

## **MODELAGEM ESPACIAL DISTRIBUÍDA APLICADA À ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS NO SEMIÁRIDO DO BRASIL**

Juliana Argélia Garcia de Almeida <sup>(1)</sup>; Jamille Freire Amorim <sup>(2)</sup>; Akira Duarte Kobayashi <sup>(3)</sup>; Francisco Jácome Sarmento <sup>(4)</sup>

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - juliana.garciah@gmail.com<sup>(1)</sup>; Universidade Federal da Paraíba - jamille.fa@gmail.com<sup>(2)</sup>, akiradukoba@gmail.com<sup>(3)</sup>, jacomesarmento@hotmail.com<sup>(4)</sup>.*

**Resumo:** O uso do Geoprocessamento e dos sistemas de informações geográficas tem se configurado como importante ferramenta de identificação e análise da dinâmica hidrológica e transporte de poluentes em bacias hidrográficas através de modelos hidrológicos distribuídos no espaço, simulando ambientes que melhor se aproximem da realidade. Objetivando subsidiar a adoção de medidas mitigadoras aos efeitos nocivos da poluição, o presente estudo buscou estabelecer modelos para determinação da área de influência, considerada como a porção da bacia hidrográfica que responde pela potencial contribuição para a poluição do lago, através da caracterização e avaliação do transporte e da concentração de fósforo nas áreas de contribuição hidrográfica dos açudes Acaraú Mirim, Araras, Jenipapo, São Vicente e Taquara, localizados no semiárido do Ceará, na Bacia do rio Acaraú. A quantificação das cargas de fósforo provenientes de fontes pontuais e difusas, considerando aspectos qualitativos e quantitativos, baseia-se na carga per capita e no tipo de uso e cobertura do solo associados à coeficientes médios de exportação de fósforo. Dadas as interações físicas que ocorrem no processo de carreamento dos nutrientes, é considerada no cálculo das cargas de fósforo a distância que a fonte poluente está do corpo hídrico, tendo sido aplicado o indicador de distância para todos os pixels dos planos de informação de carga difusa e pontual a fim de considerar o decaimento ao longo da trajetória percorrida pela substância até chegar ao reservatório. Delimitadas as áreas, como meio para validar a pertinência e adequabilidade da metodologia, foram considerados valores de concentração de fósforo resultantes da caracterização estatística de um banco de dados público de variáveis de qualidade de água bem como valores advindos de amostras de água coletadas e analisadas oriundas dos referidos corpos hídricos, com vistas a maximizar o grau de realismo da modelagem. Uma observação comum a todas as bacias dos reservatórios analisados foi o registro de superestimação, até mesmo em termos médios, da concentração de fósforo identificada no lago. Nessas circunstâncias, o uso de um modelo referenciador se mostra extremamente útil, pois fornece uma estimativa da concentração dessa substância (em termos médios anuais) compatível com a magnitude da área de drenagem e com o uso e ocupação do solo.

**Palavras-chave:** Geoprocessamento, Modelagem Espacial, Área de Influência.

### **Introdução**

O processo intensificado de urbanização, bem como de produção agrícola e outras atividades desenvolvidas para suprimento das necessidades humanas, associados à precariedade dos sistemas de abastecimento e tratamento de água configuram-se como fatores preponderantes ao desequilíbrio dos biosistemas aquáticos devido ao alto índice de descarga de nutrientes e poluentes por fontes pontuais e difusas.

Uma forma de identificar e analisar a poluição em bacias hidrográficas, considerando aspectos qualitativos e quantitativos, oriundos de fontes pontuais e não pontuais, é utilizando modelos hidrológicos distribuídos no espaço através de sistemas de informações geográficas (SIG).

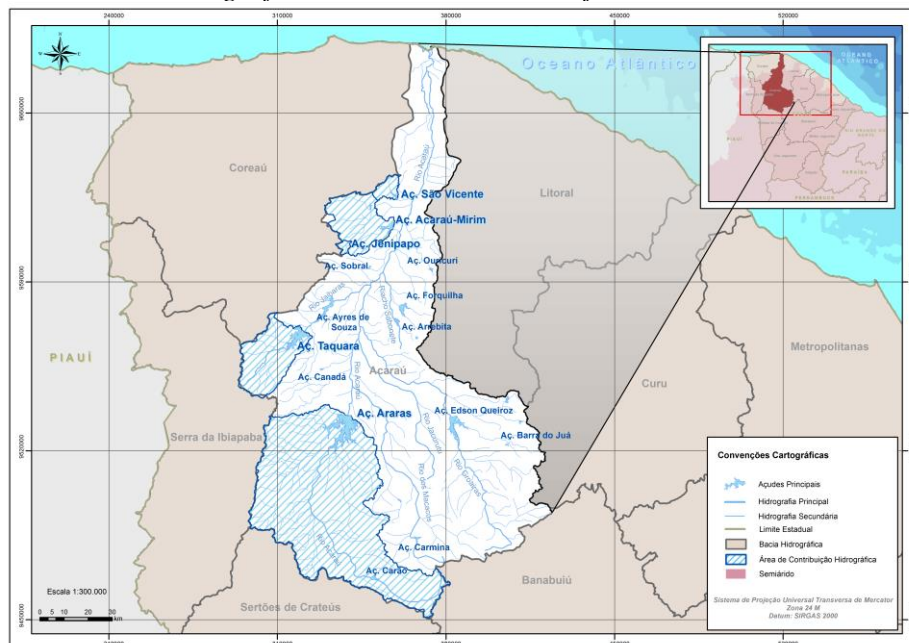
Segundo Larentis (2004), esses modelos permitem avaliar de forma sistemática os processos que envolvem a dinâmica hidrológica e o transporte de poluentes na bacia, simulando ambientes que melhor se aproximem da realidade, servindo desta forma como um instrumento de suma importância à tomada de decisão e apoio ao planejamento dos recursos hídricos.

Neste contexto, objetivando subsidiar a adoção de medidas mitigadoras aos efeitos nocivos da poluição, foi estimada a área que influencia a qualidade da água em reservatórios através da caracterização e avaliação do transporte e da concentração de fósforo nas zonas de contribuição hidrográfica dos reservatórios São Vicente, Acaraú-Mirim, Jenipapo, Taquara e Araras, inseridos no semiárido brasileiro, na bacia hidrográfica do rio Acaraú, no estado do Ceará, desenvolvendo metodologia baseada em técnicas e ferramentas de geoprocessamento.

### Metodologia

A Bacia Hidrográfica do rio Acaraú, onde estão inseridos os reservatórios São Vicente, Acaraú-Mirim, Jenipapo, Taquara e Araras, localiza-se no semiárido brasileiro, na porção noroeste do Estado do Ceará, sendo limitada ao sul pelas Bacias Hidrográficas do Banabuiú e dos Sertões de Crateús, ao norte pelo Oceano Atlântico, a oeste pelas Bacias Hidrográficas do Coreaú e da Serra da Ibiapaba e ao leste pelas Bacias Hidrográficas do Litoral e do Curú, conforme pode ser observado na Figura 1.

**Figura 1.** Mapa de localização da Bacia do Acaraú contendo as cinco bacias de contribuição hidrográfica dos reservatórios objetos de estudo



Fonte: elaboração própria (2017).

Em ambiente SIG, a partir do modelo digital de elevação (MDE) obtido do projeto Topodata, desenvolvido e disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e utilizando um conjunto de ferramentas para análises hidrológicas que opera em software de domínio público, foram executadas diversas etapas que resultaram em *rasters* contendo a direção do escoamento superficial da água para cada célula, a acumulação do fluxo, rede de drenagem e, por fim, os limites das sub-bacias e bacias hidrográficas dos reservatórios de interesse.

### ***Modelagem da Relação Chuva-vazão***

Para a caracterização do comportamento hidrológico e da disponibilidade hídrica nas bacias estudadas foi necessário calcular as vazões médias de longo termo e construir uma relação matemática entre chuva e vazão.

A vazão média de longa duração permite caracterizar a disponibilidade potencial de uma bacia hidrográfica. O cálculo da vazão média de longa duração das áreas estudadas foi obtido pela média das vazões médias anuais para toda a série de dados, como definido por Pruski *et al.* (2006).

Para a análise da potencialidade hídrica superficial foi utilizado o cálculo do deflúvio superficial direto que é dado pelo volume de água que escoar na superfície de uma determinada área devido à ocorrência de precipitação.

O plano de informação relativo ao regime de chuva na área de interesse foi gerado através da espacialização de dados de precipitação obtidos do banco de dados dos *Estudos Pluviométricos* desenvolvidos no âmbito do "Estudo para refinamento do balanço hídrico e definir diretrizes, metodologias e ferramenta para subsidiar o estabelecimento de regras operativas para 204 reservatórios localizados na região semiárida, contemplando estimativas de oferta hídrica e demandas associadas, criação de base de dados e aplicação de ferramenta de suporte e decisão" (ANA, 2016).

Através de técnicas de geoprocessamento, tem-se delimitadas as áreas de drenagem de estações fluviométricas dos reservatórios selecionados, cujos valores de precipitação de suas células foram sumarizados, resultando em valores de precipitação média anual por área de drenagem, a fim de subsidiar as etapas seguintes para a elaboração do plano de informação da vazão média de longo curso, distribuída em função da precipitação.

O cálculo do deflúvio foi obtido pela relação entre as vazões médias anuais e a área de drenagem, resultando em valores em  $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$  (equação 1), a fim de comparar com os valores de precipitação média da área de drenagem estudadas.

$$D = \frac{Q_{\text{anual}}}{A} \times 10^3 \times 31536000$$

Onde:

D = Deflúvio (mm.ano<sup>-1</sup>);

Q anual = vazão média anual (m.s<sup>-1</sup>);

A = área de drenagem da estação (m<sup>2</sup>);

Para a elaboração de um modelo de vazão distribuída nas bacias estudadas, foram realizadas análises de regressão linear e não linear simples com o objetivo de se verificar a relação entre os dados de vazão e chuva e consequente obtenção da equação de regressão com o melhor ajuste possível, posteriormente aplicada sobre o mapa de precipitação para obtenção do plano de informação da vazão média de longo curso distribuída em função da precipitação em mm/m<sup>2</sup>/ano.

#### ***Modelo de vazão acumulada***

Obtida a distribuição das vazões médias de longo termo em função da precipitação, foi possível determinar, em ambiente SIG, o volume de água acumulado na bacia, através da aplicação do algoritmo de fluxo acumulado ponderado (FAP) implementado em ferramenta de tratamento de informações hidrológicas. Seguindo requerimento da ferramenta, o procedimento teve como dados de entrada o *raster* de direção de fluxo e o modelo de vazão média distribuída por pixel, tendo como produto o modelo de vazões médias de longo termo acumuladas, em m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>.

#### ***Modelo regressivo referenciador***

O modelo adotado destinou-se a fornecer uma referência da carga total de fósforo na bacia a partir de variáveis estudadas e identificadas como determinantes da mesma, em se tratando de lagos tropicais de águas quentes. A metodologia escolhida para esse fim é consagrada e foi proposta por Salas e Martino (1991). Esses autores conduziram importante investigação científica no contexto de um Programa Regional para o desenvolvimento de metodologias simplificadas para a avaliação da eutrofização em lagos/reservatórios tropicais de água quente da América Latina e do Caribe. Trata-se de um programa que foi iniciado em 1981 pelo Centro Panamericano de Engenharia Sanitária e Ciências Ambientais (CEPIS) do Centro Especializado da Organização Pan-Americana da Saúde, este, por sua vez ligado à Organização Mundial de Saúde (OMS).

No presente contexto, conforme mencionado, o modelo regressivo se prestou ao fornecimento de um valor de referência para a carga de fósforo afluyente à bacia hidráulica dos

reservatórios. Conforme o artigo supracitado, a equação do balanço de massa para o fósforo total é dada por:

$$P_{\lambda} = \frac{L(P)}{\bar{Z} \left( \frac{1}{T_w} + K_s \right)}$$

Onde:

$P_{\lambda}$  é o fósforo total em  $mg/L$ ;

$L(P)$  é a taxa de contribuição de fósforo total por unidade de superfície em  $g/m^2 \cdot ano$ ;

$\bar{Z}$  é a profundidade média do lago em  $m$ ;

$T_w$  é o tempo de detenção em  $anos$ ;

$K_s$  é a taxa global de perda de fósforo total em  $1/ano$ .

O valor do parâmetro  $K_s$  é obtido como função do tempo de detenção como sendo (Salas e Martino, 1991):

$$K_s = \frac{2}{\sqrt{T_w}}$$

### ***Modelagem espacial distribuída***

De posse de todos os dados das áreas potenciais de poluição, é dado início à etapa de identificação e quantificação das cargas de fósforo provenientes de fontes pontuais e difusas, baseando-se na carga per capita e no tipo de uso e cobertura do solo associados aos coeficientes médios de exportação definidos pelo Modelo Matemático de Correlação Uso do Solo/Qualidade da Água (MQUAL), desenvolvido pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA, 2010).

A estimativa da carga potencial ( $C_p$ ) de fósforo por origem pontual é feita a partir da quantificação, segundo dados do Censo Demográfico 2010 (IBGE, 2010), da população por setor, parcial ou integralmente incluso no limite da bacia hidrográfica do reservatório. O cálculo é feito considerando a população e a área proporcionais do setor e a carga per capita média de fósforo total anual, aplicando-se:

$$C_p = \frac{P_{st} C_{pc}}{A_{st}}$$

Onde:

$C_p$  é a carga pontual de fósforo em  $kg/km^2 \cdot ano$ ;

$P_{st}$  é a população proporcional do setor em hab;

$C_{pc}$  é a carga per capita anual de fósforo em kg/hab;

$A_{st}$  é a área proporcional do setor em km<sup>2</sup>.

Para identificação e quantificação das potenciais causas da eutrofização dos corpos hídricos por fontes difusas foram aplicados coeficientes de exportação às diferentes classes de cobertura do solo e atividades desenvolvidas dentro da área de contribuição do reservatório.

Para tanto, foram utilizadas imagens multiespectrais, dos sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal InfraRed Sensor*) do satélite LANDSAT 8, distribuídas pela U.S Geological Survey (USGS), com resolução espacial de 30 m, para as quais foi atribuída composição colorida RGB nas bandas 6, 5 e 4, respectivamente.

O processo de classificação das imagens se deu através de *software* de geoprocessamento de domínio público, utilizando-se o método não supervisionado *IsoCluster*, obtendo, de modo geral, sete classes: afloramento rochoso, área urbana, cultura agrícola, pastagem, solo exposto e vegetação.

A cada grupo de objetos é atribuído seu respectivo coeficiente médio de exportação de fósforo, resultando no modelo de cargas potenciais de origem difusa, distribuídas por categoria de uso e cobertura do solo.

#### ***Calibração de parâmetro de depuração***

O decaimento da carga de nutrientes ao longo do espaço no percurso do escoamento superficial é modelado por um coeficiente de atenuação dependente da distância entre o ponto e o exutório da bacia. Um índice normalizado denominado Indicador de Distância (DI), proposto por Cecchi *et al.* (2007), pode ser utilizado para ponderar os coeficientes de exportação, conforme as equações a seguir:

$$DI_i = e^{-D_i K}$$

$$CE_{PD} = DI_i \times CE_{UCS}$$

Onde:

$DI_i$  é o indicador de distância entre a célula  $i$  e o corpo de água;

$D_i$  é a distância euclidiana da célula  $i$  ao exutório medida em número de células;

$K$  é a variável de calibração;

$CE_{PD}$  é o coeficiente de exportação ponderado pela distância dado em  $kg \cdot km^{-2} \cdot ano^{-1}$ ;

$CE_{UCS}$  é o coeficiente de exportação de cada tipo de uso e cobertura do solo dado em  $kg \cdot km^{-2} \cdot ano^{-1}$ ;



Portanto, se  $D_i = 0 \Rightarrow DI_{i=1} = 1$ ; e se  $D_i = \infty \Rightarrow DI_{i=1} = 0$ . Essa condição, expressa em palavras em termos práticos aproximados, significa que, se a retícula (pixel) de discretização da área de drenagem estiver no próprio lago ou na APP, sua contribuição para o total da carga poluente depositada será integral ( $DI_{i=1} = 1$ ). Na situação oposta, ou seja, se localizada a uma distância muito grande do lago, sua contribuição se anula, via processo de decaimento, admitido, como em tantos modelos clássicos, como governado pela função exponencial.

Considerando a área de influência do reservatório como a porção da bacia hidrográfica que responde pela potencial contribuição para a poluição do lago, procede utilizar o indicador de distância como índice ou parâmetro a calibrar, de maneira que a carga de fósforo obtida no exutório da bacia hidrográfica, calculada em termos de média anual pelo modelo referenciador, seja aproximada pelo resultado do processamento do algoritmo acumulativo da carga poluente na bacia. A calibração de  $K$  é iterativa: expande a área de influência inicialmente, tomada como coincidente com a bacia hidráulica, até que os resultados mencionados se aproximem suficientemente.

#### ***Modelo de cargas difusas e pontuais***

Os valores de carga potencial de fósforo foram distribuídos para todos os pixels dos planos de informação de carga difusa e pontual e, sobre eles, aplicado o indicador de distância a fim de considerar o decaimento (depuração) ao longo da trajetória percorrida pela substância até chegar ao reservatório.

A estimativa da carga total acumulada de fósforo é feita somando-se as cargas potenciais provenientes de fontes pontuais e difusas e, posteriormente, aplicando-se o algoritmo FAP, conforme descrito anteriormente, combinando os planos de direção de fluxo e da carga total de fósforo.

A partir do modelo de vazões médias de longo termo acumuladas e do modelo de carga total de fósforo acumulada torna-se possível obter a concentração média anual na área de contribuição hidrográfica, utilizando a seguinte equação:

$$C_p = \frac{L_p}{Q_p}$$

Onde:

$C_p$  é a concentração média anual da substância;

$L_p$  é a carga total acumulada de P ( $\text{kg}\cdot\text{ano}^{-1}$ );

$Q_p$  é a vazão média anual acumulada ( $\text{m}^3\cdot\text{ano}^{-1}$ ).

Tendo, assim, como resultado a concentração média anual na bacia em kg/m<sup>3</sup>, posteriormente convertida, obtendo-se o plano de informação da concentração média anual de fósforo em mg/L.

### Resultados e discussão

Estimadas as cargas de nutrientes que influenciam no processo de trofia dos corpos hídricos, partindo da identificação e do levantamento das fontes poluidoras, apresenta-se na tabela 1 os valores de carga de fósforo anual já atribuídas as perdas resultantes do decaimento desse elemento e, para fins comparativos, valores de concentração estimados através do modelo referenciador, média de dados coletados em campo em 2016 e valores médios provenientes do banco de dados de variáveis de qualidade de água disponibilizados por órgão governamental.

Tabela 1 – Concentrações médias anuais de fósforo

Reservatório	Fósforo -Equação Modelo Referenciador (mg/L)	Fósforo - SIG (mg/L)	Fósforo - Coleta Campo (mg/L)	Fósforo - Banco de Dados (mg/L)
Acaraú Mirim	0,0033	0,0038	0,040	0,129
Araras	0,0035	0,0035	0,164	0,173
Jenipapo	0,0025	0,0027	0,027	0,021
São Vicente	0,0019	0,0021	0,050	0,148
Taquara	0,0032	0,0031	0,026	0,025

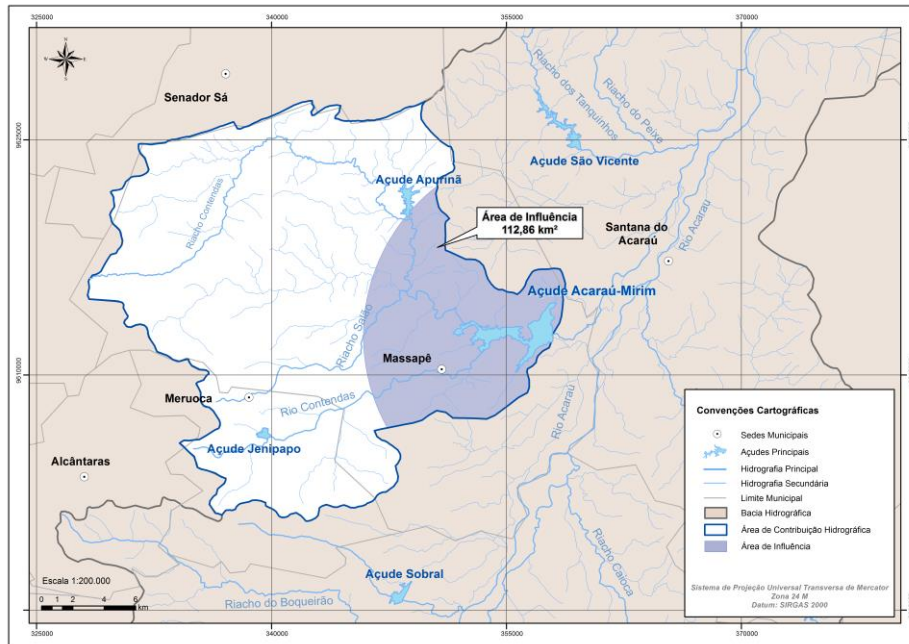
Fonte: elaboração própria (2017).

Contata-se uma superestimação de concentração de fósforo na comparação direta entre os valores calculados pela equação empírica e os valores advindos das análises da água coletada nas campanhas realizadas em campo, bem como aqueles valores e a média obtida a partir de todas as informações provenientes do banco de dados de variáveis de qualidade de água.

As áreas que influenciam a qualidade da água nas zonas de contribuição hidrográfica dos reservatórios, delimitadas a partir da estimativa das concentrações de fósforo são apresentadas nas figuras 2 à 6.

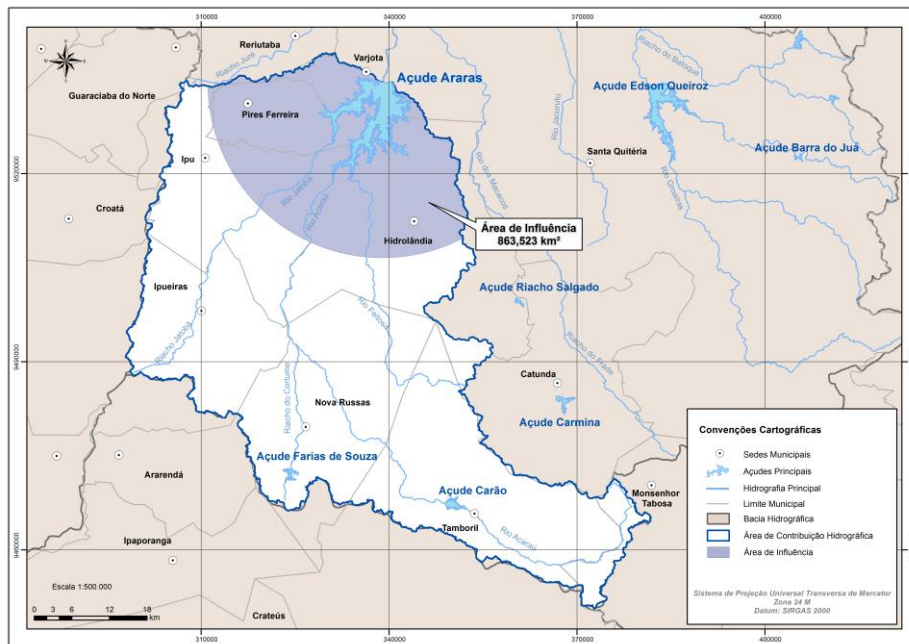


**Figura 2. Mapa da área de influência do Açude Acaraú Mirim – Bacia do Acaraú**



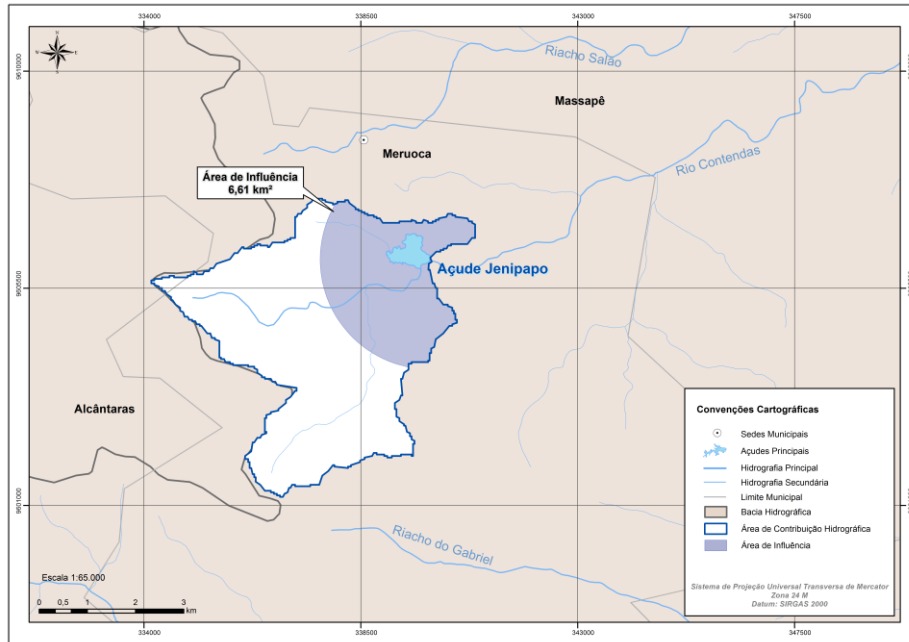
Fonte: elaboração própria (2017).

**Figura 3. Mapa da área de influência do Açude Araras – Bacia do Acaraú**



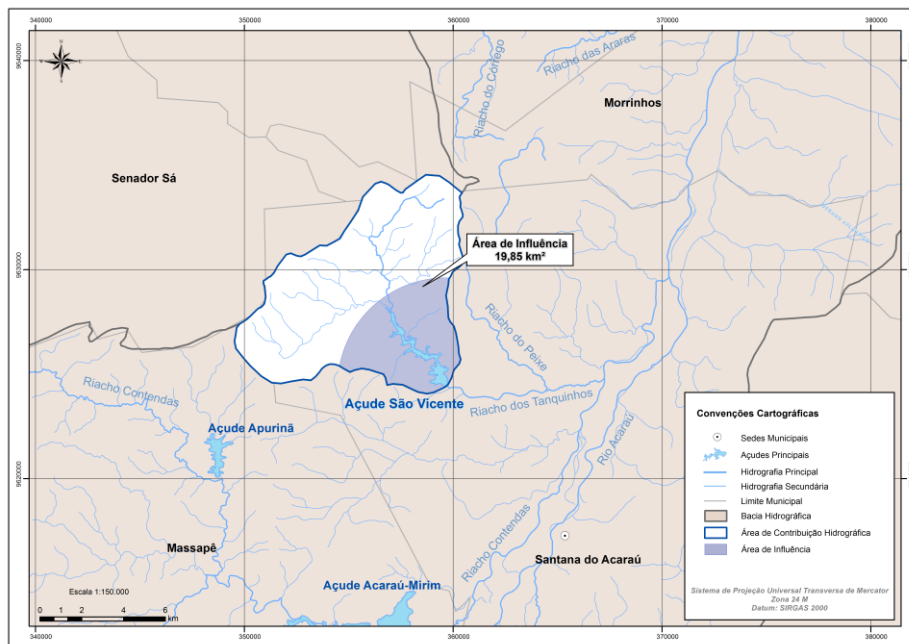
Fonte: elaboração própria (2017).

**Figura 4.** Mapa da área de influência do Açude Jenipapo – Bacia do Acaraú



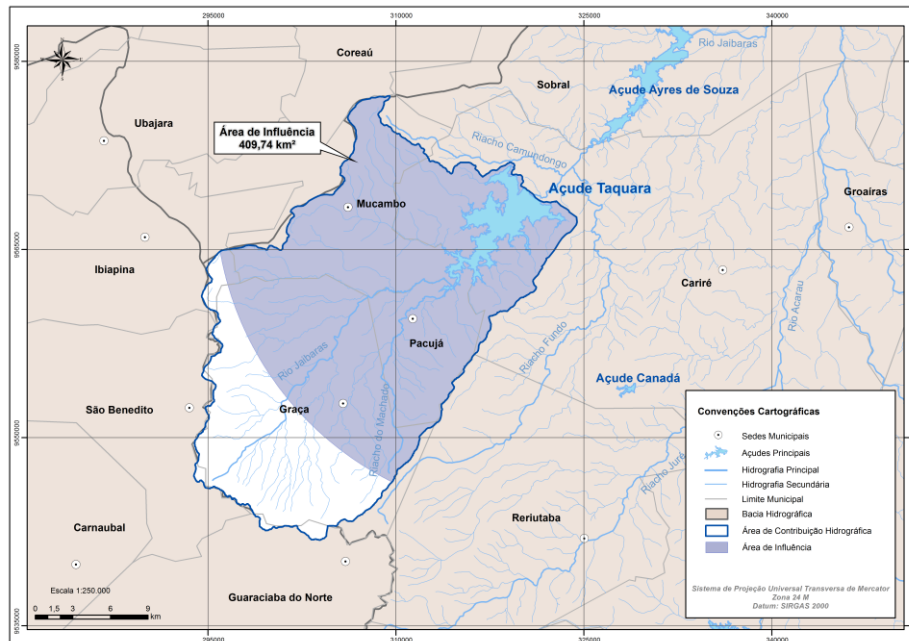
Fonte: elaboração própria (2017).

**Figura 5.** Mapa da área de influência do Açude São Vicente– Bacia do Acaraú



Fonte: elaboração própria (2017).

**Figura 6.** Mapa da área de influência do Açude Taquara – Bacia do Acaraú



Fonte: elaboração própria (2017).

## Conclusões

Uma observação comum a todas as bacias dos reservatórios analisados foi o registro de superestimação, até mesmo em termos médios, da concentração de fósforo identificada no lago, ou melhor, na zona do lago onde se deu a coleta. Nessas circunstâncias, o uso do modelo referenciador se mostra extremamente útil, pois fornece uma estimativa da concentração dessa substância (em termos médios anuais) compatível com a magnitude da área de drenagem e com o uso e ocupação do solo. A utilização apenas dos valores médios anuais de concentração obtidos das amostras disponíveis no banco de dados leva inexoravelmente à conclusão, em todos os casos analisados, que existem atividades sendo realizadas no próprio lago, na sua APP ou no entorno mais imediato que resultam no despejo praticamente direto de nutrientes no reservatório.

## Referências

ANA. Agência Nacional de Águas. **Estudo Para Refinamento do Balanço Hídrico e Definição de Diretrizes, Metodologias e Ferramenta para Subsidiar o Estabelecimento de Regras Operativas para 204 Reservatórios Localizados na Região Semiárida, Contemplando Estimativas de Oferta Hídrica e Demandas Associadas, Criação de Base de Dados e Aplicação de Ferramenta de Suporte e Decisão**, Relatório Parcial RP03B - Estudos Pluviométricos e Evaporimétricos - Brasília: ANA/SPR 208p, 2016.

Cecchi, G.; Munafò, M.; Baiocco, F.; Andreani, P.; Mancini, L. **Estimating river pollution from diffuse sources in the Viterbo province using the potential non-point pollution index**. Annali dell'Istituto Superiore di Sanità, v. 43, n. 3, p. 295-301. 2007.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Base de Dados Demográficos**. 2010.

Larentis, D. G. **Modelagem matemática da qualidade da água em grandes bacias: Sistema Taquari-Antas - RS**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 159 p., 2004.

Pruski, F. F. *et al.* **Estudo da Vazão em Cursos d'Água. Viçosa: Engenharia na Agricultura**. Caderno didático:43. Associação de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 151 p. 2006.

Salas, H. J.; Martino, P. **A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes**. Water Research, v. 25, n. 3, p. 1341 – 350, 1991.

SMA. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. **Elaboração do Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings**. Relatório Final. Processo N° 7097/2007, Contrato SMA/CPLEA N° 09/2007, São Paulo. 2010.