

Resposta espectral da água com diferentes concentrações de sólidos em suspensão

Spectral response of water with different concentrations of solids in suspension

Makele Rosa de Paula*, Franciele de Lima Sarmiento*, Felipe Correa dos Santos*, Edison Antonio Alberti*, Everson Mattos**, Waterloo Pereira Filho*, Fabio Marcelo Breunig***

* Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: makeleufsm@hotmail.com, francielisarmiento@gmail.com, felipecorrea_rs@hotmail.com, edisonalberti@gmail.com, waterloopf@gmail.com

** Departamento de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: everson.mattos@gmail.com

*** Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, e-mail: fabiobreunig@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v50i0.77005>

Resumo

O sensoriamento remoto é uma técnica cada vez mais utilizada para obter informações ambientais. Assim, avaliamos a resposta espectral da água submetida a diferentes concentrações de Totais de Sólidos em Suspensão (TSS). O experimento foi conduzido em um ambiente controlado com o uso de uma caixa de água, a qual foram adicionadas frações de Latossolo Vermelho. Os dados de TSS oscilaram de zero, água limpa, até 318 mg/l. Os dados de reflectância foram obtidos com o uso do espectrorradiômetro FieldSpec (400 a 900 nm). O aumento de TSS levou a dois efeitos distintos quanto a reflectância de acordo com a faixa espectral: i) diminuição da reflectância na faixa de 400 a 525 nm e ii) aumento na reflectância nos comprimentos de onda maiores do que 525 nm. Este quadro proporcionou correlações significativas e negativa para o intervalo de 400 a 510 nm e significativas e positivas entre 584 e 822 nm. Foram testadas diferentes funções matemáticas para a estimativa de TSS a partir da reflectância nos comprimentos de onda que apresentaram as melhores correlações. O melhor modelo foi o polinomial com R^2 de 0,82 em 741 nm. Portanto, o TSS, constituído de Latossolo Vermelho, altera a reflectância da água a níveis possíveis de serem detectados com recursos de sensoriamento remoto, principalmente na borda vermelha e infravermelho próximo.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; Total de Sólidos em Suspensão; Qualidade da água.

Abstract

Remote sensing is a technique that is being increasingly used to gather environmental information. Therefore the spectral response of water subjected to different concentrations of Total Suspended Solids (TSS) was evaluated. The experiment was performed in a controlled environment using a water tank, to which small rates of Rhodic Acrustox were added. TSS data varied from zero for clean water up to 318 mg/L. Reflectance data were collected through FieldSpec spectroradiometer (400 to 900 nm). The increase in TSS rendered two distinct effects regarding reflectance: i) there was a decrease in reflectance in the range from 400 nm to 525 nm and ii) there was an increase in reflectance in wavelengths higher than 525 nm. This situation provided significative and negative correlations to the interval from 400 nm to 510 nm, and significative and positive correlations from 584 nm to 822 nm. Different mathematical functions were tested regarding the estimation of TSS from reflectance in the wavelengths with the best correlations. The best model was polynomial

regression with R^2 of 0.82 at 741 nm. Therefore, TSS constituted of Rhodic Acrustox alters the reflectance of water to levels that can be detected through means of remote sensing, especially at red-edge and near-infrared.

Keywords: Remote Sensing; Total Suspended Solids; Water quality.

I. INTRODUÇÃO

A produção de sólidos em bacias hidrográficas depende de diversos fatores, seja de origem natural como o tipo de solo, geologia, geomorfologia, clima (WANG et al., 2004; TUNDISI et al., 2004; HESTIR et al., 2015), como pela ação antrópica, principalmente representado pelo uso e ocupação da terra (FRITZ, 1989; BRAMLEY et al., 2002; AHEARN et al., 2005; LIU et al., 2015). A intervenção antrópica nos ecossistemas terrestre e aquático tem gerado uma série de problemas ambientais. Silva et al. (2009) ressaltam que, em consequência da intensa exploração dos recursos hídricos, estes encontram-se, em geral, com sérios problemas na qualidade da água.

Como consequência dos solos desprovidos de cobertura vegetal e episódios de precipitação intensa, ocorre erosões que tendem a proporcionar elevada quantidade de sólidos carregados para os corpos d'água, o que pode proporcionar assoreamento dos rios, lagos e reservatórios (CURRAN e NOVO, 1988; LATRUBESSE et al., 2005; TYLER et al., 2006; LATRUBESSE et al., 2012; BREUNIG et al., 2017). Lodhi et al. (1997) ressaltam que os sólidos afetam a qualidade da água e sua adequação quanto ao consumo, recreação, e para fins industriais. Ainda, servem como transportador e armazenador de pesticidas, fósforo absorvido, nitrogênio e compostos orgânicos. Por fim, comprometem a vida útil de empreendimentos hidráulicos seus processos metabólicos inclusive a reprodução de peixes.

Conhecer a dinâmica e a quantidade do total de sólidos em suspensão (TSS) é de suma importância para estudos de bacias hidrográficas, em relação a projetos hidráulicos, ambientais e usos dos recursos hídricos (CARVALHO, 2008). Portanto, há uma necessidade crescente de estudos em ambientes aquáticos, que buscam compreender a sua dinâmica, a fim de monitorá-los e permitir a tomada de medidas adequadas quanto à conservação ou recuperação.

Nesse sentido, técnicas tradicionais de inspeção e coleta de campo têm se mostrado trabalhosas e temporalmente limitadas. Métodos indiretos como o sensoriamento remoto possuem um excelente potencial para obtenção de informações. De acordo com Novo (2010) o sensoriamento remoto fornece dados de grande utilidade para diversas aplicações, dentre elas pode se ressaltar a limnologia, ao auxiliar na caracterização da

vegetação aquática, identificação de tipos de água e avaliação do impacto do uso da terra em ecossistemas aquáticos.

Alguns parâmetros de qualidade da água são considerados componentes opticamente ativos (COAs), devido à propriedade de interagir com a radiação eletromagnética (KIRK, 1994; DALL'OLMO et al., 2005; GITELSON et al., 2007). De acordo com Londe et al. (2006) a composição das substâncias opticamente ativas presentes na água resulta em diferentes padrões de absorção e de retro-espalhamento da radiação eletromagnética, o que permite distinguir diferentes assinaturas espectrais para cada tipo de água.

Diversos modelos empíricos têm sido propostos na literatura para estimar o TSS (CHEN, CURRAN e HANSOM, 1992; GITELSON et al. 1993; HAN, 1997; J. J. WANG e Lu 2010; ODERMATT, et al. 2012; TIAN et al. 2014; SHI et al. 2015). Contudo, para compreender a resposta dos modelos isso requer um experimento com distintas concentrações de TSS na água.

Cabe ressaltar que embora as coletas de dados ao nível de campo sejam mais fiéis a realidade dos ecossistemas aquáticos, seria inviável pelo grande número necessário de amostras de águas, pelo alto custo operacional (MANTOVANI, 1993), pela demora, e por não fornecer uma visão sinóptica da distribuição de TSS na água.

Nesse sentido, faz-se necessário o uso de sensoriamento remoto e a busca de informação dos melhores comprimentos de onda para a estimativa da concentração de TSS no ambiente aquático, visto que é uma variável de fundamental importância para a determinação da qualidade da água.

Assim, o objetivo do estudo consiste em analisar a resposta espectral da água em função de diferentes concentrações de Latossolo Vermelho em um ambiente controlado. Ademais, foram avaliadas as correlações entre a resposta espectral e as concentrações de TSS medidas em laboratório.

II. METODOLOGIA

Delineamento experimental e medidas radiométricas

Realizou-se o experimento nas dependências do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), localizado em Santa Maria – RS, no dia 07 de novembro 2013 sob condições de iluminação direta do sol, entre as 11:00 horas e 14:00 horas. O experimento foi realizado em um tanque de 300 litros de água limpa (Figura 1a). Foi utilizado um tanque em formato de tronco de cone com 54 cm de profundidade, 140 cm de diâmetro superior e 75 cm inferior, com 50 cm de água, de acordo com a Figura 1b. O tanque foi pintado de preto fosco para

atenuar sua reflectância de fundo.

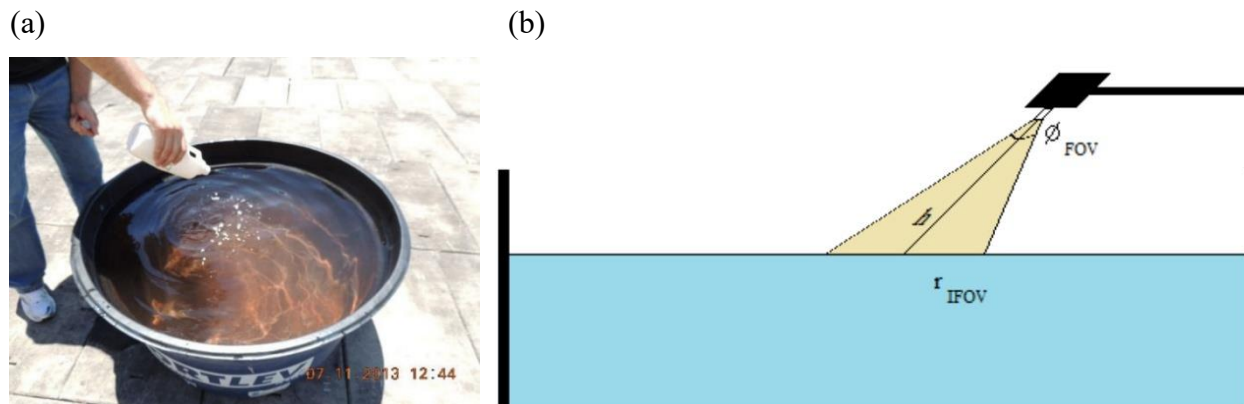


Figura 1: Delineamento experimental com (a) o tanque de água com 300 litros e contínua adição de TSS e (b) configuração do espectrorradiômetro para a aquisição das medidas. (FOV: Campo de visada; IFOV: Campo de visada instantâneo; h: altura; r: raio).

Amostras de solo foram diluídas em 500 ml de água em cada garrafa, as quais foram adicionadas, uma por uma, no tanque de 300 litros (Figura 1a) que inicialmente encontrava-se com água limpa. As garrafas foram agitadas com as amostras de TSS antes da sua inclusão no tanque. Para cada amostra de solo adicionada realizou-se 10 medições espectrais da água, dessas gerou-se uma curva de reflectância média. Para as operações de tratamento dos dados utilizou-se o programa computacional ViewSpecPro versão 5.6 (ASD Inc. 2010). Coletaram-se amostras de água para análise do TSS em laboratório de acordo com método de filtragem descrito em *American Public Health Association* (APHA, 2005). A correlação foi realizada entre a reflectância espectral e TSS.

Os espectros de reflectância foram obtidos com um campo de visada (FOV) de 25°, na faixa espectral de 400 a 900 nm (visível ao infravermelho próximo) com uma resolução espectral de 1 nm (ASD Inc, 2010). Para a medida foi adotado um ângulo zenital de observação de 45° em relação à superfície da água e de 90° de azimute em relação à posição do sol (plano principal de espalhamento), para minimizar o efeito da reflectância especular da água e a influência do céu (STEFFEN et al., 1996; BREUNIG et al., 2016).

Para suavizar as curvas de reflectância que apresentaram ruídos, aplicou-se o filtro de média móvel com tamanho de 7 amostras, que possui uma implementação simples e de baixo tempo computacional. O resultado esperado após a filtragem é a remoção do ruído, sem alteração dos detalhes espectrais medidos, selecionando assim, a dimensão da vizinhança com base nesse critério (WATANABE et al., 2010). Usou-se o software Excel

para a suavização das curvas de reflectância. O cálculo consiste do valor espectral de pontos, considerando um intervalo discreto e pré-definido a partir de um ponto médio (TSAI, 1998).

Análise dos dados

Foram aplicados testes estatísticos aos dados de TSS e reflectância espectral. Realizaram-se análises de correlação entre os valores de reflectância e o TSS, na faixa espectral 400 a 900 nm. Para a verificação da existência ou não de correlação significativa entre os dados espectrais e a variável TSS foram calculados coeficientes de correlação linear e testados com o teste t de Student a um nível de significância de 99,9% conforme Equação 1.

$$t_{cal} = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}} \quad (1)$$

Onde: t: t de Student calculado; n – 2: graus de liberdade; r: coeficiente de correlação e r²: coeficiente de determinação.

Após a identificação dos comprimentos de onda significativamente correlacionados com a variável TSS foram gerados diagramas de dispersão. Sobre os diagramas de dispersão foram testadas equações lineares e não lineares, permitindo o cálculo do valor da regressão, que expressa a relação entre os parâmetros espectrais e o TSS.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas espectrais demonstram bem as principais feições da reflectância do corpo d'água com presença de sólidos em suspensão (Figura 2). Observa-se que houve dois efeitos distintos em relação a reflectância e o aumento de TSS. Primeiro ocorreu a diminuição da reflectância em comprimentos de onda inferiores a 525 nm e segundo registrou-se aumento da reflectância com o aumento da carga de TSS para comprimentos de onda superiores a 525 nm. A faixa espectral em que se observou o aumento da reflectância é registrado em trabalhos de Curran e Novo (1988); Chen, Curran e Hansom (1992); Han e Rundquist (1996); Han (1997); Lodhi et al. (1997); Doxaran et al. (2002).

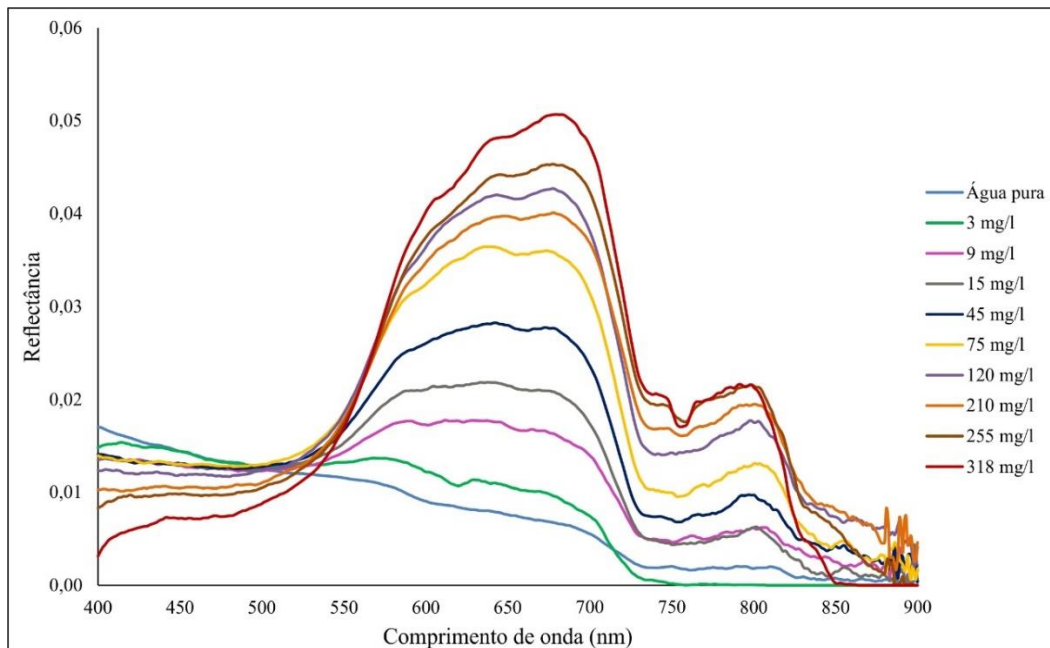


Figura 2: Reflectância espectral da água com diferentes níveis de TSS (apenas algumas concentrações são apresentadas).

Mantovani (1993) ressalta que, as características do material particulado em suspensão ligadas à sua constituição mineralógica, ao tamanho das partículas e concentrações são inter-relacionadas e desempenham papel importante na determinação da resposta espectral resultante.

Observou-se que as maiores diferenças de reflectância ocorrem na faixa espectral entre 550 a 700 nm (região do visível), como verificado por Han (1997), e um pico de reflectância em 800 nm (infravermelho). Lodhi et al. (1997) verificaram que os maiores comprimentos de onda da região do visível parece ser mais vulneráveis a concentração de TSS do que em menores comprimentos de onda nesta mesma região do espectro. Novo (2010) afirma que, quanto maior a concentração de partículas inorgânicas suspensas na coluna d'água, maior é o espalhamento e maior é a reflectância.

Em experimento realizado por Lodhi et al. (1997) foi observado o efeito de saturação, quando o acréscimo de TSS não modifica mais o formato da curva de reflectância, observada em uma concentração de 300 mg/l, em TSS constituído de um solo Argiloso e em aproximadamente 600 mg/l para o solo Siltoso. A saturação, portanto, está relacionada com a concentração e o tipo de TSS. As concentrações utilizadas no presente artigo, com máximo de 318 mg/l, não registraram saturação do TSS na reflectância.

O pico de maior reflectância ocorreu na região do vermelho em 685 nm, representada pela curva de maior carga de sólidos em suspensão (318 mg/l) (**Figura 2**), o que pode ser explicado pela concentração de TSS e pela cor da água. Han (1997), encontrou o pico de reflectância localizado em 646 nm (vermelho) quando o TSS

atingiu 500 mg/l (maior concentração de TSS). Novo (2001) afirma que, o TSS compõe dois tipos diferentes de sólidos em suspensão, orgânicos e inorgânicos, e principalmente os sedimentos orgânicos estão relacionados à cor da água. Infelizmente nesse estudo essa diferenciação não foi realizada.

O aumento da concentração de sólidos tende a formar um patamar de reflectância entre 600 e 700 nm, resultando no deslocamento do pico de máxima reflectância em direção aos maiores comprimentos de onda (NOVO, 2001; ARRAUT et al., 2005). No entanto, conforme aumenta a concentração do TSS na água, há uma saturação da reflectância (LODHI et al., 1997). Assim, para tais casos, as faixas do azul e do verde, podem não fornecer informações ao modelo (MONTANHER, 2013), já que a saturação da relação é dependente do comprimento de onda (LODHI et al., 1997). Fica claro a maior diferença dos dados de reflectância na região espectral do vermelho, o que indica o potencial de uso dessa faixa para as estimativas de TSS utilizando dados de sensoriamento remoto.

A análise de correlação do TSS com a sua respectiva resposta espectral em relação ao comprimento de onda de 400 a 900 nm mostrou dois cenários distintos (Figura 3). Verificou-se que a diferença da reflectância entre as concentrações de TSS foi menor nos comprimentos de onda mais curtos do que 510 nm (Figura 2), obtendo correlações negativas significativa a partir de -0,62, limites obtidos para o nível de confiança de 99,9% (Figura 3). Este resultado foi semelhante ao encontrado por Han (1997), em que a diferença de reflectância diminuiu com TSS a comprimentos de onda mais curtos do que 550 nm, obtendo $r < -0,7$.

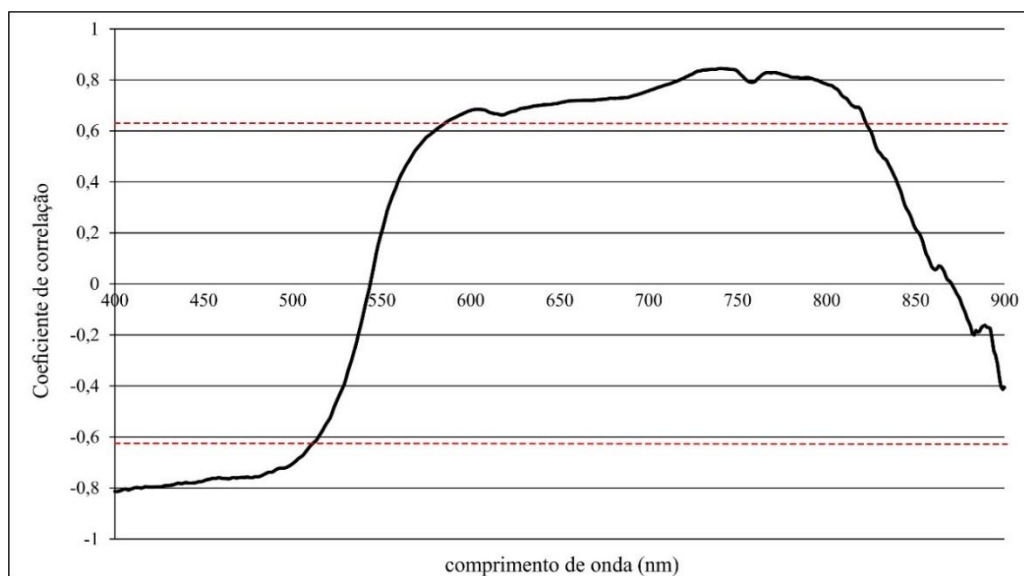


Figura 3: Correlação entre reflectância da água em função das diferentes concentrações de TSS (linha tracejada em vermelho – limite dos valores estatisticamente significativo, $\alpha = 0,001$).

Em 543 nm ocorre uma inversão para as correlações positivas, porém passam a ser significativas a partir de 584 nm com $r = 0,62$, onde ocorre um aumento da correlação para a faixa do vermelho e infravermelho próximo, até 822 nm, enquanto que o $r > 0,8$ ocorre entre as faixas de 720 a 754 nm e 762 nm a 791 nm, portanto a reflectância aumenta com o aumento de TSS.

Esse resultado foi semelhante ao encontrado em outros estudos como os de Han (1997) e Chen, Curran e Hansom (1992). Os últimos autores encontraram na faixa de comprimento de onda de 710 a 930 nm coeficientes de correlação de 0,95 e acima disso, entre o TSS medido em laboratório e a reflectância espectral. Han (1997) encontrou coeficientes de correlação de 0,99 nos comprimentos de onda entre 722 e 900 nm, o que indicou uma relação quase linear entre TSS e reflectância. Ressalta-se que o maior valor de r (0,9983) ocorreu em 827, 830 e 847 nm. Han e Rundquist (1996) verificaram que para ambos os sedimentos, siltoso e argiloso, o coeficiente de correlação aumentou com o aumento do comprimento de onda, e superou 0,95 em comprimentos de onda além de 700 nm. Obtendo $r = 0,99$ em 756 nm para o siltoso e 0,97 em 801 nm para o argiloso. No experimento conduzido por Lodhi et al. (1997) os valores de correlação obtidos para o solo siltoso variaram de 0,78 a 0,98, com maiores correlações ($r > 0,90$) na região do infravermelho próximo entre 714 e 880 nm. Os comprimentos de onda com melhor correlação com o TSS ocorreram com pequenas diferenças em relação a literatura provavelmente ao fato do tipo de solo utilizado em cada experimento.

Os comprimentos de onda cujos valores apresentaram os melhores resultados de correlação (Figura 3) foram testados também com funções não lineares para se ter uma ideia da relação entre a reflectância espectral e o TSS. A opção pelos ajustes logarítmico e polinomial foi considerada a partir do critério de priorizar o aumento de R^2 , com intuito de oferecer maior potencial de predição as regressões (NETER et al., 1996).

A Figura 4a apresenta o modelo empírico com ajuste da função logarítmica entre a reflectância em 685 nm e o TSS, o qual obteve um coeficiente de determinação (R^2) de 0,75. Chen, Curran e Hansom (1992) encontraram $R^2 = 0,87$ no comprimento de onda de 670 nm entre o TSS e a reflectância espectral.

Na Figura 4b, o modelo empírico usado com o comprimento de onda em 741 nm para estimar o TSS, apresentou $R^2 = 0,82$ (ajuste polinomial), constituindo-se o de maior correlação. Em 800 nm, o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,78 (ajuste polinomial). Jensen (2009) afirma que, a faixa de comprimento de onda entre 714 e 880 nm pode ser útil para determinar a quantidade de sólidos em suspensão nas águas em que eles sejam os constituintes predominantes. A borda vermelha vem sendo indicada como promissora para estimativas de TSS, concordando com os resultados apresentados (Figura 4b).

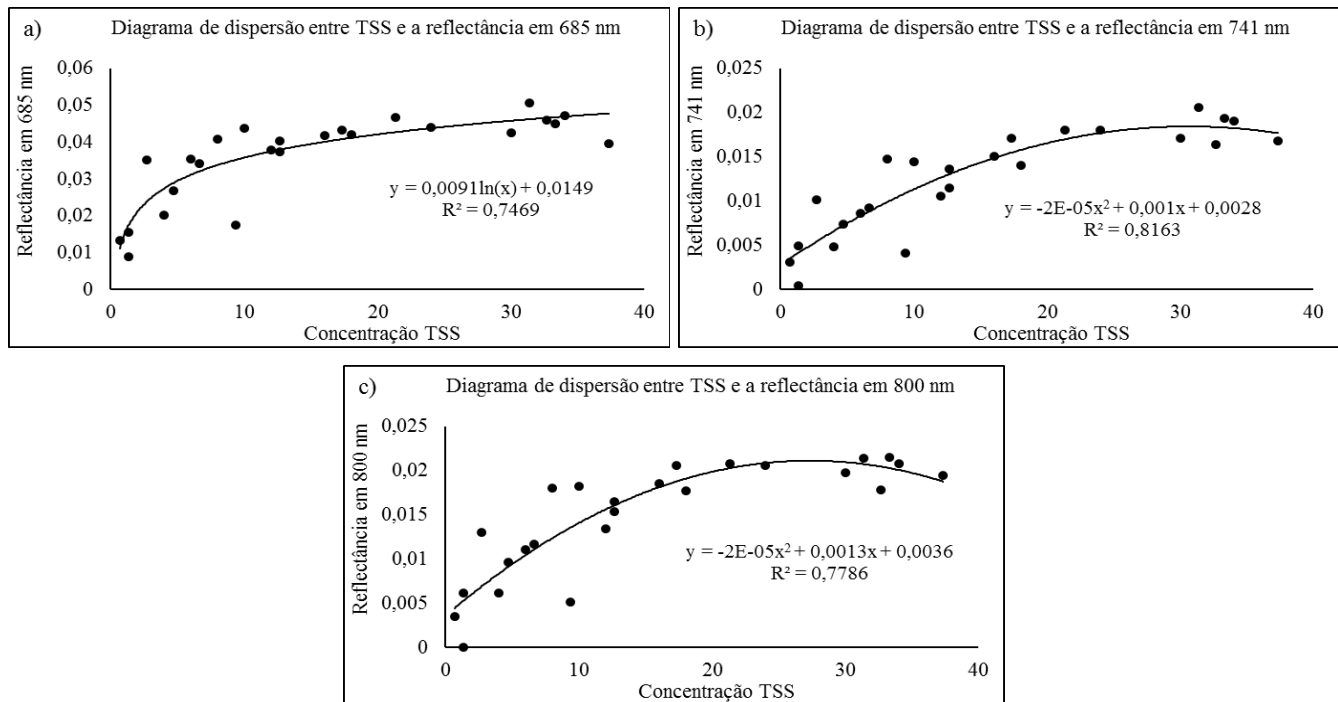


Figura 4: Diagramas de dispersão entre a concentração de TSS medida em laboratório e a resposta espectral em (a) 685 nm (ajuste logarítmica) (b) 741 nm (ajuste polinomial) e (c) 800 nm (ajuste polinomial).

Os valores de R^2 demonstram que a faixa espectral do infravermelho próximo é mais indicada para a estimativa da concentração de TSS na água de superfície, desde que encontre em predomínio no ambiente, conclusão semelhante as de Han e Rundquist, (1994) e Lodhi et al. (1998).

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aumento da carga de sólidos em suspensão alterou a intensidade de reflectância em duas faixas espectrais entre 400 e 900 nm. A primeira, a azul, ocorreu de forma inversa e na faixa verde até o infravermelho próximo o efeito foi diretamente proporcional. Especificamente a correlação negativa e significativa ocorreu entre 400 e 510 nm e a segunda faixa, com correlação positiva e também significativa, foi encontrada entre os comprimentos de onda de 584 até 822 nm.

O melhor comprimento de onda para estimar o TSS a partir de dados espectrais foi o de 741 nm, com um coeficiente de determinação de 0,82 e uso de um ajuste polinomial. Embora dentro da mesma faixa espectral também documentada na literatura o pequeno deslocamento do melhor comprimento de onda para estimar o TSS deve ser decorrente do tipo de solo utilizado neste trabalho.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processos 474812/2007-1, 309030/2017-0 e 311374/2019-0).

V. REFERÊNCIAS

AHEARN, D. S.; SHEIBLEY, R. W.; DAHLGREN, R. A.; ANDERSON, M.; JOHNSON, J.; TATE, K. W. Land Use and Land Cover Influence on Water Quality in the Last Free-Flowing River Draining the Western Sierra Nevada, California. *Journal of Hydrology*, v. 313, n. 3-4, p. 234–247, 2005.

APHA - American Public Health Association. *Standard Methods for the Examination of Water and Waster water*. 21 ed. Springfield: Byrd Prepress, 2005.

ARRAUT, E. M.; RUDORFF, C. M.; BARBOSA, C. C. F.; CARVALHO, J. C.; FILHO, W. P.; NOVO, E. M. L. M. Estudo do comportamento espectral da clorofila e dos sólidos em suspensão nas águas do Lago Grande de Curuai (Pará), na época de seca, através de técnicas de espectroscopia de campo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. Anais... Goiânia: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005, p. 2447-2456.

ASD (Analytical Spectral Devices, Inc.). *FildSpec HandHeld Spectroradiometer: User's Guide*. Disponível em: <<http://support.asdi.com/Document/Documents.aspx>>. Acesso em 14 de Nov. 2013.

BRAMLEY, R. G. V.; ROTH, C. H. Land-Use Effects on Water Quality in an Intensively Managed Catchment in the Australian Humid Tropics. *Marine and Freshwater Research*, v.53, p. 931–940, 2002.

BREUNIG, F. M.; PEREIRA FILHO, W.; GALVÃO, L. S.; WACHHOLZ, F. Assessing the Long-Term Variability of TSS and Chlorophyll in Subtropical Reservoirs Using MODIS Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 9, p. 5406-5412, 2016.

BREUNIG, F. M.; PEREIRA FILHO, W.; GALVÃO, L. S.; WACHHOLZ, F.; CARDOSO, M. A. G. Dynamics of Limnological Parameters in Reservoirs: A Case Study in South Brazil Using Remote Sensing and Meteorological Data. *Science of the Total Environment*, V. 574, 253–63, 2017.

CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia prática*. 2. ed. rev., atual. e ampliada. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 602 p.

CHEN, Z.; CURRAN, P.J.; HANSOM, J.D. Derivative Reflectance Spectroscopy to Estimate Suspended Sediment Concentration. *Remote Sensing of Environment*, v. 40, n. 4, p. 67-77, 1992.

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

DALL'OLMO, G.; GITELSON, A. A.; RUNDQUIST, D. C.; LEAVITT, B.; BARROW, T.; HOLZ, J. C. Assessing the potential of SeaWiFS and MODIS for estimating chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and near-infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, v.96, p.176–187, 2005.

DOXARAN, D.; FROIDEFOND, J. M.; CASTAING, P. A reflectance band ratio used to estimate suspended matter

- concentrations in sediment-dominated coastal waters. *Remote Sensing*, v. 23, n. 23, p. 5079-5085, 2002.
- FRITZ, S.C. Lake Development and Limnological Response to Prehistoric and Historic Land-Use in Diss, Norfolk, UK. *The Journal of Ecology*, v. 77, n. 1, p. 182–202, 1989.
- GITELSON, A.; GARBUZOV, G.; SZILAGYI, F.; MITTENZWEY, K. H.; KARNIELI, A.; KAISER, A. Quantitative Remote Sensing Methods for Real-Time Monitoring of Inland Waters Quality. *International Journal of Remote Sensing*. v. 14, n. 7, p. 1269–1295, 1993.
- GITELSON, A.A.; SCHALLES, J.F.; HLADIL, C.M. Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake Bay case study. *Remote Sensing of Environment*, v.109, n. 4, p. 464–472, 2007.
- HAN, L.; RUNDQUIST, D. C. The response of both surface reflectance and the underwater light field to various levels of suspended sediments: preliminary results. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.60, n. 12, p. 1463-1471, 1994.
- HAN, L.; RUNDQUIST, D. C. Spectral characterization of suspended sediments generated from two texture classes of clay soil. *Remote Sensing*, v. 17, n. 3, p. 643-649, 1996.
- HAN, L. Spectral reflectance with varying suspended sediment concentrations in clear and algae-laden waters. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 63, n. 6, p. 701-705, 1997.
- HESTIR, E.L.; BRANDO, B.; CAMPBELL, G.; DEKKER, A.; MALTHUS, T. The relationship between dissolved organic matter absorption and dissolved organic carbon in reservoirs along a temperate to tropical gradient. *Remote Sensing of Environment*, v. 156, p. 395–402, 2015.
- JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos naturais. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009. 598p.
- KIRK, J. T. O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 2ed. Cambridge University Press: New York, 1994.
- LATRUBESSE, E. M., STEVAUX, J. C.; SINHA, R. Tropical rivers. *Geomorphology*, v. 70, p. 187–206, 2005.
- LATRUBESSE, E. M. Amazon lakes. In: BENGTSSON, L.; HERSCHY, R. W.; FAIRBRIDGE, R. W. (Orgs.), *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*. 2012. p. 13–26.
- LIU, Y.; BRALTS, V. F.; ENGEL, B. A. Evaluating the Effectiveness of Management Practices on Hydrology and Water Quality at Watershed Scale with a Rainfall-Runoff Model. *Science of the Total Environment*, v. 511, p. 298–308, 2015.
- LODHI, M. A.; RUNDQUIST, D. C.; HAN, L.; KUZILA, M. The potential for remote sensing of loess soils suspended in surface waters. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 33, p. 111-117, 1997.
- LODHI, M. A.; RUNDQUIST, D. C.; HAN, L.; KUZILA, M. S. Estimation of suspended sediment concentration in water using integrated surface reflectance. *Geocarto International Centre*, v. 13, n. 2, p. 11-15, 1998.
- LONDE, L. R. ALCANTARA, E.; JARDIM-LIMA, D.; SOPPA, M.; CLARO, M.; RUDORFF, C. M.; NOVO, E. M. L. M.; CALIJURI, C. Comparação entre Técnicas para Análise do Comportamento Espectral da Clorofila-a no Reservatório de Salto Grande (SP). In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 3., 2006, Aracaju. Anais... Aracaju: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006.
- MANTOVANI, J. E. Comportamento espectral da água: faixas espectrais de maior sensibilidade ao fitoplâncton na presença de matéria orgânica dissolvida e de matéria inorgânica particulada. 1993, 99 f. Dissertação

- (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1993.
- MONTANHER, O. C. Modelos empíricos para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão em rios amazônicos de águas brancas à partir de imagens Landsat 5. 2013, 125 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São José dos Campos.
- NETER, J.; KUTNER, M.H.; NACHTSHEIM, C.J.; WASSERMAN, W. 1996. Applied linear statistical models. 4a. ed. McGraw-Hill, Irwin.1388 pp.
- NOVO, E. M. L. M. Comportamento Espectral da Água. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. da S. (Orgs.). Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais. Brasília: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001, 6, p.203-222.
- NOVO, E.M.L.M. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. São Paulo: Blucher, 4. ed., 2010. 388p.
- ODERMATT, D.; GITELSON, A.; BRANDO, V. E.; SCHAEPMAN, M. Review of Constituent Retrieval in Optically Deep and Complex Waters from Satellite Imagery. Remote Sensing of Environment, v.118, p.116 – 126, 2012.
- SHI, K.; ZHANG, Y.; ZHU, G.; LIU, X.; ZHOU, Y.; XU, H.; QIN, B.; LIU, G.; LI, Y. Long-term remote monitoring of total suspended matter concentration in Lake Taihu using 250 m MODIS-Aqua data. Remote Sensing of Environment, v. 164, p. 43-56, 2015.
- SILVA, A. P. S.; DIAS, H. C. T.; BASTOS, R. K. X.; SILVA, E. Qualidade da água do reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Peti, Minas Gerais. Revista Árvore, v. 33, n.6, p. 1063-1069, 2009.
- STEFFEN, C. A., MORAES, E. C., GAMA, F. F. Tutorial radiometria óptica spectral. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8. 1996. Salvador. Anais... Salvador: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.
- TIAN, L.; WAI, O. W. H.; CHEN, X.; LIU, Y.; FENG, L.; LI, J.; HUANG, J. Assessment of Total Suspended Sediment Distribution under Varying Tidal Conditions in Deep Bay: Initial Results from HJ-1A/1B Satellite CCD Images. Remote Sensing. v. 6, p. 9911-9929, 2014.
- TSAI, F.; PHILPOT, W. Derivative analyses of hyperspectral data. Remote Sensing of Environment, v. 66, n. 1, p. 41 – 51, 1998.
- TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; ARANTES JUNIOR, J. D.; TUNDISI, J. E. M.; MANZINI, N. F.; DUCROT, R. The response of Carlos Botelho (Lobo-Broa) reservoir to the passage of cold fronts in reflected by physical, chemical and biological variables. Brazilian Journal of Biology: Revista Brasileira de Biologia, v. 64, n. 1, p. 177-186, 2004.
- TYLER, A.N.; SVAB, E.; PRESTON, T.; PRESING, M.; KOVACS, W. A. Remote sensing of the water quality of shallow lakes: A mixture modelling approach to quantifying phytoplankton in water characterized by high-suspended sediment. International Journal of Remote Sensing, v. 27, n. 8, p. 1521–1537. 2006.
- WANG, J. J.; LU, X. X. Estimation of Suspended Sediment Concentrations Using Terra MODIS: An Example from the Lower Yangtze River, China. Science of the Total Environment, v. 408, p. 1131 – 1138, 2010.
- WANG, Y.; XIA, H.; FU, J.; SHENG, G. Water quality change in reservoirs of Shenzhen, China: Detection using LANDSAT/TM data. Science of the Total Environment, v. 328, n. 1-3, p. 195–206, 2004.
- WATANABE, F. S. Y.; IMAI, N. N.; BARBOSA, C. C. F.; ARAUJO, A. P. Avaliação do comportamento espectral da água: estudo de caso do alto curso do rio Paraná (Presidente Epitácio – SP). In: Simpósio Brasileiro de Ciências

Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 3., 2010, Recife. Anais... Recife: UFPE, 2010, p. 001-008.
