido *in situ* a reflectância, que é uma grandeza diretamente comparável com o sinal de satélite e a atenuação da luz dentro da coluna de água.

Na aplicação em sistemas aquáticos continentais, as bandas mais adequadas do ponto de vista espectral seriam as utilizadas para aplicações oceanográficas. Essas bandas estão em maior número e localizadas em região do espectro eletromagnético que permitem observar feições específicas de certos componentes óticamente ativos, como por exemplo os sedimentos em suspensão. No entanto, essas bandas se caracterizam pela baixa resolução espacial (1 Km) limitando sua aplicação em águas continentais em função da homogeneização de diversos alvos em um só pixel (NOVO et al., 2007).

Nessas circunstâncias Novo et al. (2007) destacam que as bandas 1 a 7 são as mais adequadas por possuírem resoluções especiais de 250m (bandas 1 e 2) e 500m (bandas de 3 a 7). Com essas resoluções é possível estudar um grande número de rios e lagos amazônicos.

As imagens do sensor MODIS têm dimensões de 1° x 1° demandando potência de sistemas computacionais ou um longo tempo processamento. O Observatório Ambiental HYBAM (www.ore-hybam.org), liderado pelo IRD (Instituto Francês de Pesquisas para o Desenvolvimento) em parceria com instituições francesas, brasileiras e dos demais países Amazônicos, elencou áreas de interesse e assim promoveu recortes de áreas menores específicas dentro de cada imagem MODIS.

Por meio de dois softwares de processamento (GETMODIS e o MOD3R) desenvolvidos pelos pesquisadores do IRD, é possível baixar as imagens da plataforma de dados da NASA, fazer interface com o Google Earth e realizar o tratamento dos recortes feitos nas imagens. O principal objetivo desses dois softwares é reduzir o tempo de processamento realizando análises apenas nas áreas específicas de estudo.

Atualmente o projeto HYBAM conta com 57 recortes na Amazônia e nordeste brasileiro. No Amazonas são 17 recortes, um deles no rio Purus área de estudo deste trabalho. A Figura 3 mostra os recortes dentro da interface do Google Earth.



Figura 3. Os retângulos vermelhos são os recortes eleitos pelo ORE/HYBAM. Um destes recortes compreende a área de estudo, contendo o município de Beruri-AM. Fonte: www.ore-hybam.org.

O software GETMODIS é responsável por realizar o download das imagens e criação das máscaras de onde serão extraídos os dados de radiação infravermelha. Na Amazônia Brasileira todos os recortes compreendem uma área onde se localiza uma estação hidrométrica, e por isso o nome/código destas estações, estabelecido pela Agência Nacional de Águas (ANA), é mantido nos recortes. É possível nesse primeiro momento escolher a estação/recorte, o período das imagens, o satélite (Terra ou Aqua) e a resolução (250m ou 500m).

Realizado o download das imagens o software atua com a interface no Google Earth para a criação da máscara utilizada na pesquisa. A máscara é, na verdade, um polígono do qual serão extraídas informações da radiação infravermelha. Somente a partir desta máscara existirá a possibilidade do MOD3R extrair as informações, caso não haja a criação das máscaras, a informação seria uma média de todos os corpos d'água presentes no recorte o que prejudicaria a análise do rio analisado, no caso o Rio Purus.

No Google Earth é criado um polígono respeitando os limites que compreendem apenas o corpo d'água. Esse polígono é utilizado pelo software GETMODIS, que cria na imagem MODIS uma máscara de pontos, onde cada um representa uma coleta de dados de radiação infravermelha.

O software MOD3R é responsável pelo processamento das imagens e pela geração de um relatório descritivo com os dados extraídos da máscara. Para cada imagem processada são gerados dois produtos, um gráfico com as dimensões do recorte e da máscara criada indicando os pontos onde foi possível a obtenção de dados e uma planilha em formato .xml descrevendo todos os dados extraídos e dando um índice de qualidade da informação extraída em cada imagem.

Na planilha acima citada, o valor zero indica que a imagem teve cobertura total de nuvens referente à máscara. O valor três indica que houve aquisição dos dados em parte da máscara, mas em condições insuficientes para a análise. O valor dois indica que houve aquisição de dados em parte significativa da máscara, mas os dados devem ser vistos com cautela. O valor um indica que houve aquisição dos dados em toda ou grande parte da máscara e que a interferência por nuvem foi insignificante. Para este trabalho foram selecionados os critérios um e dois.

3. Resultados e Discussão

Como mencionado anteriormente, a reflectância da água depende dos componentes presentes no meio e estes revelam a propriedade de cor da água. A Figura 4 mostra as curvas de reflectância para a estação de Beruri-AM em quatro datas distintas. Se pode verificar que as curvas possuem características similares quando se analisa a variação de reflectância nas bandas vermelho e infravermelho.

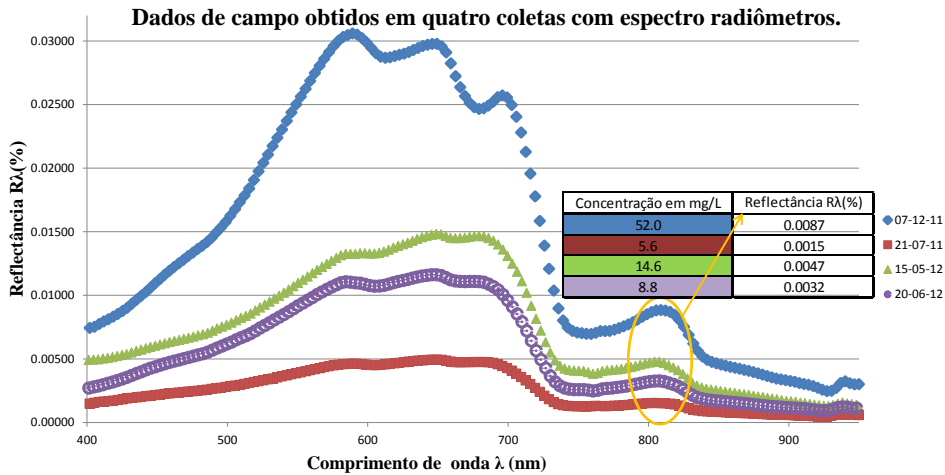


Figura 4. Gráfico com as assinaturas espectrais na seção de medição de Beruri-AM, nele as reflectâncias de quatro amostras de campo em datas diferentes. Em destaque no interior do círculo o sinal na banda no infravermelho.

Percebe-se que essas grandezas são diretamente proporcionais. Percebe-se uma menor concentração de sedimentos em suspensão no período de águas altas. Na região estudada este período corresponde ao trimestre de maio a julho. Estes meses estão representados no gráfico e seus valores são bem inferiores se comparados ao valor apresentado para dezembro, mês de águas baixas, que foi de 52 mg/L.

O período utilizado de aquisição das imagens MODIS foi de 2000 a 2011. A Figura 5 apresenta o resultado do cruzamento da média mensal e interanual da radiação na banda do vermelho com a média mensal e interanual das cotas.

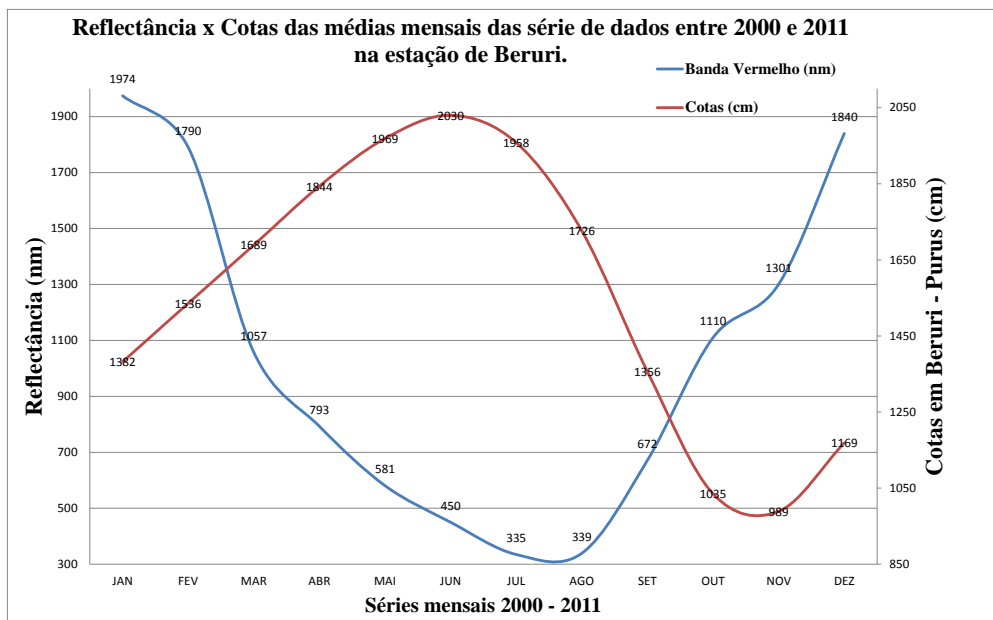


Figura 5. Gráfico com o cruzamento de dados das cotas com os de reflectância na banda do vermelho.

A figura 5 deixa clara a relação inversa entre a reflectância e cota na região analisada, fato decorrente de nos meses de águas baixas a concentração de sedimentos em suspensão ser maior, ocasionando maior reflectância, já na situação de cheia, há maior diluição e depósito de material no leito e consequentemente menor concentração de material suspenso gerando assim menor reflectância.

Para que seja possível realizar um maior número de medições espectralométricas uma unidade está sendo adquirido pelo Projeto Dinâmica Fluvial da CPRM e outra pelo

Laboratório de Potamologia da Universidade Federal do Amazonas (LAPA/UFAM) as quais estarão disponíveis para uso nos estudos subseqüentes que serão estendidos para toda a calha do Rio Purus.

4. Conclusões

No presente trabalho mostrou-se que a aplicação de tecnologia de sensoriamento remoto e processamento de imagens de satélites constituem uma importante ferramenta de otimização no monitoramento hidro-sedimentológico. É certo que não substitui o monitoramento convencional, *in situ*, porém traz a possibilidade de que, com o avanço dos estudos áreas remotas possam vir a ser monitoradas de forma virtual, após um minucioso estudo validação a partir de dados coletados em campo. Este estudo abre a perspectiva para o uso das técnicas em pauta para um estudo da hidro-sedimentologia do Rio Purus trazendo uma melhora, tanto quantitativa quanto qualitativa, em relação à disponibilização de dados atualmente realizados no contexto da rede hidrometeorológica no Brasil. Vale enfatizar que o esforço em permanecer realizando as coletas de campo é fundamental, sendo inclusive, para uma melhor validação, intensificar o número de visitas às estações.

Referências Bibliográficas

ALLEN, PHILIP A. 2008. **From landscapes into geological history**. Nature 451, 274-276 (17 January 2008).

ESPINOZA, RAUL. **Monitoramento das dinâmicas espaciais e temporais dos fluxos sedimentares na bacia amazônica a partir de imagens de satélite**. Qualificação de Doutorado. Brasília-DF, UNB, Maio 2011.

FILIZOLA, NAZIANO, GUYOT J.L. Fluxo de sedimentos em suspensão nos Rios da Amazônia. Revista Brasileira de Geociências, dezembro de 2011.

FILIZOLA, NAZIANO, GUYOT J.L., BEISL C., MIRANDA F.P. O fluxo de matéria em suspensão na Amazônia Ocidental como marcador da dinâmica fluvial. Manaus, 2011.

ESPERT, N., BABY, P., BRUSSET, S., RODDAZ, M., HERMOZA, W., REGARD, V., ANTOINE, P.-O., SALAS-GISMONDI, R. E BOLAÑOS, R. How does the Nazca Ridge subduction influence the modern Amazonian foreland basin?. Geology, June 2007, v. 35; no. 6. p.515-518.

FILIZOLA, N ; GUYOT, J L ; WITTMANN, H. ; MARTINEZ, J M ; OLIVEIRA, Eurides de . The Significance of Suspended Sediment Transport Determination on the Amazonian Hydrological Scenario. In: Andrew J. Manning. (Org.). Sediment Transport in Aquatic Environments. Sediment Transport in Aquatic Environments. : InTech, 2011.

GUYOT J.L, FILIZOLA, N. **Balço do fluxo de sedimentos em suspensão da Bacia Amazônica**. Workshop Geotecnologias Aplicadas às Áreas de Várzea da Amazônia, Manaus, 2007, p.83-91.

GUYOT J.L, FILIZOLA, N., MOLINIER M., GUIMARÃES V., OLIVEIRA E., FREITAS M.A. 2002. **Caracterização hidrológica da Bacia Amazônica**.

LATRUBESSE, E.M.; STEVAUX, J.C.; SINHA, R. 2005. **Grandes sistemas fluviais tropicais: uma visão geral**. Revista Brasileira de Geomorfologia, Ano 6 número 1 (2005) 01-18.

MARTINEZ, J. M, FILIZOLA, N., GUYOT, J. L., SONDAG, F. 2009. **Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data**.

NOVO, E.M.L.M., HAMSOM, J.D., e CURRAN, P.J., 1989, **The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentrations**: International journal of remote sensing, v. 10, p. 1283-1289.

NOVO, E.M.L.M.; BARBOSA, C.; FREITAS, R.; RUDORFF, B.; SHIMABUKURO, Y.; CEBALLOS, J.. 2007. **O Sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos, SP. A. Silva Vieira Editora, 2007, cap.19 p. 265-275.

REID J., SOUSA JÚNIOR W.C. 2005. **Infrastructure and conservation policy in Brazil**. Conservation Biology, v. 19, n. 3, p. 740-746.

SOUSA JÚNIOR W.C., WAICHMAN A.V., JAIME A.L.G., SINISGALLI P.A.A. 2006. **Gestão das águas na Amazônia: a bacia do Rio Purus**. Workshop Gestão Estratégica de Recursos Hídricos, Brasília , 2006. Anais I GERH: ABRH, 4 p.