

# Índice de criticalidade da qualidade da água em lagos e reservatórios: Uma proposta de metodologia baseada em variáveis estáticas e dinâmicas

Arcilan Trevenzoli Assireu<sup>1,2</sup>  
Ramon Morais de Freitas<sup>1</sup>  
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo<sup>1</sup>  
Felipe Siqueira Pacheco<sup>2</sup>  
Fábio Roland da Silva<sup>2</sup>  
José Luiz Stech<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{arcilan, ramon, evlyn, stech}@dsr.inpe.br

<sup>2</sup>Universidade Federal de Juiz de Fora LEA/UFJF  
CAMPUS Universitário – Bairro Martelos – 36036-900 - Juiz de Fora - MG, Brasil  
fabio.roland@edu.ufjf.br  
felipeufjf@yahoo.com.br

**Abstract.** The lakes and reservoirs morphometry as surface shape, surface area, underwater form, depth, and the irregularity of their shoreline have a major impact on turbulence, water stratification, sedimentation and resuspension, and the extent of littoral-zone wetlands that determine lake and reservoir functioning. The degree of irregularity is most frequently estimated from the shoreline development factor that reflects the extent to which the measured shore length is greater than the length of the circumference of a circle of an area equal to that of the lake. As indicated by Assireu et al. (2004), this index is not able to detect high-resolution geomorphologic features. In this work we present a dynamical morphometric index, based on recognition pattern techniques, which enable us to identify, for each wind direction, what are the reservoir regions not subject to wind-induced turbulence.

**Palavras chaves:** morphometry, hydroelectric reservoir, environment impacts, morfometria, reservatório hidrelétrico, índice identificador de regiões críticas, impactos ambientais.

## 1. Introdução

As bacias de drenagem se diferenciam em função dos padrões de drenagem (Christofolletti, 1986), os quais são influenciados pela: natureza das rochas (disposição e resistência das diferentes litologias), declividade, amplitude altimétrica, história geológica e geomorfológica local. Como consequência dessa complexidade das bacias, o represamento de um rio pode resultar em lagos de formas e complexidade variáveis em diversas escalas.

As diferentes características morfométricas do entorno do reservatório promovem variabilidades espaciais nas características do lago. Nas regiões do reservatório com maior complexidade de entorno e com maiores reentrâncias, os corpos d'água estariam, por exemplo, mais abrigados dos efeitos do vento, o que resultaria em tempo de residência mais longo. Neste tipo de entorno, é de se esperar uma maior interação entre o ambiente terrestre e o lacustre, já que as águas costeiras estão mais expostas ao ambiente terrestre. Estes fatores têm implicações para os aspectos limnológicos do lago e implicações sociais, visto que vários fatores, como ciclagem de nutrientes, regimes de mistura, produtividade primária etc, podem alterar a qualidade da água nessas regiões, fazendo com que a população ribeirinha que utilizam da água para abastecimento fique mais exposta a propagação de doenças.

As características topográficas e altimétricas controlam o potencial hidrelétrico de uma dada bacia hidrográfica (Müller, 1996). O rio Amazonas e todos os seus afluentes possuem uma vazão média anual de 250 mil m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> e um potencial hidrelétrico de 54 x 10<sup>6</sup> kW ano<sup>-1</sup>. O rio Paraná, em Itaipu, tem uma vazão em torno de apenas 9mil m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (27 vezes menor) com

um potencial hidrelétrico de cerca de  $30 \times 10^6$  kW ano<sup>-1</sup> (1,8 vezes menor). Essa variabilidade regional faz com que o impacto ambiental dos diferentes reservatórios hidrelétricos varie amplamente. Recentemente, uma série de índices tem sido proposta para avaliar o impacto ambiental de uma barragem. Dentre esses índices, um dos mais utilizados é a relação potência/área inundada.

Um dos parâmetros mais utilizados em Limnologia para descrever a morfometria dos corpos d'água é o índice D, de desenvolvimento das margens (Wetzel, 1975). Esse índice representa a razão entre o perímetro do corpo d'água (L) em relação ao comprimento da circunferência de um círculo com área equivalente à do corpo d'água. Reservatórios circulares tendem a ter valores próximos a 1, enquanto que os alongados, ou com padrão dendrítico tendem a ter valores que se distanciam de 1. Quanto maior o índice de desenvolvimento das margens, maior é a probabilidade de desenvolvimento de comunidades aquáticas e de interferência da bacia de captação próximas do corpo d'água.

Os valores de D, entretanto, são descritores muito simplificados da complexidade dos padrões espaciais dos reservatórios; complexidade essa derivada da interação entre o projeto de engenharia adotado (altura entre a fundação e crista, comprimento de crista, volume) e as características topográficas das bacias hidrográficas em que eles se inserem.

Como consequência dessa ampla possibilidade de variabilidades, o represamento de um rio pode resultar em lagos de formas e complexidade variáveis em diversas escalas. Essa complexidade, teoricamente, pode ser traduzida em termos numéricos através de índices derivados de métodos de análise de padrões de gradientes (Gradient Pattern Analysis) introduzidos por Rosa et al. (1998) e adaptados para controles geomorfológicos em reservatórios por Assireu et al. (2004).

Alguns trabalhos objetivaram estudar as implicações da morfometria do entorno de lagos sobre as características destes. Kowalik & Murty (1993) mostraram, através de modelagem aplicada à circulação em lagos, que as soluções do modelo são significativamente diferentes quando se considera um padrão de entorno suave ou fragmentado (com "braços"). Assireu et al. (2004) indicam haver relação entre a produção primária e o grau de fragmentação do entorno do corpo d'água. Os autores especularam que a existência de interfaces complexas (com grandes zonas litorâneas), com aporte de sedimentos através de inúmeros canais marginais tem um maior impacto sobre o funcionamento do sistema aquático, do que teria um entorno suave. As extensas zonas litorâneas passariam a sustentar comunidades de plantas aquáticas, as quais podem competir ativamente com o fitoplâncton pelos nutrientes e luz disponível para a fotossíntese.

As técnicas de reconhecimento de padrão, sobre as quais se baseiam os métodos de quantificação da complexidade morfométrica, são estáticos no sentido de que não levam em conta a forçante atuante sobre o sistema. Tendo em vista que o entorno influencia nas características físico-químicas do lago, o presente trabalho tem por objetivo propor uma técnica que permite mapear o grau de complexidade morfométrica local do entorno do reservatório levando em conta a morfometria, a altimetria e a forçante vento. Com isto é possível verificar, segundo um padrão quantificado, quais as regiões do lago apresentam peculiaridades importantes quanto ao padrão morfométrico para um determinado cenário de vento, o que significa que o índice proposto aqui será um índice dinâmico.

## **2. Métodos**

Nesta seção serão apresentadas as descrições de alguns métodos que serão utilizados neste trabalho.

## **2.1. Quantificação da complexidade do entorno**

O Operador de Fragmentação Assimétrica (FA) é uma técnica eficiente para caracterizar padrões de variabilidade espacial e faz parte do método de análise de padrões dos campos gradientes (Gradient Pattern Analysis – GPA, introduzido por Rosa et al. (1998)). O pressuposto adotado no desenvolvimento do GPA é o de que a complexidade de um padrão espacial é caracterizada pela sua falta de simetria e pelo seu grau de fragmentação. Este operador FA propicia uma investigação da complexidade contida em uma série espaço-temporal. Por não se basear em propriedades estatísticas da série, mas somente nas propriedades locais das simetrias do padrão gradiente, o método apresenta a importante propriedade de ser menos dependente do comprimento da série, quando comparado às técnicas estatísticas convencionais. Isto abre a possibilidade ao método de localizar, ao longo do entorno, quais são as regiões com maior complexidade morfométrica. Maiores detalhes podem ser obtidos em Rosa et al. (1999) e Assireu et al. (2002), e Assireu et al. (2004).

## **2.2. Dados de altimetria**

Após o cálculo da complexidade 2-D do entorno, torna-se necessário a caracterização topográfica ao redor do entorno. Nesse contexto, a utilização de dados Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) (Rabus, 2003) será utilizado para analisar a topografia no entorno do reservatório. O modelo digital de elevação gerado a partir de dados SRTM será utilizado para elaboração de modelo geométrico que será utilizado em simulações da interação da direção e intensidade do vento com a superfície do reservatório.

## **2.3. Determinando a extensão da “sombra” do vento**

Para que seja devidamente conhecida a influência que as elevações têm sobre o regime de ventos e como isto repercute no reservatório é fundamental o conhecimento da relação altura do obstáculo, intensidade e direção do vento e extensão da sombra (área que fica abrigada da ação do vento). Resultados de modelos numéricos como Bullard et al. (2000) mostram que a presença de elevações influencia na direção do vento que tende a ficar alinhado com a direção do vale (região entre montanhas). As modificações no sistema de vento devido a influência de montanhas, vales e escarpas é amplamente reconhecida (ex. Finningan et al., 1990). Estas modificações têm implicações para a compreensão de padrões meteorológicos locais (Weber & Kaufmann, 1998) e para a dispersão de poluentes (Beniston et al, 1989). Neste trabalho serão utilizados modelos baseados em dinâmica de fluidos geofísicos para encontrar a relação entre intensidade e direção do vento e altura do obstáculo (montanhas e etc.) com a extensão da “sombra” do vento. Tais simulações utilizarão métodos de dinâmica dos fluidos computacional e o modelo geométrico de elevação obtidos dos dados SRTM, conforme descrito em Garcia e Boulanger (2006). A partir dos dados simulados, será parametrizado um índice que considere a intensidade e direção do vento com a altimetria e a complexidade do entorno.

## **2.4. Validação dos Resultados**

No processo de validação dos resultados serão utilizadas imagens de RADAR de abertura sintética para o cálculo do campo de vento da superfície do reservatório (Du et al, 2002), bem como dados de campo para validação da metodologia.

## **3. Resultados esperados**

A discussão que segue tem como propósito apresentar e ilustrar a efetividade do método aqui proposto em indicar as regiões do reservatório protegidas da turbulência induzida pelo vento e, portanto, regiões dinamicamente lânticas. Estas regiões são muito importantes ecologicamente, pois além de serem regiões propícias a propagação de doenças e ao

desenvolvimento de mosquitos, muitos deles transmissores de doenças, são regiões cuja qualidade da água tende a ser degradada. Estas áreas serão referidas como regiões críticas do reservatório (RCR) e o índice proposto aqui será chamado de índice de criticalidade (IC).

Um dos grandes problemas ecológicos dos reservatórios é a inundação da vegetação. A decomposição desta matéria orgânica inundada terá conseqüências importantes para a qualidade da água e inclusive para a contribuição do reservatório enquanto emissor de gases de efeito estufa. Como a área inundada normalmente é muito grande, é inviável a retirada de toda a cobertura vegetal. Assim, a existência de um sistema operacional que consiga identificar as regiões críticas do reservatório antes mesmo do seu enchimento seria muito útil no sentido prognóstico, pois isto orientaria as regiões que se deveriam necessariamente remover as coberturas vegetais. A Figura 1 representa a morfometria do reservatório de Masno e foi construída a partir dos dados do SRTM de fevereiro de 2000 (período que o reservatório ainda não estava totalmente cheio). Assim, tendo-se a quota de operação do reservatório pode-se construir o entorno deste reservatório antes mesmo deste existir.

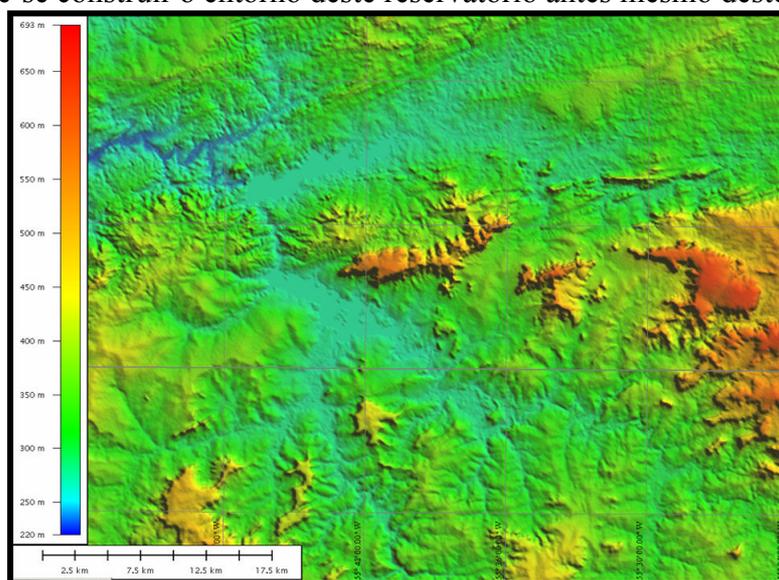


Figura 1. Altimetria da área do reservatório antes do enchimento final a partir dos dados do SRTM (conhecimento do entorno do reservatório antes mesmo dele existir).

A Figura 2 traz a área superficial atual do reservatório. Note que o entorno construído a partir do SRTM traduziu perfeitamente a área do reservatório.

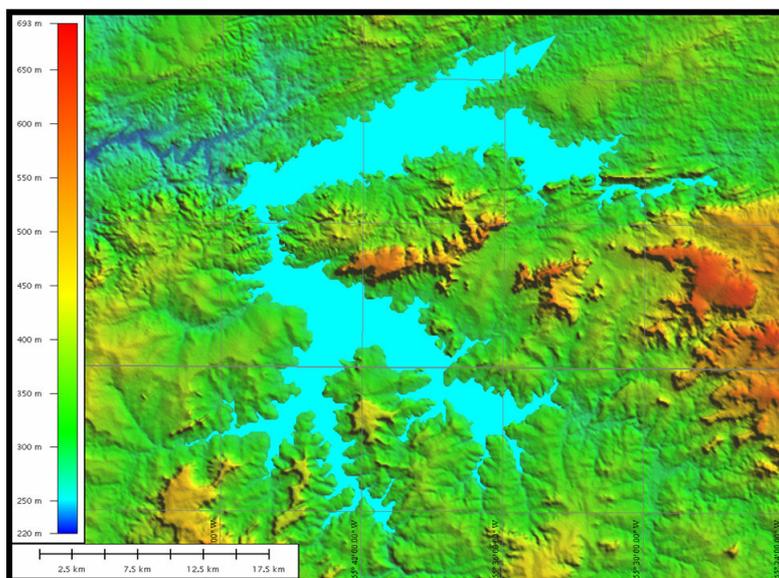


Figura 2. Área superficial do Reservatório de Manso.

A resposta do reservatório ao vento será muito heterogênea devido à morfometria. No canto direito inferior da Figura 3 é mostrada a distribuição de vento predominante no reservatório de Manso onde se observa a predominância de ventos dos quadrantes de nordeste e sudoeste. No canto direito superior da Figura 3 são indicadas as barreiras que o vento predominante (vento de sudoeste) experimentaria ao longo da margem indicada pela seta amarela. Note que em relação a quota 280 existem elevações que chegam a 20m, o que em termos práticos equivale a um edifício de quase três andares. Portanto, estas seriam regiões abrigadas do vento predominante. Neste caso, seriam sub-sistemas pois dinamicamente e, conseqüentemente, ecologicamente, seriam sistemas diferentes do corpo principal do reservatório. A soma destes sub-sistemas representa uma fração considerável da área total do reservatório e, por ser a parte em que a ocupação do entorno mais interage, representam áreas que merecem ser tratadas com atenção. Outro aspecto a ser observado é que estas regiões funcionam como atratores da matéria orgânica oriunda de cada uma destas elevações (lado direito superior) o que tenderá a realçar o aspecto contribuinte destes sub-sistemas para a emissão de gases de efeito estufa.

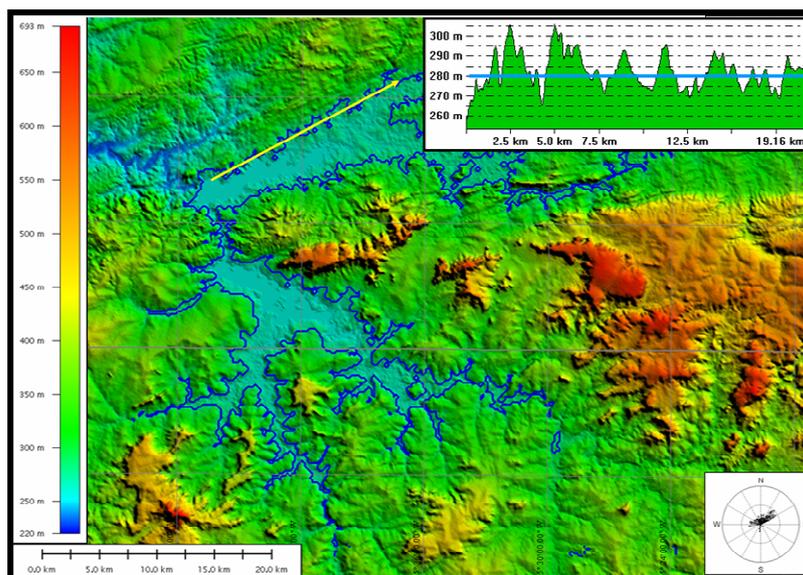


Figura 3. Implicações do relevo do entorno para o vento predominante no reservatório de Manso.

Como visto da discussão acima, a direção do vento será fundamental para a identificação das áreas críticas do reservatório já que, ao contrário da morfometria do entorno que é estática, o vento é uma força dinâmica. Por exemplo, no cenário estático (que considera apenas o nível de complexidade do entorno) (Figura 4) o nível de complexidade seria dado pelas amplitudes e irregularidades dos meandramentos do contorno (Figura 4). As cores em azul, amarelo e vermelho representam baixa, média e alta complexidade, respectivamente. As análises apresentadas a seguir são conceituais e têm o propósito de exemplificar as ideias apresentadas neste trabalho.

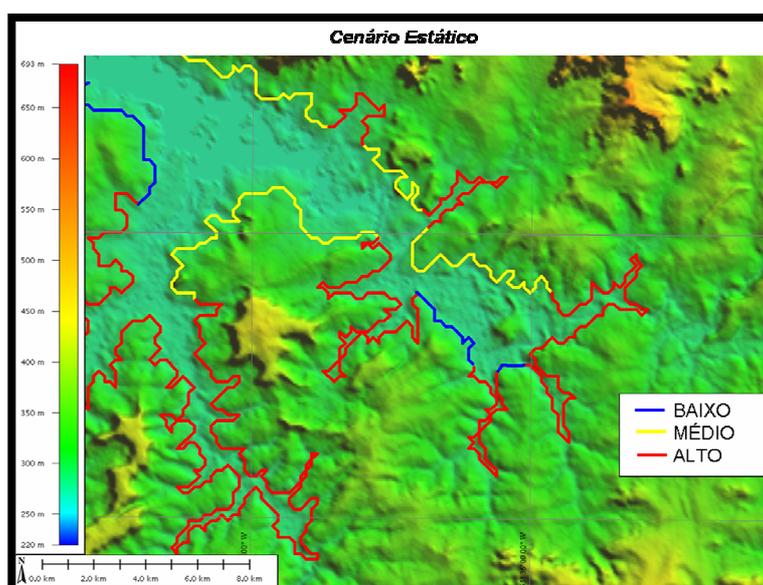


Figura 4. Complexidade do entorno no cenário estático onde é considerada apenas a complexidade do entorno.

Considerando agora este tipo de classificação sob a ação do vento predominante na região (vento de sudoeste) e considerando-se a altimetria do entorno (Figura 5) percebem-se nítidas modificações. Note que uma extensa área que no cenário estático transitava entre um padrões

de média e alta complexidade, no cenário dinâmico foi classificado como de baixa complexidade. Isto se deveu ao fato de que, o que confere maior ou menor criticalidade é a maior ou menor exposição a ação do vento. Note que, este seguimento do entorno embora muito recortado (alta complexidade no cenário estático) é perfeitamente exposto ao vento de sudoeste que transferirá às águas nesta região energia para os processos de mistura e devido a isto esta região passou a ser classificada como de baixa criticalidade no cenário dinâmico (Figura 5). Note que o braço do reservatório no canto inferior esquerdo da Figura 4 é uma região que dentro da abordagem deste estudo, deveria receber muita atenção, visto que, tanto no cenário estático quanto no dinâmico, foi classificada como de alta criticalidade. Isto se deve ao fato de que existem cadeias de montanhas dispostas de forma a sombrearem esta região tanto para o vento de nordeste quanto para o de sudeste que são os predominantes. Note tratar-se de um sub-sistema com aproximadamente 5 km de comprimento e aproximadamente 1 km de largura. Isto exemplifica bem a importância destes sub-sistemas ou sub-lagos.

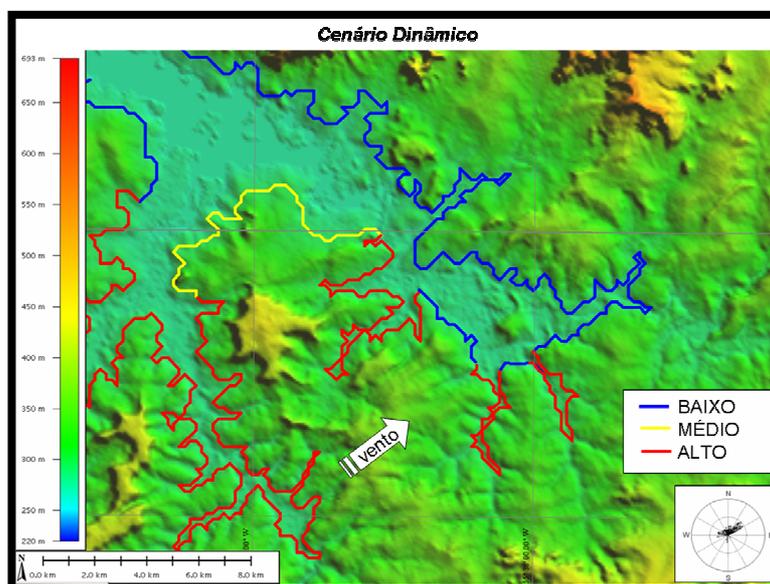


Figura 5. Complexidade do entorno no cenário dinâmico onde é considerada a ação do vento e a altimetria do entorno.

#### 4. Conclusão

O sistema de classificação proposto neste trabalho representa um importante subsídio para tomadas de decisão ao oferecer ao usuário conhecimento das regiões críticas do reservatório, e que, portanto, deverão receber atenção especial. A idéia é que ao final se tenha um produto tal que o usuário entre com o vento no momento de interesse e tenha de imediato e de forma confiável informações sobre regiões críticas no reservatório. Esta ferramenta terá também um potencial prognóstico já que, a partir dos dados do SRTM será possível conhecer o entorno virtual do reservatório a partir da quota de operação. Isto permitirá que se tomem providências tendo em vista minimizar impactos ambientais advindas do represamento. Um dado auxiliar importante a ser utilizado na etapa de validação do método serão as imagens de radar. Já que a criticalidade está associada à água “parada” estas feições deverão aparecer diferenciadas na imagem de radar.

#### Referências

Du, Y.; Vachon, P. W.; Wolfe, J. Wind direction estimation from SAR images of the ocean using wavelet analysis. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 03, p. 498-509, 2002

Rabus, B. M.; Eineder, A. R.; Bamler R. The shuttle radar topography mission- a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar, **Photogramm. Rem. Sens.**, v. 57, p. 241-262. 2003.

Garcia, M. J. and Boulanger, P. 2006. Low Altitude Wind Simulation over Mount Saint Helens Using NASA SRTM Digital Terrain Model. In **Proceedings of the Third international Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3dpvt'06)** (June 14 - 16, 2006). 3DPVT. IEEE Computer Society, Washington, DC, 535-542. DOI= <http://dx.doi.org/10.1109/3DPVT.2006.92>