

## Artigo Técnico

# Comportamento espacial da clorofila-a no reservatório de Itaparica, rio São Francisco

*Spatial behavior of chlorophyll-a in Itaparica reservoir, São Francisco River*

Helio Lopes (in memoriam), Maria do Carmo Sobral<sup>1</sup>, Günter Gunke<sup>2</sup>,  
Ana Lúcia Candeias<sup>3</sup>, Gustavo Melo<sup>4</sup>

## RESUMO

Na análise do estado trófico de um corpo hídrico torna-se fundamental o conhecimento da concentração de clorofila-a. Esse trabalho tem como objetivo determinar e avaliar o comportamento da clorofila-a no reservatório de Itaparica, localizado no sub-médio São Francisco. Para esse fim, utilizou-se de imagem Landsat-TM, na qual foram utilizadas as bandas de 1 a 5 e 7. O modelo aplicado foi escrito em linguagem LEGAL-SPRING 5.2. A partir da imagem da clorofila-a realizou-se o fatiamento do corpo hídrico em seis classes concentração. O valor mínimo foi de  $<1 \mu\text{g/L}$  e o maior foi de  $249,5 \mu\text{g/L}$ . As classes que obtiveram maior área foram de 0 a  $5 \mu\text{g/L}$  com 27,4%, seguida da classe 5 a  $10 \mu\text{g/L}$  com 24,6% da área total do reservatório, conforme observado por histograma. Por meio da análise gráfica de pontos situados ao longo do reservatório verifica-se que a concentração da clorofila-a aumenta da região fluvial para região lacustre e a partir dos contatos dos riachos com o reservatório. Em futuros estudos há necessidade de se validar os valores encontrados com dados de campo de forma a verificar a precisão do mapeamento para o reservatório em estudo, observando dia e horário da passagem do sensor.

**Palavras-chave:** qualidade da água; sensoriamento remoto; landsat.

## ABSTRACT

In the analysis of trophic state of the water body is fundamental to know chlorophyll-a concentration. Thus, this work has as main aim to determinate and to assess the behavior of chlorophyll-a in the Itaparica reservoir, São Francisco river. This way, we used Landsat-TM imagery, in which it was used bands from 1 to 5 and 7. The algorithm used was written in LEGAL/SPRING 5.2. From the chlorophyll-a result was held slicing the water body in six concentration classes. As observed by histogram, the minimum value of Chl-a was  $<1 \mu\text{g/L}$  and the highest was  $249,5 \mu\text{g/L}$ . The classes that had the biggest area were Classe 01 (0- $5 \mu\text{g/L}$ ) with 27,4%, followed by Classe 02 (5- $10 \mu\text{g/L}$ ) with 24,6% of the total area of the study area. Through graphical analysis of points located along the reservoir it was possible to verify that chlorophyll concentration augmented from fluvial to lacustrine region and from the contact of streams with reservoir. In the next studies there is a need to validate the values with field data in order to verify the mapping accuracy in this reservoir, taking into account the day and also the transit time of the sensor.

**Keywords:** water quality; remote sensing; landsat.

## INTRODUÇÃO

No monitoramento da qualidade da água, é importante a espacialização dos resultados. As imagens de sensoriamento remoto podem ser um caminho nesta avaliação e a sua resolução multitemporal pode mostrar essa dinâmica. Para isto, é necessária uma modelagem específica onde a entrada são as bandas de uma dada imagem e a saída pode ser um mapa temático com as informações da qualidade da água. As informações modeladas e espacializadas sobre a qualidade da água podem estar ligadas a uma tabela de classificação das águas para detectar e monitorar se está dentro do limite ou se excede valores críticos de padrões de

qualidade da água conforme estabelecidos em Resolução, que no caso do Brasil é a Resolução CONAMA 357/2005.

Chen *et al.* (2007) considera cinco passos relacionados ao monitoramento da água:

1. Identificação de medições apropriadas de qualidade da água e de indicadores do grau de degradação do corpo hídrico;
2. Monitoramento da qualidade da água usando dados de sensoriamento remoto;
3. Distribuição espacial de informação de qualidade da água em relação ao ecossistema aquático e mudanças ambientais;

Trabalho realizado na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) - Recife (PE), Brasil.

<sup>1</sup>Professora Doutora do Departamento de Engenharia Civil, UFPE - Recife (PE), Brasil.

<sup>2</sup>Professor Doutora do Departamento de Engenharia Ambiental (TU-Berlim) - Berlim (Alemanha), Brasil.

<sup>3</sup>Professora Doutora do Departamento de Engenharia Cartográfica, UFPE - Recife (PE), Brasil.

<sup>4</sup>Pós-doutorando, Doutor em Engenharia Civil, UFPE - Recife (PE), Brasil.

**Endereço para correspondência:** Maria do Carmo Sobral - Avenida Acadêmico Hélio Ramos, s/n - Cidade Universitária - 50740-530 - Recife (PE), Brasil - E-mail: msobral@ufpe.br

**Recebido:** 06/02/13 - **Aceito:** 11/02/15 - **Reg. ABES:** 111066

4. Ligação alfanumérica entre monitoramento da qualidade da água e políticas de recursos hídricos;
5. Avaliação completa de monitoramento da qualidade da água usando sensoriamento remoto na diretiva dos recursos hídricos.

Os resultados de monitoramento da qualidade da água, usando sensoriamento remoto, mostram a situação atual do ambiente aquático, que pode ser comparado com medições futuras e possíveis problemas na superfície da água. Portanto, identificam-se como estão as condições ou os indicadores de qualidade da água confrontando-os com os valores críticos estabelecidos na política de recursos hídricos.

Observa-se que o sensoriamento remoto oferece diversas técnicas de se monitorar recursos hídricos em diferentes áreas e escala de tempo (GODDIJN-MURPHY *et al.*, 2009). Além disso, existe uma variabilidade de parâmetros a serem monitorados por sensoriamento remoto, tais como: transparência secchi (KLOIBER *et al.*, 2002), clorofila-a (CHEN *et al.*, 2011; GITELSON *et al.*, 2008; KLOIBER *et al.*, 2002; ZHANG *et al.*, 2011), carbono orgânico particulado (HADJIMITSIS & CLAYTON, 2011), sólidos suspensos total (ARTIGAS *et al.*, 2008; WANG *et al.*, 2006), turbidez (WANG *et al.*, 2006), entre outros.

O uso do sensoriamento remoto na gestão de reservatórios é baseado no fato de que consequências da eutrofização e o aumento da produtividade estão associados com a mudança nas propriedades ópticas da massa hídrica. O aumento da clorofila-a está associado com a diminuição na quantidade relativa de energia da banda azul (0,45–0,52  $\mu\text{m}$ ) e aumento na verde (0,52–0,60  $\mu\text{m}$ ) (FRIESE *et al.*, 2010), e geralmente se utiliza para sua determinação a razão entre os canais 704 e 675 nm (LI *et al.*, 2010). O aumento de sólidos suspensos na água está associado ao aumento de energia refletida e, com isso, o pico de reflectância se moverá na direção de comprimentos de onda maiores (LILLESAND & KIEFER, 1994). Essas mudanças podem ser medidas por técnicas de sensoriamento remoto (NELLS *et al.*, 1998; ONDERKA & PERÁROVÁ, 2008; SONG *et al.*, 2010).

O enriquecimento de nutrientes em lagos e reservatórios é a causa primária de diversas condições indesejáveis, incluindo a proliferação de algas nocivas, mortalidade de peixes e excessivo crescimento de plantas aquáticas. Como consequência, um monitoramento e controle efetivo dessa manifestação de eutrofização tem sido o foco de pesquisadores limnólogos por muitos anos (LAMON III *et al.*, 1996). Clorofila-a é geralmente usada como um indicador de biomassa algal, principalmente devido a sua fácil medição (LAMON III *et al.*, 1996) e sua quantificação é importante para qualidade da água.

Estimativas de concentração de constituintes da água, por sensoriamento remoto, no caso de águas continentais, tem sido um grande desafio. Basicamente, há interações complexas entre fitoplâncton, tripton, matéria orgânica colorida dissolvida e água pura (OYAMA *et al.*, 2009; YANG *et al.*, 2011).

O processo de eutrofização acelerada em águas continentais tem se transformado em problema ambiental significativo em todo o mundo. O manejo sustentável de ecossistemas aquáticos requer o monitoramento constante da qualidade da água. No entanto, a heterogeneidade espacial e temporal de corpos d'água recai, frequentemente, em sistemas inadequados de monitoramento e caracterização da qualidade da água usando métodos de amostragem convencional (LIU *et al.*, 2003). Por conseguinte, a combinação da característica espacial e temporal do sensoriamento remoto e a coleta convencional de água reúnem uma solução potencialmente efetiva para monitorar ecossistemas aquáticos (YANG *et al.*, 2011).

Este trabalho busca aplicar e avaliar um modelo de espacialização da clorofila no reservatório de Itaparica por meio de imagens Landsat, de forma a analisar espacialmente a sua distribuição e ocorrência. Procura-se, também, relacionar o uso e a cobertura do solo como o padrão de comportamento da concentração de clorofila ao longo do reservatório.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

O reservatório de Itaparica localiza-se entre os estados da Bahia e Pernambuco e foi criado com o fechamento da barragem de Itaparica (Luiz Gonzaga) no final da década de 80 do século passado. As águas banham os municípios de Tacaratu, Petrolândia, Floresta, Itacuruba e Belém do rio São Francisco do lado de Pernambuco (Figura 1). Possui uma área normal de 828 km<sup>2</sup>. Sua Usina localiza-se no estado de Pernambuco, 25 km a jusante da cidade de Petrolândia (PE), tendo como coordenadas 38°;19' de Longitude Oeste e 9°;6' de Latitude Sul, com capacidade de gerar 1.48 MW de energia (CHESF, 2010).

### Processamento de dados espaciais

A clorofila-a foi mapeada a partir de imagem do Landsat TM correspondente a órbita/ponto 216/66 de 06 de outubro de 2010 previamente georeferenciada. Essa imagem foi solicitada a partir de um catálogo disponibilizado no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Foi verificada a ocorrência de poucas nuvens sobre o reservatório para a data escolhida. Na posição espacial da imagem onde existiam nuvens, foram substituídos os níveis de cinza existentes por 'zero', gerando assim uma máscara para essas regiões. Com isto, procurou-se a não interferência dos resultados. O georreferenciamento foi executado utilizando o sistema de coordenadas geográficas WGS84 com ajustamento polinomial de primeira ordem. O erro médio quadrático foi da ordem de 0,94 pixels, que corresponde a um erro menor que 30 metros que é a resolução espacial da imagem do Landsat TM referente às bandas do visível e do infravermelho próximo e médio. Como o alvo de

interesse era o reservatório, a imagem georeferenciada foi recortada com este formato melhorando a aplicação do contraste e visualização das diferenças espectrais da água.

Posteriormente, foi realizada a classificação do uso e cobertura do solo no entorno do reservatório, de forma a se localizar as maiores classes com potencial de poluição e também para verificar como é a concentração de clorofila-a existente próxima a essas classes. O critério da escolha das imagens foi usar aquelas que estavam sem nuvens ou com poucas nuvens e que estivessem disponíveis no acervo do INPE para o mês de outubro (que era o mês da coleta dos pontos no reservatório).

O modelo da clorofila-a foi realizado por meio do programa Spring 5.2, utilizando a ferramenta LEGAL, onde se gerou o mapa da distribuição da concentração de clorofila-a no reservatório de Itaparica.

### Algoritmo de espacialização da clorofila-a

Segundo Lim *et al.* (2009), o monitoramento ambiental por meio de métodos tradicionais de amostragem consome muito tempo e requer altos custos de levantamento. Modelos empíricos vêm sendo

desenvolvidos para obter a clorofila-a *in situ* e por meio de propriedades ópticas de imagens de satélites digitais (ARTIGAS *et al.*, 2008; GITELSON *et al.*, 2007; 2008; MA & DAI, 2005; LIM *et al.*, 2009; OKI, 2010).

Neste artigo, foi utilizado e avaliado o modelo determinado por Chen *et al.* (2008), que requer como entrada as bandas TM 1 a 5 e 7 do Landsat. Obteve-se um coeficiente de correlação de 0,82, sendo ajustada para os dados de clorofila-a obtidas no ano de 2005. A Equação 1 apresenta o modelo de Chl-a:

$$\text{Chl-a} = 4,483 + 0,44(B_1) + 0,62(B_2) - 0,82(B_3) - 2,6(B_4) + 2,16(B_5) - 4,7(B_7), \quad (1)$$

onde  $B_1$  to  $B_5$  e  $B_7$  são os canais do Landsat-TM.

### Análise pontual da clorofila-a

Para se verificar o comportamento gráfico da concentração de clorofila-a, foram escolhidos pontos (Figura 2) distribuídos por todo o reservatório considerando a margem direita, central e margem esquerda, bem

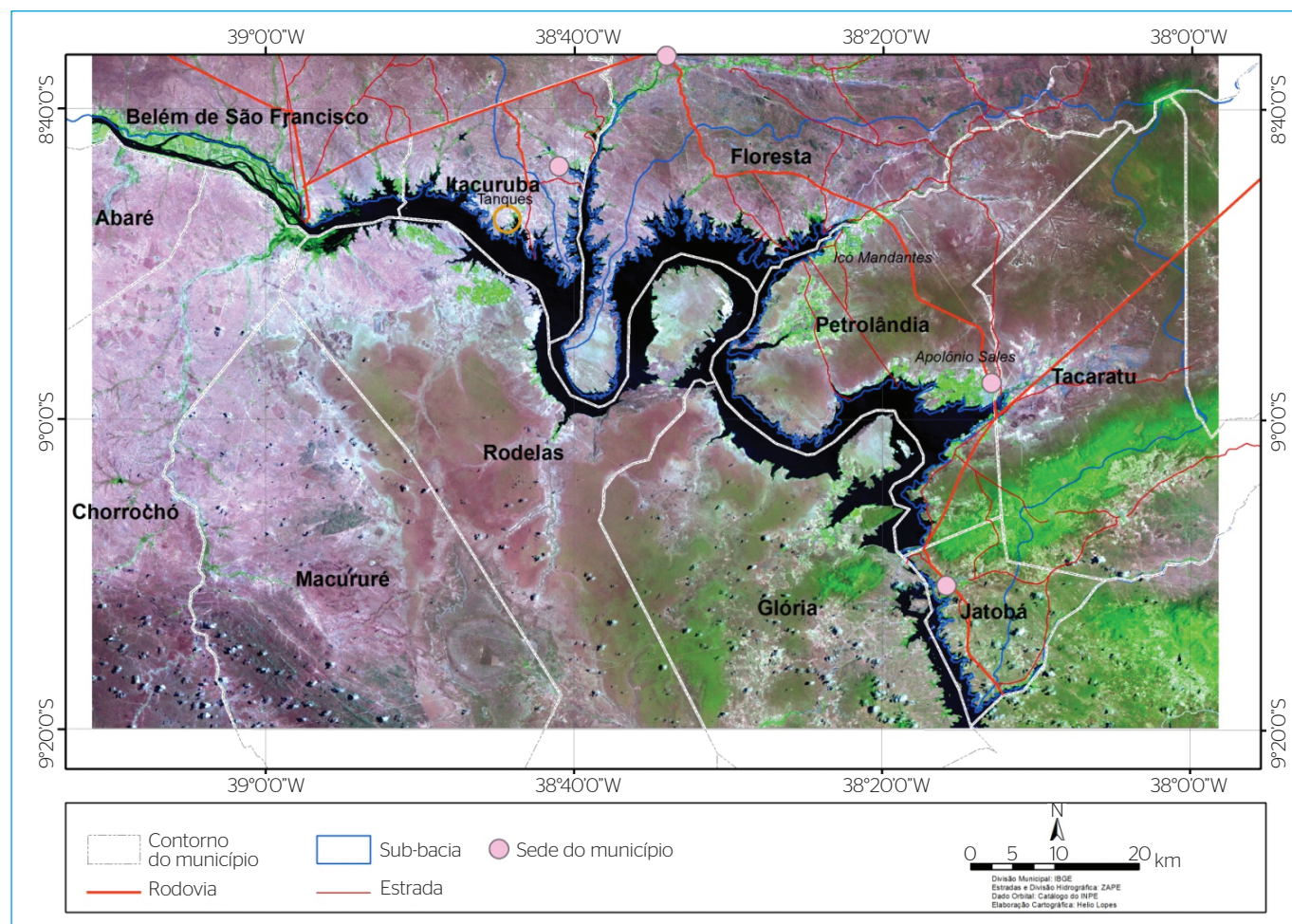


Figura 1 - Características geográficas do reservatório de Itaparica.

como a entrada dos principais riachos, nos quais foram colocados mais pontos para que se tenha uma noção do comportamento da concentração de clorofila-a transversalmente ao reservatório.

A área do reservatório é de 828 km<sup>2</sup> e a área analisada considerando a imagem de 2010 foi de 644,36 km<sup>2</sup>. Além do reservatório não estar na sua capacidade total, foi também considerado um recuo em média de 90 metros de forma a evitar mistura de pixels. Foi realizada uma análise estatística descritiva da concentração de clorofila-a considerando os diferentes trechos do corpo hídrico.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Verificação da clorofila-a utilizando pontos por sensoriamento remoto

Nos pontos selecionados ao longo da margem direita, área central e margem esquerda foram verificados os valores da concentração de clorofila-a na imagem e plotados na Figura 3. O critério dos pontos foi o de abranger as margens direita e esquerda e a parte central do

reservatório. A localização espacial destes pontos se encontra representados na Figura 2.

Observa-se, na Figura 3, o perfil dos pontos de monitoramento por satélite da concentração de clorofila-a ao longo do reservatório para a data 6 de outubro de 2012. Como resultado, obteve-se que o nível de concentração da clorofila-a tem um pequeno aumento da área fluvial para lacustre. É verificado também que os pontos localizados nas entradas de riachos apresentam aumento na concentração de clorofila-a na direção do afluente. Para os pontos localizados na região fluvial ocorreram valores entre 1,0 e 18,4 µg.L<sup>-1</sup>, enquanto que, para região de transição, os valores variaram de 3,4 a 36,0 µg.L<sup>-1</sup>. Já para zona lacustre, a concentração de clorofila-a foi de 2,4 a 52,1 µg.L<sup>-1</sup>. Essa variação entre as regiões limnológicas pode indicar a dinâmica e complexidade do reservatório por ter diversos afluentes e com bastantes curvas. Na Figura 3, é apresentado o limite estabelecido na Resolução CONAMA nº 357/2005, que é de 30 µg.L<sup>-1</sup> para Chl-a para águas de Classe II. Observa-se que na margem direita ocorreram dois pontos onde o resultado está acima do valor recomendado.

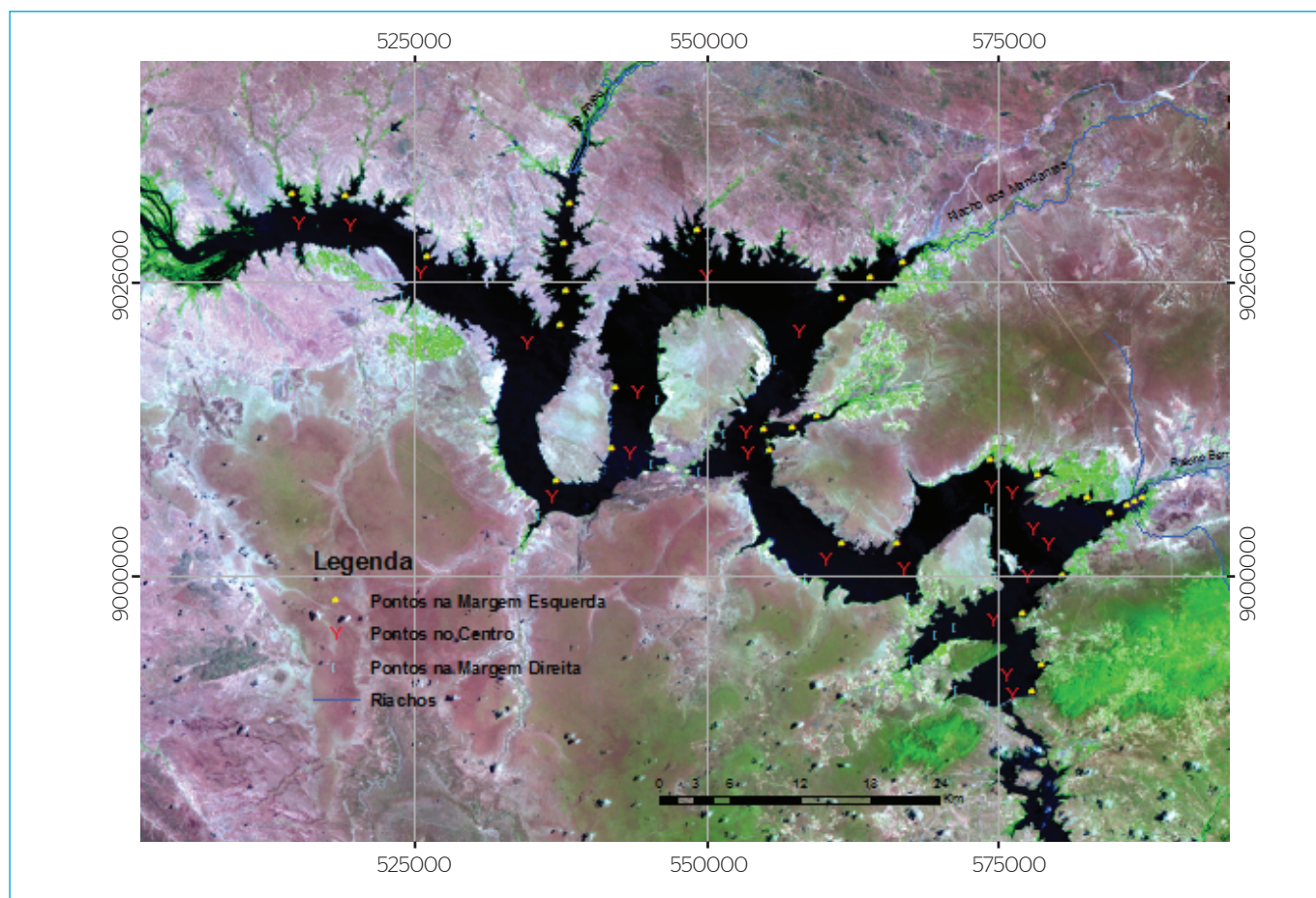


Figura 2 - Localização dos pontos de monitoramento por sensoriamento remoto.

## Mapeamento da clorofila-a

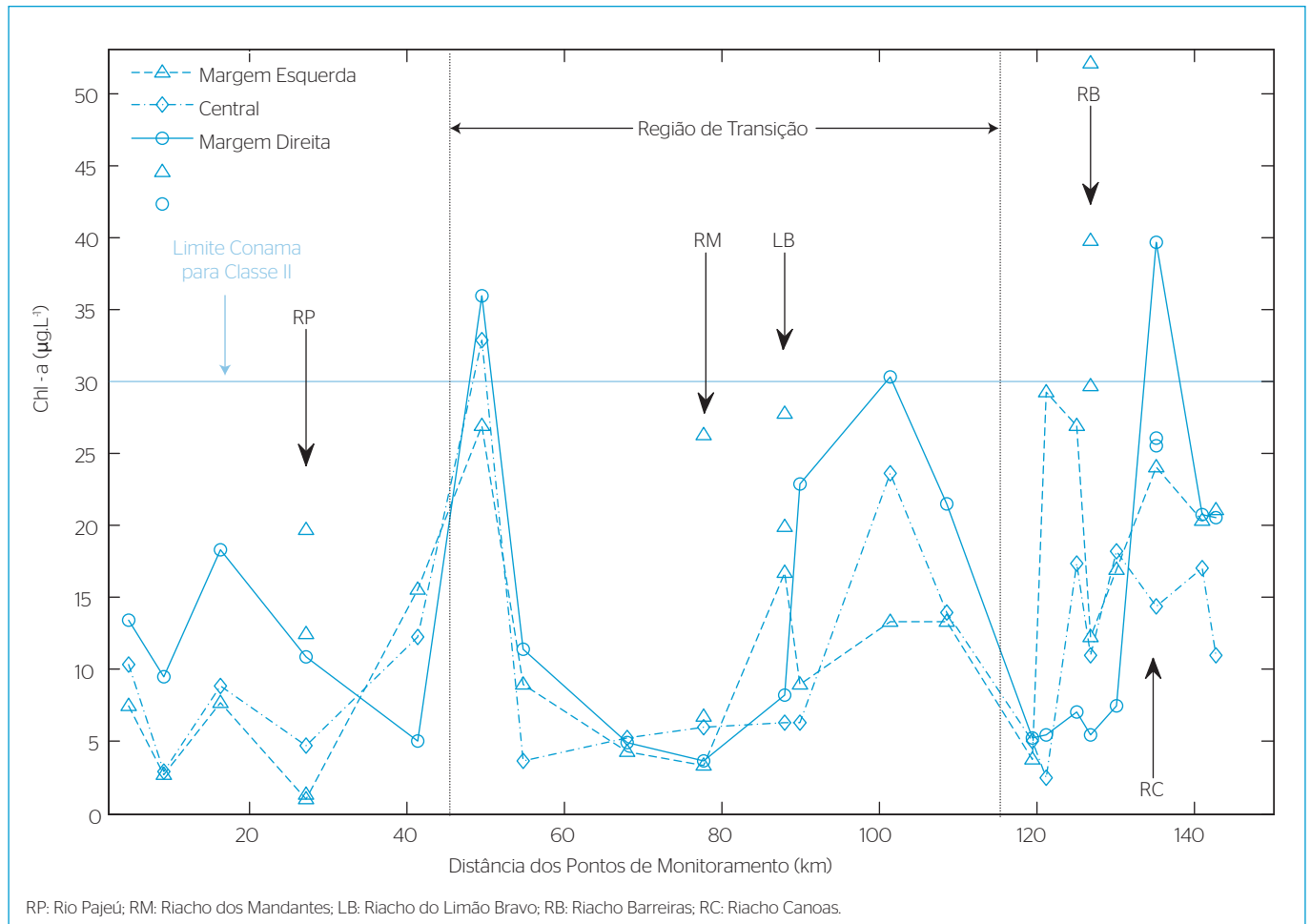
Chen *et al.* (2011) estimaram a distribuição da concentração de clorofila-a em corpo hídrico baseado em dados do Landsat-TM, indicando alta concentração de clorofila-a na região oeste, norte e central do Lago Taihu, na China, e baixa na região sul. Le *et al.* (2009) aplicaram um algoritmo baseado em três e quatro bandas para detectar concentração de clorofila-a no Lago Taihu. Chen *et al.* (2011) utilizaram a razão de bandas do Landsat-TM (2 e 3), bem como relações angulares e altura do espectro considerando as três bandas do visível, para estimar a clorofila-a.

Conforme indicado no mapa de distribuição espacial da clorofila-a no reservatório de Itaparica (Figura 4), foram estabelecidos pontos ao longo da margem direita (ME), da linha central (CT) e da margem esquerda (ME).

Nos perfis de clorofila-a da Figura 3, observa-se que parte dos pontos localizados na região central do reservatório está abaixo do valor de concentração de clorofila-a em relação aos pontos localizado nas margens, considerando o perfil transversal. Como visto no mapa de clorofila-a (Figura 4), os pontos foram distribuídos transversalmente ao

reservatório. O único ponto central em que o valor da clorofila-a está acima dos pontos localizados nas margens foi o localizado no quilometro 130,1, considerando o perfil transversal. Os pontos nas entradas de riachos estão indicados por setas o Rio Pajeú, o Riacho dos Mandantes, o Riacho do Limão Bravo e o Riacho Barreiras, localizados na margem esquerda do reservatório, enquanto para a margem direita há o riacho Canoas (Figura 3). Após o rio Pajeú a concentração de clorofila-a aumenta, depois decresce até chegar no Riacho dos Mandantes e, a partir desse ponto, volta a aumentar o valor da concentração de clorofila-a até o km 101,4. Na margem esquerda com influência do riacho Barreiras, os valores dos pontos de monitoramento são elevados, alcançando o valor de 52,1  $\mu\text{g.L}^{-1}$ .

Com o modelo da clorofila-a por meio da Equação 1 e do programa Spring 5.2, utilizando a ferramenta LEGAL, gerou-se o mapa da distribuição da concentração de clorofila-a no reservatório de Itaparica (Figura 4). Na Figura 4, estão indicados os pontos em que foram verificados os valores de clorofila-a. Foram colocados pontos ao longo da margem direita (Bahia), no centro do reservatório e ao longo da margem esquerda (Pernambuco).



**Figura 3** - Perfil dos pontos de monitoramento por satélite da concentração de clorofila-a ao longo do reservatório em 6 de outubro de 2012.

## Estatística descritiva e validação

A maior área do reservatório está na classe entre 0 e 5  $\mu\text{g.L}^{-1}$  e entre 5 e 10  $\mu\text{g.L}^{-1}$ , conforme visto na Tabela 1, que mostra as áreas de cada classe, bem como as estatísticas descritivas.

O valor mínimo da concentração de clorofila-a para todo o corpo hídrico foi de 0,003  $\mu\text{g.L}^{-1}$  e o máximo de 249,5  $\mu\text{g.L}^{-1}$ . Essas altas concentrações de clorofila-a pode estar associada à vegetação aquática emersa e submersa que ocorrem no reservatório. Esse valor está contido na segunda menor classe que representa menos de 1% do reservatório (Tabela 1). O cômputo da estatística descritiva geral mostra que o valor médio da clorofila-a foi de 11,6  $\mu\text{g.L}^{-1}$ , sendo a mediana de 9,6  $\mu\text{g.L}^{-1}$ , a moda apresentou valor de 13,9  $\mu\text{g.L}^{-1}$  e o valor do desvio padrão foi de 11,2  $\mu\text{g.L}^{-1}$ . Para se ter uma noção da quantidade e distribuição da clorofila-a, foi gerado um histograma para todo o reservatório (Figura 5) considerando as classes acima especificadas no mapa de clorofila-a.

O histograma foi gerado com base nas sete classes e em cada barra do histograma está marcado o ponto central de cada classe de concentração de clorofila-a. Observa-se que a classe que contém a maior

quantidade de pixels foi a classe de 0–5  $\mu\text{g.L}^{-1}$ , sendo, assim, parte do reservatório está abaixo do limite estabelecido na Resolução CONAMA nº 357/2005, que é de 30  $\mu\text{g.L}^{-1}$  para águas Classe II. Ao somarem-se as cinco primeiras classes, que estão abaixo deste limite, corresponde a 96,64%, e o restante está compreendido nas classes entre 30 e 249  $\mu\text{g.L}^{-1}$ . Na análise realizada por Melo (2007) utilizando coletas de amostras no reservatório, foram encontrados valores entre 0,40 e 62,0  $\mu\text{g.L}^{-1}$  para os anos de 2004 e 2005.

Para validação da modelagem definida neste artigo, foram utilizados 10 pontos limnológicos (CHESF, 2004) e uma imagem Landsat-TM5 de abril de 2004. O gráfico de dispersão dos pontos estimados *versus* os observados é apresentado na Figura 6, juntamente com a linha ajustada, em que apresentou o R2 de 0,38. Esse valor baixo do coeficiente de determinação pode estar relacionado a não sincronia do levantamento limnológico com a hora e dia de passagem do sensor.

Os valores altos da concentração de clorofila-a estimada (Figura 6) podem estar associados com a alta turbidez da água verificada no mês de abril devido à ocorrência de precipitação intensa vista nessa época.

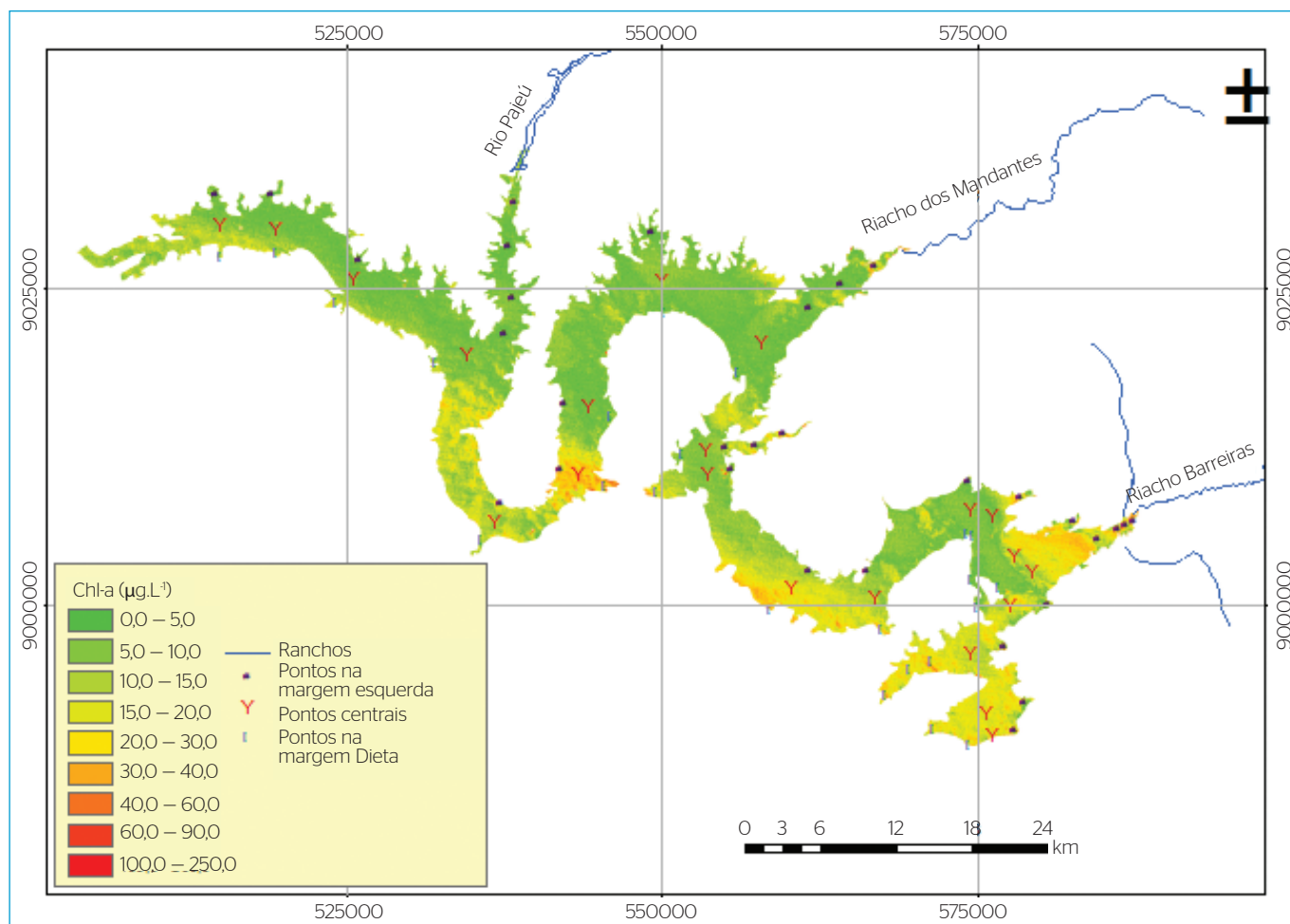
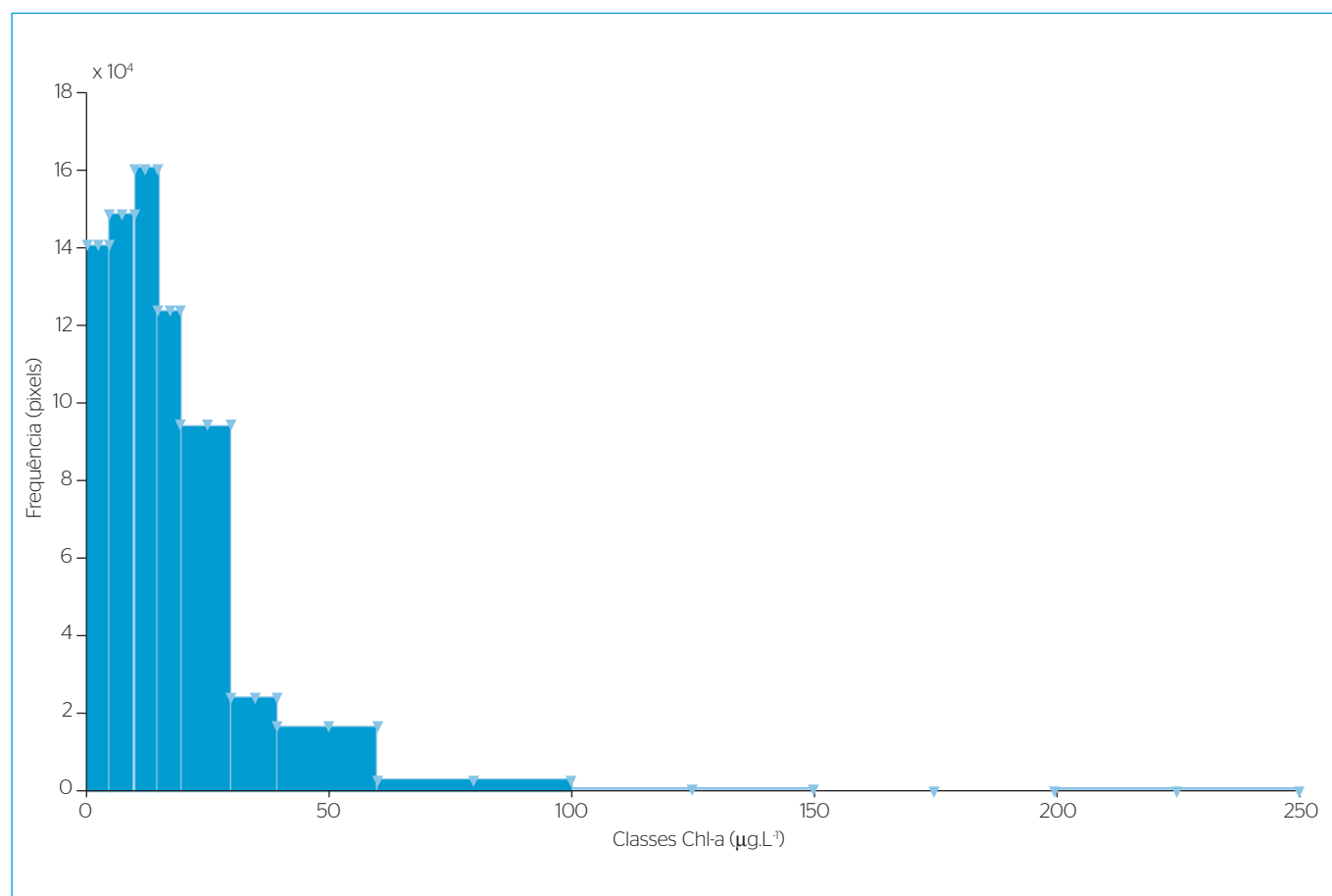


Figura 4 - Distribuição da concentração de Chl-a ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) em 6 de outubro de 2010.

**Tabela 1** - Áreas e estatística da concentração de clorofila-a conforme as classes da Figura 4.

Classe	Áreas		Estatísticas ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )					
	km <sup>2</sup>	%	Min	Max	Méd	Med	Desv	Mod
]0-5]	176,73	27,43	0,003	4,99	2,48	2,47	1,44	4,97
]5-10]	158,25	24,56	5,003	9,99	7,41	7,37	1,43	5,21
]10-15]	121,64	18,88	10,003	14,99	12,37	12,30	1,44	13,91
]15-20]	85,17	13,22	15,003	19,99	17,34	17,27	1,43	17,33
]20-30]	80,89	12,55	20,003	29,99	23,99	23,55	2,75	20,31
]30-40]	16,51	2,56	30,017	39,99	33,41	32,85	2,58	30,15
]40-60]	2,97	0,46	40,017	59,99	46,03	44,51	5,13	40,13
]60-100]	0,94	0,14	60,02	99,92	76,86	75,16	11,49	66,28
]100-150]	0,62	0,10	100,12	149,92	124,23	124,26	13,99	146,36
]150-200]	0,37	0,06	150,06	199,99	173,93	172,84	15,05	160,62
]200-250]	0,27	0,04	200,06	249,53	221,74	219,88	13,47	202,76
	644,36							

**Figura 5** - Histograma de distribuição da concentração da Chl-a em 06 de outubro de 2010.

Assim, com a ocorrência de alta turbidez na água, pode ser observado que a estimativa da concentração de clorofila-a (baixos valores) apresenta bastante ruído quando determinada por imagens orbitais. Novos estudos são necessários para comprovar essa observação incluindo também a coleta de dados em sincronia com a órbita do satélite. No trabalho de Martini *et al.* (2006), mesmo com a diferença de uma semana, o coeficiente de determinação entre os dados observados e calculado foi de 0,96, que pode estar relacionada à pouca variação temporal. Nos próximos trabalhos, também se sugere a inclusão de máscaras de turbidez para melhor predição da concentração de clorofila-a.

### Relações com o uso e cobertura do solo

Em sistemas hídricos, a produtividade primária tem relação direta com o aporte de nutrientes provindos de ecossistemas terrestres (MARTINI *et al.*, 2006). Assim, após o mapeamento da clorofila-a, realizou-se a classificação do uso e cobertura do solo (UCS) no entorno do corpo hídrico, considerando uma área de abrangência direta de entrada de emissões de 3 km a partir da margem do reservatório. Na Figura 7 é esboçado o mapa de UCS.

Grande parte da margem do reservatório se encontra com caatinga secundária, principalmente do final da região lacustre até a

região fluvial. Existe a ocorrência de agricultura irrigada na margem esquerda do Riacho dos Mandantes e na margem direita do riacho Barreiras próximo a cidade de Petrolândia, os quais deságuam na margem esquerda do reservatório, no estado de Pernambuco (Figura 7). No Riacho Barreiras, pode-se observar a ocorrência de solo exposto e erodido responsável pela entrada de sedimento nessa região do reservatório. Maiores detalhes podem ser obtidos no trabalho de Melo (2007). Nessa área do reservatório estão localizados quatro pontos da margem esquerda referentes aos km 125,0 e 126,9, em que o ponto mais externo apresentou a maior concentração de clorofila-a com  $52,1 \mu\text{g.L}^{-1}$ , enquanto que o ponto mais interior apresentou a menor concentração com valor de  $12,3 \mu\text{g.L}^{-1}$  (Figura 3). No entorno do reservatório, próximo a esses pontos, há ocorrência de agricultura irrigada e zona urbana (Petrolândia) que podem contribuir para os altos valores, além de pertencer à zona lacustre do reservatório. Os pontos das amostras situados no km 77,7 (Figura 3), que também apresentam um gradiente de elevação dos valores de clorofila-a ( $3,4, 6,8, 26,3 \mu\text{g.L}^{-1}$ ), estão localizados na entrada do Riacho dos Mandantes, em que na sua margem esquerda há ocorrência de agricultura irrigada, como visto no mapa de uso e cobertura do solo.

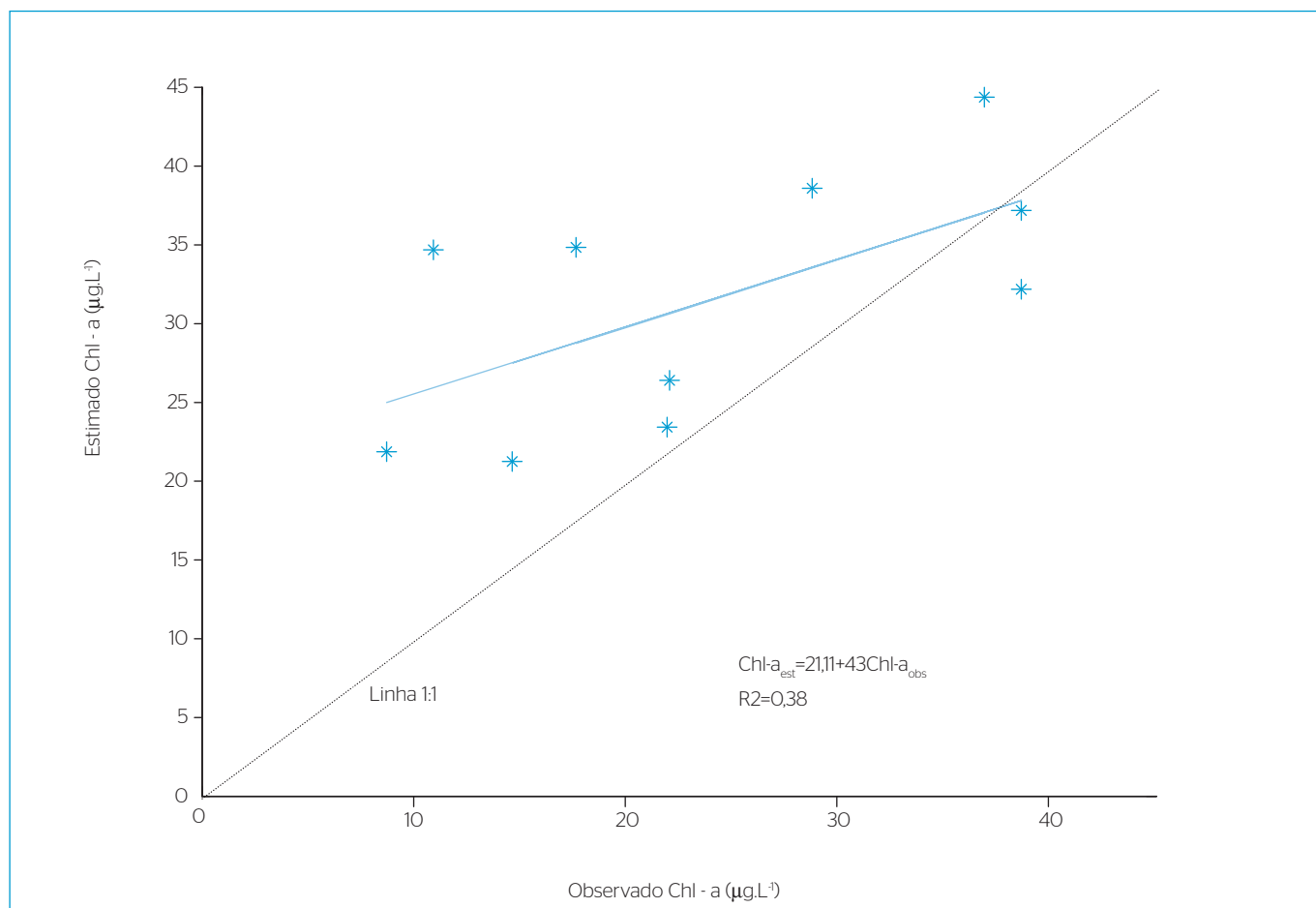


Figura 6 - Gráfico da concentração Chl-a observada versus a estimada pela equação.



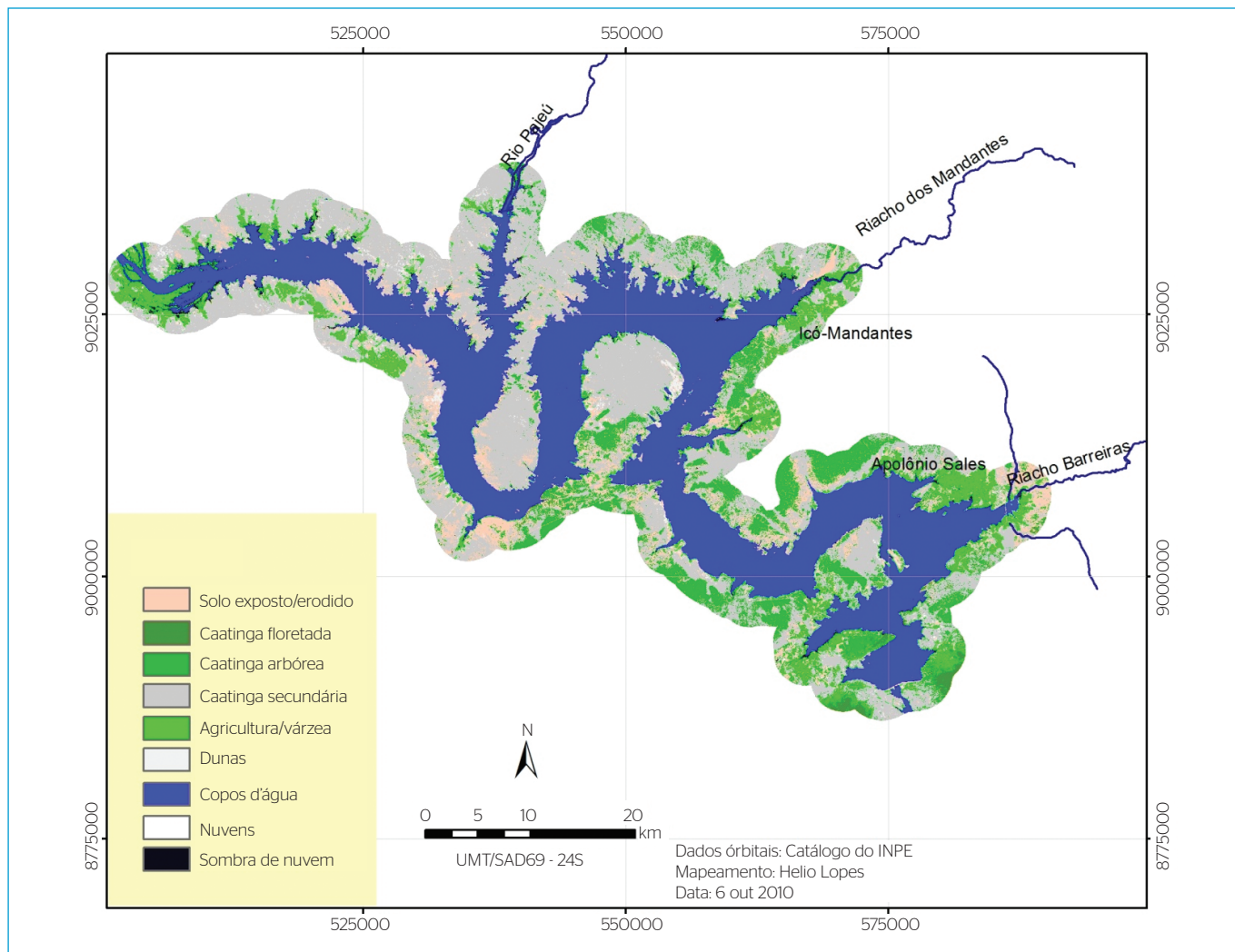


Figura 7 - Mapa de uso e cobertura do solo para as margens do reservatório de Itaparica.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem da distribuição da concentração de clorofila-a em micrograma por litro utilizando imagens de satélite pode auxiliar no monitoramento com características espaciais e não pontuais. Isto pode facilitar na gestão e na tomada de decisão. Devido a resolução espacial este tipo de monitoramento pode ser desenvolvido de forma multitemporal e sendo assim possível visualizar a distribuição da concentração durante um determinado período.

Conforme os resultados obtidos pela modelagem, cerca de 96% do reservatório encontra-se abaixo do limiar estabelecido pela resolução CONAMA 357/2005 para concentração de clorofila-a, considerando a data de passagem do satélite.

A distribuição espacial da clorofila-a seguiu, no geral, o padrão de ocorrência, diminuindo da região lacustre para região fluvial.

Após o contato de riachos com o reservatório se observa aumento na concentração de clorofila-a, que pode está associado à entrada de nutrientes.

Etapas de validação do modelo para o reservatório de Itaparica são necessárias, levando em consideração a resolução temporal do satélite e hora de passagem.

Os pontos localizados na margem esquerda, nos contatos dos Riachos dos Mandantes e Barreiras, apresentam as maiores concentrações de clorofila-a que podem estar associadas ao uso e cobertura do solo que ocorrem nessas margens, além de estarem localizados na zona de maior susceptibilidade do reservatório, que é a lacustre.

## REFERÊNCIAS

ARTIGAS, F.; MARTI, A.; YAO, N.; PECHMANN, I. (2008). Chlorophyll Detection and Mapping of Shallow Water Impoundments Using Image Spectrometry. *Research Letters in Ecology*, p. 1-4.

CHEN, L.; TAN, C.H.; KAO, S.J.; WANG, T.S. (2008) Improvement of remote monitoring on water quality in a subtropical reservoir by incorporating grammatical evolution with parallel genetic algorithms into satellite imagery. *Water Research*, v. 42, p. 296-306

- CHEN, Q.; ZHANG, Y.; HALLIKAINEN, M. (2007) Water quality monitoring using remote sensing in support of the EU water framework directive (WFD): A case study in the Gulf of Finland. *Environment Monitoring Assessment*, v. 124, p.157-166.
- CHEN, S.; FANG, L.; LI, H.; CHEN, W.; HUANG, W. (2011) Evaluation of a three-band model for estimating chlorophyll-a concentration in tidal reaches of the Pearl River Estuary, China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 66, p. 356-364.
- CHESF - Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (2004). Programa de Monitoramento Limnológico e Avaliação da Qualidade da Água do Reservatório de Itaparica. Recife: PETCON.
- CHESF - Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (2010). Inventário dos Ecossistemas Aquáticos do Baixo São Francisco. Reservatório de Itaparica, 2º. Relatório Anual, Dezembro/2008 a Novembro/2009.
- FRIESE, M.; MIGDALL, S.; BACH, H.; KRÄTZ, D.; BORCHARDT, D.; HANK, T.; MAUSER, W. (2010) Water quality assessment using hyperspectral techniques for the river main and its riparian water. *Proc. Hyperspectral 2010 Workshop* (ESA SP-683, May 2010), Frascati, Italy, 17-19 March 2010. Disponível em: [http://earth.esa.int/workshops/hyperspectral\\_2010/papers/s4\\_1frieze.pdf](http://earth.esa.int/workshops/hyperspectral_2010/papers/s4_1frieze.pdf) Acessado em: 04 nov 2011.
- GITELSON, A.A.; SCHALLES, J.F.; HLADIK, C.M. (2007) Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake Bay case study. *Remote Sensing of Environment* v. 109, p. 464-472.
- GITELSON, A.A.; DALL'OLMO, G.; MOSES, W.; RUNDQUIST, D.C.; BARROW, T.; FISHER, T.R.; GURLIN, D.; HOLZ, J. (2008) A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, p. 3582-3593.
- GODDIJN-MURPHY, L.; DAILLOUX, D.; WHITE, M.; BOWERS, D. (2009) Fundamentals of in Situ Digital Camera Methodology for Water Quality Monitoring of Coast and Ocean. *Sensors*, v. 9, p. 5825-5843.
- HADJIMITSIS, D.G. & CLAYTON, C. (2011) Field Spectroscopy for Assisting Water Quality Monitoring and Assessment in Water Treatment Reservoirs Using Atmospheric Corrected Satellite Remotely Sensed Imagery. *Remote Sensing*, v. 3, p. 362-377.
- KLOIBER, S. M.; BREZONIK, P.L.; BAUER, M.E. (2002) Application of Landsat imagery to regional-scale assessments of lake clarity. *Water Research*, v. 36, p. 4330-4340.
- LAMON III, E.C.; RECKHOW, K.H.; HAVENS, K. E. (1996) Using generalized additive models for prediction of chlorophyll a in Lake Okeechobee, Florida. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, v.2, p. 37-46.
- LE, C.F.; LI, Y.M.; ZHA, Y.; SUN, D.Y.; HUANG, C.C.; LU, H. (2009) A Four-Band Semi-Analytical Model for Estimating Chlorophyll-a in Highly Turbid Lakes: The Case of Taihu Lake, China. *Remote Sensing of Environment*, v. 113, n. 6, p. 1175-1182.
- LI, L.; SENGPIEL, R.E.; PASCUAL, D.L.; TEDESCO, L.P.; WILSON, J.S.; SOYEUX, E. (2010) Using hyperspectral remote sensing to estimate chlorophyll-a and phycocyanin in a mesotrophic reservoir. *International Journal of Remote Sensing*, v. 31, n. 15, p. 4147-4162.
- LILLESAND, T.M. & KIEFER, R.W. (1994). *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York: John Wiley & Sons, 3rd ed., U.S.A, 750 p.
- LIM, H.C.; BABU, S.; CHASE, J.S.; PAREKH, S.S. (2009) Automated control in cloud computing: challenges and opportunities. In *Proceedings of the 1st workshop on Automated control for datacenters and clouds*, ACDC '09, New York, NY, USA. ACM, p. 13-18.
- LIU, Y.; ISLAM, M.A.; GAO, J. (2003) Quantification of shallow water quality parameters by means of remote sensing. *Progress in Physical Geography*, v. 27, p. 24-43.
- MA, R. & DAI, J. (2005). Investigation of chlorophyll-a and total suspended matter concentrations using Landsat ETM and field spectral measurement in Taihu Lake, China. *International Journal of Remote Sensing*, v. 26, n. 13, p. 2779-2795.
- MARTINI, L.C.P.; MATTOS, D.S.; BARBOSA, D.F.P.; RECH, A.I.B. (2006) Uso de sensoriamento remoto orbital para avaliação da distribuição espacial de Clorofila\_a na Lagoa da Conceição - Florianópolis, SC. *Engenharia Sanitária e ambiental*, v.11, n. 4, p. 318-324.
- MELO, G.L. (2007) *Estudo da qualidade da água no reservatório de Itaparica localizado na Bacia do Rio São Francisco*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife (PE).
- NELLIS, M.D.; HARRINGTON JR., J.A.; WU, J. (1998) Remote sensing of temporal and spatial variations in pool size, suspended sediment, turbidity, and Secchi depth in Tuttle Creek Reservoir, Kansas: 1993. *Geomorphology*, v. 21, p. 281-293.
- OKI, K. (2010) Why is the Ratio of Reflectivity Effective for Chlorophyll Estimation in the Lake Water? *Remote Sens*, v. 2, p. 1722-1730.
- ONDERKA, M. & PEKÁROVÁ, P. (2008) Retrieval of suspended particulate matter concentrations in the Danube River from Landsat ETM data. *Science of The Total Environment*, v. 397, p. 238-243.
- OYAMA, Y.; MATSUSHITA, B.; FUKUSHIMA, T.; MATSUSHIGE, K.; IMAI, A. (2009) Application of spectral decomposition algorithm for mapping water quality in a turbid lake (Lake Kasumigaura, Japan) from Landsat TM data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 64, p. 73-85.
- SONG, K.; DONGMEI, L.; LIU, D.; WANG, Z.; LI, L.; ZHANG, B.; WANG, Y. (2010) Retrieval of total suspended matter (TSM) using remotely sensed images in Shitoukoumen reservoir, northeast china, *IEEE*, p. 405-408.
- WANG, F.; HAN, L.; KUNG, H.T.; VAN ARSDALE, R.B. (2006) Applications of Landsat-5 TM imagery in assessing and mapping water quality in Reelfoot Lake, Tennessee. *International Journal of Remote Sensing*, v. 27, n. 23, p. 5269-5283.
- YANG, W.; MATSUSHITA, B.; CHEN, J.; FUKUSHIMA, T. (2011) Estimating constituent concentrations in case II waters from MERIS satellite data by semi-analytical model optimizing and look-up tables. *Remote Sensing of Environment*, v. 115, p. 1247-1259.
- ZHANG, Y.; LIN, S.; QIAN, X.; WANG, Q.; QIAN, Y.; LIU, J.; GE, Y. (2011) Temporal and spatial variability of chlorophyll a concentration in Lake Taihu using MODIS time-series data. *Hydrobiologia* v. 661, p. 235-250.