

## **Influência de componentes óticamente ativos relacionados a reservatórios em cascata – Rio Jacuí - RS**

Waterloo Pereira Filho<sup>1</sup>  
Felipe Correa dos Santos<sup>1</sup>  
Ana Paula Vestena Cassol<sup>1</sup>  
André Luis Domingues<sup>1</sup>  
Diego de Almeida Prado<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Maria – UFSM  
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE  
Laboratório de Geotecnologias/Departamento de Geociências  
Avenida Roraima, n. 1000 – 97105-900 – Santa Maria - RS, Brasil  
{waterloopf; eng.domingues; diegoprado1}@gmail.com  
{felipecorrea\_rs; aninhacassol}@hotmail.com

**Abstract.** The construction of reservoirs in series in a river does not just transform the lotical environment into lentical but also provides different environmental situations on each reservoir. The work's objective consists in the identification of the main optical differences in the water's surface in four reservoirs situated in the Jacuí river in Rio Grande do Sul. The variables water transparency, Total Suspended Solids (TSS), turbidity, chlorophyll *a* and spectral reflectance were used to represent the water's optically active components and to characterize the aquatic environments. The results lead to expressive differences among the reservoirs. The reservoirs situated upward in the river present waters with a higher concentration of solids in suspension and lower transparencies, while in the reservoirs downward there is a dominance of greenish color, related to the dominant effect of chlorophyll *a*. The limnological variables as much as the reflectance spectra indicate decrease of TSS and increase of chlorophyll in the direction of the water flow between the reservoirs. This scenery might be related to the precipitation of solids in suspension and increase of light availability in the water column on the reservoirs. Samples with chlorophyll *a* higher than 30 $\mu\text{g.L}^{-1}$  showed features of absorption in the spectra of reflectance independently of TSS concentration.

**Palavras-chave:** reflectance, reservoir, limnology, Reflectância, reservatório, limnologia.

### **1. Introdução**

A construção de reservatórios para geração de hidroeletricidade tem crescido rapidamente nos últimos anos no Brasil. As condições hídricas, relevo e a crescente demanda energética no Brasil fazem com que a construção de reservatórios cresça rapidamente. Em um único rio são construídas diversas represas, muitas vezes em série, o que se configura como reservatórios em efeito cascata. As alterações do ambiente aquático devido à construção de reservatórios em cascata não foram, ainda, suficientemente avaliadas. Algumas perguntas são imediatamente levantadas, como: A modificação de um ambiente lótico para lêntico proporciona mudanças significativas na água? Há diferenças ecológicas entre os reservatórios? Há diferenças de água considerando-se somente uma represa? Até onde, dentro de um reservatório, as características da água são de um ambiente tipicamente lótico? Como se dá a estratificação vertical do reservatório? Como se dão os processos químicos reguladores dos lagos? O sensoriamento remoto, obviamente, não responde a todas estas questões, mas auxilia na medida em que proporciona uma informação sinótica destes novos ambientes.

A construção de reservatórios em cascata também é observada no Rio Grande do Sul. No rio Jacuí há sete reservatórios em seu alto curso com finalidade de geração de energia, em alguns não há secção rio entre eles. A água que chega ao reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Itaúba é oriunda de reservatórios localizados imediatamente a montante no rio Jacuí e

Ivaí. Este reservatório, portanto, recebe quase a totalidade de sua água oriunda de outros reservatórios, não apresentando seções de rios importantes a montante. A represa de Dona Francisca é outra que recebe quase a totalidade da água de Itaúba sem que haja rio entre elas. Os reservatórios de Ernestina e Passo Real encontram-se em outro contexto, ambos são abastecidos com água de rio que por sua vez recebem água de escoamento superficial.

Diante deste cenário complexo de ecossistemas devido à existência de reservatórios em cascata foi desenvolvido este trabalho, tendo-se como objetivo o de identificar as principais diferenças óticas entre os principais reservatórios do alto curso do rio Jacuí - RS.

## 2. Metodologia de Trabalho

O trabalho considerou a identificação das condições óticas da água das hidrelétricas tendo-se as seguintes variáveis: transparência; turbidez; totais de sólidos em suspensão (TSS); clorofila *a* e reflectância espectral. A transparência foi obtida com o uso do disco de Secchi, a turbidez a partir da sonda Horiba U-53G, o TSS pelo método de filtração da água em filtro com porosidade de 0,45  $\mu\text{m}$ , a clorofila *a* a partir da sonda Trilux e a reflectância espectral foi identificada com o uso do radiômetro FieldSpec e os procedimento de coleta foi realizado conforme Milton (1987). Os equipamentos utilizados apresentam as seguintes especificações técnicas: a turbidez com resolução de 0,01 NTU; a clorofila *a* em resolução de 0,01  $\mu\text{g.L}^{-1}$  com medição até 100  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ; reflectância para a faixa espectral de 400 a 900  $\text{nm}$  de comprimento de onda e resolução de 3  $\text{nm}$ . O TSS e a turbidez foram identificadas em sub-superfície a profundidade de 15 cm. A clorofila *a* representa a média do perfil com amostragem de meio em meio metro a partir da superfície até a profundidade do disco de Secchi. O valor representativo de cada reservatório em relação às variáveis transparência, turbidez, TSS e clorofila *a* foi obtido a partir da média das suas estações amostrais. O espectro de reflectância espectral representativo de cada lago foi selecionado a partir da localização da estação amostral localizada na seção intermediária do reservatório. Para suavização de ruídos nos sinais de reflectância foi utilizado o filtro média de cinco canais conforme descrito em Savitzky e Golay(1964).

Os reservatórios estudados localizam-se no alto curso do rio Jacuí (Rio Grande do Sul). A amostragem nos reservatórios consistiu na distribuição de estações amostrais localizadas em diferentes compartimentos aquáticos em cada um dos reservatórios. Com a distribuição espacial buscou-se amostras que representassem pelo menos o setor montante, intermediário e jusante. Devido às condições de acesso foram amostrados os reservatórios Ernestina, Passo Real, Itaúba e Dona Francisca, respectivamente, nos dias 14/9, 15/09, 31/08 e 23/8 de 2012. A ordem destes reservatórios segue o sentido das águas.

## 3. Resultados e Discussão

A estatística descritiva permitiu identificar as principais diferenças nos padrões da água nos reservatórios. Observou-se que a transparência da água aumenta no sentido jusante. Esta variável mostrou dados que refletem o contexto geográfico em que cada reservatório está inserido. A transparência da água do reservatório da UHE-Ernestina, localizado mais a montante no rio Jacuí, foi a menor entre os reservatórios estudados e a transparência do reservatório da UHE-Dona Francisca, a última no sentido das águas, foi a maior. Este quadro aponta para a precipitação de partículas em suspensão na água à medida que há o deslocamento da água nos reservatórios. Outro aspecto registrado em relação a esta variável é o fato de que os dois primeiros reservatórios (Ernestina e Passo Real), no sentido do movimento da água, mostraram valores de transparência próximos entre si, 48,8 e 53,6 cm, respectivamente, enquanto que para as duas barragens seguintes ocorreu aumento para 83 e

126,1 cm. O padrão da transparência da água entre os reservatórios está associado à origem da água. Os dois primeiros reservatórios recebem águas das bacias de captação que abastecem os rios após escoamento superficial. Esta condição transporta material sólido em direção aos rios e reservatórios. Entre a primeira represa e segunda há uma secção rio de aproximadamente 125 km, enquanto que os outros dois reservatórios são abastecidos basicamente com água oriunda de outros reservatórios sem que haja secção rio entre eles. Com isso o aumento na transparência foi progressivo no sentido do fluxo da água. O Quadro 1 apresenta os valores de transparência, TSS, turbidez e clorofila *a* dos reservatórios estudados.

Reservatório \ Variável	Parâmetro estatístico	Ernestina	Passo Real	Itaúba	Dona Francisca
Transparência (cm)	Média	48,8	53,6	83,0	126,1
	CV (%)	10,1	35,2	50,8	32,4
TSS (mg.L <sup>-1</sup> )	Média	13,9	15,3	5,8	4,4
	CV (%)	35,1	28,9	78,0	73,9
Turbidez (NTU)	Média	39,9	34,2	15,5	10,1
	CV (%)	6,8	23,4	131,5	54,7
Clorofila <i>a</i> (ug.L <sup>-1</sup> )	Média	8,34	31,1	>100	37,1
	CV (%)	40,2	13,5		48

Quadro 1. Transparência, TSS, Turbidez e clorofila *a* dos reservatórios das UHEs Ernestina, Passo Real e Dona Francisca.

As outras variáveis também registraram o contexto geográfico dos reservatórios. Os valores de TSS encontrados nos dois primeiros lagos foram próximos, 13,9 e 15,3 mg/L, respectivamente, enquanto nos dois seguintes foi 5,8 e 4,4 mg.L<sup>-1</sup>. O maior valor encontrado em Passo Real pode estar relacionado com sua maior área de captação. A mesma oscilação dos dados foi observada em relação à turbidez, sendo identificados valores decrescentes de acordo com o fluxo da água e, ainda, os dois primeiros reservatórios com valores próximos entre si e os demais menos turvos, com turbidez inferiores a metade dos demais.

O coeficiente de variação foi maior no reservatório de Itaúba para as variáveis transparência, TSS e turbidez. O que aponta este reservatório como o de maior variabilidade dos dados e consequentemente a presença de compartimentos e ecossistemas aquáticos distintos. Destaca-se que este reservatório é abastecido com água oriunda de outros reservatórios. Em situação oposta encontra o reservatório de Ernestina, o localizado mais a montante no sistema em cascata. Neste reservatório foi identificado o menor coeficiente de variação em duas variáveis, a transparência e a turbidez, com 10 e 7%. Este quadro mostra que Ernestina é um reservatório com menor transparência, alta turbidez e, sobretudo, representa um sistema homogêneo.

A disponibilidade de nutrientes e de luz devido a maior transparência e menor turbidez proporcionou o aumento da produtividade primária de forma mais intensa no reservatório de Itaúba. A medição de clorofila *a* ultrapassou o limite detectável pela sonda utilizada. Conforme constatado em campo houve floração de algas naquele reservatório. Portanto as condições geográficas como localização do reservatório em relação aos demais, aporte de nutrientes e disponibilidade de luz produziram condições ideais ao crescimento de algas. Observando-se o perfil dos reservatórios em cascata verifica-se que Itaúba representa o ápice em termos deste pigmento. Houve aumento da clorofila *a* entre Ernestina, Passo Real e Itaúba e diminuição em Dona Francisca. Obviamente que outros fatores como precipitação pluviométrica, estação do ano, temperatura, variação da temperatura nos dias anteriores a

coleta de campo, vento entre outros podem ter favorecido este quadro, mas o efeito cascata dos reservatórios colaborou para esta situação.

Os espectros de reflectância registraram o cenário encontrado pelas variáveis limnológicas. No reservatório de Ernestina o espectro de reflectância aponta para maiores reflectâncias nas faixas espectrais do verde e vermelho resultado da maior carga de sólidos em suspensão e menores valores de transparência, turbidez, e clorofila *a* (Figura 1). Em campo foi identificado a cor marrom para esta massa de água. Embora a maior reflectância tenha ocorrido na faixa verde do espectro o baixo valor de clorofila *a* encontrado neste reservatório não imprimiu de forma clara as feições típicas deste pigmento no espectro de reflectância.

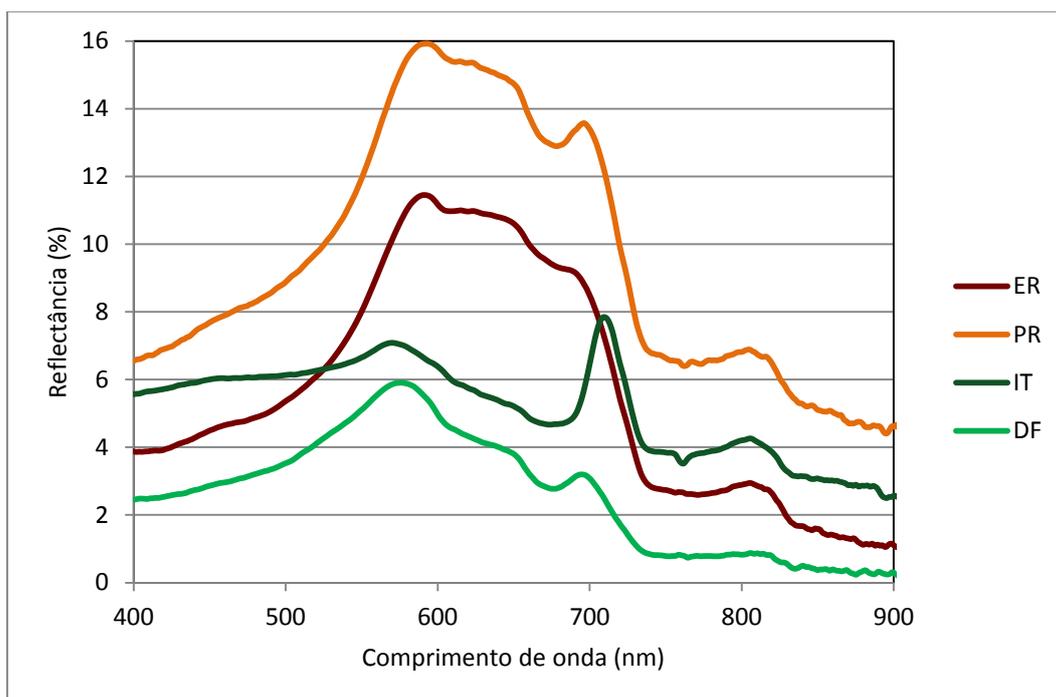


Figura 1. Espectros de reflectância dos reservatórios das UHEs Ernestina (ER), Passo Real (PR), Itaúba (IT) e Dona Francisca (DF) no rio Jacuí – RS.

Considerando-se a faixa visível do espectro observa-se que o espectro de reflectância de Passo Real também aponta para água de cor marrom, conforme foi confirmado em campo. Neste reservatório observa-se que o albedo foi um pouco maior em relação aos demais. Isto pode ser consequência do maior valor de TSS deste reservatório ( $15,3 \text{ mg.L}^{-1}$ ). O aumento na clorofila *a* ( $31,1 \text{ } \mu\text{g.L}^{-1}$ ) em relação a Ernestina já produziu feição de absorção deste pigmento na faixa de transição do vermelho com o infra-vermelho próximo (IVP). Os demais reservatórios (Itaúba e Dona Francisca) mostraram um contraste melhor definido da reflectância na faixa do verde, sempre com a reflectância nesta faixa mais intensa em relação ao azul e ao vermelho. Isto registra a coloração esverdeada da água nestes reservatórios, conforme observado em campo. A cor da água encontra nos reservatórios pode ser observada na Figura 2.



Ernestina

Passo Real

Itaúba

Dona Francisca

Figura 2. Cor da água dos reservatórios Ernestina, Passo Real, Itaúba e Dona Francisca.

O comprimento de onda de máxima reflectância na faixa verde do espectro esteve relacionado com as concentrações de TSS e clorofila *a*. Com o aumento deste pigmento houve deslocamento do pico de reflectância para comprimentos de ondas menores. Em Ernestina e Passo Real o pico ocorreu em 590 nm enquanto que para Dona Francisca foi em 575 nm e Itaúba (com maior clorofila) em 570 nm. Portanto, o aumento de clorofila *a* além de discriminar melhor a reflectância na faixa verde também deslocou o comprimento de onda de máxima reflectância em direção ao verde.

Os reservatórios Ernestina, Passo Real e Dona Francisca mostraram feição de absorção em 615 nm que pode estar relacionada à presença de ficocianina, uma vez que este pigmento apresenta pico de absorção entre 615-630 nm (Dekker, 1993; Kirk, 1994; Weaver e Wrigley, 1994; Londe *et al.*, 2005). A clorofila *a* também é responsável por pico de absorção na faixa de 675 a 686 nm, denominado como pico “alpha” (Kirk, 1994; Weaver e Wrigley, 1994). Os espectros apresentados possuem este pico bem definido em três reservatórios, com exceção em Ernestina, e com oscilação no comprimento de máxima absorção nesta faixa. Em 678 nm foi o comprimento de onda do pico de absorção em Passo Real e 674 nm em Itaúba. Isto mostra que à medida que aumenta a clorofila *a* este pico ocorre em comprimento de onda menor nesta faixa espectral.

Um pico acentuado de reflectância centrado em 710 nm também é observado. Este pico se dá em função do espalhamento celular e é mais pronunciado devido à alta absorção da clorofila *a* na faixa do vermelho pela clorofila e no IVP pela água. Considerando-se os valores de clorofila encontrados verifica-se que este pico de reflectância desloca-se entre 695 nm, para concentrações médias (Passo Real com 31,1  $\mu\text{g.L}^{-1}$  e Dona Francisca 37,1  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) para 710 nm em concentrações mais elevadas, superior a 100  $\mu\text{g.L}^{-1}$  (Itaúba).

A intensidade da feição de absorção entre vermelho e IVP está relacionada com a concentração de clorofila. O aumento na reflectância entre o pico absorção “alpha” e o pico de reflectância devido ao espalhamento celular foi de 68% em Itaúba, 15% em Dona Francisca e de 5% em Passo Real. Embora esta abordagem seja descritiva observa-se que existe uma tendência de aumentar a reflectância no IVP em relação à faixa “alpha” em função do aumento das concentrações de clorofila *a*.

Outro aspecto relacionado à ocorrência da floração verificada em Itaúba e registrada nos espectros de reflectância é que a reflectância no IVP é mais intensa do que no verde. Nos reservatórios Passo Real e Itaúba com menores valores de clorofila *a* este fato não ocorreu, embora a feição de absorção na faixa “alpha” estivesse presente.

Expressiva diferença no albedo entre os reservatórios Passo Real e Dona Francisca deve estar relacionada ao TSS. Estes dois reservatórios possuem clorofila *a* com valores parecidos e com isso as feições de absorção observadas são presentes nos dois espectros, mas a intensidade de reflectância é distinta. Neste caso, a maior concentração de sólidos em suspensão elevou a reflectância em toda a faixa utilizada, mas preservou as feições da clorofila *a*. Então para este intervalo de clorofila *a* o TSS funcionou como um efeito aditivo a reflectância devido à clorofila *a* elevar os níveis de reflectância. O TSS também produziu a reflectância de forma mais intensa na faixa do vermelho, o que conferiu a esta massa de água a coloração marrom. O espectro do reservatório de Ernestina, com baixa clorofila *a*, não

registra claramente as feições de absorção deste pigmento, mas possui reflectâncias mais elevadas do que Itaúba e Dona Francisca, com configuração associada ao TSS.

A comparação entre os reservatórios permite verificar que, de modo geral, ocorre diminuição do TSS e turbidez e aumento da transparência e clorofila *a* no sentido do fluxo da água e isto foi bem registrado nos espectros de reflectância. Os reservatórios localizados no setor mais montante apresentaram espectros com maior albedo e com padrões relacionados ao maior TSS enquanto que os reservatórios mais a jusante com menor albedo e com feições associadas mais exclusivamente a clorofila *a*.

#### 4. Conclusões

A construção de reservatórios em cascata no rio Jacuí mostrou as seguintes características quanto ao efeito em variáveis opticamente ativas: a) aumento da transparência da água e diminuição da turbidez no sentido do fluxo da água, sendo os lagos mais a montante menos transparentes e mais turvos, enquanto que os localizados a jusante mais transparentes e menos turvos; b) a carga de sólidos em suspensão é maior nos primeiros lagos em relação aos demais, isto aponta para que haja precipitação dos sólidos a medida que a água desloca nos reservatórios, sendo menor a cada reservatório no sentido jusante; c) a presença de secção rio ou ausência foi determinante nos valores encontrados em cada variável; d) a clorofila *a* esteve relacionada, principalmente com reservatório que recebe água somente de outro reservatório, sem presença de água oriunda de escoamento superficial; e) foi identificado espectros de reflectância que registram a maior concentração de sólidos em suspensão e maior concentração de clorofila *a*. Os espectros associados a maior concentração de sólidos em suspensão apresentam reflectância mais intensa na faixa do verde e vermelho e os de maior concentração de clorofila *a* a maior reflectância ocorre no IVP e, no visível, na faixa verde do espectro e, ainda, com feições espectrais típicas deste pigmento e f) concentrações de clorofila *a* superior a 30  $\mu\text{g.L}^{-1}$  foi verificada em reservatórios que recebem água de outros reservatórios; g) o aumento de TSS produziu elevação no albedo dos espectros; h) a feição de absorção devido a clorofila *a*, quando superior a 30  $\mu\text{g.L}^{-1}$ , foi observada nos espectros independentemente do valor de TSS.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico por auxílio financeiro concedido pelo projeto 478961/2010-3.

#### Referências Bibliográficas

Dekker A. G. **Detection of optical water quality parameters of eutrophic waters by high resolution remote sensing**. PhD thesis. Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands. 1993.

Kirk, J. T. O. **Light & photosynthesis in aquatic ecosystems**. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

Londe, L. R.; Novo, E. M. L. M.; Calijuri, M. C. Avanços no estudo do comportamento espectral do fitoplâncton e identificação remota de algas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia, INPE, 2005. p. 389 - 396.

Milton, E.J. Principles of field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, v.8, n.12, p.1807-1827, 1987.

Savitzky, A.; Golay, M. J. E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. **Analytical Chemistry**. v.36, n. 8, p. 1627–1639, 1964.

Weaver, E. C.; Wrigley, R. **Factors affecting the identification of phytoplankton groups by means of remote sensing.** NASA Technical Memorandum 108799. 1994.