

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOMÁTICA**

**RELAÇÃO ENTRE TRANSPARÊNCIA DA ÁGUA
OBTIDA *IN SITU* E A REFLECTÂNCIA DA IMAGEM
LANDSAT 5 TM DO RESERVATÓRIO PASSO REAL**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

Felipe Correa dos Santos

**Santa Maria, RS, Brasil
2014**

RELAÇÃO ENTRE TRANSPARÊNCIA DA ÁGUA OBTIDA *IN SITU* E A REFLECTÂNCIA DA IMAGEM LANDSAT 5 TM DO RESERVATÓRIO PASSO REAL

Felipe Correa dos Santos

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Geomática do Programa de Pós-Graduação em Geomática, Área de Concentração Tecnologia da Geoinformação, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Especialista em Geomática.**

Orientador: Prof. Dr. Waterloo Pereira Filho

Santa Maria, RS, Brasil

2014

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Geomática**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
Aprova a Monografia de Especialização.

**RELAÇÃO ENTRE TRANSPARÊNCIA DA ÁGUA OBTIDA *IN SITU* E
A REFLECTÂNCIA DA IMAGEM LANDSAT 5 TM DO
RESERVATÓRIO PASSO REAL**

elaborado por
Felipe Correa dos Santos

como requisito parcial para obtenção do grau de
Especialista em Geomática

COMISSÃO EXAMINADORA:

Waterloo Pereira Filho, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Liane de Souza Weber, Dr^a. (UFSM)

Tatiana Mora Kuplich, Dr^a. (INPE)

Santa Maria, 21 de janeiro de 2014.

AGRADECIMENTOS

A Deus que me concede a oportunidade da vida.

À Universidade Federal de Santa Maria pela possibilidade de realização da Especialização em Geomática.

Aos meus pais Adão e Sonia *e meus irmãos* Luciana e Márcio, pelo carinho e apoio.

Ao professor e orientador Dr. Waterloo Pereira Filho por seus ensinamentos, incentivo e companheirismo.

À Prof^a. Dr^a. Liane de Souza Weber e a Dr^a. Tatiana Mora Kuplich, pela leitura e contribuições a este trabalho.

Ao colega de laboratório Gustavo Rodrigues Toniolo, pelo auxílio nos processamentos de imagens.

Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.

Cora Coralina

RESUMO

Monografia de Especialização
Programa de Pós-Graduação em Geomática
Universidade Federal de Santa Maria

RELAÇÃO ENTRE TRANSPARÊNCIA DA ÁGUA OBTIDA IN SITU E A REFLECTÂNCIA DA IMAGEM LANDSAT 5 TM DO RESERVATÓRIO PASSO REAL

AUTOR: FELIPE CORREA DOS SANTOS

ORIENTADOR: WATERLOO PEREIRA FILHO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 21 de janeiro de 2014.

O monitoramento da qualidade da água geralmente é realizado a partir da amostragem *in situ*. No entanto, o custo financeiro e operacional é alto, além da difícil amostragem em diferentes setores do corpo hídrico. Como possível solução para este problema, pode ser utilizada a base histórica de imagens Landsat 5 TM que permite a realização de estudos espaço-temporais de ambientes aquáticos. Inserida neste contexto, a presente pesquisa propõe verificar a relação entre dados de transparência da água identificados em campo e os valores de reflectância espectral do reservatório Passo Real obtidos por imagem Landsat 5 TM. A transparência da água foi medida em campo com o uso de um disco de Secchi em 31 pontos amostrais do reservatório. As imagens de satélite utilizadas para a análise temporal da reflectância da água foram produzidas pelo satélite Landsat 5 TM, a partir das quais é possível a extração de pixels puros em função da resolução espacial de 30 metros. A seleção de imagens foi a partir disponibilidades de cenas sem presença de nuvens em datas mais próximas à realização dos trabalhos de campo. Os processamentos das imagens para correção dos efeitos atmosféricos e transformação dos números digitais em valores de reflectância foram realizados no *software* ENVI 5.0. As espacializações dos dados de transparência e valores de reflectância foram realizadas por interpolação no *software* Spring 4.3.3. Na análise temporal de Março de 2009 a Julho de 2009 as medidas de transparências do reservatório Passo Real em sua maioria foram superiores a 100 centímetros. Os períodos de Agosto de 2009 e Outubro de 2009 apresentaram transparências inferiores a 100 centímetros e menor variância dos dados em relação aos dados anteriores estudados. Os dados de reflectância no contexto espaço-temporal indica que as principais alterações correspondem aos setores dos tributários do reservatório Passo Real. Os dados espectrais da Banda 3 do sensor TM foram relacionados com a variável transparência da água nos 31 pontos amostrais. Os modelos gerados por regressão linear demonstram que a transparência da água apresenta relação com os dados de reflectância na região do vermelho. Os modelos com melhor ajuste foram obtidos para os dados de Março de 2009 a Julho de 2009, período com índices de maior amplitude e variância dos dados de transparência e reflectância espectral, embora todos os períodos tenham apresentado regressões significativas em um intervalo de confiança de 99,9% (n=31). A presença de pigmentos fotossintéticos na água diminui o grau de correlação de dados de transparência e reflectância na faixa do vermelho. Este fato ocorre pelo motivo de a banda 3 do sensor TM ser sensível a absorções de energia eletromagnética por pigmentos fotossintéticos. As imagens de satélite caracterizaram-se em importantes ferramentas para compreensão do funcionamento espaço-temporal do reservatório.

Palavras-chave: Transparência da água, reflectância espectral, reservatório.

ABSTRACT

Specialization Dissertation
Post Graduation Program in Geomatics
Federal University of Santa Maria

RELATION BETWEEN WATER TRANSPARENCY OBTAINED *IN SITU* AND THE REFLECTION OF THE LANDSAT 5 TM IMAGE OF THE PASSO REAL RESERVOIR

AUTHOR: FELIPE CORREA DOS SANTOS

ADVISOR: WATERLOO PEREIRA FILHO

Place and Date of Defense: Santa Maria, 21 of January of 2014.

The water quality monitoring is generally done from *in situ* sampling. However, the financial operational cost is high, beyond the difficult sampling in different sectors of the hydric body. As a possible solution for this problem, it can be used the historical basis of Landsat 5 TM images that allow the realization of space-temporal studies of aquatic environments. In this context, the present research proposes to verify the relation between water transparency data identified *in situ* and the values of spectral reflection of the Passo Real Reservoir obtained through Landsat 5 images. The water transparency was measured *in situ* with the use of a Secchi disc in 31 sample points of the reservoir. The satellite images used for the temporal analysis of the water reflection were produced by the Landsat 5 TM satellite, from which it is possible to extract the pure pixels related to the spatial resolution of 30 meters. The image selection was from the scene availability without the presence of clouds in the dates closer to the field work realization. The image processing for the correction of atmospheric effects and the transformation of digital numbers into reflection values were done with the ENVI 5.0 software. The spacings of the transparency data and reflection values were done by the interpolation in the Spring 4.3.3 software. In the temporal analysis from March 2009 to July 2009 the measures of transparencies of the Passo Real Reservoir in its major were superior to 100 centimeters. The periods from August 2009 and October 2009 presented transparencies inferior to 100 centimeters and of shorter data variance in relation to the ones studied before. The reflection data in the space-temporal context indicates that the main alterations correspond to the tributary sectors of the Passo Real Reservoir. The spectral data of the Band 3 of the TM sensor were related with the water transparency variable in the 31 sample points. The models generated by linear regression showed that the water transparency have relation with the reflection data in the red region. the models with the best adjustment were obtained for the data from March 2009 to July 2009, period with indexes of higher extent and variability of transparency and spectral reflection data, although all periods have presented meaningful regression in a trust interval of 99,9% (n=31). The presence of photosynthetic pigments in the water diminish the level of correlation of transparency and reflection data in the red strip. This fact occurs due to the Band 3 of the TM sensor be sensible to electromagnetic energy absorption by photosynthetic pigments. The satellite images characterize themselves in important tools for the comprehension of the space-temporal functioning of the reservoir.

Key-words: water transparency, spectral reflection, reservoir.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do reservatório Passo Real.....	12
Figura 2 - Localização dos pontos amostrais no Reservatório Passo Real.....	20
Figura 3 - Estatística dos dados mensais de transparência da água do reservatório Passo Real	23
Figura 4 - Espacialização da transparência e reflectância da água do reservatório Passo Real (Março de 2009).	24
Figura 5 - Gráfico de dispersão dos valores de reflectância da Banda 3 TM e medidas de transparência da água do reservatório Passo Real (Março de 2009).	25
Figura 6 - Espacialização da transparência e reflectância da água do reservatório Passo Real (Abril de 2009).	25
Figura 7 - Gráfico de dispersão dos valores de reflectância da Banda 3 TM e medidas de transparência da água do reservatório Passo Real (Abril de 2009).	26
Figura 8 - Espacialização da transparência e reflectância da água do reservatório Passo Real (Junho de 2009).	27
Figura 9 - Gráfico de dispersão dos valores de reflectância da Banda 3 TM e medidas de transparência da água do reservatório Passo Real (Junho de 2009).	27
Figura 10 - Espacialização da transparência e reflectância da água do reservatório Passo Real (Julho de 2009).	28
Figura 11 - Gráfico de dispersão dos valores de reflectância da Banda 3 TM e medidas de transparência da água do reservatório Passo Real (Julho de 2009).	29
Figura 12 - Espacialização da transparência e reflectância da água do reservatório Passo Real (Agosto de 2009).	29
Figura 13 - Gráfico de dispersão dos valores de reflectância da Banda 3 TM e medidas de transparência da água do reservatório Passo Real (Agosto de 2009).	30
Figura 14 - Espacialização da transparência e reflectância da água do reservatório Passo Real (Outubro de 2009).	31
Figura 15 - Gráfico de dispersão dos valores de reflectância da Banda 3 TM e medidas de transparência da água do reservatório Passo Real (Outubro de 2009).	32

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Bandas espectrais e resoluções sensor Thematic Mapper do satélite Landsat 5 ..	16
Quadro 2 - Datas dos trabalhos de campo e das imagens de satélite	21

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Características gerais da área de estudo	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 Sensoriamento remoto no estudo de ambientes aquáticos	14
2.2 Potencial de utilização de Imagens Landsat 5 TM para o estudo da transparência da água	15
2.3 Processamento de imagens	16
2.3.1 Correção dos efeitos atmosféricos	17
2.3.2 Conversão de Números Digitais para valores físicos de Radiância e Reflectância	18
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
6 REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A produção de energia é um dos principais usos da água no Brasil e abastece cerca de 85% da energia necessária ao país (TUNDISI, 2005). Os reservatórios hidrelétricos, além da geração de energia, apresentam outros benefícios socioeconômicos como a estocagem de água para usos futuros, controle de inundação, atividades recreativas, pesca e abastecimento de água. Porém, devido aos sucessivos represamentos e influências da ação humana são provocados ou potencializados diversos impactos ambientais.

A utilização de produtos de sensoriamento remoto para auxiliar no monitoramento da qualidade de águas continentais, desponta como instrumento de grande interesse por parte da sociedade como um todo, uma vez que permite monitorar e controlar a qualidade de um recurso natural de vital importância para as condições de saúde pública. Principalmente no caso de lagos naturais e reservatórios hidrelétricos que apresentam maior tempo de residência das águas (NOVO, 2005).

Um dos principais interesses no uso de produtos de sensoriamento remoto em ambientes aquáticos é verificar a variação espacial e temporal da composição da água, possibilitando investigar a origem e o deslocamento de substâncias específicas em suspensão ou dissolvidas na água. Sedimentos em suspensão, pigmentos fotossintetizantes, matéria orgânica dissolvida e as moléculas de água em si, são os principais agentes que regem as propriedades ópticas inerentes da água e, portanto, são chamados de constituintes opticamente ativos (COAs) (RUDORFF *et al.*, 2007; JENSEN, 2009). A transparência da água constituindo-se em uma variável óptica aparente, influenciada pela própria água e pelos constituintes opticamente ativos nela suspensos e dissolvidos, pode ser usada como indicadora da presença desses materiais na água.

Tradicionalmente, o monitoramento da qualidade da água é realizado a partir da amostragem *in situ*. No entanto, o custo financeiro e operacional é alto, além da difícil amostragem em diferentes setores do corpo hídrico. Como possível solução para este problema, pode ser utilizada a base histórica de imagens Landsat 5 TM que permite a realização de estudos espaço-temporais de corpos d'água (WANG *et al.*, 2004; WACHHOLZ, 2012).

As técnicas de sensoriamento remoto se fundamentam no processo de interação entre a radiação eletromagnética (REM) e os diferentes objetos dos quais se pretende extrair algumas

informação. Em estudos de recursos naturais da superfície terrestre, o fenômeno de reflexão é amplamente explorado, uma vez que as intensidades de radiação refletida pela superfície podem ser registradas (por sensores terrestres, aéreos ou orbitais) e desses registros, as informações podem ser extraídas e disponibilizadas no atendimento de diferentes aplicações (PONZONI; ZULLO JUNIOR; LAMPARELLI, 2007). O uso destas técnicas para monitoramento de reservatórios torna-se importante para sua compreensão em função de suas características que afetam a qualidade da água.

Inserida neste contexto, a presente pesquisa teve por objetivo verificar a relação entre dados de transparência da água identificados em campo e os valores de reflectância espectral do reservatório Passo Real obtidos por imagem Landsat 5 TM.

1.1 Características gerais da área de estudo

No Rio Grande do Sul foram construídas cinco usinas hidrelétricas no alto curso do rio Jacuí, com intuito de aproveitar seu potencial hidráulico. A Usina Hidrelétrica (UHE) Ernestina foi a primeira a ser concluída (1954). Para atender a demanda energética ainda foram construídas a UHE Jacuí (1963), Passo Real (1973), Itaúba (1978) e Dona Francisca (2000). O maior reservatório do Sistema Jacuí é o da Usina Hidrelétrica Passo Real (Figura 1) com 233,4 Km² (COAJU, 2010).

A Usina Hidrelétrica Passo Real possui uma potência instalada de 158.000 kW distribuídos em 2 geradores de 79.000 kW e sua localização geográfica fica no município de Salto do Jacuí, RS. Com um perímetro de 578 Km, o reservatório atinge áreas territoriais na sua margem direita dos Municípios de Selbach, Ibirubá, Quinze de Novembro, Fortaleza dos Valos e Salto do Jacuí e margem esquerda: Alto Alegre, Campos Borges, Jacuizinho e Salto do Jacuí. A barragem é do tipo gravidade/enrocamento com núcleo de argila com extensão 3.800m (COAJU, 2009).

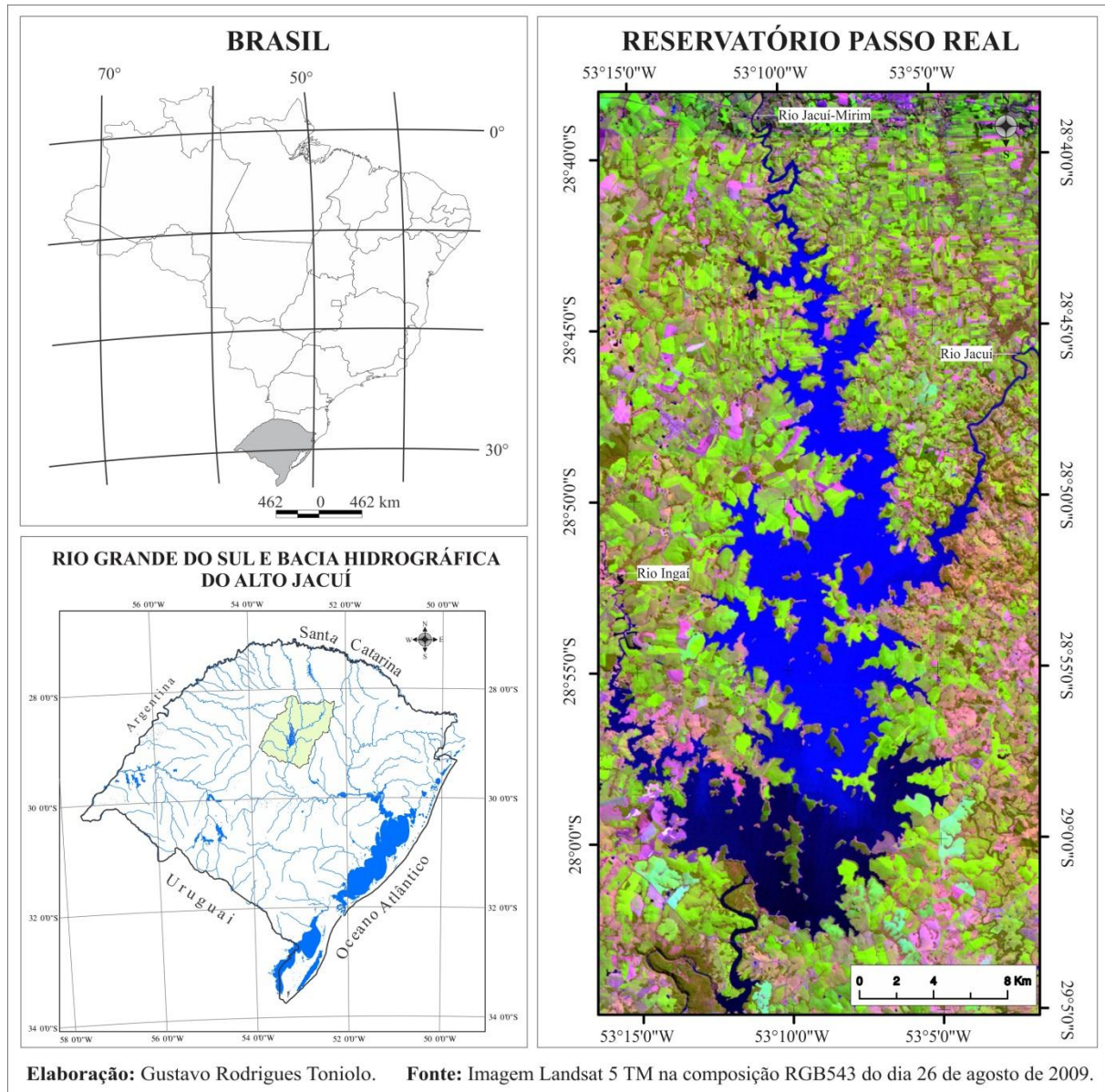


Figura 1 - Localização do reservatório Passo Real.

No reservatório Passo Real a área correspondente à faixa de 100 metros de seu entorno apresenta-se ocupada de maneira intensiva por atividades agropecuárias. Ocorre também, a presença de ocupação residencial, predominantemente com fins de lazer. A região que compreende a área do reservatório tem sua economia baseada no setor primário, especificamente na produção do trinômio trigo-milho-soja. A cultura desse trinômio agrícola ganha destaque no entorno do reservatório Passo Real que, graças ao potencial agrícola dos solos, é intensamente desenvolvida. A aveia, em muitas áreas, também é cultivada, mas seu destino é basicamente para alimentação animal, assim como o milho. Praticadas em menor escala, mas apontadas como atividades em crescimento, ocorrem a fruticultura,

principalmente de caqui, pêsego, pera, tangerina, além da produção de fumo e de tomate (CEEE-GT, 2009).

O Ministério Público do Estado do Rio Grande do Sul, em seu relatório “Análise das características da Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí, utilizando imagens do satélite CBERS” afirma que as margens do reservatório da UHE Passo Real apresentam poucos remanescentes de mata ciliar pelo uso intensivo do solo com agricultura e pastagem, próximo aos corpos hídricos. O relatório ainda sugere como uma das prioridades de ação, avaliar a qualidade da água do reservatório (MPRS, 2008).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sensoriamento remoto no estudo de ambientes aquáticos

Um dos grandes desafios da ecologia aquática é conhecer o funcionamento de base dos ecossistemas aquáticos e compreender suas respostas decorrentes de perturbações introduzidas pelas atividades humanas, de modo a prever o impacto dessas sobre suas condições de sustentabilidade em médio e longo prazo.

Diante de problemas como este, recursos de sensoriamento remoto auxiliam no monitoramento da qualidade das águas. Rudorff (2006) avalia que o sensoriamento remoto tem contribuído na realização de estudos de ambientes aquáticos ao ajudar no entendimento das complexidades do ecossistema e suas interações. Estudos da variação espacial e temporal da qualidade da água são possíveis com o uso do sensoriamento remoto, pois essa tecnologia permite identificar a gênese e o deslocamento de substâncias específicas em suspensão ou dissolvidas na água.

A demanda por informação contínua, incluindo as questões ambientais, está crescendo constantemente. Somente o registro das condições de um ambiente, durante um espaço de tempo maior, permite calcular ou derivar tendências da sua variabilidade natural em relação complexa com os diferentes fatores naturais ou humanos que influenciam estas tendências. Essas exigências estão associadas não somente a uma elevada repetição temporal e espacial, mas, em paralelo, à disponibilidade de satélites e sensores adequados (FICHTELMANN *et al.*, 2005).

Os fenômenos hidrológicos diferenciam-se espacial e temporalmente e desta forma, as técnicas convencionais de coleta de dados como amostragens são limitadas, pois permitem a geração apenas de informações pontuais. A conjunção das duas perspectivas (composição das águas e pressões humanas) possibilita ao planejador fundamentar melhor a definição das estratégias para a conservação dos recursos hídricos, superando as limitações da abordagem do dado pontual. Nesse contexto, os dados de sensoriamento remoto podem ser de grande utilidade uma vez que permitem estender informações pontuais para um contexto espacial mais amplo e fornecer subsídios para uma distribuição racional de estações de coleta de dados hidrológicos (SANTOS, 2004; NOVO, 2008).

O monitoramento da qualidade da água é um campo de aplicação da tecnologia do sensoriamento remoto bastante promissor. Novo (1988) indica que algumas das características

da água que podem ser detectadas por sensores remotos são: a presença de algas e plantas aquáticas, a quantidade de sólidos em suspensão, os níveis de clorofila e a transparência da água, visto que tais parâmetros alteram a coloração da água.

Monitorar parâmetros da água em sua quantidade e distribuição espacial em corpos d'água interiores é muito importante. A erosão do solo de uma bacia hidrográfica lança cargas de sedimentos em suspensão na água. Os sedimentos afetam a qualidade da água para consumo humano, além de impedir a transmissão de radiação solar reduzindo a fotossíntese em vegetações aquáticas e fitoplâncton próximo a superfície.

A concentração de sedimentos em suspensão é medida *in situ* e seu monitoramento em escala temporal gera grandes custos para ser realizado. A transparência da água medida com disco de Secchi é inversamente proporcional à concentração de sedimentos orgânicos e inorgânicos na água, ou seja, quanto maior for a quantidade de sedimentos em suspensão e pigmentos fotossintéticos, menor será a transparência da água (ESTEVES, 1998). Dessa forma, dados de transparência e a reflectância espectral da água podem detectar a presença de constituintes ópticos e seu deslocamento no ambiente aquático.

2.2 Potencial de utilização de Imagens Landsat 5 TM para o estudo da transparência da água

A energia ou radiação eletromagnética refletida ou emitida pelos alvos naturais (corpos d'água, vegetação, solo exposto, entre outros) é medida por sensores instalados em plataformas diversas. Quando a fonte de energia utilizada é natural, ou seja, não possuem fonte de energia própria, como os satélites Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*) e os espectroradiômetros, são denominados sensores passivos. Caso a fonte de energia seja artificial, advinda do próprio sensor, como nos radares, caracteriza-se como um sensor ativo.

Dentre as imagens de sensoriamento remoto utilizadas para fins ambientais, destacam-se as do sensor TM (*Thematic Mapper*). O sensor TM é um dos sensores a bordo do satélite Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*). A região do espectro eletromagnético mais adequada ao estudo de corpos d'água está compreendida entre 400 e 800 nm. As bandas 1, 2, 3 e 4 do sensor TM recobrem quase totalmente esta faixa do espectro (Quadro 1) e vários estudos e monitoramento de ecossistemas aquáticos foram realizados nos últimos anos, a partir de dados TM (BARBOSA 2005; RICHARDS; JIA, 2006).

Quadro 1 - Bandas espectrais e resoluções sensor Thematic Mapper do satélite Landsat 5.

Características	Landsat 5 TM
Bandas Espectrais	Banda1 - 450-520 nm (Azul) Banda2 - 520-600 nm (Verde) Banda3 - 630-690 nm (Vermelho) Banda4 - 760-900 nm (Infra-vermelho próximo)
Resolução Temporal	16 dias
Resolução Espacial	30 metros
Resolução Radiométrica	8 bits

O potencial de utilização de imagens Landsat é explorado para monitoramento de ambientes aquáticos e diversas pesquisas utilizam de seus produtos para avaliar a transparência da água. Hellweger *et al.* (2004) relata em sua pesquisa que a reflectância na faixa do vermelho foi a que melhor correlacionou com dados de transparência obtidos com disco de Secchi. Em trabalho realizado por Wu *et al.* (2008) a faixa do vermelho em dados Landsat 5 TM apresentou correlações negativas com dados de transparência. As imagens Landsat foram importantes para compreensão do funcionamento espaço-temporal de reservatórios estudados realizados por Wachholz e Cabral (2012) com destaque para análise de variação da reflectância na banda TM3 (vermelho) relacionada à transparência da água. Procedimentos semelhantes foram aplicados por McCullough (2012) para monitoramento remoto da transparência da água com imagens TM de lagos em Maine, localizada no nordeste dos Estados Unidos. Os modelos de regressão linear multivariada das medidas de disco de Secchi de 1.511 lagos de Maine (no período de 1990-2010) e dos dados de transparência estimados por satélite indicaram que as bandas 1 e 3 do satélite Landsat 5 TM possuem grande potencial de monitoramento da transparência de ambientes aquáticos.

2.3 Processamento de imagens

O Sensoriamento Remoto fundamenta-se na identificação e discriminação entre alvos, em que a radiância detectada por um sensor é a base do processo. O mecanismo de aquisição é ideal se o conteúdo espectral e temporal da informação sempre permanecesse inalterado. Todavia, na realidade isto não ocorre, pois entre o sensor e a superfície há um meio extremamente dinâmico, a atmosfera, que interage com a radiação eletromagnética. Esta interação provoca alterações significativas na propagação da radiação (fluxo) proveniente de

um alvo. Isso sugere que as imagens utilizadas para análises de dados sobre os alvos da superfície dependem de algumas etapas para que possam representar os fenômenos que se deseja estudar (FREIRE; BASTOS, 1996).

Uma etapa anterior ao processamento de imagens é o pré-processamento, que consiste na preparação do dado para ser interpretado. Nessa fase ocorre a correção geométrica, atmosférica e radiométrica das imagens de satélite. Na fase de processamento ocorre a classificação da imagem.

2.3.1 Correção dos efeitos atmosféricos

No tratamento e análise de uma imagem de Sensoriamento Remoto, deve-se considerar que entre o sensor e a superfície existe um meio extremamente dinâmico, a atmosfera, que é responsável por significativas alterações no fluxo radiante proveniente do alvo. Os principais efeitos observados nas imagens de satélite, devido à presença real da atmosfera entre o satélite e a superfície terrestre, são a diminuição da faixa de valores digitais possíveis registrados pelo sensor, diminuição de contraste entre superfícies adjacentes e alteração do brilho de cada ponto da imagem (ZULLO JUNIOR, 1994; ENNES, 2008).

Na parte visível do espectro, os principais processos que contribuem para o componente atmosférico do sinal registrado pelo sensor são: o espalhamento molecular (*Rayleigh*), as absorções por vapor d'água, ozônio e outros gases, e a absorção e espalhamento por partículas em suspensão (aerossóis). A combinação destes dois efeitos (espalhamento e absorção) é denominada atenuação atmosférica (BARBOSA, 2005; NOVO, 2008).

Sensores orbitais com bandas espectrais no visível e no infravermelho próximo têm contribuição da atmosfera nos alvos registrados nas imagens. A região do azul apresenta uma maior influência dos efeitos do espalhamento da atmosfera. Na interpretação da água em imagens de satélite, por exemplo, cerca de 90% da radiância, registrada pelo sensor orbital, podem ser atribuídas aos efeitos da atmosfera, que também é conhecida como radiância de trajetória. Essa radiância de trajetória é provocada principalmente pelo espalhamento que a luz solar sofre na presença das moléculas dos gases constituintes da atmosfera e de partículas nela presentes (NOVO, 2001).

A correção dos efeitos atmosféricos é uma técnica amplamente utilizada em todos os dados advindos de plataformas orbitais. A importância de sua aplicação está na distinção das

variações relacionadas com a captura dos dados pelos satélites, das variações referentes às próprias grandezas medidas e que realmente condizem com a reflectância das superfícies observadas (ZULLO JUNIOR, 1994).

Uma forma comum de realizar a correção atmosférica em imagens de satélite é com a aplicação do método proposto por Chavez Junior (1988) denominado de Correção Atmosférica pela Subtração do Pixel Escuro (*Dark Object Subtraction – DOS*). Segundo a proposta deste método, em toda e qualquer cena e em qualquer banda espectral, existem pixels que deveriam assumir o valor “0”, uma vez que estes poderiam não receber radiação incidente. No caso de sombras na região do visível, idealmente o sistema de imageamento não deve detectar qualquer radiação nesses locais e um valor “0” de número digital deve ser atribuído a estes pixels. No entanto, por causa de efeitos de dispersão na atmosfera, estas áreas sombreadas não aparecerão completamente escuras na imagem. A correção simplesmente consiste em identificar no histograma de cada banda espectral, quais quantidades de números digitais devem ser subtraídas de cada imagem como um todo, considerando que a interferência atmosférica é uniforme em toda a cena.

2.3.2 Conversão de Números Digitais para valores físicos de Radiância e Reflectância

A conversão de Números Digitais (ND) das imagens para valores de parâmetros físicos como Radiância e/ou Reflectância é possível e tem como objetivo permitir a caracterização espectral de objetos, bem como permitir a elaboração de cálculos que incluem dados de diferentes bandas espectrais ou de diferentes sensores. Este processo exige do usuário conhecimento de algumas características do sensor que gera a imagem e das condições ambientais nas quais as imagens foram geradas (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

A transformação de Números Digitais para Reflectância espectral foi proposta por Markham e Barker (1986). O primeiro processamento consiste em converter os Números Digitais em valores de Radiância espectral usando parâmetros de calibração obtidos em missões de calibração antes do lançamento, segundo a Equação 1.

$$L_{\lambda} = L_{min_{\lambda}} + \left(\frac{L_{MAX_{\lambda}} - L_{MIN_{\lambda}}}{Q_{calmax}} \right) Q_{CAL} \quad (1)$$

Onde:

L_λ = Radiância espectral,

Q_{CAL} = Número digital a ser convertido,

Q_{calmax} = Número digital máximo (dependente da resolução radiométrica do sensor),

$LMIN_\lambda$ = Radiância espectral mínima,

$LMAX_\lambda$ = Radiância espectral máxima.

Após a conversão para Radiância, os dados adquiridos são convertidos para Fator de Reflectância Bidirecional Aparente, por meio da Equação 2. A reflectância é o parâmetro mais apropriado para avaliar as propriedades espectrais dos objetos, que são expressos por fatores de reflectância. Segundo Ponzoni e Shimabukuro (2010), com os dados em Números Digitais convertidos para Reflectância Bidirecional Aparente é possível realizar operações aritméticas utilizando dados de imagens em diferentes bandas espectrais, além da possibilidade de caracterização espectral de objetos existentes na superfície terrestre.

$$\rho_\lambda = \frac{\pi * L_\lambda * d^2}{E_{sun_\lambda} * \cos\theta} \quad (2)$$

Onde:

ρ_λ = FRB aparente [sem unidade]

π = constante matemática igual a ~3.14159 [sem unidade]

L_λ = Radiância espectral (do passo anterior) [$mW/(cm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1})$]

d = distância Terra-Sol [unidades astronômicas] (depende da data da imagem)

E_{sun_λ} = Irradiância média solar exoatmosférica [$mW/(cm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1})$]

θ = ângulo solar zenital [graus]

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a realização da presente pesquisa no reservatório Passo Real foram utilizadas metodologias distribuídas em duas fases: obtenção de dados em campo e em laboratório de processamento de imagens. Salienta-se que a presente pesquisa está relacionada a um projeto financiado pelo CNPq nº 484712/2007-1 (*Caracterização Espectral e Limnológica de Ambientes Lênticos no Rio Grande do Sul, com Abordagem Espaço-Temporal*).

Para a realização dos trabalhos de campo, Pereira Filho *et al.* (2010) estabeleceram 31 pontos amostrais equidistantes que contemplam as diferenças espectrais encontradas no reservatório (Figura 2).

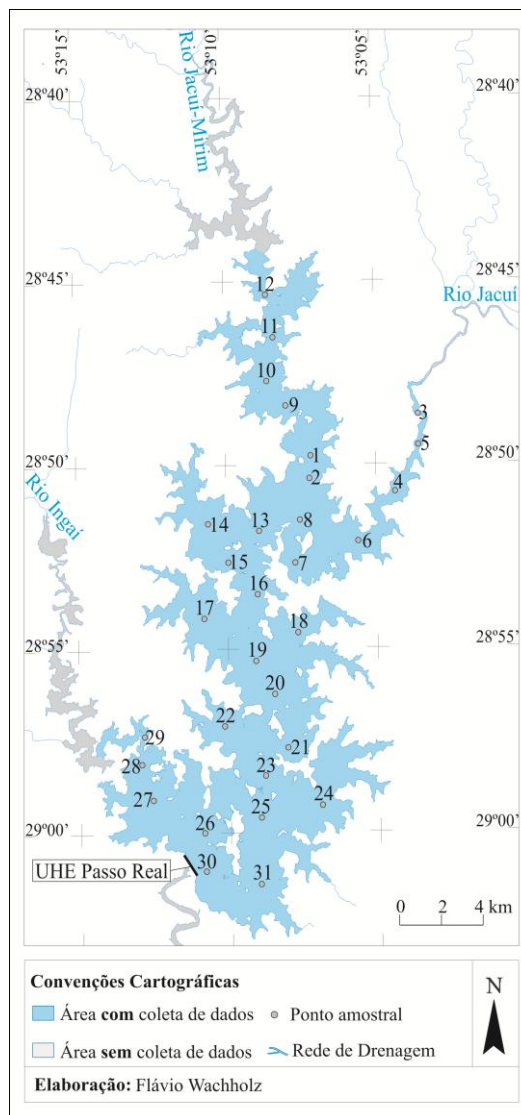


Figura 2 - Localização dos pontos amostrais no Reservatório Passo Real.
Fonte: Adaptado de Wachholz (2011).

A transparência da água foi obtida com o uso de um Disco de Secchi. A obtenção dos dados desta variável ocorre com submersão de um disco branco com 25 cm de diâmetro suspenso horizontalmente por uma corda graduada. A medida da transparência corresponde ao desaparecimento do disco quando mergulhado na água. As medições foram somente com céu claro (BARTRAM; BALANCE, 1996; WETZEL, 2000).

As imagens de satélite utilizadas para a análise temporal da refletância da água foram produzidas pelo satélite Landsat 5, sensor TM, a partir das quais é possível a extração de pixels puros em função da resolução espacial de 30 metros. A seleção de imagens foi a partir da disponibilidade de cenas sem presença de nuvens em datas mais próximas à realização dos trabalhos de campo, conforme apresentado na Quadro 2.

Quadro 2 - Datas dos trabalhos de campo e das imagens de satélite.

Data de coleta de dados de transparência <i>in situ</i>	Data da imagem selecionada (reflectância)	Defasagem entre data dos dados de transparência e reflectância (em dias)
13 e 14.03.2009	19.03.2009	5
17 e 18.04.2009	20.04.2009	2
04.06.2009	22.05.2009	13
13.07.2009	25.07.2009	12
13.08.2009	26.08.2009	13
21.10.2009	29.10.2009	8

As imagens do satélite Landsat 5 TM foram adquiridas gratuitamente no catálogo do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR>). A área referente ao reservatório Passo Real está compreendida na órbita/ponto 222/80.

O processamento das imagens foi realizado no software ENVI 5.0. A banda 3 (626-693 nm) correspondente à região do vermelho no espectro eletromagnético foi corrigida dos efeitos da atmosfera pelo método da Subtração do Pixel Escuro (*Dark-Object Subtraction*), proposto por Chavez Junior (1988). Os valores em números digitais da imagem foram transformados em valores de radiância espectral e após convertidos em reflectância de superfície conforme métodos descritos em Markham e Barker (1986).

Dados pontuais de reflectância foram consultados nas imagens a partir das coordenadas geográficas dos 31 pontos de coleta do reservatório. Com os dados limnológicos e espectrais organizados em tabelas no aplicativo Excel foi realizado testes estatísticos de regressão para interpretar e comparar os dados estudados.

As imagens convertidas em valores de reflectância foram importadas no *software* SPRING e realizada a espacialização destes dados por fatiamento em 21 classes. Para a espacialização da transparência da água, os dados foram inseridos no banco de dados geográfico do *software* SPRING, na forma de modelo numérico do terreno (MNT). Para cada data foi gerada uma grade retangular (interpolador por média ponderada), que posteriormente foi utilizada no fatiamento em 20 classes temáticas definidas e ponderadas de acordo com os estados tróficos definido por Carlson (1977) e modificados por Lamparelli (2004).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A variável limnológica estudada nesta pesquisa foi a transparência da água e é apresentada em conjunto com a reflectância da água. Estes dados são avaliados estatisticamente com o intuito de verificar a relação entre as medidas de transparência obtidas em campo e a reflectância obtida por imagens de satélite.

Na análise temporal de Março de 2009 a Julho de 2009 as medidas de transparências do reservatório Passo Real em sua maioria foram superiores a 100 centímetros. Os períodos de Agosto de 2009 e Outubro de 2009 apresentaram transparências inferiores a 100 centímetros e com menor variância dos dados (Figura 3).

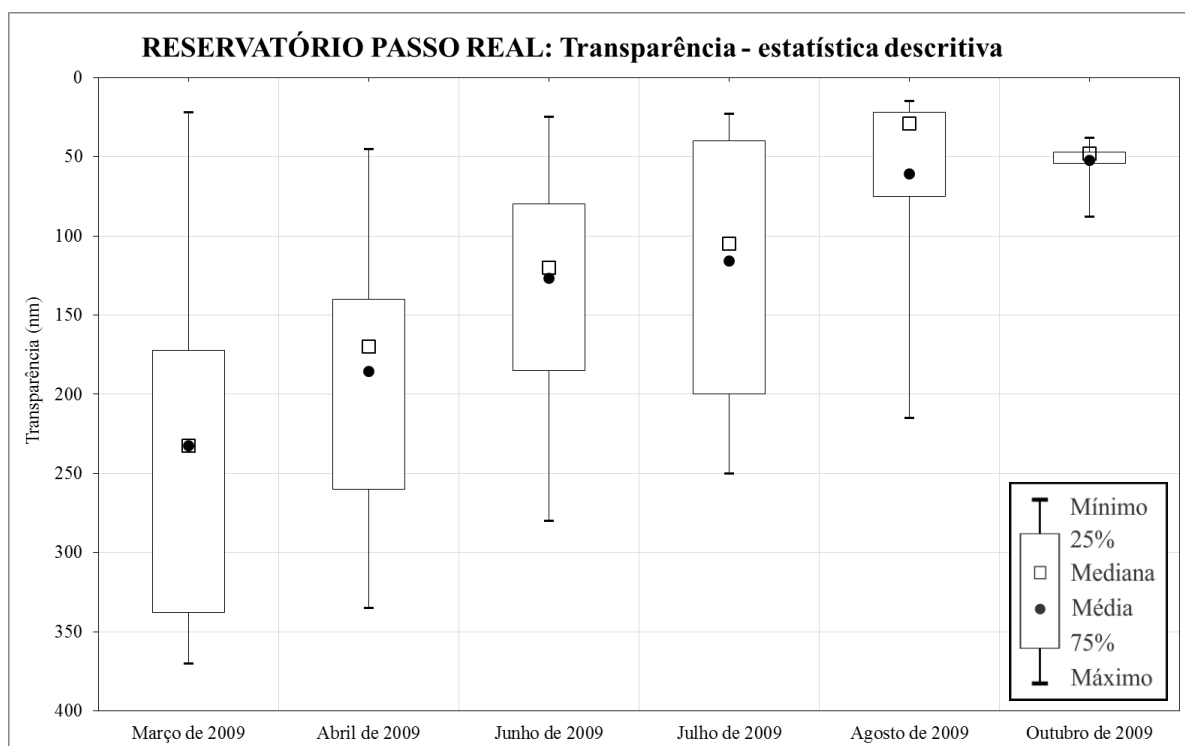


Figura 3 - Estatística dos dados mensais de transparência da água do reservatório Passo Real.

A espacialização dos dados demonstra que o período de Março de 2009 (Figura 4) apresentou setores transparentes caracterizando um estado ultraoligotrófico em quase totalidade do reservatório. Os setores com redução de transparência correspondem à entrada dos rios Jacuí e Jacuí-Mirim e apresentaram maior reflectância para o mesmo período.

Salienta-se que a diferença de datas das imagens em relação ao campo é um período menor do que uma semana.

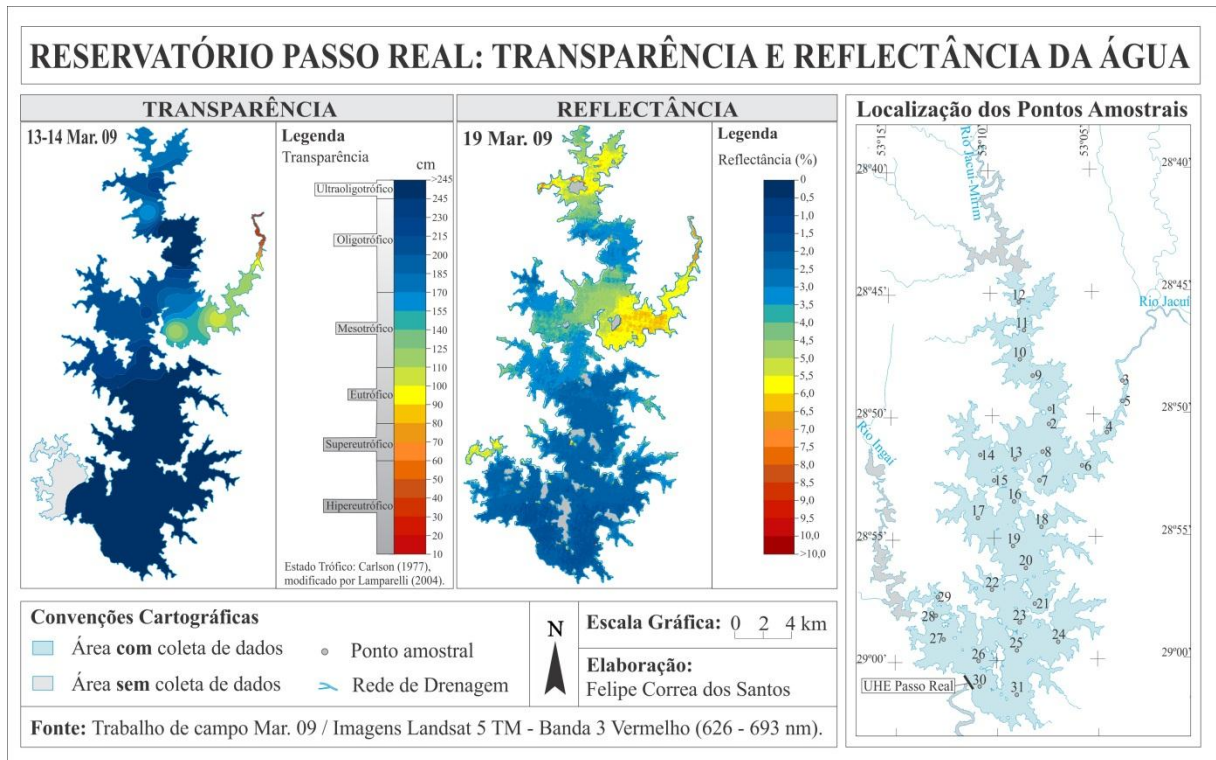


Figura 4 - Espacialização da transparência e reflectância da água do reservatório Passo Real (Março de 2009).

O modelo de regressão gerado para os dados de Março de 2009 (Figura 5) apresentam três agrupamentos de pontos amostrais que representam a configuração do ambiente aquático neste período. O grupo circulado em linha contínua representa os dados referentes ao compartimento aquático de entrada do rio Jacuí no reservatório e caracterizaram-se por transparência abaixo de 120 centímetros e maiores valores de reflectância para este período. Os pontos amostrais de entrada do rio Ingaí apresentam características opostas e estão circutados em linha tracejada por se constituírem em ambientes de transparências superiores a 320 centímetros e menores valores de reflectância. Os valores intermediários de transparência e reflectância da água são encontrados no setor de entrada do rio Jacuí-Mirim (PR11) e em setores no interior do reservatório.

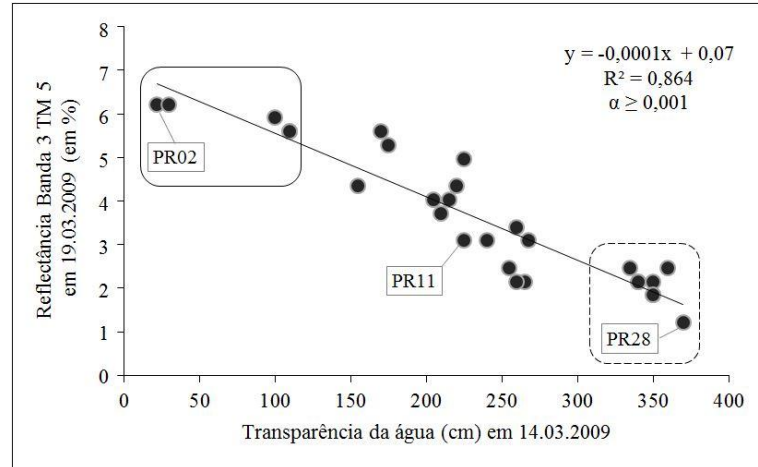


Figura 5 - Gráfico de dispersão dos valores de reflectância da Banda 3 TM e medidas de transparência da água do reservatório Passo Real (Março de 2009).

Semelhante a Março de 2009, os dados de Abril de 2009 demonstram a participação dos tributários na transparência do reservatório Passo Real (Figura 6). Este período se caracterizou por águas transparentes em quase todo o reservatório, com redução da transparência e elevação da reflectância apenas nos setores de entrada dos rios.

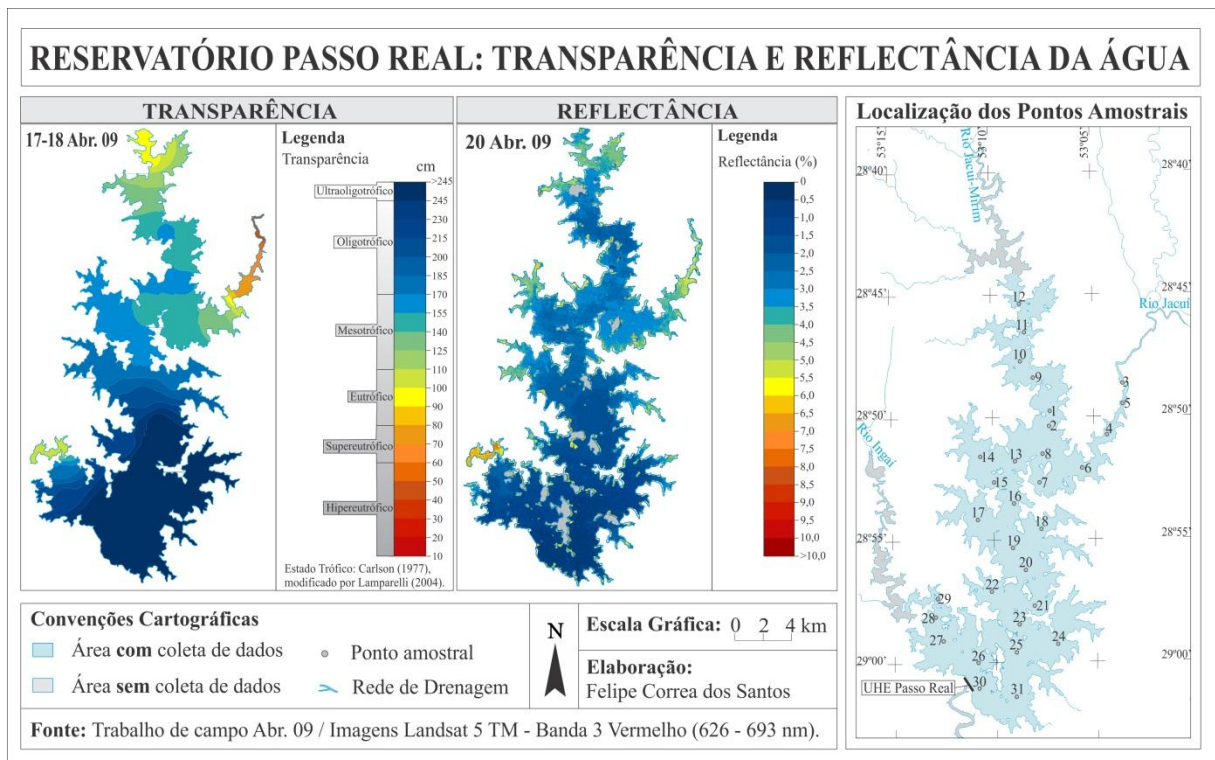


Figura 6 - Espacialização da transparência e refletância da água do reservatório Passo Real (Abril de 2009).

O período de Abril de 2009 (Figura 7) foi o que apresentou melhor ajuste linear com forte coeficiente de determinação ($R^2=0,91$). Este fato pode estar associado a pouca diferença de tempo entre a coleta de dados em campo e a passagem do satélite (2 dias). O ponto amostral PR05 foi o que apresentou menor transparência (45 centímetros) e maior reflectância neste período e demonstra a situação do setor de entrada do rio Jacuí no reservatório. Em situação oposta encontra-se o ponto PR30 com transparência de 335 centímetros e baixo valor de reflectância. O ponto amostral PR15, localizado no setor central do reservatório, representa a mediana dos dados de transparência que na regressão configura-se entre os dados intermediários na dispersão.

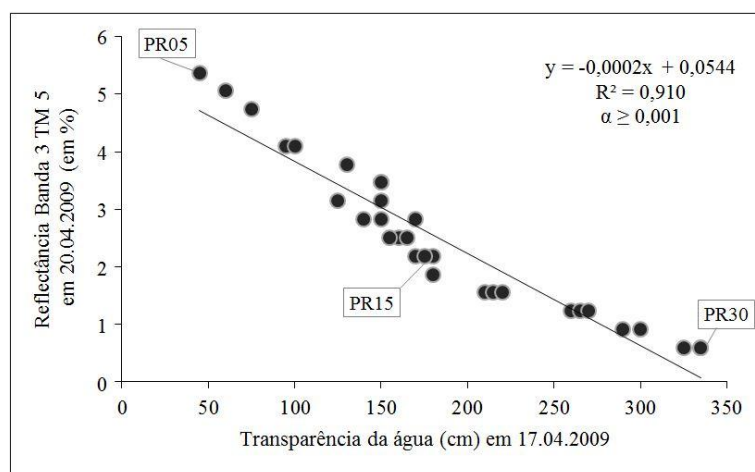


Figura 7 - Gráfico de dispersão dos valores de reflectância da Banda 3 TM e medidas de transparência da água do reservatório Passo Real (Abril de 2009).

Em Junho de 2009 as maiores transparências correspondem ao eixo dos pontos amostrais 20 a 31 e verifica-se uma diminuição na transparência nos setores do reservatório que recebem águas dos rios Jacuí e Jacuí-Mirim. Essa condição avança para áreas mais centrais do reservatório. A imagem de Maio de 2009 apresentou dados de reflectância mais elevada na entrada das águas dos rios Jacuí e Jacuí-Mirim. Esta imagem corresponde a 13 dias anteriores a realização do campo em que foram observados os dados de transparência em Junho de 2009 e demonstra a entrada de sedimentos pelos rios no reservatório. Os dados de transparência medidos em campo apresentam o material já deslocado para o interior do reservatório.

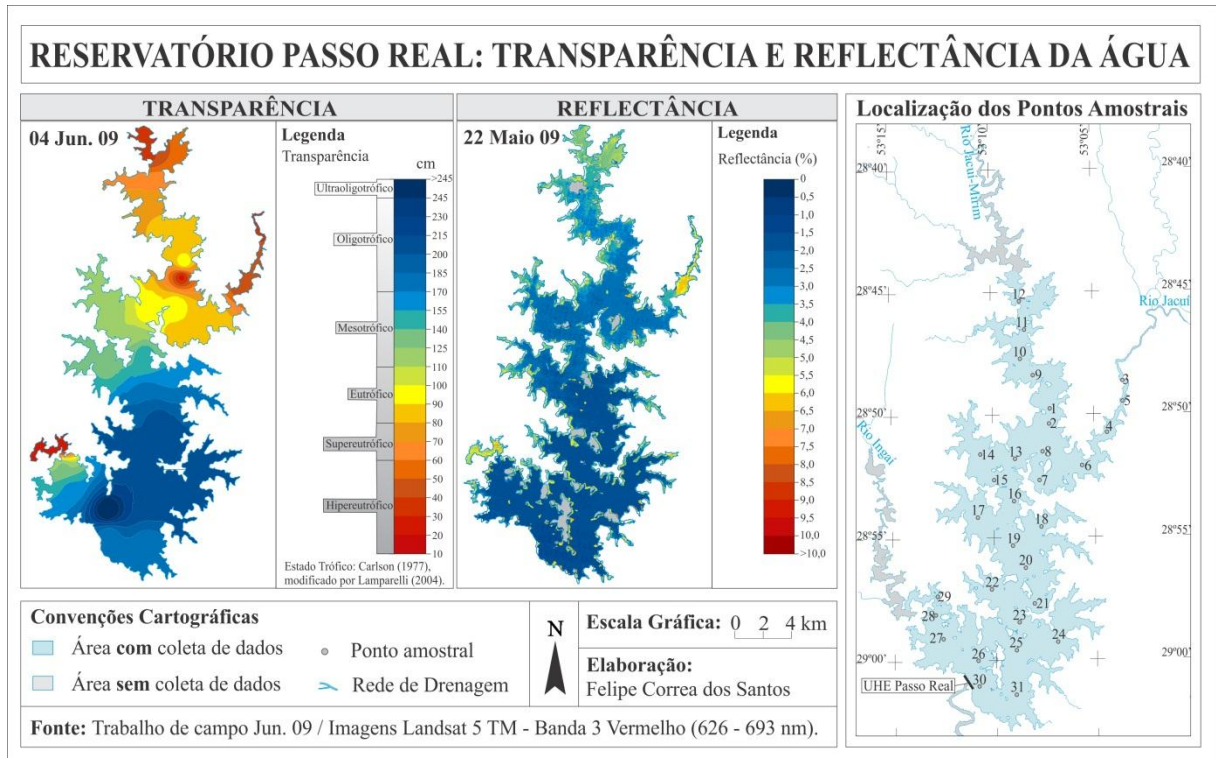


Figura 8 - Espacialização da transparência e reflectância da água do reservatório Passo Real (Junho de 2009).

Em Junho de 2009 (Figura 9) embora com diferenças de aproximadamente duas semanas entre as coletas de dados em campo e passagens do satélite na área de estudo, os dados se configuraram em tendência linear nos modelos apresentados. Em Junho de 2009 destaca-se o grupo de pontos amostrais (circulados no gráfico) com medidas de transparência abaixo de 50 centímetros e os maiores valores de reflectância neste período por estarem situados nos setores de entrada dos rios Ingaí, Jacuí, Jacuí-Mirim e no setor de mistura dos últimos dois rios referidos.

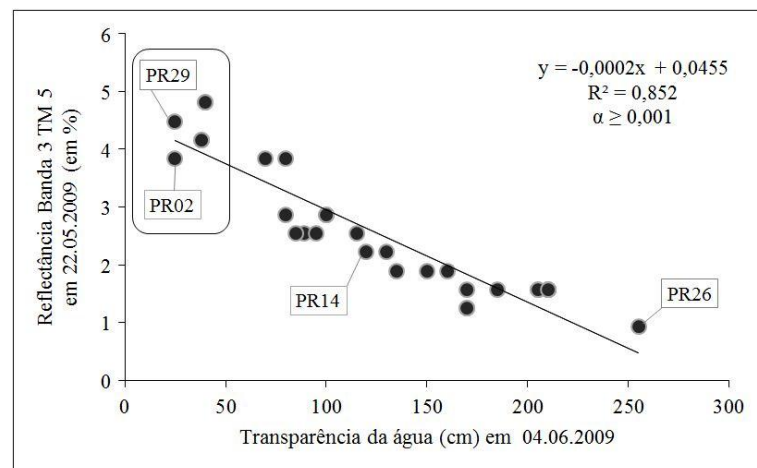


Figura 9 - Gráfico de dispersão dos valores de reflectância da Banda 3 TM e medidas de transparência da água do reservatório Passo Real (Junho de 2009).

As medidas de transparência da água em Julho de 2009 foram semelhantes às de Junho de 2009. Verifica-se transparência menor que 100 centímetros nos setores do reservatório que recebem águas dos rios Jacuí e Jacuí-Mirim e as transparências superiores a 150 centímetros correspondem ao eixo central do reservatório até o setor próximo ao dique.

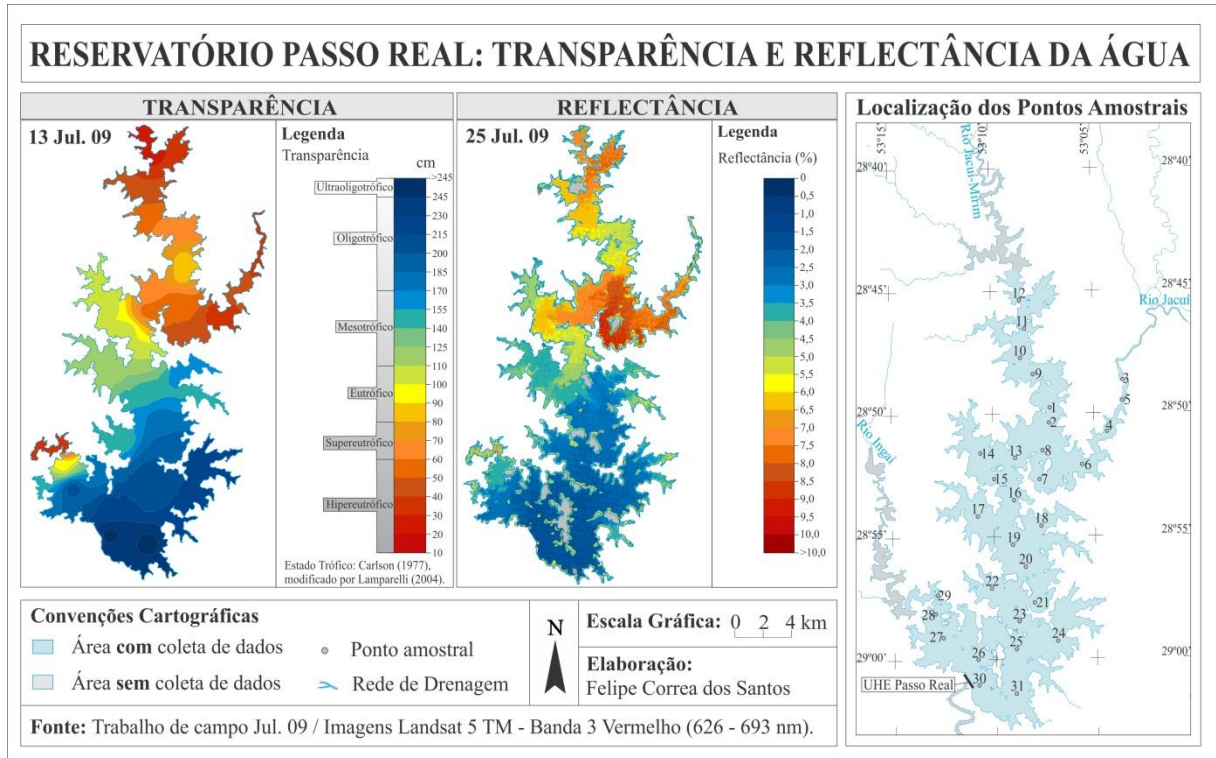


Figura 10 - Espacialização da transparência e reflectância da água do reservatório Passo Real (Julho de 2009).

Os dados de Julho de 2009 se configuraram em tendência linear no modelo apresentado com forte correlação entre transparência e reflectância (Figura 11), além de demonstrar a grande influência da entrada de água dos rios no reservatório nos dados analisados. Destaca-se a diferença de 12 dias entre a coleta de dados em campo e passagens do satélite na área de estudo.

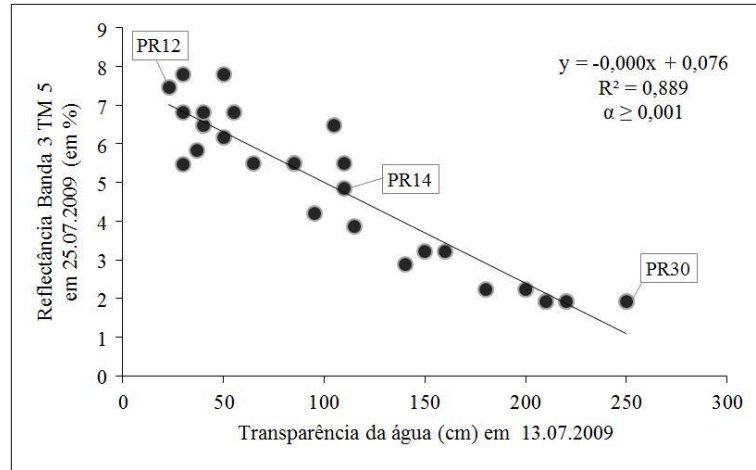


Figura 11 - Gráfico de dispersão dos valores de reflectância da Banda 3 TM e medidas de transparência da água do reservatório Passo Real (Julho de 2009).

Os dados de transparência foram inferiores a 100 centímetros em Agosto de 2009 (Figura 12), com exceção do setor próximo ao dique, onde se encontra maior volume de água. Em uma análise temporal ocorreu redução da transparência em quase todo o reservatório se comparado com períodos anteriores.

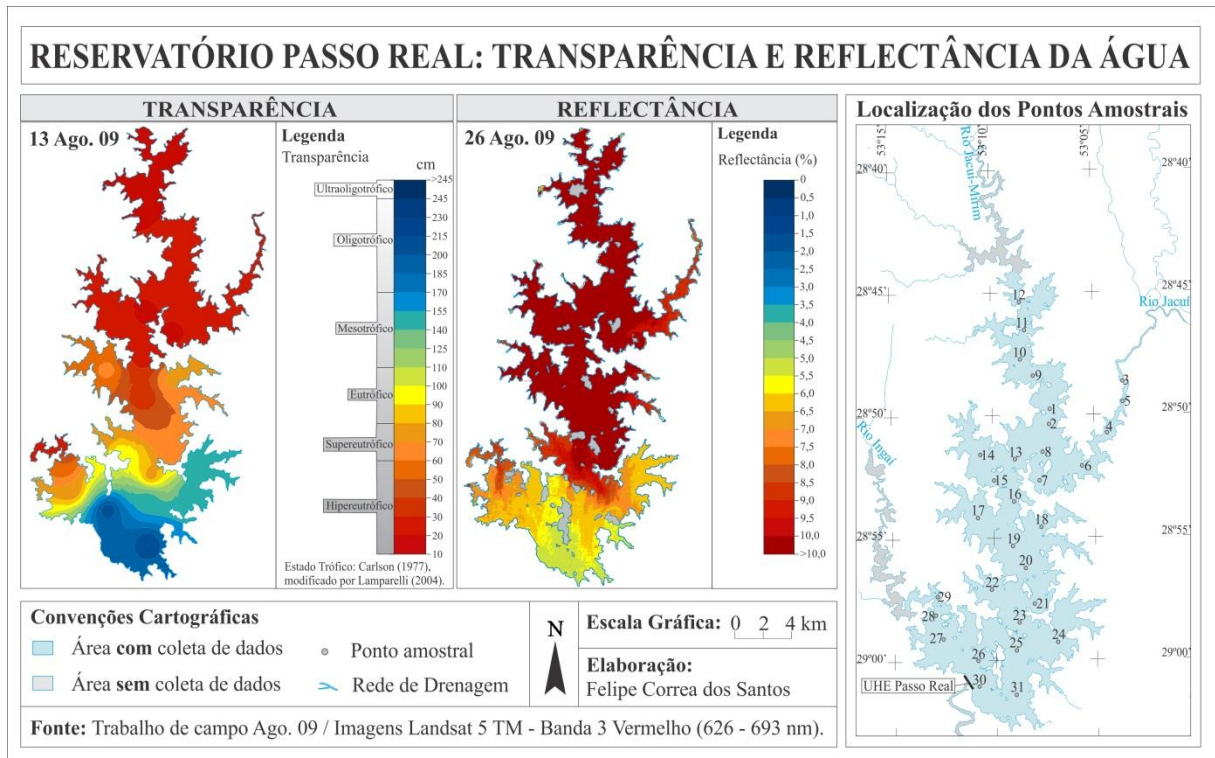


Figura 12 - Espacialização da transparência e reflectância da água do reservatório Passo Real (Agosto de 2009).

Segundo Wachholz (2011) em Agosto de 2009, a redução do nível da água e o aumento das chuvas proporcionaram a diminuição da transparência. Esse período pode ser caracterizado como um grande pulso de material no reservatório. Os dados de reflectância se apresentaram elevados em quase todo o reservatório. A reflectância obtida por imagem (13 dias posterior ao campo) registrou avanço de sedimentos em suspensão oriundos do rio Ingaí para o interior do reservatório, setor em que foram registradas transparências superiores a 150 centímetros.

Os dados de Agosto de 2009 (Figura 13) apresentaram forte correlação entre transparência e reflectância, embora seja menor que os períodos anteriores estudados. A dispersão dos dados remete a uma divisão em dois grupos. Um grande grupo com transparências até 100 cm (circulado no gráfico em linha contínua) apresentou altos valores de reflectância e correspondem aos setores desde as entradas dos rios Jacuí e Jacuí-Mirím até o setor central do reservatório (PR22). O segundo agrupamento de dados correspondem ao setor próximo ao dique do reservatório e o de entrada do rio Ingaí (circulado no gráfico em linha tracejada), em que foram medidas transparências superiores a 150 centímetros e valores de reflectância menores que o primeiro grupo mencionado. Apesar destes pontos amostrais apresentarem valores de reflectância menores que o do primeiro grupo, ainda são valores mais altos do que o esperado para este setor. Esta ocorrência é devido ao deslocamento do material em suspensão do setor de entrada do rio Ingaí ao compartimento próximo ao dique, pois esta dinâmica das águas do reservatório ocorreu no período de 13 dias entre a coleta em campo e a passagem do satélite.

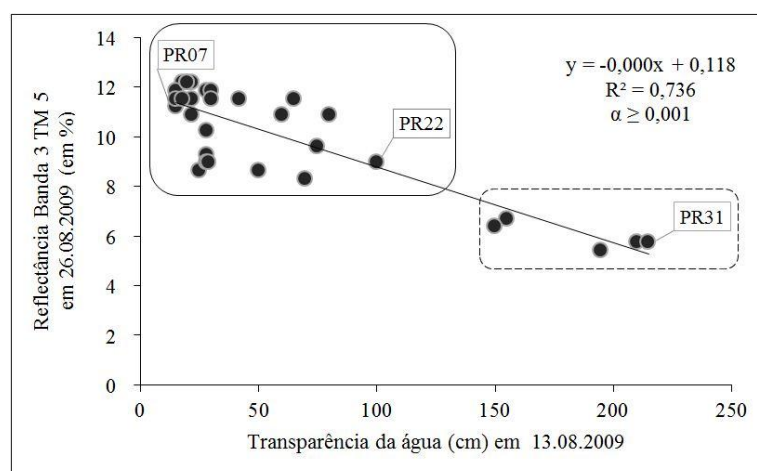


Figura 13 - Gráfico de dispersão dos valores de reflectância da Banda 3 TM e medidas de transparência da água do reservatório Passo Real (Agosto de 2009).

Em Outubro de 2009 as transparências foram inferiores a 100 centímetros em todos os setores do reservatório e pouca variância dos dados (Figura 14). Este fato está relacionado ao volume de chuvas e ao baixo tempo de retenção das águas no reservatório. O acúmulo pluviométrico dos 30 dias anteriores à coleta foi de 212 mm, configurando um mês chuvoso principalmente por ser um ano influenciado pelo *El Niño*.

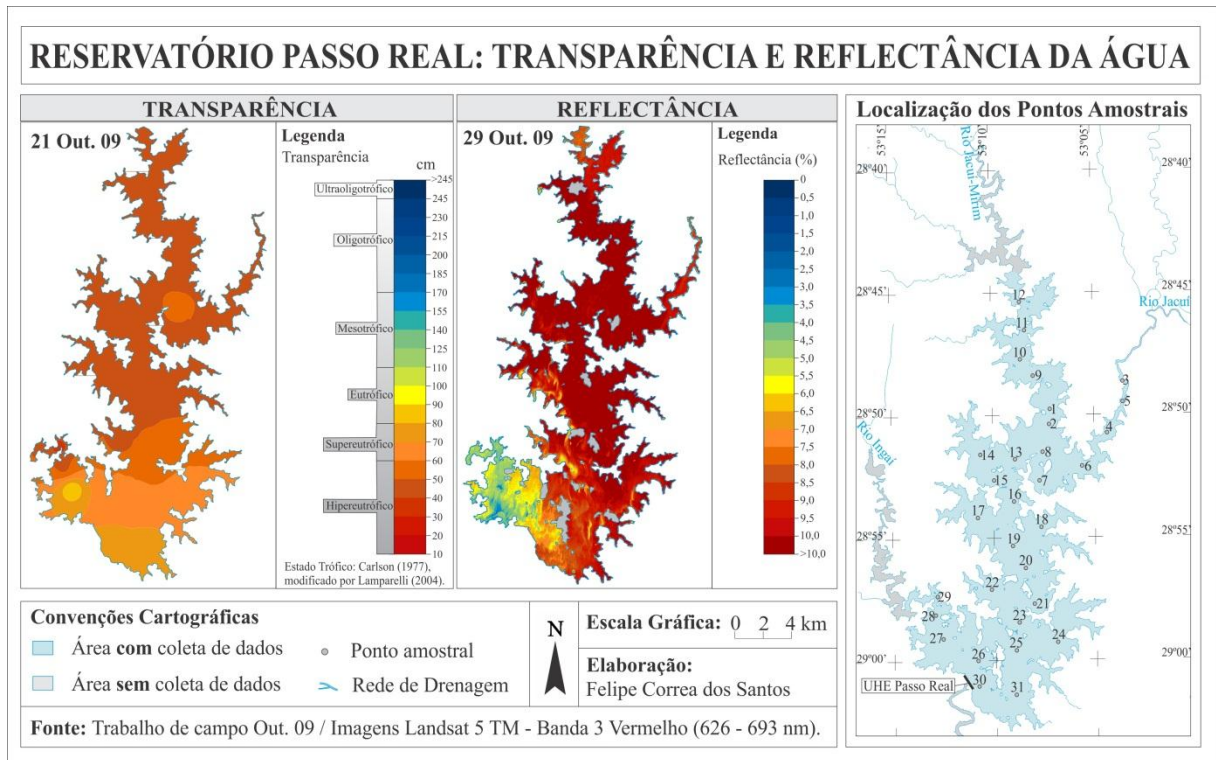


Figura 14 - Espacialização da transparência e reflectância da água do reservatório Passo Real (Outubro de 2009).

Em estudo anterior realizado por Santos (2012), foi constatado que em Outubro de 2009 as baixas medidas de transparência da água foram decorrentes de valores elevados de clorofila a e presença de sólidos em suspensão na água, consequência das elevadas precipitações que proporcionaram o transporte de material para o corpo hídrico, pois no período de entressafra e início do plantio das culturas de verão os solos encontram-se menos protegidos. Neste período o reservatório apresentou altos valores e pouca variância nos dados de reflectância. O setor de entrada das águas do rio Ingaí e próximo ao dique apresentam valores de reflectância inferiores ao restante do reservatório.

Ao observar a regressão para os dados de Outubro de 2009 (Figura 15) nota-se a ocorrência de pontos amostrais afastados da linha de tendência (circulados no gráfico). Os pontos com medidas de transparências próximas a 40 cm apresentaram valores de reflectância abaixo do esperado de acordo com o modelo de regressão. Estudos realizados por Pereira

Filho *et al.* (2011), Wachholz (2011) e Santos (2012) relatam uma floração de algas no setor próximo a entrada do rio Ingaí com concentração de clorofila *a* que chegam a 439,52 µg/L (PR29). A banda 3 do sensor TM sendo sensível a absorções de pigmentos fotossintéticos apresentou valores baixos de reflectância neste setor do reservatório.

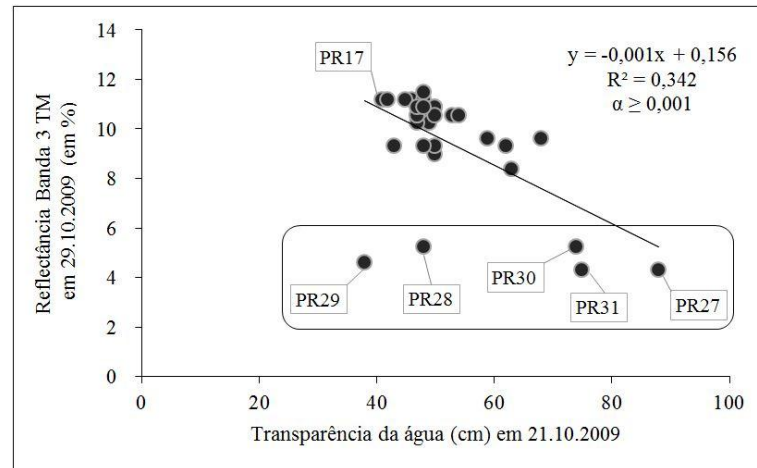


Figura 15 - Gráfico de dispersão dos valores de reflectância da Banda 3 TM e medidas de transparência da água do reservatório Passo Real (Outubro de 2009).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transparência da água medida em campo com o uso de Disco de Secchi foi comparada com os valores de reflectância na faixa do vermelho (TM3) de imagens Landsat 5 em 31 estações amostrais do reservatório Passo Real. A reflectância é mais elevada em estações de coletas que apresentaram baixa transparência da água. Os setores que mais sofreram diminuição de transparência correspondem às entradas de rios no reservatório. Foram encontradas fortes correlações entre os dados e padrões no que se refere aos diferentes setores do reservatório e conclui-se que os modelos de regressão podem ser usados para estimar a transparência da água, porém devem ser usados com cautela, visto que sob certas situações a relação entre estas variáveis diminui, especialmente quando há elevada concentração de clorofila *a*.

A transparência da água é uma variável altamente dinâmica e ao se correlacionar dados obtidos *in situ* com os de imagem e satélite deve ser observada a defasagem entre as datas de coletas. O grau de correlação entre os dados dependerá da dinâmica do reservatório no período de defasagem entre campo e imagem. O máximo de defasagem entre os dados desta pesquisa foi de 13 dias e mesmo assim apresentaram fortes correlações entre os dados.

A presença de pigmentos fotossintéticos na água diminuiu o grau de correlação de dados de transparência e reflectância na faixa do vermelho. Em condições de alta concentração de clorofila *a*, tanto a transparência medida em campo quanto a reflectância registraram baixos valores para o período (inferiores a 90 centímetros e 6% respectivamente). Foi constatada a presença de floração de algas no compartimento do rio Ingaí no mesmo período, de acordo com registro apresentado em trabalhos de Pereira Filho *et al.* (2011), Wachholz (2011) e Santos (2012). A banda 3 do sensor TM é sensível à absorção de energia eletromagnética por pigmentos fotossintéticos, resultando em valores baixos de reflectância em setores com presença de florações de algas.

As imagens de satélite caracterizaram-se em importantes ferramentas para compreensão do funcionamento espaço-temporal do reservatório. Embora pesquisadores devam estar cientes que frequentemente a cobertura de nuvens reduz a disponibilidade de imagens Landsat reduzindo a possibilidade de monitoramento constante de um ambiente aquático.

6 REFERÊNCIAS

BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas.** 2007. 282 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005.

BARTRAM, J; BALANCE, R. (Editores). **Water Quality Monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes.** London: E & FN SPON, 1996.

CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes. **Limnology Oceanography**, v . 22: p. 361-80, 1977.

CEEE–GT (Companhia Estadual de Geração de Energia Elétrica – Geração e Transmissão). **Plano de uso e ocupação do solo no entorno do Reservatório da UHE Passo Real.** Porto Alegre: PROFFIL, 2009.

CHAVEZ JUNIOR, P. S.; An Improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, p. 459-479, 1988.

COAJU – Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí. **Plano de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí:** consolidação das informações existentes sobre os recursos hídricos da bacia. Relatório Temático – RT 2, 2009, Passo Fundo, 2009.

COAJU – Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí. **História do Sistema Jacuí.** Disponível em: <www.upf.br/coaju/download/Historia_Sistema_Jacui_1.ppt> Acesso em: 11 de outubro de 2010.

ENNES, R. **Potencial das imagens hiperespectrais orbitais na detecção de componentes opticamente ativos no reservatório de Itupararanga.** 125f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia.** 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

FICHTELMANN, B., *et. al.* Automação de SR com Base num Exemplo de Monitoramento Operacional de Clorofila no Mar Báltico. In.: BLASHKE, T.; KUX, H. (Orgs.). **Sensoriamento remoto e SIG avançados: novos sistemas sensores: métodos inovadores.** São Paulo: Oficina de Textos, 2005, p. 253-262.

FREIRE, M. L. F.; BASTOS, E. J. B. Correção Atmosférica de Imagens Landsat Contaminadas por Efeito de Adjacência: Atmosfera Rayleigh. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8, 1996, Salvador, **Anais...** Salvador: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996. p. 905-907.

HELLWEGER, F. L. *et al.* Use of satellite imagery for water quality studies in New York Harbor. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.61, p.437-448, 2004.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos naturais.** São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento.** 238f. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) – Universidade de São Paulo, Instituto de Biociências, São Paulo, 2004.

MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L.; Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperature. **EOSAT Landsat Technical Notes**, Nº 1, August, 8p., 1986.

MCCULLOUGH, IAN M. **Remote Estimation of Regional Lake Clarity with Landsat TM and MODIS Satellite Imagery.** 90f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Ciências Ambientais) - The University of Maine, Orono, 2012.

MPRS - MINISTÉRIO PÚBLICO DO RIO GRANDE DO SUL. **Análise das características da Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí, utilizando imagens do satélite CBERS.** (Parecer da Divisão de Assessoramento Técnico nº 2757/2008). Porto Alegre, 2008.

NOVO, E. M. L. M., Utilização de dados de Sensoriamento Remoto em Estudos Ambientais. **Geografia**, v. 13, 25, n. 25, p. 43-51, 1988.

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. p.203-222.

NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento Remoto Aplicado à Ecologia Aquática. In: ROLAND, F.; CESAR, D.; MARINHO, M. (Orgs.) **Lições de Limnologia.** São Carlos: RIMA, 2005. p 418-432.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações.** 3 ed. São Paulo: Blucher, 2008.

PEREIRA FILHO, W.; *et al.* **Caracterização espectral e limnológica de ambientes lenticos e lóticos no Rio Grande do Sul, com abordagem espaço-temporal.** Relatório Técnico apresentado ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) processo nº 484712/2007-1 como comprovante das atividades referentes ao projeto, 2010.

PEREIRA FILHO, W.; *et al.* Relação entre clorofila a com perfil espectral e imagem de satélite no reservatório Passo Real – RS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011. Curitiba. **Anais...** Curitiba: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2011. p.5433-5440.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação.** São José dos Campos, SP: Editora Parêntese, 2010. 140p.

PONZONI, F. J.; ZULLO JUNIOR, J.; LAMPARELLI, R. A. **Calibração absoluta de sensores orbitais:** conceituação, principais procedimentos e aplicação. São José dos Campos: Parêntese, 2007.

RICHARDS, J.A.; JIA, X. **Remote Sensing Digital Image Analysis:** an introduction. Berlin: Springer, 2006.

RUDORFF, C. M. **Estudo da composição das águas da Planície Amazônica por meio de dados de reflectância do sensor Hyperion/EO-1 e de espectrômetro de campo visando à compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos.** 2006. 140f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

RUDORFF, C. M. *et al.* Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 37, 2007. p. 269-280.

SANTOS, F. C. **Influência dos constituintes opticamente ativos na reflectância espectral da água do reservatório Passo Real, RS.** 87 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

SANTOS, R. F. **Planejamento Ambiental:** Teoria e Prática. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI:** enfrentando a escassez. 2.ed. São Carlos: Rima, 2005.

WACHHOLZ, F. **Influência das bacias hidrográficas e características espaço-temporal de variáveis limnológicas em reservatórios no Rio Grande do Sul.** 2011. 191 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

WACHHOLZ, F. Alterações espectrais nas imagens de satélite nos reservatórios das usinas hidrelétricas Caçu e Barra dos Coqueiros - GO. **Revista GeoNorte**, v. 2, p. 1170-1179, 2012.

WACHHOLZ, F.; CABRAL, J. . Impacto das Usinas Hidrelétricas a modo de fio d'água no rio Claro na transparência da água, com o uso de dados espectrais de imagens Landsat TM5. In: Symposium SELPER, 15, 2012, Caiena. **Anais...** Caiena: PROCEEDINGS SELPER, 2012. p. 1-8.

WANG, Y.; *et al.*. 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.

WETZEL, R. G. **Limnological analyses.** 3rd. ed. New York, NY: Springer, 2000.

WU, G.; *et al.* Comparison of MODIS and Landsat TM5 images for mapping tempo-spatial dynamics of Secchi disk depths in Poyang Lake National Nature Reserve, China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n.8, 2183–2198, 2008.

ZULLO JUNIOR, J. **Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações.** 1994. 194p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1994.