

INTEGRAÇÃO DE DADOS TM/LANDSAT E MEDIDAS *IN SITU* PARA ESTIMATIVA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO EM RIOS AMAZÔNICOS: UM ESTUDO DE VIABILIDADE

Otávio Cristiano MONTANHER¹

Cláudio Clemente Faria BARBOSA¹

Evlyn Márcia Leão de Moraes NOVO¹

Resumo

A base de dados *in situ* de concentração de sedimentos em suspensão (CSS) nos rios amazônicos possui baixa densidade de amostras (2,72 coletas por ano) distribuídas de modo não sistematizado. O uso de imagens de satélite pode aumentar essa densidade devido à relação direta entre CSS e a reflectância espectral da água na região do visível-infravermelho próximo. O objetivo desse trabalho é, portanto, avaliar a viabilidade de integração de dados do sensor TM/Landsat 5 (TM-5) e dados sedimentológicos para gerar modelos de estimativa da CSS de rios amazônicos. Analisam-se as limitações espaciais e radiométricas do sensor TM-5 e seu impacto sobre os modelos para diferentes tipos de água. Avalia-se também a frequência de dados *in situ* e orbitais e o ganho de informação com o uso de dados de sensoriamento remoto. Os resultados mostram que apenas 35 das 97 estações de coleta de CSS podem ser utilizadas. Apesar do reduzido número de amostras, os resultados mostram que nos casos mais restritivos de cobertura de nuvens, poderia haver um aumento de até 127% na base de dados se fossem desenvolvidos modelos empíricos baseados em imagens de satélite. Conclui-se que existem dados suficientes para testar o desenvolvimento de modelos empíricos e semi-empíricos baseados na integração de dados TM-5 e medidas *in situ* de modo a aumentar a densidade de dados de CSS dos rios da bacia amazônica. A próxima etapa dessa pesquisa é então o desenvolvimento e teste desses modelos.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. Transporte de sedimentos. Bacia Amazônica. Modelos empíricos.

Abstract

Integration of TM/LANDSAT data and *in situ* measurements for suspended sediment estimation of amazon rivers: a feasibility study

The *in situ* database of suspended sediment concentration (SSC) available for the Amazon rivers is characterized by a very low sample density in time (2,72 samples/year) with no systematic spatial distribution. Satellite images can increase both spatial and temporal sampling density based on the relationship between SSC and the water spectral reflectance in the visible-near infrared range. Therefore, the aim of this paper is to assess the feasibility of integrating TM/Landsat 5 (TM-5) data and *in situ* sedimentologic data to generate empirical models for estimating SSC in Amazon rivers. Spatial and radiometric limitations of TM-5 sensor are analyzed, as well as its impact on models for different water types. It is also assessed the frequency of concurrent *in situ* and orbital data, and the gain of information by using remote sensing data. The results of this assessment show that only 35 out of 97 SSC gauging stations can be used. Despite of this small number of sampling stations, the results show that in the most restrictive cases of cloud coverage, there would be an increase of 127% of SSC samples in the database, if remote sensing models were implemented. At the end of this feasibility study, one can conclude that there are enough concurrent TM-5 data and *in situ* measures which can be integrated in order to develop remote sensing SSC estimates, which could be used to expand the SSC sample density of rivers of Amazon basin. Therefore, the next stage of this research is the development and test of these models.

Key words: Remote sensing. Sediment transport. Amazon basin. Empirical models.

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE - Avenida dos Astronautas, 1758 - Jardim da Granja. Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil. E-mails: {otavio, evlyn}@dsr.inpe.br

INTRODUÇÃO

A carga sedimentar transportada por um rio é função do balanço de forças de resistência e de tração atuantes sobre os materiais da bacia hidrográfica. As forças de resistência resultam das características geológicas, pedológicas, topográficas e do uso e cobertura do solo da bacia, de forma que compostos menos coesos e com alta exposição são mais vulneráveis à erosão do que os com alta coesão e baixa exposição. Já as forças de tração, para ambientes tropicais úmidos, são produto principalmente da precipitação (quantidade e intensidade) e da topografia (CHRISTOFOLETTI, 1980; CHARLTON, 2008).

Como produto de tais processos, os sedimentos em suspensão transportados pelos rios são indicadores das características e dos condicionantes que atuam na bacia hidrográfica e podem também refletir mudanças no equilíbrio entre a resistência e a tração ao longo do tempo (DOWNS; GREGORY, 2004). No entanto, o monitoramento da concentração de sedimentos em suspensão na água (CSS) não é feito de forma contínua ao longo do tempo, e nem de forma espacialmente sistemática. Muitas vezes as estações de amostragem são implantadas somente em função da facilidade de acesso aos locais, e não por critérios associados aos condicionantes da produção de carga sedimentar. Estas limitações da amostragem são ainda mais graves nos rios da Bacia Amazônica, em que a coleta de amostras é caracterizada por baixa frequência espacial e temporal. Os dados de domínio público fornecidos pela ANA (Agência Nacional de Águas) exemplificam isto: são 97 estações amostrais em toda a bacia amazônica com 2,72 amostragens por ano para cada estação, em média. Estas coletas não são realizadas com base no comportamento das hidrógrafas e há muitas lacunas temporais, de forma que as variações sazonais na CSS não podem ser adequadamente avaliadas. Tais características dos dados *in situ* limitam o estudo do transporte da carga sedimentar nos rios amazônicos.

Existem evidências na literatura que mostram que medidas de reflectância da água podem ser utilizadas para a geração de modelos empíricos, semi-empíricos e analíticos de estimativa de CSS (WHITLOCK et al., 1982; CURRAN; NOVO, 1988; QUIBELL, 1991; DEKKER et al., 2002; GITELSON et al., 2008; WANG et al., 2009; NECHAD et al., 2010; VOLPE et al., 2011), o que abre a perspectiva de se utilizar dados de sensoriamento remoto orbital para ampliar a base de dados existentes sobre a CCS dos rios amazônicos.

Entretanto, para que tais modelos possam ser desenvolvidos há que se considerarem os seguintes aspectos: i) quanto maior a cobertura temporal do sensor, maior é a probabilidade de que os modelos gerados possam captar as mudanças temporais dos condicionantes da bacia hidrográfica; ii) quanto menor o custo dos dados orbitais, maior é a viabilidade de serem utilizados por uma comunidade mais ampla; iii) quanto maior a dificuldade de processamento dos dados orbitais, menor é a oportunidade de o método ser aplicado amplamente.

Levando-se em conta tais aspectos, verifica-se que os dados da série de satélites do programa Landsat são particularmente interessantes para o desenvolvimento de modelos de estimativa da concentração de CSS dos rios amazônicos, visto que são disponibilizados gratuitamente, além de representarem um acervo de imagens de quase três décadas, com ampla cobertura espacial e relativamente alta frequência temporal. O sensor TM é útil para diversas aplicações em recursos terrestres, tais como: agricultura, florestas, solos e geologia, no entanto, a posição das bandas do sensor TM foca principalmente nas feições espectrais dos fatores dominantes que controlam a reflectância das folhas (JENSEN, 2009). Apesar de não ser um sensor desenvolvido especificamente para estudos em água, existem exemplos de aplicação de seus dados em estudos sedimentológicos e de qualidade de água (MERTES et al., 1993; DEKKER et al., 2002; BARBOSA, 2005). Uma das principais limitações do TM-5 para estudos em corpos aquáticos é sua baixa resolução radiométrica, (8 bits) a qual não permite discriminar pequenas variações de intensidade do sinal refletido pela água.

O desenvolvimento de modelos de estimativa de CSS para os rios da bacia Amazônica é de grande interesse científico e de aplicação visto que a região tem sido submetida, nas últimas três décadas, a mudanças de uso e cobertura do solo, caracterizadas por elevadas taxas de desflorestamento (www.obt.inpe.br/prodes/index.html; MORTON, et al., 2005), e também pela implantação de reservatórios hidrelétricos. Estas estimativas podem fornecer informações sobre as variações da CSS e de suas forçantes, permitindo avaliar o impacto direto e indireto das atividades humanas sobre a origem e destino dos sedimentos da bacia.

A grande questão, entretanto, é verificar se existem dados suficientes para gerar esses modelos devido às limitações práticas, tais como a disponibilidade de dados quase simultâneos de sensoriamento remoto e *in situ* (BARBOSA; NOVO, 2009), a grande diversidade de óptica das águas amazônicas (LOBO et al., 2012) e as limitações espectrais, espaciais e radiométricas das imagens do sensor TM/Landsat. Assim sendo, este trabalho apresenta os resultados de um estudo de viabilidade da integração de dados derivados de séries de imagens do sensor TM/Landsat5 e dados sedimentológicos disponíveis na base de dados hidrológicos da ANA para gerar modelos de estimativa de CSS em rios Amazônicos.

Estimativa da CSS por Dados Orbitais

O estudo de águas interiores opticamente complexas a partir do sensoriamento remoto (SR) tem avançado, principalmente na última década, mas ainda não há, por exemplo, uma base operacional de produtos de SR com estimativas de concentração de componentes, como há para as águas oceânicas (produtos de cor do oceano, por exemplo: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Ou seja, ainda há muitos tópicos de pesquisa em aberto para as águas opticamente complexas, tanto no tocante à compreensão da interação da radiação eletromagnética (REM) com os diferentes componentes, quanto na geração de modelos de estimativa de suas concentrações.

Para que a tecnologia de SR possa contribuir efetivamente para o monitoramento de recursos hídricos, é fundamental o desenvolvimento de modelos que produzam estimativas confiáveis da composição e/ou concentração dos componentes dos sistemas aquáticos continentais. Atualmente o algoritmo aplicado em imagens MERIS já fornece estimativas de algumas propriedades ópticas inerentes em águas com maior complexidade óptica (DOERFFER; SCHILLER, 2007). No entanto, tal série de imagens possui limitações: i) são úteis apenas para grandes corpos de água (resolução espacial de 260m x 260 m ao nadir); ii) disponibilidade recente de dados (a partir de 2000) e fim da missão do satélite ENVISAT em abril de 2012; iii) aquisição sob demanda, o que não proporciona cobertura global e contínua das áreas de interesse; iv) custo relativamente alto de aquisição das imagens em áreas de grandes dimensões com a Amazônia.

Ao contrário dos dados MERIS, que é um sensor cuja especificação é adequada aos sistemas aquáticos, os sensores da série de satélites Landsat foram desenvolvidos para aplicações relacionadas ao estudo de processos e sistemas terrestres. A solução proposta por muitos autores, desde a década de 80, é a geração de modelos baseados na relação estatística empírica entre dados adquiridos em campo e os dados orbitais (Tabela 1).

Tabela 1 - Modelos empíricos baseados em dados da série de satélites Landsat

Sensor	Informação espectral	Erro médio de estimativa (mg/l)	R ²	Intervalo de CSS (mg/l)	Referência	Área de estudo
MSS/TM	Bandas 1 a 4	± 20	-	5,6 - 207	MERTES et al., (1993)	Rio Amazonas
MSS	Banda 5	-	0,96	~ 0 - 10 ⁵	ARANUVACHAPUN e WALLING (1988)	Rio Amarelo (China)
MSS	Bandas 4 a 7	±18,1	0,95	1 - 279	RITCHIE et al., (1987)	Rio Mississippi (EUA)
MSS	Bandas 5 e 7	-	0,81	2,1 - 66,4	KHORRAM, (1985)	Baía de São Francisco (EUA)
ETM+	Banda 4	± 46	0,88	22 - 2610	WANG et al., (2009)	Rio Amarelo (China)

Os autores citados afirmam que as relações empíricas encontradas podem ser utilizadas para fins de monitoramento e gerenciamento ambiental, mas que deveriam ser realizados estudos adicionais para validação das equações. Com isso, muitos desses modelos são passíveis de aplicação apenas sobre as imagens em que foram gerados, não sendo úteis para quantificação da CSS em outras datas (RITCHIE; SHIEBE, 2000), ou seja, não são adequados para a proposta de monitoramento da CSS. Para tal, os modelos devem ser desenvolvidos com base em várias imagens de diferentes datas, que abranjam a amplitude e as variações na composição da CSS desejadas. Tendo em vista o conhecimento acumulado nesse campo, o presente estudo propõe uma análise de viabilidade da integração de dados disponibilizados pela ANA e imagens TM-5 para o desenvolvimento de modelos empíricos e semi-empíricos de estimativa de CSS.

METODOLOGIA

Geração de modelos empíricos

A geração dos modelos empíricos demanda que sejam disponíveis medidas de reflectância espectral da água quase simultâneas às medidas de CSS em estações fluviométricas da ANA. A partir da análise estatística entre os dois conjuntos de dados, são gerados modelos para aplicação em outras datas para as quais não existam medidas *in situ* (Figura 1).

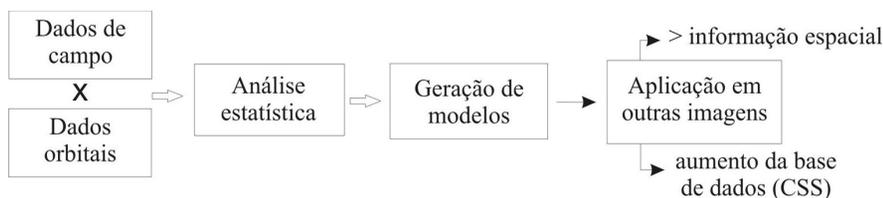


Figura 1 - Abordagem geral do uso de dados orbitais para estimativas de CSS por meio de relações empíricas e semi-empíricas

Para que tais modelos possam ser gerados, são necessárias algumas condições: i) a área dos corpos d'água deve ser compatível com a resolução espacial do sensor; ii) a composição dos materiais suspensos precisa ser homogênea para cada conjunto de dados *in situ* utilizado no modelo empírico; iii) o sinal proveniente da água deve ser compatível com a resolução radiométrica do sensor utilizado; iv) o número de amostras disponíveis para gerar os modelos deve ter significância estatística. Estas condições foram avaliadas para as estações de CSS e dados orbitais para os rios da bacia amazônica conforme apresentado na Figura 2.

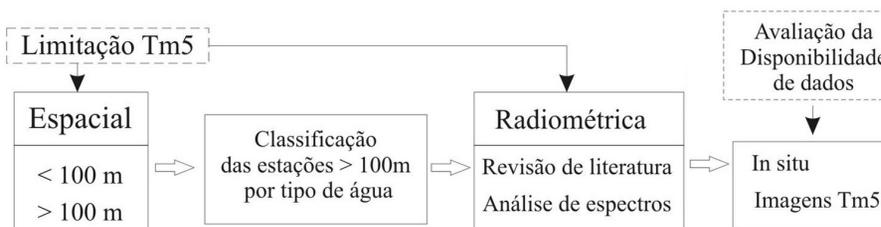


Figura 2 - Abordagem metodológica para definição das estações e dados adequados para geração de modelos empíricos em rios da bacia amazônica

Seleção de estações "in situ"

Limitação imposta pela resolução espacial

Tendo em vista a resolução espacial nominal do TM-5, de 30m, definiu-se um valor mínimo de 100m de largura dos canais fluviais como o limite para seleção de estações passíveis de serem utilizadas na geração de modelos de CSS. Esse limite visa garantir que não haja contaminação dos pixels de água com materiais correspondentes às margens (seja vegetação ou solo exposto). Para coleta da informação espectral devem ser identificados trechos de canais fluviais com largura superior à 100m. Para isso, as bases de dados *in situ* e de imagens foram inspecionadas para avaliar o número de estações fluviométricas em que tais condições eram atendidas.

Classificação das estações amostrais segundo a tipologia de águas amazônicas

Os rios amazônicos possuem diferentes características limnológicas, que variam conforme as características das bacias hidrográficas. Segundo Sioli (1984) as águas Amazônicas podem ser classificadas em três tipos: preta, branca e clara. As águas brancas são típicas de drenagens tropicais de cinturões orogênicos montanhosos (LATRUBESSE et al., 2005) que transportam altas cargas de sedimentos finos, como siltes e argilas em suspensão (SIOLI, 1984; AB'SÁBER, 2003). A origem desse material sedimentar é vinculada às altas taxas de soerguimento do cinturão orogênico andino em conjunto com as altas taxas de precipitação (LATRUBESSE et al., 2005), que propiciam uma forte energia potencial disponível para erosão e transporte de partículas.

Outros rios amazônicos originam-se em terras baixas de áreas cratônicas e bacias sedimentares no domínio dos cerrados (AB'SÁBER, 2003). Tais rios são caracterizados pela baixa quantidade de sedimentos (LATRUBESSE et al., 2005). Estas são as águas claras (SIOLI, 1984; JUNK et al., 2011), ou ligeiramente esverdeadas (AB'SÁBER, 2003), provindas de bacias hidrográficas de relevos cratônicos, que drenam a porção norte da bacia sedimentar do Paraná, o Cráton Amazônico e pequena parte da Bacia Sedimentar Amazônica. O menor transporte de carga sedimentar está vinculado com esta origem geológica, já que tais

relevo são mais senis e erodidos (LATRUBESSE et al., 2005), e não há tanta energia potencial disponível como na cadeia andina. No entanto, uma característica intrínseca a esta região são as mudanças de uso e cobertura do solo, onde extensas áreas florestais e de cerrado foram retiradas para atividades agropecuárias (CARDILLE; FOLEY, 2003; LEITE et al., 2011). Estas mudanças no uso do solo fazem com que haja uma menor proteção física do solo em relação à ação erosiva da chuva, e muitas vezes os rios desta região transportam maiores concentrações de sedimentos em suspensão, o que pode ser avaliado por dados orbitais multitemporais.

A estrutura geológica das bacias hidrográficas dos rios de águas pretas é semelhante à das bacias de água clara. Tais drenagens estão embasadas principalmente na bacia Sedimentar Amazônica e na parte norte do cráton amazônico, mas possuem características muito distintas de precipitação e cobertura do solo em relação às bacias de água clara. As altas taxas de precipitação e a densa cobertura florestal fazem com que os rios transportem grandes quantidades de materiais orgânicos dissolvidos (AB´SÁBER, 2003; JUNK et al., 2011). O Rio Amazonas possui uma mistura complexa de todos os tipos de água citados anteriormente e mais os componentes originados da grande planície de inundação existente na área (BARBOSA, 2005).

Para que os modelos empíricos sejam eficientes na estimativa da CSS em imagens sem dados *in situ*, os corpos d'água com composições químicas muito diferentes devem ser tratados separadamente. Tendo em vista essa necessidade, o tipo de água em cada estação amostral foi avaliado a partir da análise do uso e cobertura do solo e das diferenças altimétricas na área de captação à montante com base em informações disponíveis na literatura. Além da análise destas características, foi feita uma inspeção geral dos valores de CSS das estações. Após a diferenciação dos conjuntos de dados, foram realizados testes estatísticos *t* (STUDENT, 1908) e *F* (LOMAX, 2007) para verificação da igualdade de média e variância de CSS em cada conjunto de estações com o mesmo tipo de água.

Limitação imposta pela resolução radiométrica

A análise da limitação radiométrica foi baseada na revisão de literatura e na análise de espectros em águas de diferentes tipos e em vários intervalos de CSS, obtidos em diferentes locais e datas. Para esta análise, foram adotados valores de fator de reflectância bidirecional de superfície (FRBs) que é um parâmetro normalizado pela irradiância incidente no alvo e possui uma minimização dos efeitos atmosféricos (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007).

Disponibilidade de dados de campo e dados TM-5 na Amazônia

O sensor TM-5 possui recorrência de imageamento sobre uma mesma área de 16 dias, mas esta não é a frequência efetiva para o desenvolvimento de modelos de estimativa de CSS. Muitas vezes, por falhas de operação, o sensor não produz imagens, e com maior frequência, há cobertura de nuvens que impossibilitam seu uso, fator problemático para a região amazônica. Para avaliar a existência de imagens efetivamente disponíveis realizou-se o levantamento de dados *in situ* no banco de dados da ANA (www.ana.gov.br/portalsnrh) e de imagens TM (www.dgi.inpe.br/CDSR) passíveis de serem utilizadas (sem cobertura de nuvens e com qualidade radiométrica adequada).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados em dois tópicos: o primeiro aborda a definição das estações em que a área das seções transversais e o sinal proveniente da água são compatíveis com a resolução espacial e radiométrica do TM-5, o segundo aborda a disponibilidade de dados *in situ* e orbitais.

Largura das seções transversais

A partir das limitações espaciais do sensor TM, todas as estações de coleta de CSS da ANA na bacia hidrográfica amazônica foram avaliadas (Figura 3), segundo a largura dos rios. Esta avaliação mostra que 23 das 97 estações não podem ser utilizadas, ou 23,7%.

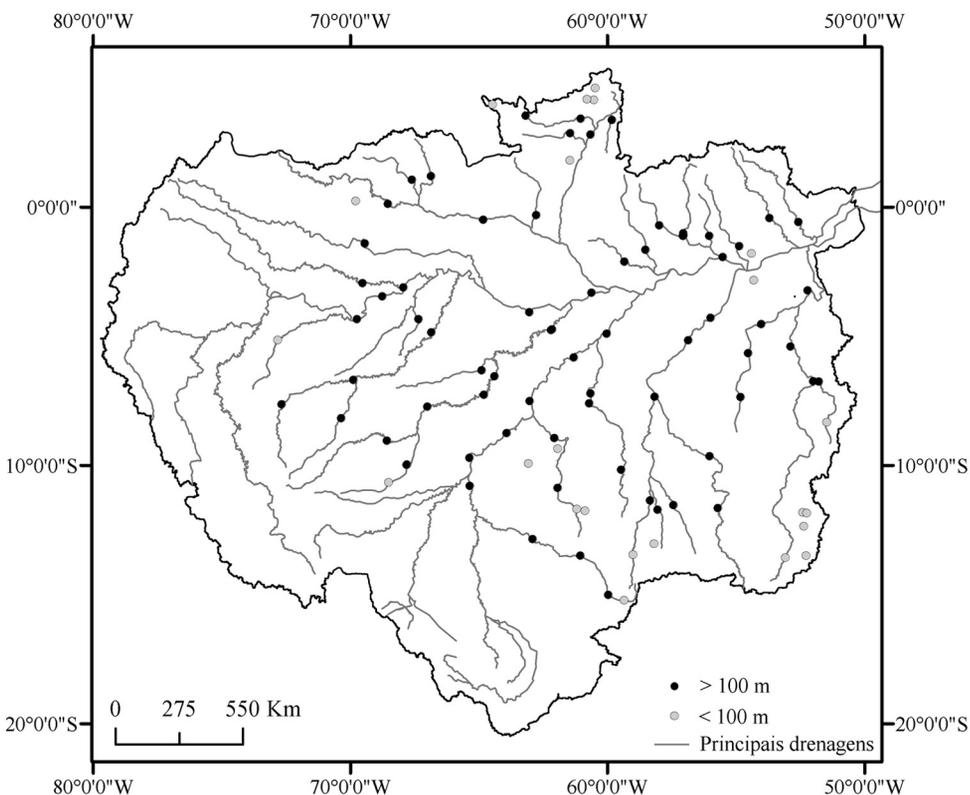


Figura 3 - Diferenciação por tamanho da seção transversal dos rios nos locais das estações de coleta de CSS da ANA na bacia hidrográfica amazônica

Classificação das estações amostrais segundo a tipologia de águas amazônicas

A figura 4 apresenta a distribuição das estações fluviométricas da ANA segundo a tipologia de águas (SIOLI, 1984) dos rios amazônicos. Além dos tipos de água preta, clara e

branca, já reconhecidos na literatura, foram diferenciados os grupos denominados aqui por Rio Amazonas e águas pretas de Roraima "água preta (RR)". O Rio Amazonas é formado por dois importantes rios, o Solimões (água branca) e o Negro (água preta), possui afluentes de águas claras (Rio Tapajós, Rio Xingú) e também possui uma forte dinâmica com grandes sistemas de planícies de inundação (BARBOSA, 2005). Dada essa diversidade de tipos de água, a estação de Óbidos foi tratada separadamente. O outro grupo é formado por três estações localizadas no estado de Roraima. Estas estações apresentaram valores maiores de CSS em relação ao grupo de águas pretas (Tabela 2), mas ainda possuem forte influência de materiais orgânicos dissolvidos, por isso foram separadas em outro conjunto. Como se observa na figura 4 apenas rios com largura de canal superior à 100m foram incluídos na análise.

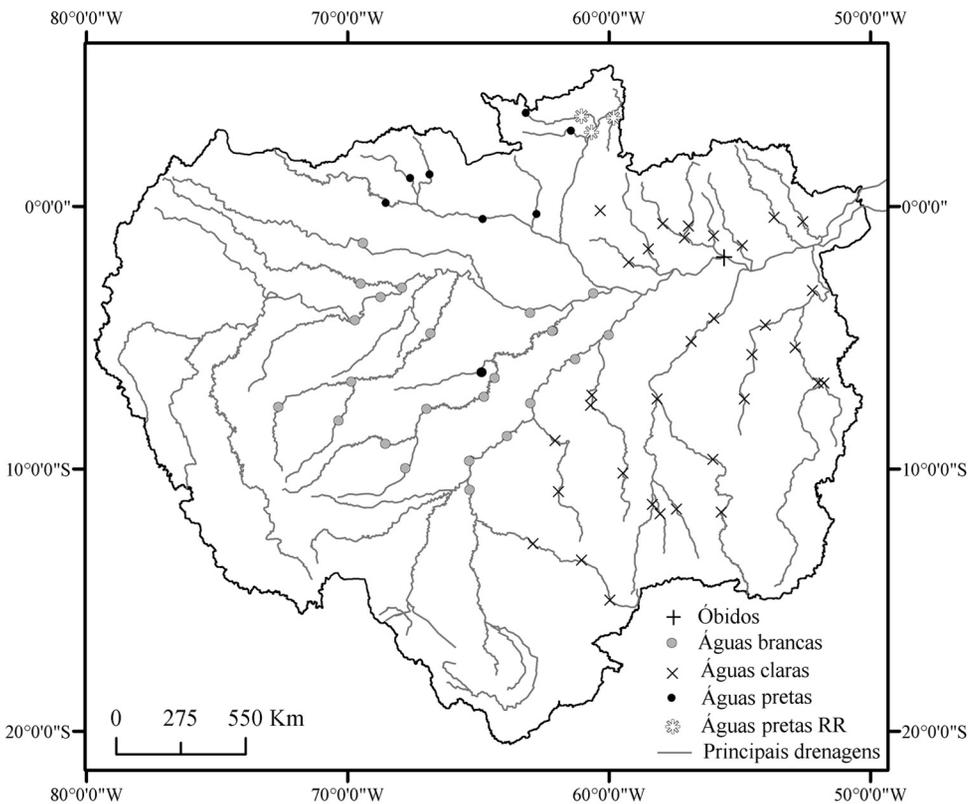


Figura 4 - Diferenciação das estações de coleta de CSS segundo as características geológicas e de uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica apenas em trechos de rios com largura superior a 100m

As tabelas 2, 3 e 4 apresentam a descrição dos dados de CSS dos tipos de água, bem como os testes estatísticos para igualdade de médias e variâncias da CSS entre os conjuntos. F representa que a hipótese H_0 é falsa e V que é verdadeira.

Tabela 2 - Descrição dos dados de CSS dos tipos de água (em mg/l)

Tipos de água	Nº de estações	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Nº de coletas
Preta	8	0	1285,2	16,94	69,02	446
Clara	33	0	5507,4	29,15	201,61	1009
Preta-RR	3	2,86	265,68	44,31	39,49	90
Rio Amazonas	1	5,56	344,58	90,23	75,31	70
Branca	25	0	2843	239,88	291,27	1371

Tabela 3 - Teste t para média $H_0: \mu_1 = \mu_2$ ($\alpha = 5\%$)

Tipo	Branca	Preta	Clara	Óbidos
Preta	F	-	-	-
Clara	F	V	-	-
Rio Amazonas	F	F	F	-
Preta - RR	F	F	V	F

Tabela 4 - Teste F para variância $H_0: \sigma_1 = \sigma_2$ ($\alpha = 5\%$)

Tipo	Branca	Preta	Clara	Óbidos
Preta	F	-	-	-
Clara	F	F	-	-
Rio Amazonas	F	V	F	-
Preta - RR	F	F	F	F

As tabelas 3 e 4 mostram que a maioria dos tipos de água possui médias e variâncias de CSS distintas. Em termos de média, a CSS da classe água clara está próxima às classes de água preta e água preta (RR). No entanto, essas duas combinações de conjuntos são diferenciadas pela variância da CSS. No tocante à variância da CSS, os únicos tipos que são iguais (5% de significância) são a água preta e o Rio Amazonas, que possuem médias de CSS muito distintas.

Para melhor avaliação dos conjuntos que possuem valores de média e variância iguais, os dados de todos os conjuntos foram plotados em gráfico de frequência acumulada (Figura 5). A figura 5 mostra que os rios de água branca possuem valores maiores de CSS do que os outros conjuntos, possuindo, por exemplo, 20% de valores acima de 350 mg/l. O Rio Amazonas possui uma certa proximidade com a água branca, mas com valores menores, possivelmente por causa da diluição das águas brancas com águas pretas e claras. Os conjuntos de água: clara, preta e preta (RR), que possuem médias iguais, podem ser mais bem avaliados. Observa-se que as águas claras possuem valores maiores do que as águas pretas e que as águas pretas (RR) possuem valores maiores do que os outros dois conjuntos. Esses três conjuntos possuem 95% dos valores de CSS abaixo de 90 mg/l, embora apresentem alguns valores extremos. As duas medidas de maior CSS de toda a bacia amazônica estão no conjunto de águas claras: 3038 e 5507,4 mg/l, e os dois maiores valores da classe de águas pretas também são extremos: 1285,2 e 674,1 mg/l. Tais valores extremos devem ter influenciado a análise de médias, de forma que os conjuntos foram considerados iguais. No entanto, tais eventos são extremamente raros. A existência de grandes obras, ou eventuais atividades de mineração podem explicar esses eventos atípicos.

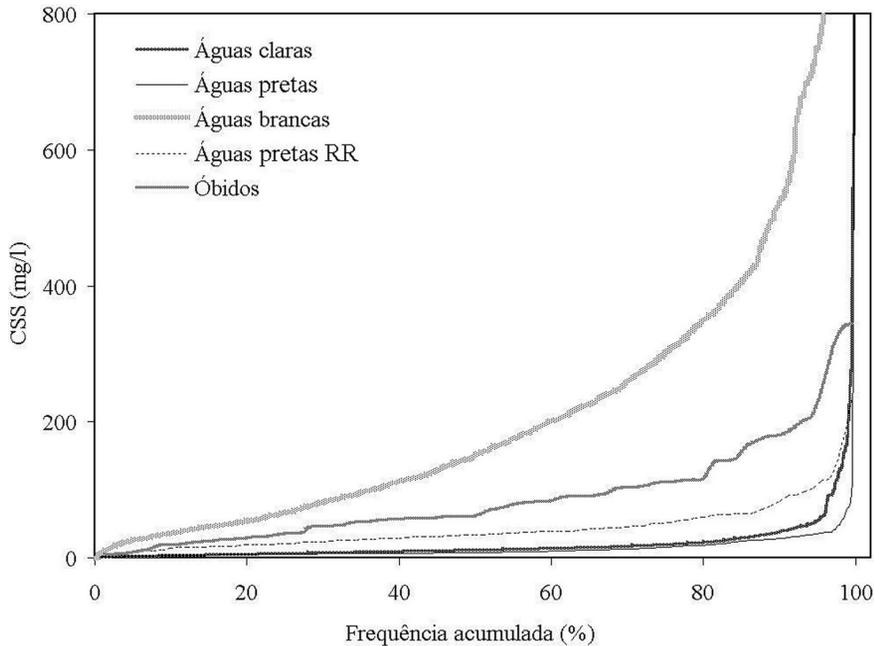


Figura 5 - Frequência acumulada das estações amostrais por CSS e tipos de água. O limite máximo do eixo Y foi fixado em 800 mg/l para melhor visualização dos dados contidos na figura

Análise da Limitação radiométrica

Como as partículas inorgânicas em suspensão na água, providas da erosão de solos e rochas, possuem um alto sinal de retorno (QUIBELL, 1991; LODHI et al., 1997; WANG et al., 2009) pode-se admitir que a baixa resolução radiométrica das imagens TM-5 não oferecem restrições para a estimativa da CSS em rios em que este seja o componente dominante.

A resolução radiométrica do sensor TM-5 é principalmente limitada quanto à avaliação de compostos orgânicos dissolvidos das águas pretas. Este componente possui alta absorção de REM para todos os comprimentos de onda do visível e infravermelho próximo (Dekker, 1993), correspondente às bandas 1 a 4 do TM-5. A figura 6 mostra os espectros de reflectância obtidos para águas pretas e para águas brancas com variados níveis de CSS.

Pode-se observar na figura 6 que as águas pretas em diferentes locais e épocas, apresentam valores muito semelhantes de FRB. As pequenas variações de FRB ocasionadas pelas diferenças na concentração e composição desse tipo de água dificilmente podem ser avaliadas a partir de dados TM-5. Já as águas com altos valores de CSS apresentam grandes variações de FRB. Conforme aumentam as concentrações de CSS, os valores de FRB também aumentam o que sugere ser viável o desenvolvimento de modelos empíricos de CSS a partir dos dados TM-5.

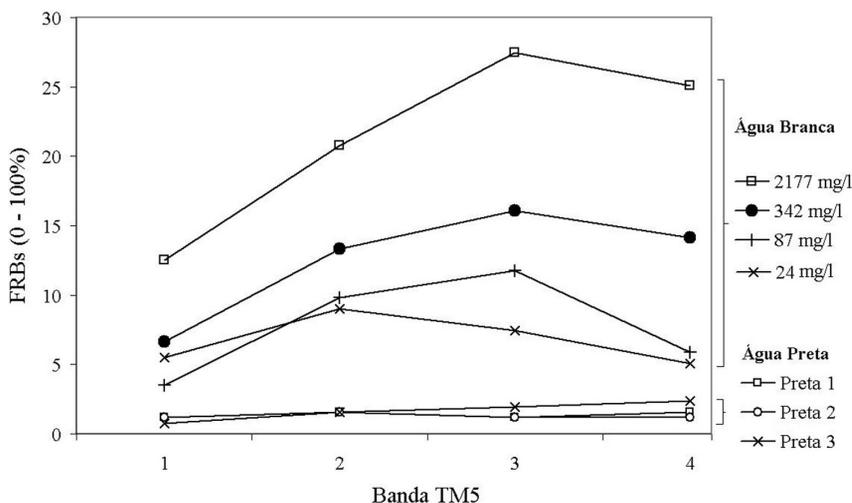


Figura 6 - Comparação entre os tipos de água preta e branca. Os espectros foram coletados na estação de Porto Velho - RO (Rio Madeira - água branca) e em pequenos lagos na planície de inundação próxima a Óbidos - PA, (água preta)

Análise da frequência de dados de campo e dados TM-5 na Amazônia

O resultado da avaliação da frequência de dados *in situ* passíveis de serem utilizados para gerar o modelo baseado em imagens orbitais encontra-se resumido na tabela 5. Nela é apresentado o número de imagens disponíveis com e sem cobertura de nuvens por estação de coleta, informações relativas à localização de cada estação e dados pluviométricos. Estas quatro estações foram avaliadas por serem representativas das áreas de interesse das águas brancas e claras, as estações de águas pretas e águas pretas (RR) não foram incluídas tendo em vista os resultados apresentados na figura 6.

Tabela 5 - Disponibilidade de dados de campo de CSS (ANA) e imagens TM-5

Estação	Porto Velho	S. P. de Olivença	Jusante Foz Peixoto de Azevedo	Cruzeiro do Sul
Rio	Madeira	Solimões	Teles Pires	Juruá
Tipo de água	Branca	Branca	Clara	Branca
Estado	Rondônia	Amazonas	Mato Grosso	Acre
Precipitação média (mm/ano)	2246	2706	2136	2124
Dados <i>in situ</i> (CSS) - ANA	60	102	21	103
Nº de imageamentos	422	389	431	408
Nº de imagens utilizáveis*	202	130	191	175
% de imagens utilizáveis	47%	33%	44%	42%
Aumento relativo da base de dados	336%	127%	909%	168%

* por utilizável define-se a imagem que não apresenta problemas radiométricos e cobertura de nuvens no local da estação.

A tabela 5 mostra que há um grande número de imagens que não podem ser utilizadas para o desenvolvimento de modelos devido à intensa cobertura de nuvens e problemas radiométricos. Dentre as áreas analisadas, a estação de São Paulo de Olivença apresentou o menor número e porcentagem de imagens utilizáveis. No entanto, mesmo para esta estação com os maiores valores de precipitação, o aumento da base de dados por meio de imagens TM-5 ainda é expressivo (127%). Os outros casos mostram possibilidades para aquisição de maior quantidade de dados, de até 909% a mais do que a base de dados atual, para a estação de Jusante Foz Peixoto de Azevedo na região norte do Estado do Mato Grosso, no Rio Teles Pires.

CONCLUSÕES

Com base nesse estudo de viabilidade da integração de dados *in situ* e dados TM-5 para o desenvolvimento de modelos empíricos de qualidade de água pode-se concluir que: i) os tipos de água com maior potencial para o desenvolvimento de modelos empíricos de estimativa de CSS a partir de imagens TM-5 são os que incluem os rios de água branca e a estação de Óbidos (Rio Amazonas); ii) apesar dos baixos valores de CSS em rios de água clara (95% abaixo de 55 mg/l) este conjunto de dados também pode ser utilizado pois as águas possuem pouca influência de materiais orgânicos dissolvidos, no entanto, este grupo deve ser tratado de forma isolada dos demais conjuntos de dados; iii) Os conjuntos de água preta e água preta (RR) são distintos em termos de média e variância (5% de significância) e sua composição, caracterizada pelos baixos valores de CSS e pela presença de materiais orgânicos dissolvidos responsáveis por forte absorção da REM, não permitem a geração de modelos empíricos com dados TM-5; iv) para as piores situações de precipitação e problemas radiométricos, a quantidade de dados que podem ser adquiridos pelas imagens orbitais ainda é superior à quantidade de dados atualmente disponibilizados pela ANA.

A próxima etapa desse estudo consistirá no desenvolvimento e teste dos modelos de estimativa de CSS baseados na integração de dados *in situ* e imagens TM/Landsat.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pela concessão de bolsa de mestrado ao primeiro autor, ao físico Lino Augusto Sander de Carvalho e ao geógrafo Édipo Henrique Cremon pelas revisões e comentários.

REFERÊNCIAS

AB´SÁBER, A. **Os domínios da natureza no Brasil – Potencialidades Paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. 159 p.

ARANUVACHAPUN, S.; WALLING, D. E. Landsat-MSS Radiance as a Measure of Suspended Sediment in the Lower Yellow River (Hwang Ho). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 2, p. 145 - 165, 1988.

BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento Remoto da Dinâmica da circulação da Água do Sistema de Curai/Rio Amazonas**. 2005. 255 f. Tese (Doutorado) – INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

BARBOSA, C.; NOVO, E. M. M. Remote sensing of the water properties of the Amazon floodplain lakes: the time delay effects between in-situ and satellite data acquisition on model accuracy. In: 33rd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT: Sustaining the millennium Development Goals, 2009, Stresa. **Proceedings...** Stresa, 2009.

CARDILLE, J. A.; FOLEY, J. A. Agricultural land-use change in Brazilian Amazônia between 1980 and 1995: Evidence from integrated satellite and census data. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 4, p. 551 – 562, 2003.

CHARLTON, R. **Fundamentals of Fluvial Geomorphology**. London: Routledge. 2008. 234 p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Edgard Blucher, 1981. 313 p.

CURRAN, P. J.; NOVO, E. M. L. M. . The relationship between sediment concentration and the remotely sensed spectral radiance: A review. **Journal of Coastal Research**, v. 4, n. 3, p. 351 - 368, 1988.

DEKKER, A.G. **Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing**. 1993. PhD teses, Free University, Amsterdam, 1993.

DEKKER, A. G.; BUKATA, R. P. Remote Sensing of Inland and Coastal Waters. In: STONE W. R. (Ed.). **Review of Radio Science 1996 – 1999**. Wiley-IEEE, 1999, p. 519 – 534

DEKKER, A. G.; VOS, R. J.; PETERS, S. W. M. Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analyses of TM and SPOT sensor data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 1, p.15 – 35, 2002.

DOERFFER, R; SCHILLER, H. The MERIS Case 2 water algorithm. **International Journal of Remote Sensing**. v. 28, n.3-4, 2007

DOWNS, P. W. e GREGORY, K. J. **River Channel Management: Towards Sustainable Catchment Hydrosystems**. Londres: Arnold, 2004.

GITELSON, A. A.; DALL’OLMO, G.; MOSES, W.; RUNDQUIST, D. C.; BARROW, T.; FISHER, T. R.; GURLIN, D.; HOLZ, J. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3582 – 3593, 2008.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**; tradução: José Carlos Neves Epiphany (Coord.)... [et al.]. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

JUNK, W.; PIEDEDE, M. T. F.; SCHÖNGART, J.; COHN-HAFT, M.; ADENEY, J. M.; WITTMANN, F. A classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands. **Wetlands**, v. 31, n. 4, p. 623 - 640, 2011.

KHORRAM, S. Development of water quality models applicable throughout the entire San Francisco Bay and Delta. **Photogrammetric Engineering Remote Sensing**, v. 51, n.1 p. 53 - 62, 1985.

LATRUBESSE, E.; STEVAUX, J. C.; SINHA, R. Tropical Rivers. **Geomorphology**, v. 70, p. 137 - 206, 2005.

LEITE, C. C.; COSTA, M. H.; LIMA, C. A.; RIBEIRO, C. A.; SEDIYAMA, G. C. Historical reconstruction of land use in the Brazilian Amazon (1940-1995). **Journal of Land Use Science**, v. 6, p. 33 - 52, 2011.

LOBO, F. L.; NOVO, E.; BARBOSA, C.; GALVÃO, L. S. Reference spectra to classify Amazon water types. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 11, p. 3422 - 3442, 2012.

LODHI, M. A.; RUNDQUIST, D. C.; HAN, L.; KUZILA, M. S. The Potential for Remote Sensing of Loess Soils Suspended in Surface Waters. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 33, n. 1, p. 111 - 117, 1997.

LOMAX, R. G. **Statistical concepts: A second course for education and the behavioral sciences**. Routledge: Nova York, 2007.

MERTES, L. A. K.; SMITH, M.O.; ADAMS, J. B. Estimating Suspended Sediment Concentrations in Surface Waters of the Amazon River Wetlands from Landsat Images. **Remote Sensing of Environment**, v. 43, p. 281 - 301, 1993.

MORTON, D.; DEFRIES, R. S.; SHIMABUKURO, Y. E.; ANDERSON, L. O.; ESPÍRITOSANTO, F. D. B.; HANSEN, M.; CAROLL, M. Rapid assessment of annual deforestation in the Brazilian Amazon using MODIS data. **Earth Interactions**, v. 9, n. 8, p. 1 - 22, 2005.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Edições A. Silva Vieira, 2007.

QUIBELL, G., The effect of suspended sediment on the reflectance from freshwater algae. **International Journal of Remote Sensing**, v.12, n.1, p.177-182, 1991.

RITCHIE, J. C.; COOPER, C. M.; YONGQING, J. using Landsat Multispectral Scanner Data to Estimate Suspended Sediments in Moon Lake, Mississippi. **Remote Sensing of Environment**, v. 23, p. 65 - 81, 1987.

RITCHIE, J. C.; SHIEBE, F. R. Water Quality. In: SHULTZ, G. A.; ENGMAN, E. T. (Ed.). **Remote Sensing in Hydrology and Water Management**. New York: Springer, 2000.

STUDENT. The Probable Error of a Mean. **Biometrika**, v. 6, p. 1 - 25, 1908.

NECHAD, B.; RUDDICK, K. G.; PARK, Y. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. **Remote Sensing of Environment**, v.114, n.4, p.854-866, 2010.

VOLPE, V.; SILVESTRI, S.; MARANI, M. Remote sensing retrieval of suspended sediment concentration in shallow Waters. **Remote Sensing of Environment**, v.115, n.1, p.44-54, 2011.

WANG, J. J.; LU, X. X.; LIEW, S. C.; ZHOU, Y. Retrieval of suspended sediment concentrations in large turbid rivers using Landsat ETM+: an example from the Yangtze River, China. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.34, n.8, p.1082-1092, 2009.

WHITLOCK, C. H.; KUO, C. Y.; LeCROY, S. R. Criteria for the Use of Regression Analysis for Remote Sensing of Sediment and Pollutants. **Remote Sensing of Environment**, v.12, n.2, p.151-168, 1982.

Recebido em abril de 2012

Revisado em julho de 2012

Aceito em julho de 2012