

## QUANTO CUSTA O RIO QUE QUEREMOS: custos de tratamento de esgotos e enquadramento do rio Jaguaribe utilizando modelo de qualidade da água QUAL2BR

*Marcos Abílio Medeiros de Sabóia<sup>1</sup>; Wictor Edney Dajtenko Lemos<sup>2</sup>; Francisco de Assis de Souza Filho<sup>3</sup>; Felipe Augusto Tavares de Carvalho Sales<sup>4</sup>; Diego de Castro Maia Ribeiro<sup>5</sup>*

**Resumo**---Um dos ramos de estudo da engenharia moderna é a modelagem matemática da qualidade da água. A modelagem consiste em determinar matematicamente, através de simulações computacionais, os níveis e as concentrações dos parâmetros que estão presentes nos corpos de água. Neste trabalho foi utilizado um programa computacional de modelagem de qualidade da água em rios, o QUAL2BR, baseado no software QUAL2E. Foi realizada a modelagem numérica da qualidade da água no rio Jaguaribe, simulando cenários com e sem o tratamento dos efluentes considerados. Os resultados obtidos, a partir da utilização do modelo de qualidade da água em rios (QUAL2BR), foram satisfatórios, mostrando a relevância dos tratamentos dos efluentes. Os parâmetros de qualidade da água simulados, essenciais ao enquadramento dos corpos hídricos em classes de qualidade, foram calculados em vários cenários na Bacia do Jaguaribe. O custo total de implantação de estações de tratamento de esgoto (ETE) para o tratamento de todos os lançamentos ao longo do trecho foi de aproximadamente R\$ 6.714.643,20.

**Abstract**---One of the studies of the modern engineering is the water quality modeling. The mathematical modeling aims, through computer simulations, determine the levels and concentrations of the parameters that are present in the water bodies. In this study we used a computer program for water quality modeling in rivers, QUAL2BR, based on the software QUAL2E. It was performed numerical modeling of water quality in the river Jaguaribe, simulating with and without effluent treatment scenarios. The results from the use of the water quality model in rivers (QUAL2BR) were satisfactory, showing the importance of wastewater treating. The parameters of simulated water quality, essential to the classification of water bodies in quality classes, were calculated in various scenarios of the Jaguaribe Basin. The total cost of the implementation of sewage treatment plants (STP) for the treatment of all entries along the stretch was approximately R\$ 6,714,643.20.

**Palavras-Chave** – Modelagem matemática. Qualidade da água. Tratamento de esgotos.

---

1) Doutorando em Recursos Hídricos, UFC. E-mail: [marcos\\_abilio@hotmail.com](mailto:marcos_abilio@hotmail.com)

2) Doutorando em Recursos Hídricos, UFC. E-mail: [wictoredney@hotmail.com](mailto:wictoredney@hotmail.com)

3) Professor do DEHA, UFC. Av. Mister Hull, s/n. E-mail: [assis@ufc.br](mailto:assis@ufc.br)

4) Mestrando em Saneamento Ambiental, UFC. E-mail: [felipemanin@hotmail.com](mailto:felipemanin@hotmail.com)

5) Mestrando em Recursos Hídricos, UFC. E-mail: [diegocmr@gmail.com](mailto:diegocmr@gmail.com)

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial ao planeta que atualmente enfrenta um grave problema quanto à escassez de água limpa. Por ser um recurso finito, a água é fundamental tanto para a sobrevivência do homem como para a manutenção de todas as outras formas de vida e o equilíbrio natural dos ecossistemas. Aproximadamente 71% da superfície terrestre estão cobertos por água, mas grande parte desta porcentagem - superior a 97% - encontra-se nos oceanos, sendo, portanto, impróprias ao consumo e de tratamento via dessalinização inviável (WETZEL, 1983; FRAGOSO Jr. *et al.*, 2009). Somando-se a isso, em torno de 2% da água doce está presa às calotas polares e geleiras, ficando menos de 1% dos recursos hídricos disponíveis à população (TUNDISI, 2008).

Para que haja um desenvolvimento sócio-econômico sustentável, a quantidade e a qualidade da água presente nos ecossistemas devem ser suficientemente adequadas. Atualmente existe uma preocupação com a evolução dos processos que a fazem um bem em constante deterioração, notadamente por causas antropogênicas. Tais processos ameaçam os ecossistemas aquáticos, destruindo o equilíbrio formado.

O problema de escassez hídrica ainda é mais forte nas regiões áridas e semiáridas do globo. Estas regiões cobrem aproximadamente um terço da superfície terrestre e são habitadas por quase 400 milhões de pessoas (WILLIAMS, 1999). As reservas brasileiras de água doce, que representam aproximadamente 12% do volume total mundial, não estão distribuídas de maneira uniforme. A região semi-árida do Nordeste, mesmo incluindo grande parte da bacia do rio São Francisco, possui apenas 4% dos recursos hídricos do país, mas abriga 35% da população brasileira, em sua maioria famílias de baixa renda.

A grande maioria dos problemas ligados à qualidade de água está diretamente relacionada às cargas poluentes que chegam aos recursos hídricos por meio da drenagem. Ligações clandestinas de esgotos domésticos e/ou industriais e a lixiviação do solo introduzem matéria orgânica, nutrientes e organismos patogênicos ao meio aquático. A matéria orgânica é responsável por consumir indiretamente uma parte do oxigênio dissolvido disponível, através de processos de estabilização realizados por bactérias decompositoras. Os nutrientes, especialmente o fósforo e o nitrogênio, potenciais causadores da eutrofização cultural, influenciam na qualidade das águas adiantando o processo de envelhecimento natural dos lagos. Por fim, os organismos patogênicos, cuja origem em esgotos é predominantemente humana, refletem diretamente o nível de saúde da população e as condições de saneamento básico da região (VON SPERLING, 1996).

Um dos ramos de estudo da engenharia moderna é a modelagem matemática da qualidade da água. A modelagem consiste em determinar matematicamente, através de simulações computacionais, os níveis e as concentrações dos parâmetros que estão presentes nos corpos de

água. Dentre os parâmetros mais quantificados e de maior relevância quanto à qualidade da água estão o oxigênio dissolvido, a demanda bioquímica de oxigênio, a concentração de coliformes, a concentração de nitrogênio, a concentração de fósforo, entre outros. Esses parâmetros são essenciais na identificação e na caracterização da água.

Neste trabalho foi utilizado um programa computacional de modelagem de qualidade da água em rios, o QUAL2BR, baseado no software QUAL2E. O programa é capaz de calcular os mais diversos parâmetros de qualidade da água em rios. Foi feita uma aplicação desse modelo no rio Jaguaribe, por se tratar do mais importante rio do estado do Ceará. Em seguida foi realizado o enquadramento do corpo d'água em diversas classes de qualidade, de acordo com padrões legislativos. Além disso, foi realizada a quantificação dos custos de tratamento dos lançamentos de efluentes no trecho do rio que foi modelado.

## **2. BASES CONCEITUAIS**

### **2.1. Modelos numéricos de qualidade da água**

A modelagem da qualidade da água tem evoluído desde o início do século XX, época em que a capacidade de processamento dos computadores ainda era nenhuma ou muito limitada. Os principais modelos eram aplicados em cenários simplificados e características rudimentares, utilizando-se de simples geometrias das seções, fluxos em estado permanente e reações cinéticas lineares (CHAPRA, 1997). O primeiro trabalho no campo da modelagem foi desenvolvido em 1925 por Streeter & Phelps (“Estudo sobre poluição e purificação natural do rio Ohio”), aplicado no rio Ohio, principal afluente do rio Mississipi, localizado no leste dos Estados Unidos (STREETER; PHELPS, 1925). Esse trabalho forneceu um meio capaz de determinar os níveis de oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) de um determinado rio.

Desde o surgimento do modelo de Streeter e Phelps, diversos modelos computacionais começaram a surgir direcionados às fontes pontuais de poluição, voltados ao projeto de estações de tratamento de água e esgoto, focados principalmente em parâmetros como temperatura, OD e DBO (SOUZA, 2006). A partir da década de 60, os computadores se tornaram ferramentas mais acessíveis e também avançaram quanto à capacidade de processamento, fazendo com que os pesquisadores pudessem modelar problemas de maior complexidade, como, por exemplo, sistemas com geometrias não-prismáticas e fluxos no estado transiente. Os modelos saíram do ambiente unidimensional e foram capazes de realizar simulações em ambientes bidimensionais (CHAPRA, 1997).

Já na década de 70, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) passou a desenvolver modelos de qualidade da água bastante conhecidos até hoje. O primeiro deles foi QUALI (1970), seguido pelo QUALII (1973), QUAL2E (1985) e pelo QUAL2K (2000). A cada

atualização, os modelos foram se tornando mais detalhados, complexos e com capacidade para calcular um maior número de parâmetros.

## 2.2. O modelo QUAL2BR

O programa computacional desenvolvido baseia-se na estrutura do software QUAL2E, utilizando-se das mesmas equações diferenciais que regem o comportamento dos parâmetros de qualidade da água. É um modelo de qualidade da água em rios capaz de simular vários constituintes, entre eles, o oxigênio dissolvido, a demanda bioquímica de oxigênio, algas, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrito, nitrogênio nitrato, fósforo orgânico, fósforo inorgânico e coliformes.

### 2.2.1. Componente hidrodinâmica do modelo QUAL2BR

A componente hidrodinâmica pode simular o escoamento permanente e uniforme através da equação de Manning ou o transiente hidráulico através da simplificação das equações de Saint Venant. Os modelos de escoamento em rios e canais levam em conta o balanço de massa e momento em um dado fluxo unidimensional. Neste modelo foram omitidos os termos fluxo lateral, cisalhamento devido à força do vento e as perdas por turbulência. As equações de balanço de massa e momento são explicitadas através das Equações (1) e (2).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A_c}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{A_c} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A_c} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A_c} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (2)$$

Onde  $Q$  é a vazão em  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $A_c$  é a área da seção transversal em  $\text{m}^2$ ,  $y$  é a profundidade do escoamento, em m;  $g$  é a aceleração da gravidade, em  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $S_0$  é a declividade do fundo do canal,  $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$  e  $S_f$  é a declividade devido ao efeito de atrito, em  $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ .

### 2.2.2. Transporte de constituinte

O balanço de massa é utilizado para medir a concentração dos vários constituintes a cada passo de tempo, descrito através da Equação 3

$$V \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial (A_c E \frac{\partial c}{\partial x})}{\partial x} dx - \frac{\partial (A_c U_c)}{\partial x} dx + V \frac{dc}{dt} + s \quad (3)$$

Onde  $V$  é o volume, em  $m^3$ ;  $c$  a concentração do constituinte, em  $mg.L^{-1}$ ;  $A_c$  é a área da seção, em  $m^2$ ;  $E$  o coeficiente de dispersão, em  $m^2.s^{-1}$ ;  $U_c$  a velocidade média na seção, em  $m.s^{-1}$  e  $s$  são as fontes externas (positivo) ou sumidouros (negativo) do constituinte, em  $mg.s^{-1}$ .

### 2.3. Legislação existente

Os rios, ecossistemas de grande importância da qual dependem milhares de espécies da fauna e flora, serve a diversos fins, entre eles, a diluição, o transporte e a assimilação de esgotos urbanos e industriais (Lei Estadual N° 11.996, de 24 de JULHO DE 1992).

O capítulo II da política nacional dos recursos hídricos destaca os objetivos principais da qualidade da água, que é “assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos”. Por qualidade da água entende-se o conjunto de todas as características físicas, químicas e biológicas que ela apresenta. A qualidade varia de acordo com a sua utilização, onde padrões de classificação pretendem classificar a água de acordo com a sua potabilidade, a segurança que apresenta para o ser humano e para o bem estar dos ecossistemas.

A resolução CONAMA 357/2005 dispõe sobre a qualidade apresentando-a por um segmento de corpo d'água, num determinado momento, em termos dos usos possíveis com segurança adequada, frente às Classes de Qualidade. Por classes de qualidade define-se o conjunto de condições e padrões de qualidade de água necessários ao atendimento dos usos preponderantes, atuais ou futuros. A mesma lei impõe enquadramentos específicos para cada classe de qualidade de acordo com o estabelecimento de metas ou objetivos a serem obrigatoriamente alcançados ou mantidos em um segmento de corpo de água, de acordo com os usos preponderantes pretendidos, ao longo do tempo.

### 2.4. Local de aplicação

O local escolhido foi o rio Jaguaribe, rio mais importante do estado do Ceará. A bacia do rio Jaguaribe ocupa  $72.440 \text{ Km}^2$  aproximadamente, o que representa metade do Estado do Ceará. Dentre as principais preocupações associadas ao gerenciamento da qualidade da água do rio Jaguaribe está a descarga de efluentes domésticos, a deposição de resíduos sólidos e o escoamento superficial de áreas agrícolas (PAULA *et al.*, 2006).

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo numérico de qualidade da água implementado no código computacional foi aplicado à bacia do Jaguaribe. Neste trecho, o rio recebe cargas de diversos afluentes, como mostrado no diagrama unifilar da Figura 1.

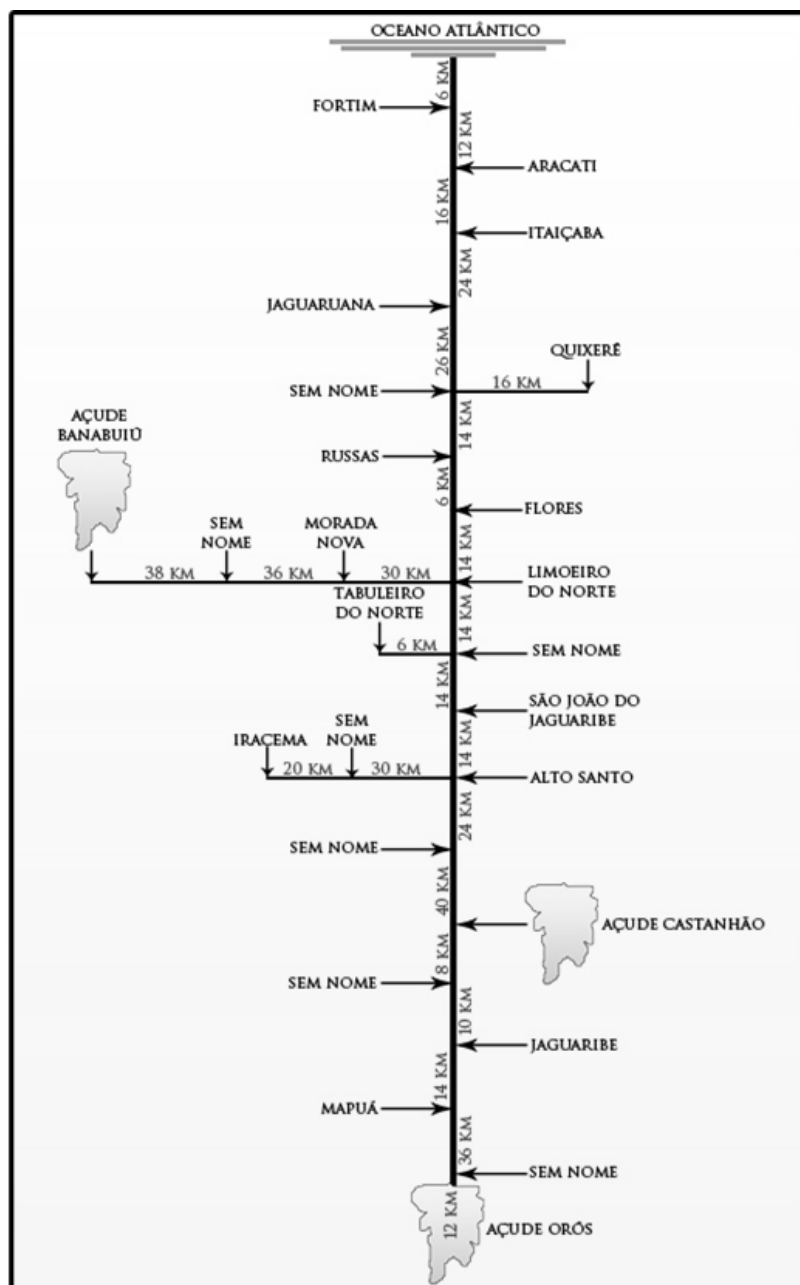


Figura 1. Diagrama unifilar mostrando a topologia do sistema modelado.

A Tabela 1 apresenta o sistema completo onde foi realizada a modelagem. Cada cidade recebeu uma identificação por trecho, somando ao final um percurso total de 304 Km simulados. O início do percurso se deu à jusante do açude orós, recebendo cargas da cidade próxima. O final do trecho foi o oceano, após a cidade de Fortim. Para o modelo numérico, foram utilizadas simulações considerando os parâmetros apresentados na Tabela 2.

Foi realizada uma análise do lançamento de esgoto in natura na região da bacia do Jaguaribe, avaliando-se os parâmetros DBO, OD, coliformes, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrito, nitrogênio nitrato, fósforo orgânico, fósforo inorgânico e algas.

Tabela 1. Descrição dos trechos do sistema.

Número do trecho	Nome	Começo (Km)	Fim (Km)	Cabeceira
1	Orós	304	292	Sim
2	-	292	256	Não
3	Mapuá	256	242	Não
4	Jaguaribe	242	232	Não
5	-	232	224	Não
6	Castanhão	224	184	Não
7	-	184	160	Não
8	Iracema	50	30	Sim
9	-	30	0	Não
10	Alto Santo	160	146	Não
11	S. J. Jaguaribe	146	132	Não
12	Tabuleiro do Norte	6	0	Sim
13	-	132	118	Não
14	Banabuiú	104	66	Sim
15	-	66	30	Não
16	Morada Nova	30	0	Não
17	Limoeiro do Norte	118	104	Não
18	Flores	104	98	Não
19	Russas	98	84	Não
20	Quixeré	16	0	Sim
21	-	84	58	Não
22	Jaguaruana	58	34	Não
23	Itaiçaba	34	18	Não
24	Aracati	18	6	Não
25	Fortim	6	0	Não

Tabela 2. Coeficientes utilizados na simulação.

$N$ (rugosidade)	0,02
$b_0$ (largura de fundo do canal)	5 m
$s$ (declividade lateral do canal)	1
$se$ (declividade de fundo do canal)	0,005
$E$ (dispersão)	60 m <sup>2</sup> /s

Os lançamentos de cabeceira considerados na modelagem estão apresentados na Tabela 3. Os lançamentos incrementais no trecho modelado estão dispostos na Tabela 4. Para os demais lançamentos incrementais (parâmetros), as seguintes concentrações foram consideradas em cada trecho: nitrogênio orgânico, 15,6 mg.L<sup>-1</sup>; nitrogênio amoniacal, 40 mg.L<sup>-1</sup>; nitrogênio nitrito, zero mg.L<sup>-1</sup>; nitrogênio nitrato, zero mg.L<sup>-1</sup>; fósforo orgânico, 6,3 mg.L<sup>-1</sup> e fósforo inorgânico, zero mg.L<sup>-1</sup>. Os dados das vazões médias dos lançamentos de esgotos foram coletados a partir do trabalho realizado por VBA CONSULTORES (1998/1999) *apud* SABÓIA (2011).

Tabela 3 - Lançamentos de cabeceira

Cabeceira	Vazão (m <sup>3</sup> .L <sup>-1</sup> )	Temp. (°C)	OD (mg.L <sup>-1</sup> )	DBO (mg.L <sup>-1</sup> )	ALGAS (mg.L <sup>-1</sup> )
Açude Orós	5,0	28	7,8	2	0,005
Iracema	0,1	28	7,8	2	0,005
Tabuleiro do Norte	0,1	28	7,8	2	0,005
Banabuiú	0,1	28	7,8	2	0,005
Quixeré	0,1	28	7,8	2	0,005

Tabela 4 - Lançamentos incrementais

Trecho	Vazão (m <sup>3</sup> .L <sup>-1</sup> )	Temp. (°C)	OD (mg.L <sup>-1</sup> )	DBO (mg.L <sup>-1</sup> )	COLIFORMES (NMP/100ml)	ALGAS (mg.L <sup>-1</sup> )
1	0,0000	28	0	337	10000000	0
2	0,0000	28	0	337	10000000	0
3	0,0010	28	0	337	10000000	0
4	0,0150	28	0	337	10000000	0
5	0,0000	28	0	337	10000000	0
6	0,0000	28	0	337	10000000	0
7	0,0000	28	0	337	10000000	0
8	0,0070	28	0	337	10000000	0
9	0,0000	28	0	337	10000000	0
10	0,0030	28	0	337	10000000	0
11	0,0020	28	0	337	10000000	0
12	0,0130	28	0	337	10000000	0
13	0,0000	28	0	337	10000000	0
14	0,0050	28	0	337	10000000	0
15	0,0000	28	0	337	10000000	0
16	0,0250	28	0	337	10000000	0
17	0,0000	28	0	337	10000000	0
18	0,0030	28	0	337	10000000	0
19	0,0300	28	0	337	10000000	0
20	0,0040	28	0	337	10000000	0
21	0,0000	28	0	337	10000000	0
22	0,0110	28	0	337	10000000	0
23	0,0033	28	0	337	10000000	0
24	0,0360	28	0	337	10000000	0
25	0,0070	28	0	337	10000000	0

Quanto aos custos de tratamento dos efluentes, foi utilizada a tecnologia das lagoas de estabilização. De acordo com Dos Santos (2007) *apud* Sales (2010), o tipo de sistema realizado por lagoa facultativa seguida por lagoa de maturação é o mais utilizado no Nordeste. Lagoas de estabilização necessitam de grandes áreas e, por ter boa disponibilidade de insolação, a região Nordeste permite maior eficiência das lagoas. Assim, foram utilizados dados referentes aos custos de implantação de lagoas de estabilização compostas por uma lagoa facultativa seguida por duas lagoas de maturação (SALES, 2010).



O custo de uma estação de tratamento de esgotos depende do grau de eficiência e do mecanismo de tratamento que se objetiva. JORDÃO & PESSOA (2005) *apud* Sales (2010) apresentam alguns estudos econômicos de estações de tratamento de esgotos por lagoas de estabilização, implantados em várias regiões do país. De acordo com a Tabela 5, verifica-se que o custo médio de implantação per capita de uma ETE é de R\$ 69,29, e o custo médio de implantação por vazão de efluente tratada é de R\$ 33.241,45 por litro por segundo.

Tabela 5. Custo de implantação de ETE com lagoas de estabilização no Brasil.

<b>CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DE ETE COM LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO NO BRASIL</b>					
<b>ETE</b>	<b>Pop. (Hab.)</b>	<b>Vazão (L/s)</b>	<b>Custo Implantação (R\$)</b>	<b>Custo Implantação/Hab. (R\$/Hab.)</b>	<b>Custo Implantação/Vazão (L/s)</b>
Presidente Alves – SP	4.800	7,90	239.023,71	49,80	30.256,17
Adolfo – SP	5.700	9,50	210.329,67	36,90	22.139,97
Sete Barras – SP	12.296	29,00	984.660,49	80,08	33.953,81
Pariquera - Açu – SP	15.499	35,30	1.331.859,42	85,93	37.729,73
Piratinga – SP	21.000	34,70	1.549.154,10	73,77	44.644,21
ETE - Brazlândia – DF	29.600	86,00	2.642.336,73	89,27	30.724,85
<b>Média</b>				<b>R\$ 69,29</b>	<b>R\$ 33.241,45</b>

Fonte: JORDÃO & PESSOA (2005) *apud* Sales (2010).

Na Tabela 2, encontram-se dados referentes ao custo de implantação de ETE por distritos no estado do Ceará. A partir destes dados, foi possível obter uma equação para o cálculo dos custos médios de implantação de ETE no estado.

Tabela 6. Custo de implantação de ETE por vazão nos distritos pesquisados no estado do Ceará.

<b>Distrito</b>	<b>Total (R\$)</b>	<b>R\$/L/S</b>	<b>Eficiência (DBO (%))</b>
Araquém em Coreaú	833.090,1265	<b>118.390,8884</b>	98,8000
Alcântaras	1.547.451,1877	<b>51.031,4638</b>	98,7000
Porteiras	1.828.133,0173	<b>38.023,4231</b>	98,8600
Catarina	2.000.636,4659	<b>38.510,2230</b>	98,8600
Aurora	2.656.935,5948	<b>35.091,3264</b>	98,8500
Frecheirinha	2.263.723,3650	<b>36.830,2912</b>	98,5000
Coreaú	2.146.454,1306	<b>12.487,2173</b>	98,6100
Mucambo	2.549.975,8856	<b>20.970,6273</b>	98,8500
Barro	3.458.073,6725	<b>17.836,3474</b>	99,0000
Massapê	3.969.261,8490	<b>19.262,0024</b>	97,9600
Tauá	6.842.878,3208	<b>17.759,6603</b>	92,0900
Tianguá	3.152.185,8400	<b>6.814,2940</b>	-

Fonte: Adaptado de Sales (2010).

A curva de custo gerada pode ser observada na Figura 2, referente à relação entre os custos de implantação de ETE versus vazão dos efluentes gerados.

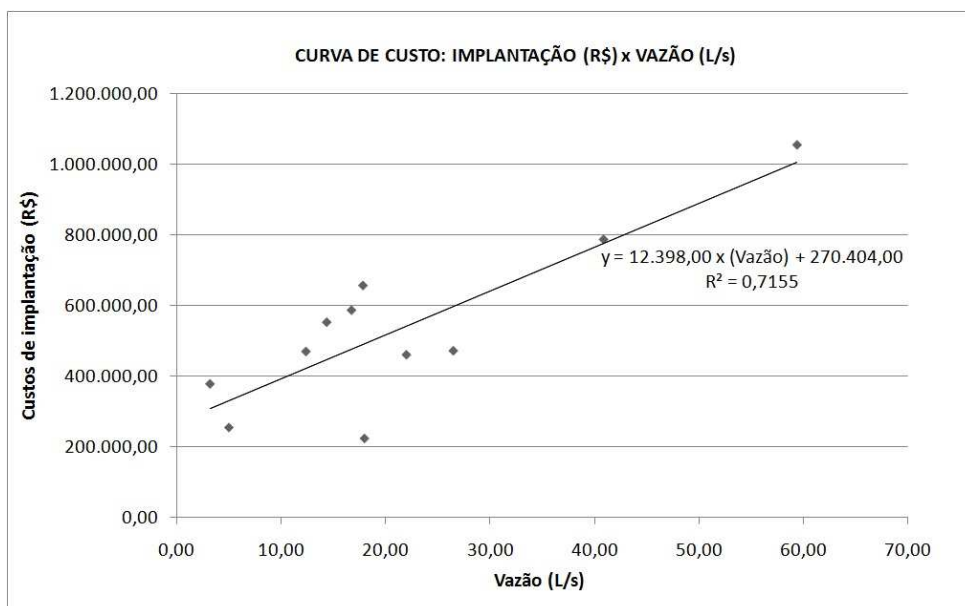


Figura 2. Relação entre os custos de implantação e a vazão de projeto de ETE para o estado do Ceará. Adaptado de SALES (2010).

Na Figura 3, a mesma curva foi gerada correspondente aos custos de implantação versus a população atendida. Os gráficos revelam uma forte correlação entre as variáveis analisadas, isto é, o custo total e o per capita comportam-se tendenciosamente à medida que se aumenta a população ou a vazão de tratamento no final do plano do projeto.

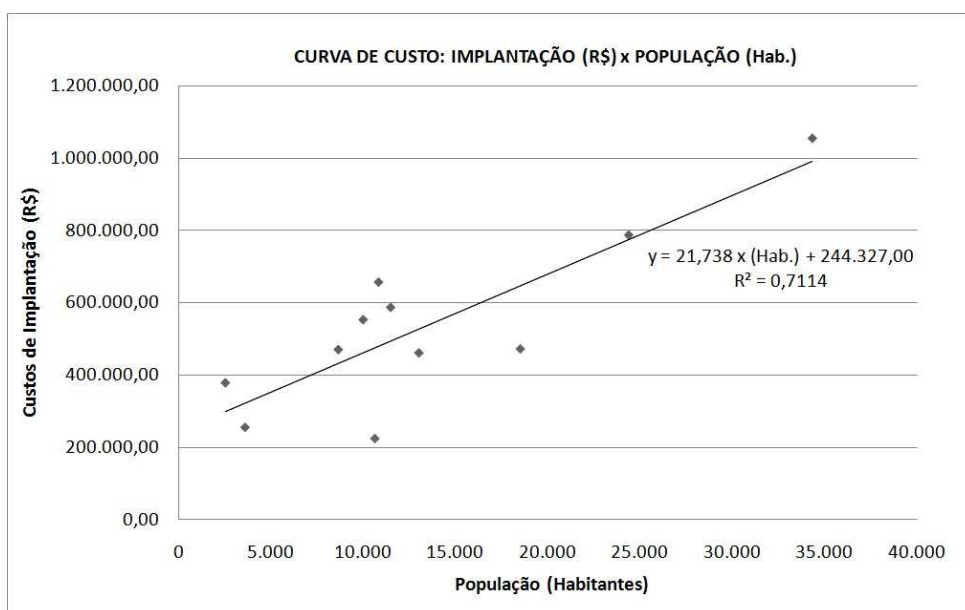


Figura 3. Relação entre o número de habitantes e os custos de implantação de ETE para o estado do Ceará. Adaptado de SALES (2010).

#### 4. RESULTADOS

Através do modelo QUAL2BR foi possível a simulação do cenário descrito, de acordo com as cargas efluentes consideradas, comparando os resultados obtidos e os custos referentes aos tratamentos da água. O nível de tratamento considerado no modelo numérico, segundo Sales (2010), pode ser visualizado na Tabela 7.

Tabela 7 - Níveis de tratamento adotado

Parâmetros	Nível de tratamento
DBO	85%
Fósforo Total	34%
Nitrogênio Total	59%
Coliformes	99.99%

Fonte: SALES, 2010.

Foi analisado o comportamento dos parâmetros de qualidade da água após o lançamento de esgoto com e sem tratamento prévio através de lagoas de estabilização. É possível notar pelos gráficos gerados que o incremento na qualidade da água relativo ao tratamento dos efluentes foi relevante. Todos os parâmetros analisados tiveram um aumento de qualidade, com exceção das algas, que permaneceu inalterada. Este fato foi devido à taxa de crescimento (no modelo numérico) ter sido considerada constante.

A concentração de coliformes, por sua vez, foi a que apresentou a queda mais significativa após o tratamento dos efluentes. Os valores médios passaram de concentrações de quase 180.000 NMP/100mL para apenas 18 NMP/100mL. Esta queda acentuada foi definitiva no enquadramento final do rio em classes de qualidade.

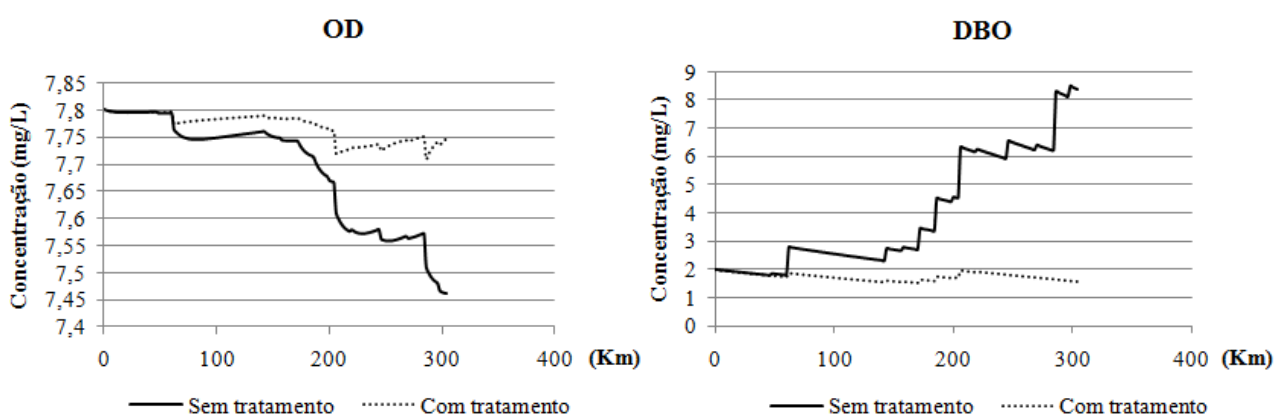


Figura 4. Níveis comparativos de OD e DBO devido ao lançamento dos efluentes tratados e não-tratados.

A simulação foi realizada utilizando-se uma vazão de referência de  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Quanto maior a vazão do rio, maior também a capacidade de diluição, e, assim, menor o impacto do efluente na qualidade da água. Este valor foi importante para potencializar os efeitos da entrada dos efluentes não tratados no sistema.

Na Figura 4 observa-se o comportamento do oxigênio dissolvido e da demanda bioquímica de oxigênio, comparando as concentrações finais desses parâmetros no final do trecho modelado. A linha tracejada é referente ao valor da concentração do parâmetro após o devido tratamento pelas lagoas de estabilização. A variação de  $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$  para o OD foi mínima em relação a algum impacto ambiental, mas para a DBO este quadro já foi mais relevante. Houve uma variação de  $7 \text{ mg.L}^{-1}$  aproximadamente, valor alto e importante para o enquadramento final do rio.

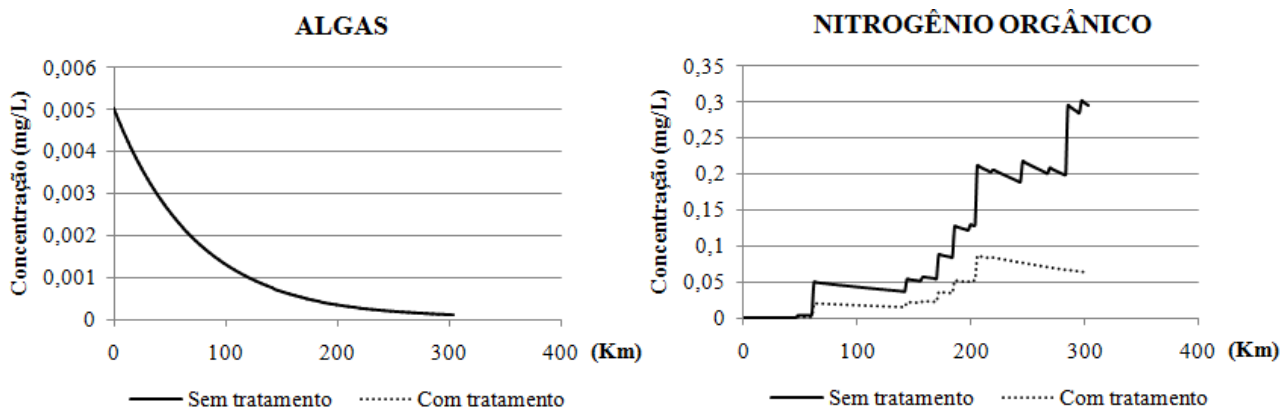


Figura 5. Níveis comparativos de Algas e Nitrogênio Orgânico devido ao lançamento dos efluentes tratados e não-tratados.

Na Figura 5 observa-se o comportamento das algas e do nitrogênio orgânico. As algas não apresentaram variação devido a consideração inicial de crescimento constante. Já para o nitrogênio orgânico pôde-se notar uma diminuição na concentração com o tratamento da água, de  $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$  para  $0,15 \text{ mg.L}^{-1}$ .

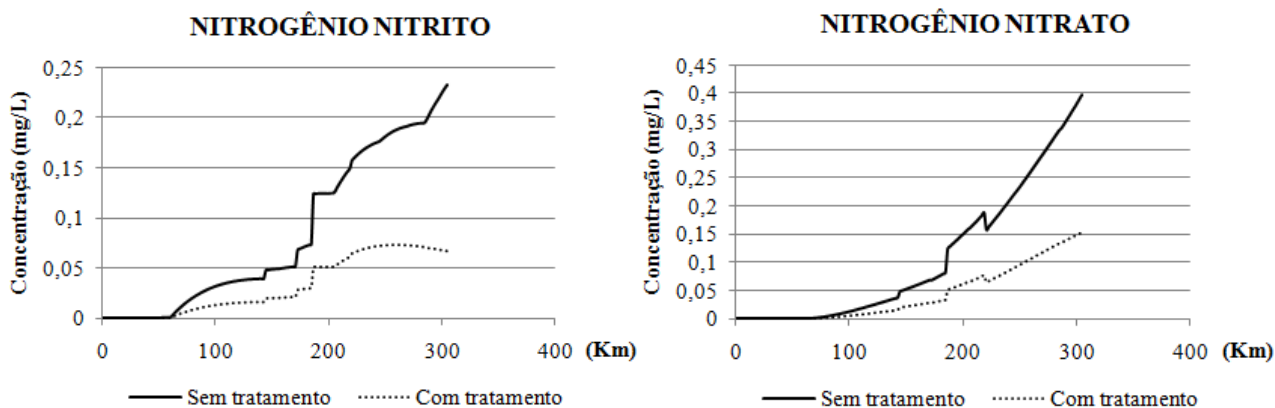


Figura 6. Níveis comparativos de Nitrito e Nitrato devido ao lançamento dos efluentes tratados e não-tratados.

Na Figura 6 observa-se a comparação dos parâmetros nitrito e nitrato. Ambos os componentes apresentaram redução significativa. O mesmo ocorreu com os parâmetros nitrogênio amoniacal e fósforo orgânico, mostrados na Figura 7.

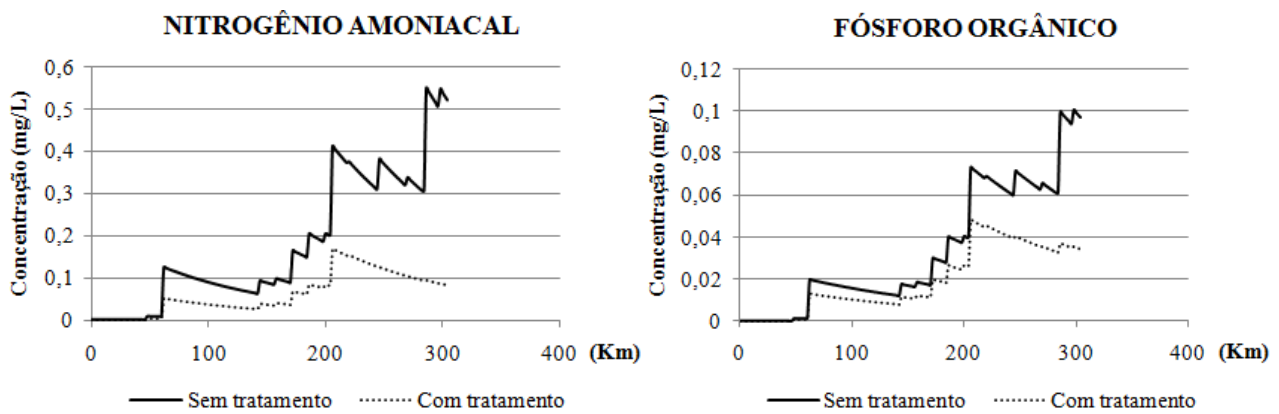


Figura 7. Níveis comparativos de Algas e Nitrogênio Orgânico devido ao lançamento dos efluentes tratados e não-tratados.

Finalmente, observa-se na Figura 8 o comportamento dos parâmetros fósforo inorgânico e coliformes. O primeiro sofreu uma pequena redução, algo em torno de  $0,03 \text{ mg.L}^{-1}$ . Para os coliformes, a redução foi bem expressiva, onde nota-se pelo gráfico que sem o tratamento da água a concentração final foi de 160.000 NMP/100mL, contra um valor próximo de zero NMP/100mL, se houvesse tido o tratamento pelas lagoas de estabilização.

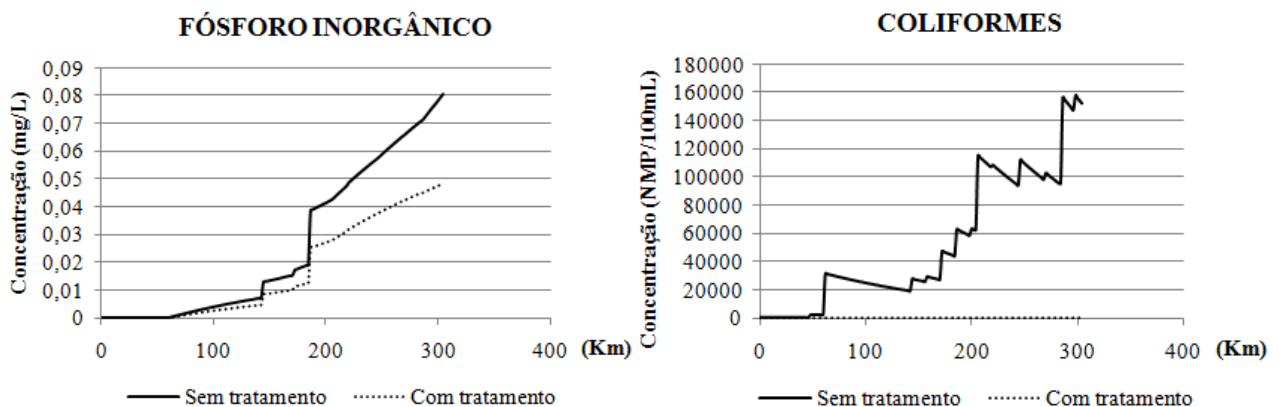


Figura 8. Níveis comparativos de Algas e Nitrogênio Orgânico devido ao lançamento dos efluentes tratados e não-tratados.

Após o tratamento dos efluentes, pôde-se perceber que para o cenário simulado, toda a extensão do rio foi classificada como classe 1, para vazão de referência adotada. Os parâmetros de qualidade da água simulados apresentam os seguintes valores máximos, referentes à classe 1, de acordo com a Resolução Conama 357:

- Clorofila  $\alpha$  (algas) =  $0,01 \text{ mg.L}^{-1}$
- Oxigênio dissolvido (OD) =  $6,0 \text{ mg.L}^{-1}$
- $\text{DBO}_5$  =  $3 \text{ mg.L}^{-1}$
- Nitrogênio Amoniacal Total =  $3,7 \text{ mg.L}^{-1}$
- Nitrogênio Nitrito =  $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$
- Nitrogênio Nitrato =  $10,0 \text{ mg.L}^{-1}$
- Fósforo Total =  $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$

- Coliformes = 200 NMP/100mL

Sem o tratamento dos efluentes, o rio tenderia a diminuir a qualidade, aumentando a classe de classificação de acordo com a concentração e volume dos efluentes, como observado no gráfico da Figura 9. Com o tratamento dos efluentes, nota-se que todo o trecho simulado está classificado como classe 1, baseando-se nos valores máximos estabelecidos na Resolução CONAMA 357 citados (Figura 10).

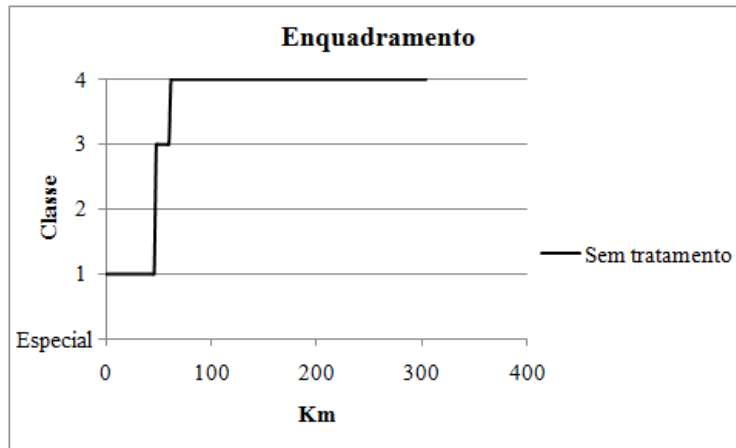


Figura 9. Enquadramento do rio ao final do percurso modelado sem o tratamento prévio das cargas efluentes.

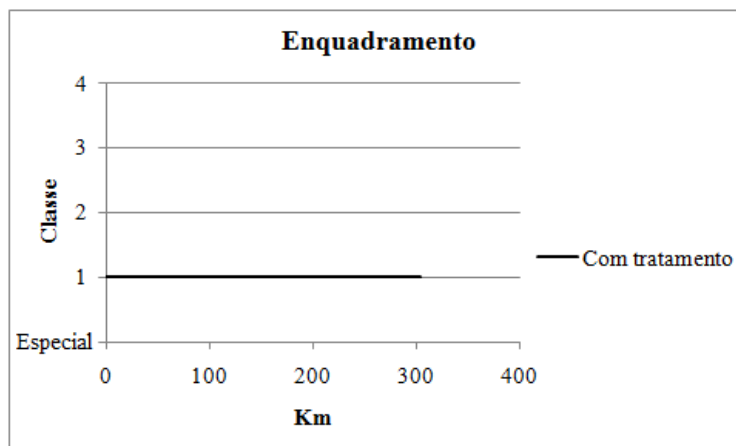


Figura 10. Enquadramento do rio ao final do percurso modelado com o tratamento prévio das cargas efluentes.

A brusca mudança na classe do rio, observado na Figura 9, foi devido ao rápido aumento da concentração de coliformes, após os lançamentos de esgoto sem o tratamento prévio.

A última análise realizada foi quanto aos custos de tratamento dos efluentes. A estimativa dos custos de tratamento para os lançamentos incrementais, de acordo com as equações de implantação de ETE por SALES (2010) e de acordo com as concentrações ao longo do rio, podem ser visualizados na Tabela 8, para cada trecho onde houve lançamento. O custo total de implantação de estações de tratamento de esgoto (ETE) para o tratamento de todos os lançamentos ao longo do trecho do rio seria de aproximadamente R\$ 6.714.643,20. Lembrando que seriam implantadas ETE's com lagoas de estabilização, seguidas por duas lagoas de maturação.

Tabela 8 - Custos de tratamento nos trechos onde houve lançamentos de efluentes.

Número do trecho	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Custo (R\$)
3	0,001	133.576,00
4	0,015	572.392,00
8	0,007	321.640,00
10	0,003	196.264,00
11	0,002	164.920,00
12	0,013	509.704,00
14	0,005	258.952,00
16	0,025	885.832,00
18	0,003	196.264,00
19	0,03	1.042.552,00
20	0,004	227.608,00
22	0,011	447.016,00
23	0,0033	205.667,20
24	0,036	1.230.616,00
25	0,007	321.640,00
<b>TOTAL</b>		6.714.643,20

Tratando todos os lançamentos incrementais, o custo total estimado para classificarmos o rio em classe 1 seria de R\$ 6.714.643,20. Este valor, referente à instalação de estações de tratamento de esgotos ao longo do trecho de rio simulado, é o valor teórico que teria de ser gasto para garantir a qualidade de classe especial para o rio Jaguaribe.

## 5. CONCLUSÕES

Foi possível realizar a modelagem numérica da qualidade da água no rio Jaguaribe, simulando cenários com e sem o tratamento dos efluentes considerados. O enquadramento do rio em classes de qualidade e a quantificação do custo de implantação de estações de tratamento de esgotos tiveram o objetivo de manter o rio na qualidade desejada.

Os resultados obtidos, a partir da utilização do modelo de qualidade da água em rios (QUAL2BR), foram satisfatórios. Os parâmetros de qualidade da água simulados, essenciais ao enquadramento dos corpos hídricos em classes de qualidade, foram calculados em vários cenários na Bacia do Jaguaribe. O estudo do comportamento desses parâmetros é de fundamental importância para a concessão de outorgas de lançamento de efluentes em determinados trechos.

A modelagem da qualidade da água é uma forte ferramenta que pode ser utilizada pelos gestores para o melhor aproveitamento dos recursos hídricos, sendo corretamente utilizada pode gerar grande economia de capital e de tempo. Contudo, ainda não é amplamente utilizada, principalmente no estado do Ceará.

A realização do estudo de quantificação dos custos de implantação de estações de tratamento de esgotos, de forma a permitir que o rio mantenha a qualidade da água necessária para os seus usos

mais preponderantes, foi um dos objetivos deste estudo. Recomenda-se que seja implementado no programa uma rotina de otimização de redes de estações de tratamento, para que a qualidade da água desejada seja alcançada através do menor custo de tratamento possível.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos e ao DEHA (Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental) da Universidade Federal do Ceará, pelo apoio e estrutura fornecida.

## BIBLIOGRAFIA

BROWN, L.C; BARNWELL Jr., T.O. (1987). *The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual*. Environmental Research and Development U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia, 189p.

CHAPRA, S. C (1997). *Surface water-quality modeling*. McGraw-Hill, New York. 844 p.

FRAGOSO Jr., Carlos Ruberto; MARQUES, David de Motta; FERREIRA, Tiago Finkler (2009). *Modelagem ecológica em ecossistemas aquáticos*. São Paulo: Oficina de Textos, 304p.

SABÓIA, M. A. M. (2011). *Desenvolvimento de modelo de qualidade da água em rios com vistas a avaliação custo-efetividade do enquadramento dos corpos de água*. 176f. Dissertação apresentada ao curso de Engenharia Civil (Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza).

SALES, F. A. T. C (2010). *Análise econômica de estações de tratamento de esgoto*. 2010. 89f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SOUZA, R. S (2006). *Simulação Hidrodinâmica da qualidade da água. Estudo de caso: Ajuste do modelo CE-QUAL-W2 à sub-bacia do Arroio Demétrio, bacia hidrográfica do Rio Gravataí/RS*. 156f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

TEIXEIRA, C. A. (2004). *Gerenciamento integrado de quantidade e qualidade de água*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 273f.

STREETER, H. W.; E. B. PHELPS (1925). *Studies of the pollution and natural purification of the Ohio River*. Public Health Bulletin, n. 146, 80 p.