

## XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HIDRÍCOS DO NORDESTE

### **APLICAÇÃO DE MODELO ESTATÍSTICO PARA ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO DE SUPERFÍCIE NA BACIA DO RIO SOLIMÕES - AM.**

Jonathas Laborda Neves<sup>1</sup>; Carlos Benedito Santana da Silva Soares<sup>2</sup>; Mauro Mendonça da Silva<sup>3</sup>.

#### **RESUMO**

Os estudos científicos da bacia Amazônica ainda são um grande desafio para uma construção técnico-científica. Como viés de auxílio aplica-se a utilização de sensores orbitais ópticos que estão sendo utilizados para estimar a Concentração de sedimentos em suspensão de superfície (Css) nas águas interiores dos grandes rios da Amazônia. Importantes trabalhos realizados em rios com forte carga sedimentar como Solimões, Amazonas e Madeira, mostram o potencial das imagens de satélite para estimar a Css. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo principal utilizar as imagens do sensor MODIS/produto MOD09 (Reflectância de Superfície) e o Modelo estatístico de regressão linear  $Css=3352*R-7.19$  desenvolvido por Soares (2012). Para estimar uma série histórica temporal de doze anos (2000 a 2012) dos dados de Css, nos regimes hidrológicos de Enchente, Cheia e Seca na estação hidrosedimentológica de Manacapuru. A pesquisa mostra que no regime de enchentes a Css possui forte carga sedimentar, de forma contrária no regime de cheias a Css possui as menores concentrações do ano, já no período de secas os resultados assemelham-se ao regime de enchentes. Conclui-se que os resultados de Css obtidos através das imagens MODIS, são coerentes com os de campo realizado por Soares (2012).

**Palavras-chave:** sedimentos em suspensão, MODIS, modelo estatístico.

#### **ABSTRACT**

The studies about the Amazon Basin still are the great challenge for the technical scientific construction. As a form of aid we know that the use of optics sensors, that are generally used in estimations of concentration of suspended sediments in the inland waters of the great Amazon Rivers. Important works realized at the Amazon Rivers demonstrate the potential use of this kind of data to estimate the Css (concentration of suspended sediments) in rivers with intense sediment load. In this way this work has as aims, image product MOD99 (surface reflectance). To estimate a historical temporal series of twelve years (2000 to 2012), of data of Css in the hidrological regime of spate, flood and drought at the seasons of Manacapuru. The research pointed in this three

<sup>1</sup> Acadêmico de Licenciatura em Geografia pela UEA (Universidade do Estado do Amazonas), bolsista FAPESAM (Fundação de amparo à pesquisa do Estado do Amazonas), atualmente estagia na Divisão de Proteção Ambiental no SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia); [jonathas.jl@hotmail.com](mailto:jonathas.jl@hotmail.com); Centro Regional de Manaus do Sistema de Proteção da Amazônia, Av. do Turismo, nº 1350, Tarumã, CEP. 69041-010; Fone: (92) 3303-6298- Manaus - AM, Brasil.

<sup>2</sup> Doutor em Clima e Ambiente pelo INPA/UEA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia); [carlos.soares@sipam.gov.br](mailto:carlos.soares@sipam.gov.br); Centro Regional de Manaus do Sistema de Proteção da Amazônia, Av. do Turismo, nº 1350, Tarumã, CEP. 69041-010 Fone: (92) 3303-6296- Manaus - AM, Brasil.

<sup>3</sup> Mestre em Meteorologia pela UFAL (Universidade Federal de Alagoas), e professor de Meteorologia na UEA; [mauro.mendonca@sipam.gov](mailto:mauro.mendonca@sipam.gov); Centro Regional de Manaus do Sistema de Proteção da Amazônia, Av. do Turismo, nº 1350, Tarumã, CEP. 69041-010; Fone: (92) 3303-6296- Manaus - AM, Brasil.

regimes, that the spate period the CSS is high, On the other hand, at the flood the CSS is low, at the drought the C<sub>ss</sub> keeps high, considering the width and complexity of the Amazonas/Solimões River the results were consistent the estimates are within the expected based on the result of the field survey carried out by Soares (2012).

Key-words: suspended sediments, MODIS, statistical model.

## 1. INTRODUÇÃO

Desde o século XVI, o rio Amazonas tem sido fonte de muitas disputas e discussões, sejam elas para o interesse territorial ou para desvendar os fenômenos e os mistérios que cerca desse grande rio. Foi em 1541, Francisco de Orellana, se uniu a expedição a fim de percorrer desde a nascente do rio Amazonas nos Andes até a sua desembocadura no Oceano Atlântico, mesmo tendo dito que em 1535 já tinha percorrido, Porro (1992). Quase cinco séculos se passaram e a Bacia Amazônica ainda continua sendo um grande desafio para uma construção técnico-científica.

Souza (2010 p. 14) refuta que a importância dos sedimentos, já era uma prática conhecida desde a época das civilizações antigas, como os depósitos de sedimentos que fertilizavam as áreas usadas pela agricultura no Egito antigo (3.000 a.C), que frequentemente eram inundadas durante os períodos chuvosos. Segundo Simons e Sentürk, (1992 p. 14-15), no séc. XV Leonardo da Vinci realizou em particular, observações quanto ao curso de água e seus movimentos em canais de laboratório. Nos séculos XVII e XVIII, destacam-se as observações de Domenico Guglielmini, um dos pioneiros na observação dos processos sedimentológicos. E tantos outros como: Paolo Frizi que em 1770 publicou uma obra que em suma trabalhava com problemas relacionados à gestão de rios e o transporte de sólidos pelos cursos d'água. Laplace; Lagrange; Gauss, também contribuíram para o avanço dos estudos sedimentológicos.

De todos esses célebres pesquisadores, destaca-se os trabalhos de Jules Dupuit que foi o primeiro pesquisador a abordar em particular o transporte em suspensão. Simons e Sentürk, (1992) *apud* Souza (2010 p.18) faz referência à obra de Dupuit intitulada “Estudos Teóricos e Práticos sobre os Movimentos das Águas”, na qual afirma que o movimento dos sedimentos em suspensão deve-se ao gradiente de velocidade do líquido nos lados superior e inferior do grão de sedimento do leito. Observou também que a concentração de sedimentos próxima do fundo é mais elevada que a concentração próxima da superfície livre.

Na Amazônia o estudo da física e da dinâmica do transporte de sedimentos, como também a quantificação dos fluxos de sedimentos nos rios da bacia Amazônica somente surgiu a partir da década de sessenta, Gibbs (1967) estimou a descarga sólida do rio Amazonas para o Oceano Atlântico com valores que variam entre 400 e 1300 x 10<sup>6</sup> ton/ano. Estes valores de descarga de

sedimentos colocam o rio Amazonas/Solimões em terceiro lugar no mundo, depois do rio Ganges-Brahmaputra na Índia e Paquistão e do rio Huang-ho-Amarelo na China (Milliman & Meade, 1983).

A bacia do rio Solimões possui relevante importância para os estudos hidrológicos, pois representa mais de 35% da área total da bacia do rio Amazonas. A vazão média representa quase 50% da descarga média anual total, do rio Amazonas ao Oceano Atlântico, Filizola, *et al.* (2008).

Definem-se processos sedimentológicos, como sendo os fenômenos associados ao movimento de grãos de sedimentos, desde o desprendimento dos grãos provocado pelos impactos das gotas de chuva na bacia hidrográfica e pela ação dos cursos d'água junto ao leito, ao transporte, à dispersão, sedimentação, deposição, ou seja, até a cessação deste movimento, quando as partículas de sedimentos se depositam no fundo do escoamento, Motta (1978) *apud* Souza (2010 p. 38).

A utilização de sensores ópticos para estimativas de concentração de sedimentos em suspensão nas águas interiores dos grandes rios da Amazônia ainda é incipiente. Importantes trabalhos realizados em rios Amazônicos, Novo *et al.* (1989); Martinez *et al.* (2004); Soares (2012). A carga de sedimentos transportados por um rio varia de acordo com a erosão da mesma bacia. Assim a quantificação dos fluxos sedimentares dentro da rede hidrográfica serve para estimar os processos de erosão numa bacia.

Recentes estudos de Soares (2012) utilizando a seção hidrosedimentológica de Manacapuru no rio Solimões, realizou o cruzamento entre os dados de concentração de sedimentos em suspensão coletados *in situ*, e a reflectância de superfície do produto MOD09 do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) embarcado nas plataformas orbitais Terra e Aqua. Onde foram realizadas seis campanhas de campo nos regimes hidrológicos de enchente, cheia (águas altas) e seca (águas baixas) e foi criado um modelo estatístico para a estimativa de C<sub>ss</sub>, gerado através da curva de calibração originária do cruzamento entre os dados de campo e os dados de reflectância de superfície imagens na faixa espectral do infravermelho próximo, centrada em 858 nm.

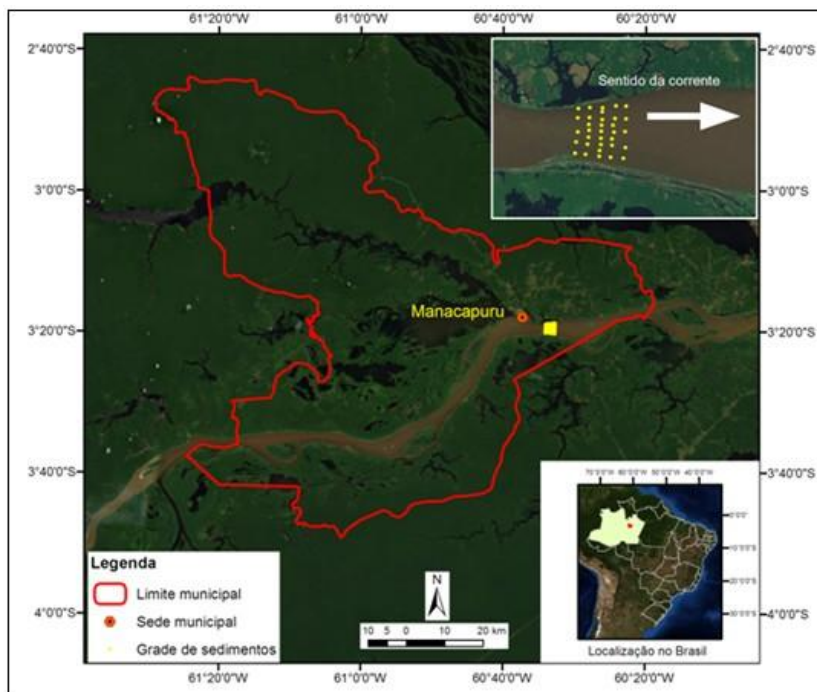
## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Localização da área de estudo**

Manacapuru é um município do Amazonas, pertencente à Mesorregião do Centro Amazonense e Microrregião de Manaus, localiza-se a sudeste de Manaus, capital do estado. Ocupa uma área de 7.602 km<sup>2</sup>, IBGE (2010). A área da pesquisa encontra-se distante de Manaus por via terrestre a 85 quilômetros e por via fluvial 102 quilômetros (figura 1). A jusante da cidade de Manacapuru, no rio Solimões, está localizada a estação hidrosedimentológica, de responsabilidade da (ANA) Agência Nacional de Água, utilizada a mais de trinta anos pelo governo brasileiro em

parceria com a (OMM) Organização Mundial de Meteorologia para executar monitoramento de dados físicos como os fluxos de sedimentos em suspensão originados na bacia do rio Solimões.

A seção transversal da estação de Manacapuru possui 3.000 m de largura e 20 m de profundidade, nela é monitorada aproximadamente toda a totalidade do transporte de sedimentos em suspensão provenientes da bacia do rio Solimões, com fluxo médio total anual de sedimentos em suspensão de aproximadamente  $400 \times 10^6$  toneladas, Filizola *et al.* (2008).



**Figura 1:** Localização da área de estudo com os 33 pontos da grade espacial ou “grid” de monitoramento hidrosedimentológico da estação de Manacapuru no rio Solimões.

**Fonte:** Soares (2012).

## 2.2 Objetivos

### 2.2.1 Objetivos Específicos:

- 1) Levantamento dos dados de Concentração de sedimentos em suspensão de superfície da série histórica de 12 anos (2000 a 2012) e;
- 2) Analisar a dinâmica sedimentológica de superfície nos diferentes regimes hidrológicos do rio Solimões.

## 2.3 Metodologia

Através do projeto MESASOL (Material em Suspensão do rio Solimões) foi criada na estação de Manacapuru uma grade geoespacializada para coletar dados de concentração de sedimentos em suspensão. A rede foi montada levando-se em conta a seção transversal da estação de medição de Manacapuru e a ela adicionando duas seções transversais a montante e duas a jusante, igualmente espaçada de 300 metros uma da outra. Longitudinalmente foram estabelecidos perfis

igualmente espaçados de 600 metros entre si, sendo que na porção central da malha formada pelos perfis longitudinais e transversais se adensou a rede de perfis longitudinais adotando-se um espaçamento de 300 metros. Portanto, o cruzamento dos perfis longitudinais com os perfis transversais gerou 33 pontos, ou nós, nos quais são realizadas amostras de concentração de sedimentos em suspensão em superfície (SOARES, 2012).

A aquisição dos dados de reflectância de superfície e das bandas de qualidade, deu-se pela seleção das imagens do sensor MODIS/ produto MOD09 que se encontram hospedadas no site do USGS (United States Geological Survey) [https://lpdaac.usgs.gov/data\\_access/data\\_pool](https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool). No portal as imagens são disponibilizadas em formato HDF (Hierarchical Data Format) e projeção SIN (Sinusoidal). Através do *Software* MRT (Modis Reprojection Tool) as cenas foram convertidas para o formato GEOTIFF e reprojetaadas projeção Lat/Long e Datum WGS-84. Essa uniformidade, entre as imagens e os pontos da grade geoespacializada se faz necessário para se evitar os erros de deslocamento entre os pixels das imagens de reflectância de superfície e os pontos da grade geoespacializada.

As fases de pré-processamento e processamento foram realizadas no software Environment for Visualizing Images (ENVI) versão 4.6.1, onde foram alisadas as bandas B<sub>2</sub> (infravermelho próximo) e as de qualidade (State Flag e View Zenith), sob os meses referentes aos regimes hidrológicos de “enchentes” (março), cheias “águas altas” (junho) e secas “águas baixas” (outubro) de 2000 a 2012.

Segui-se o mesmo padrão de ND (níveis de cinza) de 88, 152 e 216 sugeridos por Soares (2012). Que determinam os dados de reflectância de superfície com melhores qualidades, baseado na tabela (Tabela 1) de análise criada pela National Aeronautics and Space Administration (NASA). Os ângulos de visada do sensor MODIS variam de 0° a 55°, porém as imagens que possuam ângulos acima de 35° foram descartadas das análises, por apresentarem pixels com resolução efetiva maiores que a resolução nominal (250 m). Para cada regime hidrológico, de seu respectivo ano, foram analisadas três imagens, onde foi utilizada a de melhor qualidade em seus níveis de cinza (ND).

Tabela 1: Tabela de avaliação da qualidade dos dados de refletância de superfície  
 Fonte: Adaptado SOARES (2012).

		0	Nenhuma nuvem
8 até 9	Cirrus detectado	0	Não
		1	Pequenas
		10	Média
		11	Alta
6 até 7	Quantidade de aerossóis	0	Climatologia
		1	Baixa
		10	Média
		11	Alta
3 até 5	Terra pavilhão de água	0	Águas rasas
		1	Terra
		10	Litoral do oceano e lago
		11	Águas interiores superficiais
		100	Água efêmera
		101	Águas profundas no interior
		110	Mar continental / moderada
		111	Oceano profundo
2	Sombra de nuvem	1	Sim
		0	Não
0-1	Nuvem	0	Claro
		1	Nublado
		10	Mistas
		11	Não definido, assumiu clara

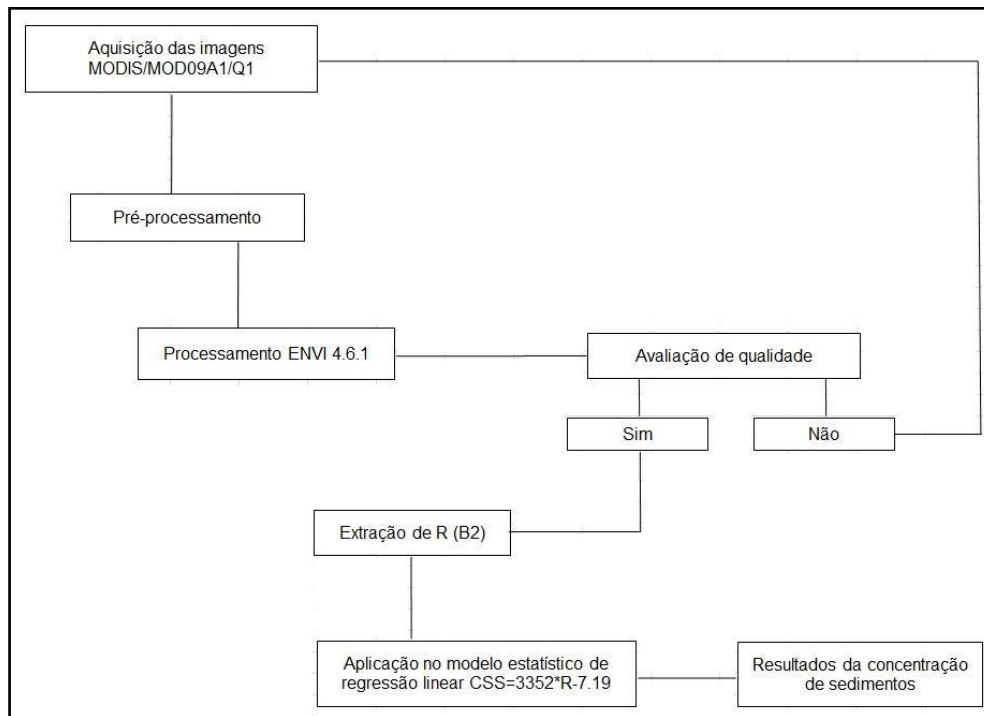
Para a determinação de  $C_{ss}$  via modelo estatístico consistiu na verificação das médias mensais de ND, transformadas em binário para controle de qualidade dos pixels e após sua conformidade, convertidas em refletância de superfície para que fossem e aplicadas a equação de regressão linear usada por Soares (2012). Que é utilizada como ferramenta tecnológica para auxiliar as campanhas de campo, uma vez que a mesma demanda altos custos financeiros, gerando as estimativas de concentração de sedimentos em suspensão de superfície. O modelo estatístico foi obtido através de Regressão Linear por Mínimo Quadrado e possui coeficiente de determinação ( $R^2 = 96\%$ ) e intervalo de confiança de 95%, conforme fluxograma (figura 2).

$$C_{ss} = 3352 * R - 7.19 \quad (1)$$

Onde,

$C_{ss}$  = Concentração de sedimentos em suspensão de superfície;

$R_m$  = Refletância de superfície média.



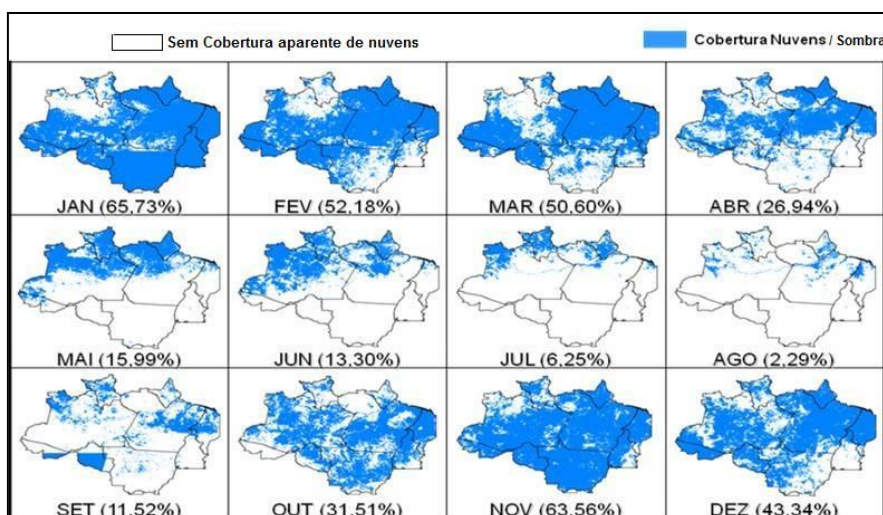
**Figura 2 :** Fluxograma da metodologia da pesquisa.

**Fonte:** Adaptado Soares (2012).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados das estimativas de C<sub>ss</sub> na estação hidrométrica de Manacapuru em diferentes períodos de regime hidrológico mencionado.

Na região Amazônica é característica comum o alto índice pluviométrico anual, conseqüentemente é constante a presença de nuvens. Imagens com grande quantidade de nuvem e alta carga de aerossóis, superestimam os valores C<sub>ss</sub>, por isso a análise criteriosa nas bandas de qualidade tornam-se imprescindíveis. A figura 3 mostra como ocorre a dinâmica de nuvens na região, bem como evidencia a dificuldade de se obter imagens com condições adequadas para a pesquisa.



**Figura 3:** Cobertura de nuvens e sombra de nuvem durante o período anual na Região Amazônica.

**Fonte:** Adaptado SIPAM/CR-MN

Em comparação aos dados coletados pelo sensor MODIS nos referidos anos no período de enchente, a aplicação do modelo estatístico mostra a correlação que existe entre os dados aferidos em campo por Soares (2012) e os estimados na pesquisa, como por exemplo: março de 2006 com 118 mg/l e março de 2007 com 124 mg/l, considerando-se essa variação ou aumento de 6 mg/l ideal para o período, segundo Soares (2012) essa variação torna-se adequada desde que não ultrapasse o desvio padrão de 15mg/l.

Como resultado do processo e análise de mais de 160 imagens construiu-se o produto final apresentado pela figura 4.

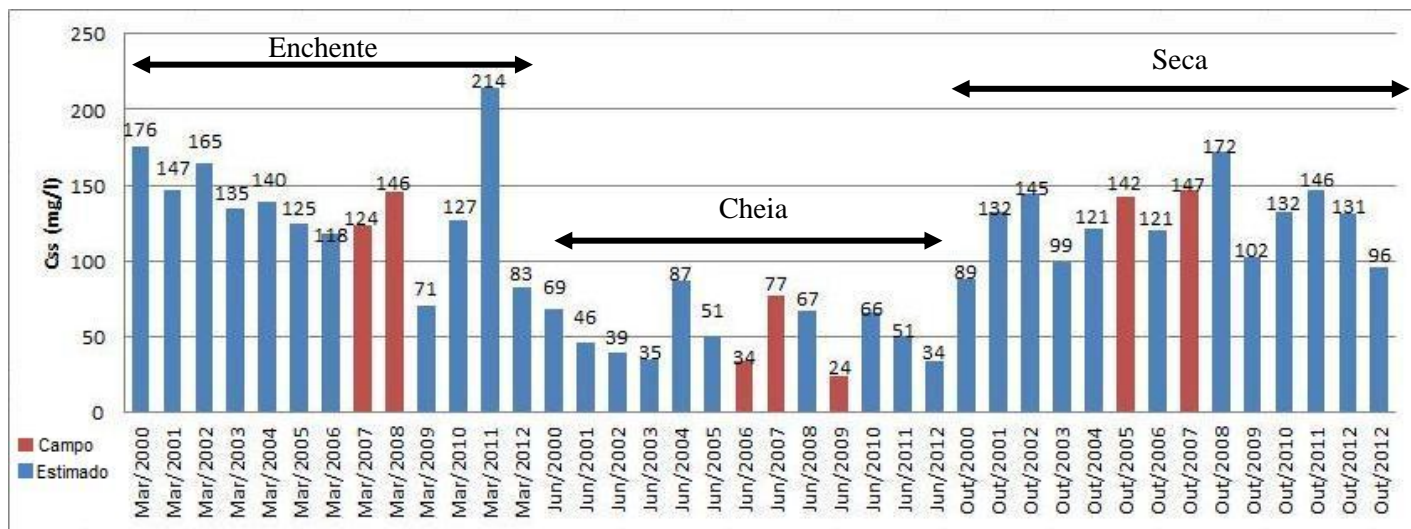


Figura 4: Estimativa de sedimentos em suspensão de superfície da Banda B2 (Infra Vermelho Próximo) no período de 2000 a 2012.

No período de cheia, apontado no estudo sobre o mês de junho de 2009 e junho de 2012, anos que ocorreu a maior cheia histórica registrada na região, dessa forma é possível afirmar que quando a cota fluviométrica do rio se eleva a concentração de sedimentos tende a diminuir.

Em outubro (seca), os dados aferidos em campo, por conseguinte, muito se aproximam aos apontados pela pesquisa, considerando a variação já mencionada, a mais alta estimativa que a pesquisa apresentou neste mês fora de 172 mg/l que se demonstrou aceitável pela comparação realizada com os dados do sistema da Agência Nacional de Águas (ANA).

A tabela 1 mostra o resultado das médias de C<sub>ss</sub> nos diferentes regimes do rio Solimões durante 12 anos. É importante destacar que os dados de concentração levantados pela pesquisa tendem a diminuir a medida que rio atinge a sua cota máxima. E em contrapartida, os dados do regime hidrológico da enchente (março) e da seca (outubro), possuem praticamente os mesmos valores de C<sub>ss</sub>. assemelham.



Tabela 2: Tabela de Css médio de 2000 a 2012

<b>Regimes</b>	<b>Css médio de 2000 a 2012</b>
Enchente	148 mg/l
Cheia	57 mg/l
Seca	150 mg/l

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mesmo diante da dificuldade para encontrar imagens de boa qualidade, estas foram captadas como as melhores possíveis diante dos critérios de qualidade sugeridos ao longo da pesquisa foram adquiridas grande quantidade de imagens que foram baixadas, reprojatadas, conferidas e analisadas, dessa forma a pesquisa se destaca por ser criteriosa.

Sobre o trabalho ora apresentado viu-se que à medida que o rio enche a concentração de sedimentos tende a diminuir vertiginosamente, enquanto no período de cheia percebe-se que a concentração é baixa, e no período de seca os dados se assemelham ao período de enchente quando os dados de concentração aumentam, essa afirmação se explica ao tomar-se como nota de que uma vez que no período de enchente a velocidade do rio tende a aumentar favorecendo a erosão lateral das margens, trazendo os sedimentos do fundo do leito para cima. No entanto, no período de águas altas, a média de concentração de sedimentos em suspensão diminui mais da metade em comparação aos outros regimes hidrológicos devido ao grande aumento do volume de águas. Dos dados citados neste, como sugestão pode-se apontar a necessidade de pesquisa a campo para melhorar a confiabilidade do modelo estatístico da curva de calibração.

Pode-se afirmar que a metodologia aplicada no trabalho colaborou com o estudo do fluxo de sedimentos em suspensão, em Manacapuru, uma vez que, para águas muito heterogenias precisa-se entender o menor parâmetro a fim de se alcançar a complexidade dos maiores, portanto a metodologia se aplica de forma positiva, mostrando que o sensor MODIS tem o potencial de acompanhar ou estimar a concentração de sedimentos através de suas imagens. Já que essas são comparadas as coletas de campo e se apresentam dentro do padrão.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

a) Livro

PORRO, Antônio. *As crônicas do Rio Amazonas*. Petrópolis/RJ: Vozes, 1992.

SIMONS, db & F.SENTÜRK. *Sediment Transport Technology; Water and Sediment Dynamics*. Water Resources Publ, LLC, Highlands Ranch, Colorado, 1992.

b) Capítulo de livro

GIBBS, R., 1967. *The geochemistry of the Amazon river system - I. The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids*, *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 78, pp. 1203-1232.

c) Artigo em revista

FILIZOLA, JR.N.P. *O fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia brasileira*. Brasília, DF. ANEEL, 1999, 63pp.

MILLIMAN, J. & MEADE, R.H., 1983. *World-wide delivery of river sediment to the oceans*, *J. Geol.*, v.91 (1), pp. 1-21.

NOVO, E. M. L. M.; HAMSOM, J. D.; CURRAN, P. J. *The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration*. *Inter. J. Remote Sens.* , v.10, n. 7, p. 1283-1289. 1989.

d) Artigo em anais de congresso ou simpósio

FILIZOLA, N. et al. *Estudo das variações no fluxo de matéria em suspensão de Manacapuru, Amazonas, Brasil*. Anais. VIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 2008.

MARTINEZ, J. M., GUYOT, J. L, et al., *Use of MODIS and MERIS data for water quality monitoring of Amazonian rivers and floodplain lakes*: LBA Third International Conference.2004.

SOARES, Carlos B.S.S. *Estimativas da concentração de sedimentos em suspensão na estação hidrométrica de Manacapuru – Rio Solimões – Por meio das imagens do sensor MODIS*. 2012. 152f. Tese (Doutorado em Clima e Ambiente) – Programa Clima e Ambiente, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Universidade do Estado do Amazonas (UEA), Manaus/AM. 2012.

SOUZA, Ademilton Luiz Rodrigues de. *Estudo do Movimento incipiente de sedimentos não coesivos em escoamentos com superfície livre*. 2010. 158f. Tese (Mestrado em Ciências / Engenharia Oceânica) Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro/RJ. 2010.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAPEAM (Fundação de Amparo à pesquisa do Estado do Amazonas) pelo apoio e fomento a pesquisa no estado, ao SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia) na pessoa do Msc. Bruno Monteiro gerente do CR-MN por todo o auxílio prestado; a Dra. Solange Costa pelas sugestões que contribuíram para finalização deste trabalho; também a colaboradora Randielly Barbosa Soares.