

ESTUDO DOS IMPACTOS NA QUALIDADE DA ÁGUA PROVOCADOS PELA IMPLANTAÇÃO DO TRATAMENTO DE ESGOTOS NA BACIA DO RIO PARÁ

Ana Maria Alvim¹ & Célia Regina Alves Rennó²

RESUMO – Este trabalho apresenta uma simulação do balanço de oxigênio dissolvido na bacia do rio Pará, visando prever as alterações resultantes nas concentrações de oxigênio dissolvido dos mananciais, decorrentes da implantação do tratamento de esgoto nos municípios desta bacia. Utilizou-se para isto a modelagem clássica de Streeter e Phelps (1925), com calibração efetuada a partir dos registros disponibilizados pelo IGAM no programa Águas de Minas. A estimativa das características hidráulicas das seções transversais e das vazões consideradas nos cenários estudados foi efetuada a partir dos registros de medições de vazão dos mananciais mais relevantes, disponibilizados pela Agência Nacional de Águas em sua rede básica Nacional de monitoramento hidrológico. Estimou-se inicialmente com a população atual, qual seria a evolução das concentrações de oxigênio dissolvido e DBO ao longo dos mananciais nos anos estudados e, uma vez calibrado o coeficiente de reaeração K_2 , simulou-se tal evolução para a vazão mínima $Q_{7,10}$. Simulou-se qual seria a alteração deste cenário após a implantação do tratamento de esgoto nas comunidades desta bacia hidrográfica, e em seguida, considerando-se as populações estimadas para os anos de 2020 e 2030.

ABSTRACT – This paper presents a Dissolved Oxygen model development for the Pará river basin, which previews the changing on DO concentration in the rivers due to the implementation of the Sewage Treatment Plants on all the municipalities of the area. To do that, the Streeter Phelps Model (1925) was used, and the model calibration was done with the existing registered data from the Minas Gerais Water Program developed by IGAM. The hydraulic characteristics of all river sections and the rivers flow patterns were developed based on the water flow data given by the National Water Agency (ANA), which runs the National Basic Water Monitoring Network. Considering first today's population of the area being served with sewage system (2010), it was previewed for the minimum flow $Q_{7,10}$ how the DO and BOD concentrations of the water would vary along the river, for a given and calibrated reaeration coefficient K_2 . Then this scenario was runned with all Water Sewage Treatment Plant implemented on the river basin, and finally the same model was runned with the estimated population of the area on the years of 2020 and 2030.

Palavras-chave : Qualidade da água, Balanço de Oxigênio Dissolvido, Esgoto

¹ Engenheira da Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais, Rua Mar de Espanha 525 Belo Horizonte, MG , fone: 3250 1652, E-mail : ana.alvim@copasa.com.br

² Engenheira da Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais, Rua Mar de Espanha 525 Belo Horizonte, MG , fone: 3250 6328, E-mail : Celia.renno@copasa.com.br

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta um estudo do balanço de oxigênio dissolvido na bacia do rio Pará, visando prever as alterações resultantes nas concentrações de oxigênio dissolvido dos mananciais, decorrentes da implantação das estações de tratamento de esgoto nos municípios desta bacia hidrográfica. Tal metodologia tem sido utilizada pela COPASA em diversas bacias hidrográficas, visando fornecer subsídios para priorização da implantação do tratamento de esgoto nas comunidades onde os esgotos são lançados in natura, de forma a maximizar os seus efeitos sobre os cursos d'água.

Para isto, efetuou-se a simulação do balanço de oxigênio para cenários críticos, utilizando-se a modelagem clássica de Streeter e Phelps (1925). A calibração do balanço de oxigênio dissolvido foi efetuada a partir dos registros disponibilizados pelo IGAM no programa Águas de Minas. A estimativa das características hidráulicas das seções transversais e das vazões consideradas nos cenários estudados foi efetuada a partir dos registros de medições de vazão dos rios Pará, Lambari, Itapecerica e São João, disponibilizados pela Agência Nacional de Águas em sua rede básica Nacional de monitoramento hidrológico.

Os valores do coeficiente de reaeração (K_2) foram estimados a partir do modelo apresentado por O'Connor & Dobbins (1958), baseado em dados hidráulicos do curso d'água, e calibrados a partir dos registros de qualidade da água das estações operadas pelo IGAM, disponibilizados no projeto Águas de Minas. Nesta calibração, foram utilizados os registros de qualidade relativos ao período de 2000 a 2009.

Estimou-se inicialmente com a população atual, qual seria a evolução das concentrações de oxigênio dissolvido e DBO ao longo do rio nos anos estudados e, uma vez calibrado o coeficiente de reaeração K_2 , simulou-se tal evolução para a vazão mínima $Q_{7,10}$. Simulou-se qual seria a alteração destes cenários após a implantação do tratamento de esgoto nas comunidades desta bacia hidrográfica, com eficiência de remoção de 90%. Em seguida, tais cenários foram simulados considerando-se a população estimada para os anos de 2020 e 2030.

2. EQUACIONAMENTO

As simulações do balanço de oxigênio dissolvido foram efetuadas utilizando o modelo de Streeter-Phelps, onde as cinéticas da desoxigenação e da reaeração acontecem somente sob o efeito

da dispersão longitudinal (Von Sperling M., 2007). Considerando que a taxa de oxidação da matéria orgânica seja proporcional à matéria orgânica ainda remanescente em um tempo qualquer, a progressão da DBO ao longo do tempo pode ser descrita pela equação 2.1 a seguir.

$$L = L_0 \cdot e^{-K_1 t} \quad (2.1)$$

Onde:

L = DBO remanescente em um tempo t qualquer (mg/l)

L_0 = DBO remanescente em $t=0$ (mg/l)

K_1 = coeficiente de desoxigenação (base e) (dia^{-1})

O coeficiente de desoxigenação observado em rios é um pouco mais elevado que aquele determinado através do teste da DBO em laboratório devido aos processos de sedimentação e remoção de DBO pelo lodo de fundo. Sendo assim o coeficiente de decomposição da DBO no rio, incorporando a decomposição da matéria orgânica pela biomassa suspensa na massa líquida, bem como pela biomassa no lodo de fundo, é denominado K_d .

No processo de reaeração atmosférica, a taxa de absorção de oxigênio é diretamente proporcional ao déficit existente. Para a situação relativamente simples em que se considera apenas a desoxigenação e a reaeração atmosférica no balanço do oxigênio dissolvido, a integração da equação diferencial que expressa a taxa de variação do déficit de oxigênio com o tempo, a qual é advinda da interação das equações de desoxigenação e reaeração leva à equação 2.2 a seguir para expressar a concentração de oxigênio dissolvido em um instante de tempo t .

$$C_t = C_s - \left\{ \frac{K_d \cdot L_0}{K_2 - K_d} \cdot (e^{-K_d t} - e^{-K_2 t}) + (C_s - C_0) e^{-K_2 t} \right\} \quad (2.2)$$

Onde:

C_t = Concentração de oxigênio em um instante de tempo t (mg/l)

C_0 = Concentração inicial de oxigênio, logo após a mistura (mg/l)

C_s = Concentração de saturação de oxigênio (mg/l)

K_2 = Coeficiente de reaeração (base e) (dia^{-1})

K_d = Coeficiente de remoção da DBO (base e) (dia^{-1})

Para utilização desta equação, todos os coeficientes e variáveis são constantes, à exceção de C_t e t . Assim para diversos valores de t , ou diversas distâncias a partir do ponto inicial do rio, foram calculados os valores de C_t correspondentes. Neste modelo, os cálculos são baseados na demanda

última de oxigênio (L_0), e não na demanda de cinco dias (DBO_{5_0}). A conversão da demanda de cinco dias em demanda última é efetuada pelo fator de conversão K_t .

$$L = L_0 \cdot e^{-K_1 t} \quad (2.3)$$

Onde:

L = DBO remanescente em um tempo t qualquer (mg/L)

L_0 = DBO remanescente em $t=0$ (mg/L)

K_1 = Coeficiente de desoxigenação

Sendo o fator de conversão K_t definido por:

$$K_t = \frac{DBO_u}{DBO_5} = \frac{1}{1 - e^{-5 \cdot K_1}} \quad (2.4)$$

Nos pontos de entrada dos diversos tributários do rio principal e dos esgotos, as concentrações de OD e DBO resultantes da mistura das águas dos esgotos, do rio e dos tributários são dadas pelas equações 2.5 e 2.6 a seguir.

$$C_0 = \frac{Q_r \cdot OD_r + Q_e \cdot OD_e + Q_t \cdot OD_t}{Q_r + Q_e + Q_t} \quad (2.5)$$

$$DBO_{5_0} = \frac{(Q_r \cdot DBO_r + Q_e \cdot DBO_e + Q_t \cdot DBO_t)}{Q_r + Q_e + Q_t} \quad (2.6)$$

onde:

C_0 = Concentração inicial de oxigênio, logo após a mistura (mg/L)

Q_r = Vazão do rio a montante do lançamento dos despejos (m^3/s)

Q_t = Vazão do tributário (m^3/s)

Q_e = Vazão de esgoto (m^3/s)

OD_r = Concentração de OD no rio, a montante do lançamento dos despejos (mg/l)

OD_t = Concentração de oxigênio dissolvido no tributário

OD_e = Concentração de oxigênio dissolvido no esgoto

DBO_{5_0} = Concentração de DBO₅, logo após a mistura (mg/l)

DBO_r = Concentração de DBO₅ do rio (mg/l)

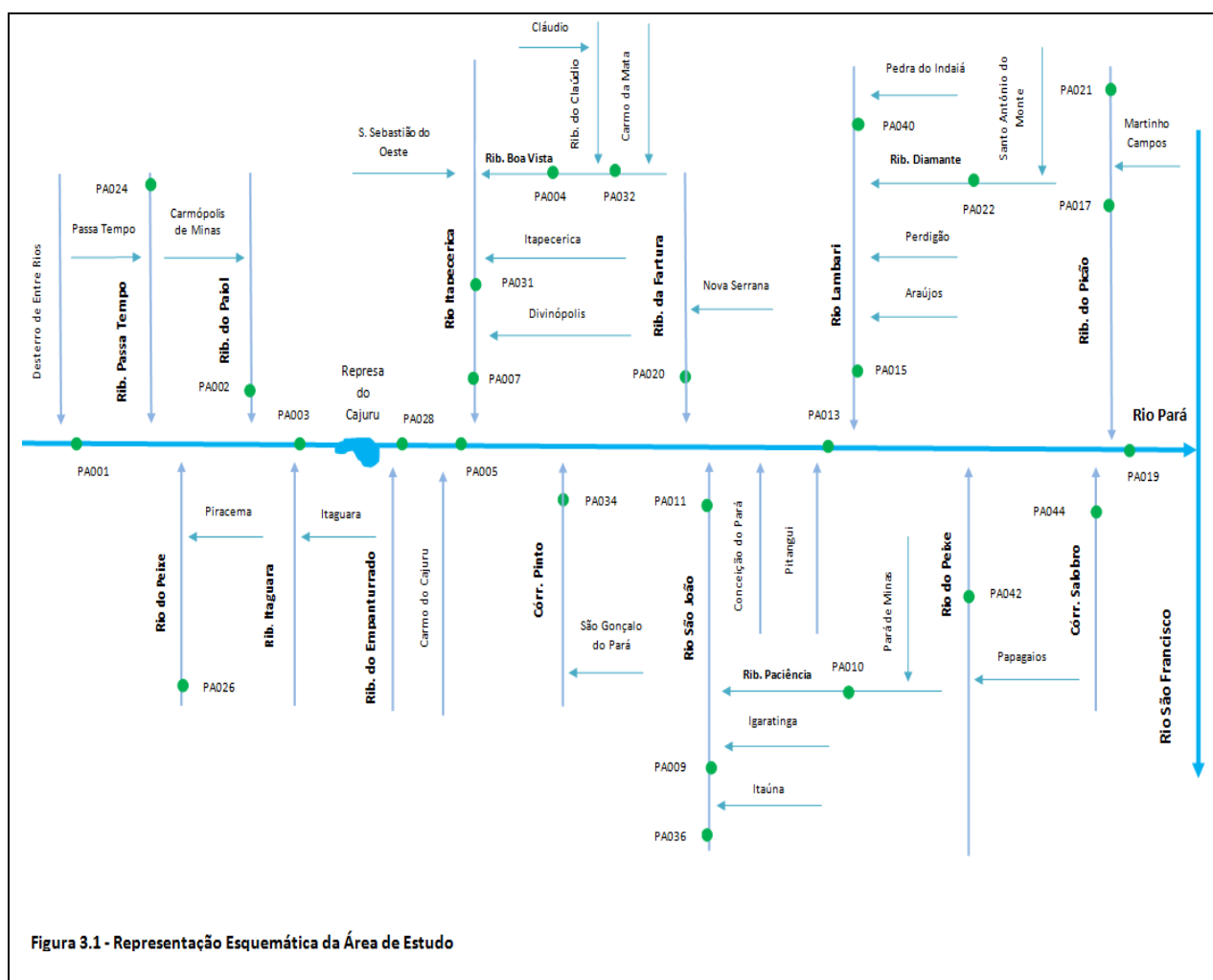
DBO_t = Concentração de DBO₅ do tributário (mg/l)

DBO_e = Concentração de DBO₅ esgoto

3. ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES E VARIÁVEIS DA MODELAGEM

3.1 Caracterização do Trecho Estudado

O rio Pará e seus afluentes foram representados por trechos sequenciais, representados de forma esquemática na figura 3.1, para os quais foram admitidas como constantes as características físicas, hidráulicas e os coeficientes de reação dos diferentes parâmetros em estudo. A estimativa das áreas das bacias e distâncias entre os nós foi efetuada pelo programa Map-Info, e a base cartográfica digitalizada do Geominas. O mapa da bacia está apresentado na figura 3.2 a seguir. Todas as alterações de vazões e cargas poluidoras foram processadas no início de cada trecho, onde são lançadas as vazões dos tributários com as suas respectivas concentrações dos parâmetros de qualidade, e as vazões incrementais de montante, que engloba os tributários menos significativos e as contribuições diretas para o trecho estudado.



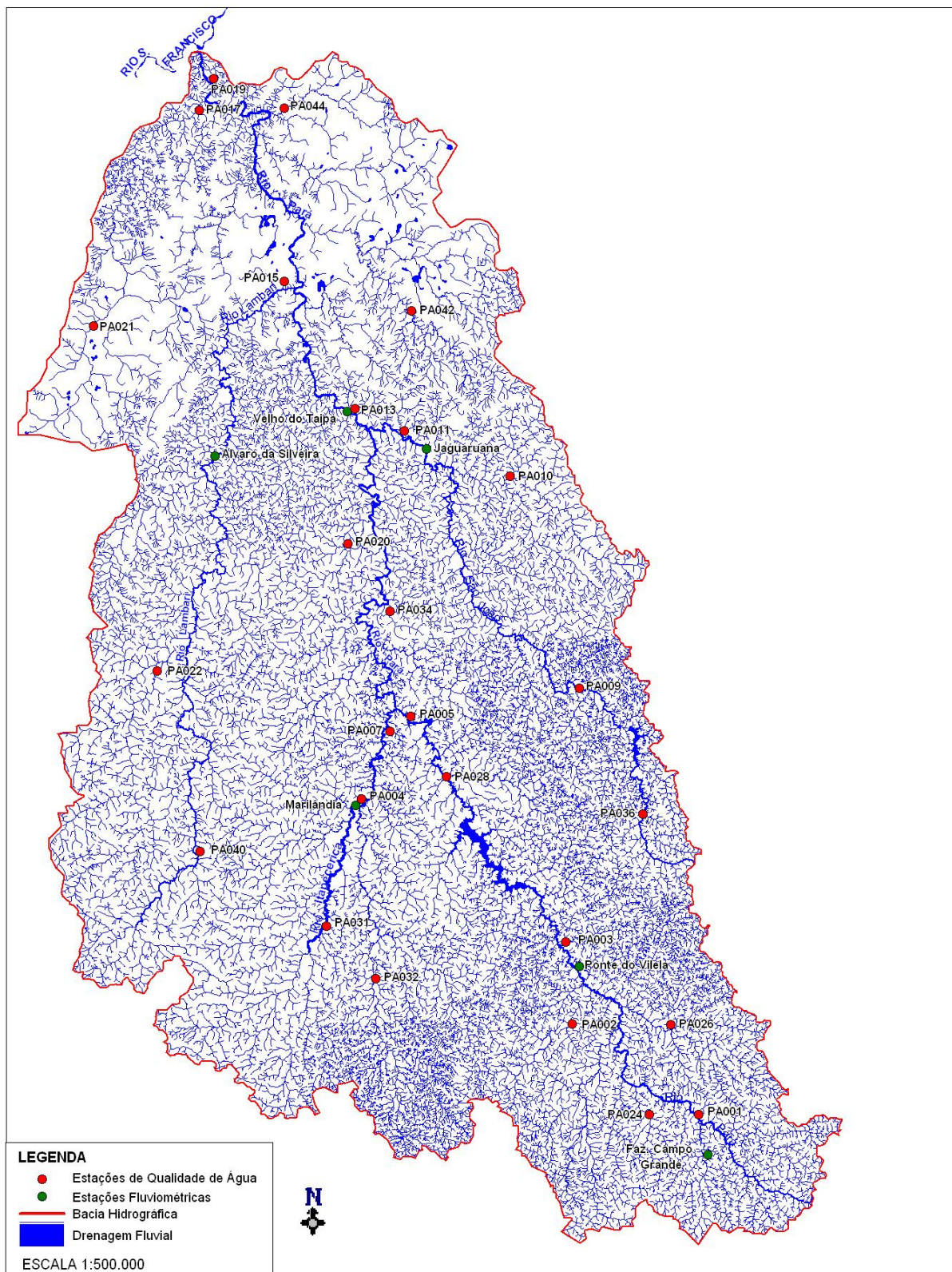


Figura 3.2 – rio Pará - mapa da bacia

3.2 Variáveis Hidráulicas e Hidrológicas

Para estimativa das vazões e velocidades utilizadas como base, foram utilizados os registros de monitoramento hidrológico da bacia hidrográfica nas estações fluviométricas apresentadas na tabela 3.1, cujas localizações estão indicadas no mapa da figura 3.2.

TABELA 3.1 – REDE HIDROMÉTRICA UTILIZADA						
Manancial	Estação	Código	Coordenadas		Área de drenagem (Km ²)	Operação
			Latitude	Longitude		
Rio Pará	Fazenda Campo Grande	40105000	20° 41' 00"	44°25' 00"	361	1939 /1980
Rio Pará	Ponte do Vilela	40130000	20° 26' 00"	44°36' 00"	1650	1938/1980
Rio Pará	Velho da Taipa	40330000	19°41'38"	44°55'51"	7330	1938/2005
Rio Pará	Carmo do Cajuru	40150000	20°10'52"	44°47'38"	2500	1949/2005
Rio Lambari	Álvaro da Silveira	40400000	19° 45' 11"	45°07' 03"	1820	1935/2005
Rio São João	Jaguaruna-Jusante	40300001	19°44' 37"	44°49' 06"	1560	1938/2005
Rib. Fartura	Lamounier	40160000	20°28' 00"	45°01' 00"	157	1938/1965
Rio Picão	Martinho Campos	40500000	19°19' 54"	45°13' 17"	769	1965/2005
Rio Itapecerica	Marilândia	40170000	20°12' 58"	44°55' 06"	1040	1965/2005

Em cada estação, efetuou-se a correlação entre as vazões medidas e as respectivas velocidades e profundidades médias nos dias das medições. As equações que expressam as velocidades em função das vazões foram determinadas por regressão linear. Com estas equações, foram determinadas as respectivas velocidades médias para as vazões dos cenários simulados. De forma similar, foram efetuadas as correlações entre as vazões medidas e as respectivas profundidades médias. As velocidades nas seções onde não existem estações fluviométricas foram determinadas adotando-se as correlações vazão/velocidade da estação mais próxima. As vazões $Q_{7,10}$ nas estações acima relacionadas foram estimadas através do estudo de frequência de vazões médias mensais mínimas anuais, onde foram obtidas as vazões $Q_{30,10}$, estimando-se que as vazões $Q_{7,10}$ fossem consideradas como sendo 10% menores que as respectivas vazões $Q_{30,10}$. A distribuição de frequência utilizada foi a de Weibull, por ser mais apropriada para o estudo de eventos extremos mínimos. Os resultados obtidos para as vazões específicas estão apresentados na tabela 3.2.

TABELA 3.2 – VAZÕES MÍNIMAS $Q_{7,10}$ NAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS ESTUDADAS				
Manancial	Estação	Vazão $Q_{7,10}$ (m³/s)	Área de Drenagem (Km²)	Vazão específica $q_{7,10}$ (l/s/Km²)
Rio Pará	Fazenda Campo Grande	1,63	361	4,06
Rio Pará	Ponte do Vilela	6,58	1650	3,59
Rio Pará	Velho da Taipa	26,0	7330	3,2
Rio Para	Carmo do Cajuru	12,51	2500	4,5
Rio Lambari	Álvaro da Silveira	5,0	1820	2,5
Rio São João	Jaguaruna-Jusante	4,5	1525	2,7
Rio Itapecerica	Marilândia	3,29	1040	2,9
Ribeirão Fartura	Lamounier	0,53	157	3,04
Rio Picão	Martinho Campos	1,5	769	1,76

Os valores das vazões mínimas nos trechos estudados, juntamente com as respectivas estações adotadas nesta estimativa e as distâncias entre as seções, estão apresentadas nas tabelas 3.3 e 3.4. As localidades cujos despejos de esgoto foram considerados no balanço de oxigênio dissolvido, estão também relacionadas nas tabelas 3.3 e 3.4.

TABELA 3.3 – RIO PARÁ - VAZÕES $Q_{7,10}$ ESTIMADAS NAS DIVERSAS SEÇÕES DO MODELO DE SIMULAÇÃO DO BALANÇO DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO					
SEÇÃO	Área de drenagem (Km²)	Vazões específicas $Q_{7,10}$ (l/s/Km²)	Vazões $Q_{7,10}$ (m³/s)	Comprimento do trecho (Km)	Estação fluviométrica adotada
Desterro de Entre Rios	386,7	4,0	1,547	13,73	Faz. Campo Grande
Enc. c/ rib. Passa Tempo	513,9	4,0	2,056	15,2	Ponte do Vilela
Enc. c/ rio do Peixe	929	4,0	3,716	13,87	Ponte do Vilela
Enc. c/ ribeirão Paiol	1499	3,6	5,396	10,06	Ponte do Vilela
Enc. c/ ribeirão Itaguara	1721	3,6	6,196	46,82	Ponte do Vilela
Final da represa Cajuru	2287	4,5	10,292	12,27	Carmo do Cajuru
Enc. c/ rib. Empanturrado Carmo do Cajuru	2515	4,5	11,318	21,1	Carmo do Cajuru
Enc. c/ rio Itapecerica	4641	3,2	14,851	35,7	Velho da Taipa
Enc. c/ córrego Pinto S. Gonçalves do Pará	5236	3,2	16,755	14,22	Velho da Taipa
Enc. com ribeirão Fartura	5447	3,2	17,430	26,07	Velho da Taipa
Enc. c/ rio S. João Pitangui, Conc. do Pará	7311	3,2	23,395	33,96	Velho da Taipa
Enc. com rio Lambari	9880	3,2	31,616	13,36	Velho da Taipa
Encontro c/ rio do Peixe	10520	3,2	33,664	24,62	Velho da Taipa
Enc. c/ córrego Salobro	11270	3,2	36,064	13,35	Velho da Taipa
Enc. com ribeirão Picão	12230	3,2	39,136	3,92	Velho da Taipa
Foz no rio São Francisco	12270	3,2	39,264	5,89	Velho da Taipa

TABELA 3.4 – TRIBUTÁRIOS DO RIO PARÁ - VAZÕES $Q_{7,10}$ ESTIMADAS NAS DIVERSAS SEÇÕES DO MODELO DE SIMULAÇÃO DO BALANÇO DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO					
MANANCIAL / SEÇÃO	Área de drenagem (Km²)	Vazões específicas $Q_{7,10}$ (l/s/Km²)	Vazões $Q_{7,10}$ (m³/s)	Comprimento do Trecho (Km)	Estação fluviométrica adotada
Ribeirão Passa Tempo	58,76	4,0	0,235	6,57	Fazenda Campo Grande
Rio do Peixe Piracema	224,6	4,0	0,898	10,2	Fazenda Campo Grande
Ribeirão Paiol Carmópolis de Minas	162,7	2,9	0,472	9,11	Marilândia (rio Itapecerica)
Ribeirão Itaguara Itaguara	88,3	2,9	0,256	15,01	Marilândia (rio Itapecerica)
Ribeirão do Claudio Claudio	172	2,9	0,499	2,5	Marilândia (rio Itapecerica)
Rib. Boa Vista Carmo da Mata	329,5	2,9	0,956	34,48	Marilândia (rio Itapecerica)
Rio Itapecerica Itapecerica	572,4	2,9	1,66	26,59	Marilândia
Rio Itapecerica Enc. com rib. Boa Vista São Sebastião do Oeste	1825	2,9	5,293	31,78	Marilândia
Rio Itapecerica Divinópolis	2004	2,9	5,812	3,95	Marilândia
Córrego Pinto	20,31	3,0	0,061		Lamounier (rib. Fartura)
Rib. Fartura Nova Serrana	55,12	3,0	0,165	9,07	Lamounier
Rio S. João PA 036	93,46	2,7	0,252	52,31	Jaguaruna
Rio S. João Itaúna	412	2,7	1,112	33,1	Jaguaruna
Rio S. João Igaratinga	766	2,7	2,068	31,1	Jaguaruna
Rio S. João Enc. com rib. Paciência	1479	2,7	3,993	15,0	Jaguaruna
Rib. Paciência Pará de Minas	257	2,7	0,694	11,5	Jaguaruna
Rio Lambari Pedra do Indaiá	266,6	2,5	0,667	41,39	Álvaro da Silveira
Rio Lambari Encontro c/ rib. Diamante	862	2,5	2,155	23,84	Álvaro da Silveira
Rio Lambari Perdigão e Araújo	1015	2,5	2,538	77,8	Álvaro da Silveira
Ribeirão Diamante Santo Antônio do Monte	244,7	2,5	0,612	7,02	Álvaro da Silveira
Rio do Peixe Papagaios	174,2	2,7	0,470	33,38	Jaguaruna
Córrego Salobro	113,7	2,7	0,307	2,13	Jaguaruna
Rib. Picão Martinho Campos	290,8	1,8	0,523	49,09	Martinho Campos
Rib. Picão Encontro com rio Pará	899,1	1,8	0,618	1,95	Martinho Campos

Na calibração do balanço de oxigênio dissolvido, a estimativa das vazões do rio Pará e dos seus tributários nos dias das coletas de qualidade da água foi efetuada a partir dos registros das estações

atualmente operantes. As estações desativadas são Fazenda Campo Grande e Ponte do Vilela, no rio Pará e Lamounier no ribeirão Fartura. Para estimativa das vazões nos dias de coleta, nos trechos onde foram adotados registros destas estações, utilizaram-se os registros da estação Velho da Taipa, multiplicados pelo coeficiente de correlação entre as respectivas vazões específicas $Q_{7,10}$. Para a estação Fazenda Campo Grande, este coeficiente é igual a 1,26, para a Ponte do Vilela, o valor é de 1,12 e para Lamounier 1,05.

3.3 Parâmetros de Qualidade da Água

A calibração do modelo do balanço de oxigênio dissolvido foi efetuada a partir dos registros de qualidade da água dos mananciais desta bacia hidrográfica, disponibilizados pelo IGAM no programa Águas de Minas. Foram utilizados os registros de concentrações de Oxigênio Dissolvido e DBO destes mananciais relativos ao período de 2000 a 2009. As estações de qualidade têm suas localizações indicadas no mapa da figura 3.2 e na representação esquemática da figura 3.1. Os registros utilizados na calibração, relativos ao mês de outubro de cada ano, estão apresentados nas tabelas 3.5 a 3.8. As concentrações iniciais de oxigênio dissolvido nas águas de cabeceiras dos mananciais envolvidos foram consideradas como sendo iguais à concentração de saturação deste parâmetro, que depende da temperatura e altitude. Foi adotado o valor de 8,0 mg/l para esta bacia (Von Sperling M., 2007). A DBO das águas de cabeceira foram consideradas iguais a 2,0 mg/l, que é o menor valor detectável nas análises deste parâmetro. Uma vez caracterizada a qualidade das águas de cabeceira, foram sendo introduzidas as cargas de DBO dos esgotos das comunidades localizadas nesta bacia hidrográfica.

TABELA 3.5– CONCENTRAÇÕES DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO NAS ESTAÇÕES DE QUALIDADE UTILIZADAS NA CALIBRAÇÃO – MÊS DE OUTUBRO DOS ANOS INDICADOS RIO PARÁ						
ANOS	ESTAÇÃO					
	PA-01 Passa Tempo	PA-03 Enc.c/rib. Itaguara	PA-05 Enc.c/rio Itapecerica	PA-013 Enc.c/ rio.S.João	PA-019 Enc.c/ rib. Picão	PA-028 Carmo do Cajuru
2000	7,7	7,9	7,2	7,7	8,8	-
2001	7,6	7,6	6,5	6,8	7,6	-
2002	7,9	8,1	7,8	8,1	8,5	-
2003	7,7	7,7	7,3	6,9	6,8	-
2004	8,1	8,1	7,0	7,8	7,6	-
2005	7,0	7,2	6,7	6,7	6,3	-
2006	7,5	6,8	6,7	5,9	6,0	-
2007	7,6	6,8	6,6	6,8	7,1	6,4
2008	7,9	6,9	6,9	6,4	6,4	6,4
2009	7,6	6,4	6,8	6,9	6,8	7,3

TABELA 3.6 – CONCENTRAÇÕES DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO NAS ESTAÇÕES DE QUALIDADE UTILIZADAS NA CALIBRAÇÃO – MÊS DE OUTUBRO DOS ANOS INDICADOS – RIOS ITAPECERICA E SÃO JOÃO						
ANOS	ESTAÇÃO					
	PA-031 R.Itapecerica Itapecerica	PA-004 R.Itapecerica Rib. B.Vista	PA-007 R.Itapecerica Divinópolis	PA-036 R. S.João S.João	PA-009 R. S.João Itaúna	PA-011 R. S.João Enc.Paciência
2000	-	6,7	5,6	-	6,1	6,1
2001	-	6,8	5,6	-	5,2	5,8
2002	-	7,1	5,2	-	5,1	6,6
2003	-	5,7	5,3	-	5,7	5,8
2004	-	7,2	6,7	-	5,9	5,9
2005	-	6,5	6,8	-	5,3	6,1
2006	-	6,4	6,3	-	5,7	5,4
2007	-	6,6	6,2	7,0	5,0	5,5
2008	6,6	6,9	6,7	7,3	5,5	4,0
2009	6,4	7,0	6,9	6,7	6,3	6,2

TABELA 3.7 – CONCENTRAÇÕES DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO NAS ESTAÇÕES DE QUALIDADE UTILIZADAS NA CALIBRAÇÃO – MÊS DE OUTUBRO DOS ANOS INDICADOS MANANCIAS INDICADOS						
ANOS	ESTAÇÃO					
	PA-040 R.Lambari P.Indaia	PA-015 R.Lambari Perdigão	PA-017 R.Picão Enc.c/rioPará	PA-002 Rib.Paiol Carmópolis	PA-032 R.B.Vista C.da Mata	PA-022 R Diamante S.A Monte
2000	-	7,2	6,6	5,1	-	-
2001	-	7,2	6,2	4,4	-	-
2002	-	8,0	6,6	-	-	-
2003	-	7,4	5,6	0,5	-	-
2004	-	7,0	6,5	2,5	-	-
2005	-	7,2	4,3	3,6	-	5,0
2006	-	6,7	5,0	4,7	-	5,3
2007	6,8	6,8	5,5	3,6	7,0	6,3
2008	6,3	6,9	4,7	2,6	6,5	5,2
2009	6,7	7,1	5,6	4,4	6,7	6,1

TABELA 3.8 – CONCENTRAÇÕES DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO NAS ESTAÇÕES DE QUALIDADE UTILIZADAS NA CALIBRAÇÃO – MÊS DE OUTUBRO DOS ANOS INDICADOS MANANCIAS INDICADOS							
ANOS	ESTAÇÃO						
	PA-024 RioPassaT empo P.Tempo	PA-003 Ribeirão Itaguara Itaguara	PA-034 Corrego.Pi nto S.Gonç do Para	PA-020 Ribeirão Fartura N.Serrana	PA-042 R.do Peixe Papagaios	PA-044 Córrego Salobro Pompéu	PA-010 Rib. Paciência Pará de Minas
2000	-	7,7	-	-	-		1,0
2001	-	7,6	-	-	-		2,5
2002	-	7,9	-	-	-		1,6
2003	-	7,7	-	-	-		3,3
2004	-	8,1	-	-	-		3,3
2005	-	7,0	-	0,5	-		5,6
2006	-	7,5	-	0,5	-		5,4
2007	6,9	7,6	0,5	0,5	-	6,8	3,5
2008	6,9	7,9	1,1	3,6	6,1	6,6	2,2
2009	7,7	8,0	0,7	1,2	6,5	7,3	4,6

3.4 Vazões de Esgoto

As vazões de esgoto das localidades da bacia hidrográfica foram estimadas a partir do consumo de água das respectivas populações, considerando a vazão de esgoto como sendo equivalente a 80% do consumo de água. O consumo per capita de cada localidade foi estimado a partir de informações sobre as vazões micromedidas, disponibilizadas nos relatórios operacionais da COPASA. As populações dos anos de 2020 e 2030 foram estimadas considerando-se o mesmo crescimento populacional observado entre as contagens populacionais do IBGE para os anos de 2000 e 2010. Tais projeções populacionais foram aplicadas nas populações de 2010 de cada localidade, disponibilizadas pelo IBGE. Os esgotos de tais localidades são lançados nos mananciais indicados na tabela 3.10, tendo sido contabilizados nas equações de mistura água/esgoto processadas no início de cada trecho. Na tabela 3.10 estão também apresentadas as populações e as vazões de esgoto das localidades, com os respectivos pontos de lançamento considerados na modelação. Considerou-se que a eficiência do tratamento de esgoto em todas as ETEs será de 90%.

TABELA 3.10 – VAZÕES DE ESGOTO DAS COMUNIDADES ONDE DEVERÃO SER IMPLANTADOS OS SISTEMAS DE TRATAMENTO								
Município	Corpo Receptor do Esgoto	Per Capta	População 2010	População 2020	População 2030	Vazão esgoto de 2010 (l/s)	Vazão esgoto de 2020 (l/s)	Vazão esgoto de 2030 (l/s)
Passa Tempo	Rib. Passa Tempo	100	6387	6387	6387	5,91	5,91	5,91
Piracema	Rio do Peixe	124	3034	3034	3034	3,48	3,48	3,48
Carmópolis de Minas	Rib. Paiol	124	11823	14050	16696	13,57	16,13	19,17
Itaguara	Rib. Itaguara	124	9530	10432	11419	10,94	11,98	13,11
Cláudio	Rib. do Cláudio	125	21160	24218	27718	24,49	28,03	32,08
Carmo da Mata	Rib. Boa Vista	124	8610	9046	9504	9,89	10,39	10,91
Itapecerica	rio Itapecerica	109	16495	16606	16717	16,65	16,76	16,87
São Sebastião do Oeste	rio Itapecerica	126	3247	4057	5068	3,79	4,73	5,91
Divinópolis	rio Itapecerica	150	207573	240424	278473	288,3	333,92	386,77
Nova Serrana	Rib. Fartura	120	69711	137235	270164	77,46	152,48	300,18
Itaúna	Rio S. João	124	80391	89317	99234	92,3	102,55	113,94
Igaratinga	Rio S. João	146	7677	9671	12183	10,38	13,07	16,47
Pará de Minas	Rib. Paciência	152	79646	91915	106073	112,09	129,36	149,29
Pedra do Indaiá	Rio Lambari	124	2056	2091	2126	2,36	2,4	2,44
Perdigão	Rio Lambari	141	7862	12276	19169	10,26	16,03	25,03
Araújos	Rio Lambari	124	6813	8641	10958	7,82	9,92	12,58
Pedra do Indaiá	Rio Lambari	124	2056	2091	2126	2,36	2,4	2,44
Perdigão	Rio Lambari	141	7862	12276	19169	10,26	16,03	25,03
Araújos	Rio Lambari	124	6813	8641	10958	7,82	9,92	12,58
S. Antônio do Monte	Rib. Diamante	141	22205	24585	27221	28,99	32,10	35,54
Papagaios	Rio do Peixe	124	11916	13540	15385	13,68	15,55	17,66
Martinho Campos	Rib. Picão	119	10986	11704	12469	12,1	12,9	13,74
Carmo do Cajuru	Rio Pará	124	17341	20232	23605	19,91	23,23	27,10

3.5 Coeficientes de Reaeração

A estimativa do coeficiente de oxigenação K_2 foi efetuada pelo modelo apresentado por O'Connor & Dobbins (1958), baseado nas características hidráulicas dos cursos d'água, as quais foram estimadas a partir dos registros de medições de vazão das estações fluviométricas estudadas. Segundo este modelo, o K_2 pode ser descrito em função da velocidade (V) e profundidade (H) através da relação:

$$K_2 = 3,93 V^{0,5} H^{-1,85} \quad (3.1)$$

A calibração deste coeficiente foi efetuada a partir dos registros de oxigênio dissolvido e DBO disponibilizados pelo projeto Águas de Minas. Estimou-se o valor de K_2 em cada seção para cada vazão observada nas datas de coleta de oxigênio dissolvido. Multiplicou-se os valores de K_2 em todos os nós por coeficientes de ajuste, para que as concentrações de oxigênio dissolvido simuladas se ajustassem àquelas observadas. Calculou-se em seguida o valor médio destes coeficientes para simulação dos cenários de interesse com a vazão mínima $Q_{7,10}$.

Observou-se que dentro do período estudado (2000 a 2009), foram obtidas melhores calibrações nos períodos de estiagem dos anos mais secos, (2005 a 2009). Foram obtidos os resultados apresentados nas figuras 3.2 e 3.3. Como a vazão $Q_{7,10}$ é uma vazão de estiagem muito severa, optou-se por adotar apenas os coeficientes de ajuste dos anos mais secos para simulação do balanço de oxigênio dissolvido nos cenários de interesse com a vazão $Q_{7,10}$. Utilizou-se a média destes coeficientes para tais cenários, os quais estão apresentados nas tabelas 3.11 e 3.12. Verifica-se na figura 3.3 que a simulação do balanço de oxigênio para a vazão $Q_{7,10}$ se encontra bem no centro da envoltória das simulações de OD para os anos mais secos, e não abaixo da envoltória, como seria esperado. Apesar de esta vazão ser inferior às outras da envoltória, são observados níveis de oxigênio mais elevados. É possível que tal resultado seja devido ao fato do valor do K_2 ser inversamente proporcional à profundidade, levando a valores mais elevados deste coeficiente para vazões mais reduzidas, e, conseqüentemente, níveis de oxigênio mais elevados. As tabelas 3.11 e 3.12 mostram que os coeficientes de ajuste são menores que a unidade no alto Pará e nos seus efluentes, levando a valores de K_2 inferiores àqueles relativos às fórmulas apresentadas por O'Connor & Dobbins (1958).

Os valores das concentrações de OD simuladas e observadas para os anos estudados estão apresentados na tabela 3.13. Para o coeficiente K_1 , adotou-se o valor constante igual a $0,17 \text{ dia}^{-1}$ e para o coeficiente de decaimento bacteriano K_b , adotou-se o valor de $1,0 \text{ dia}^{-1}$, ambos recomendados por Arceivala (1981).

Figura 3.2 - rio Pará - calibração do coeficiente de reaeração K2 - anos 2000 a 2009

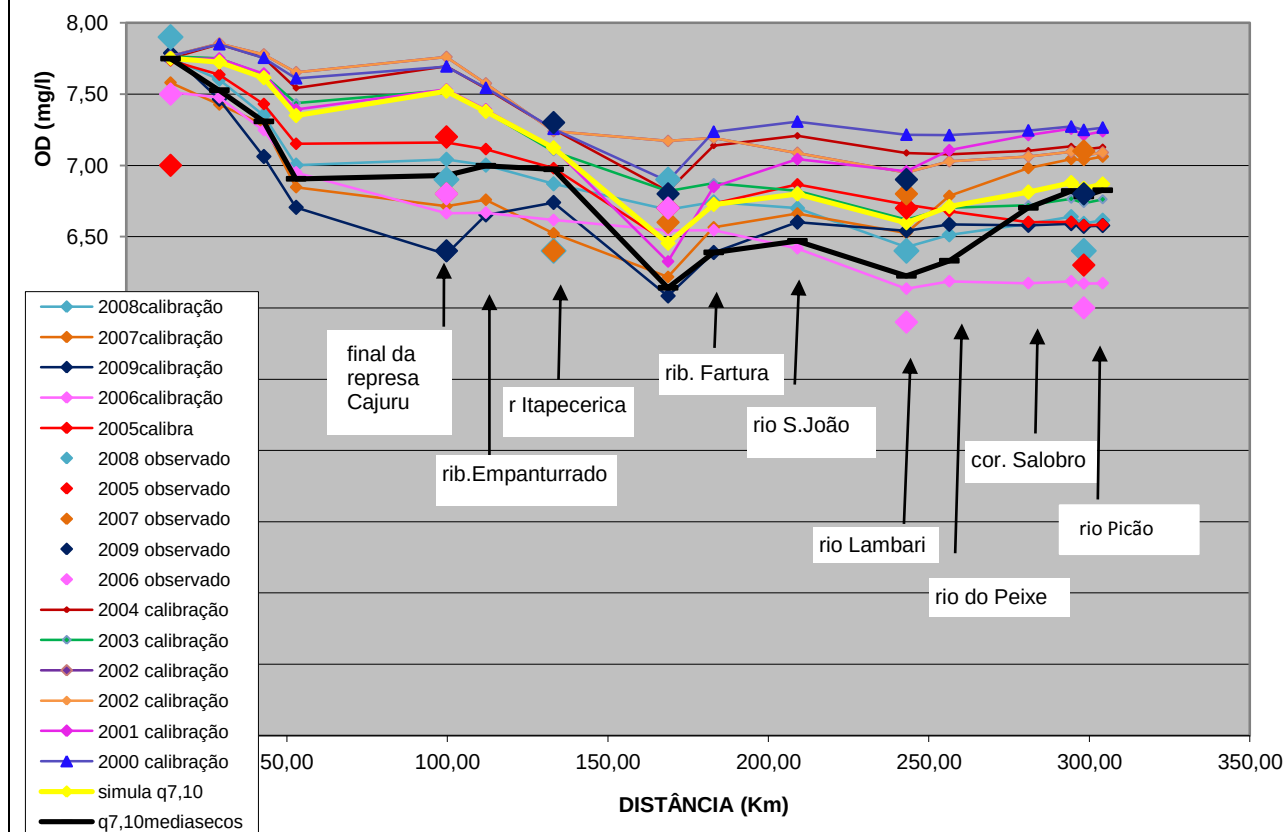


Figura 3.3 - rio Para - calibração do coeficiente de reaeração - anos mais secos - 2005 a 2009

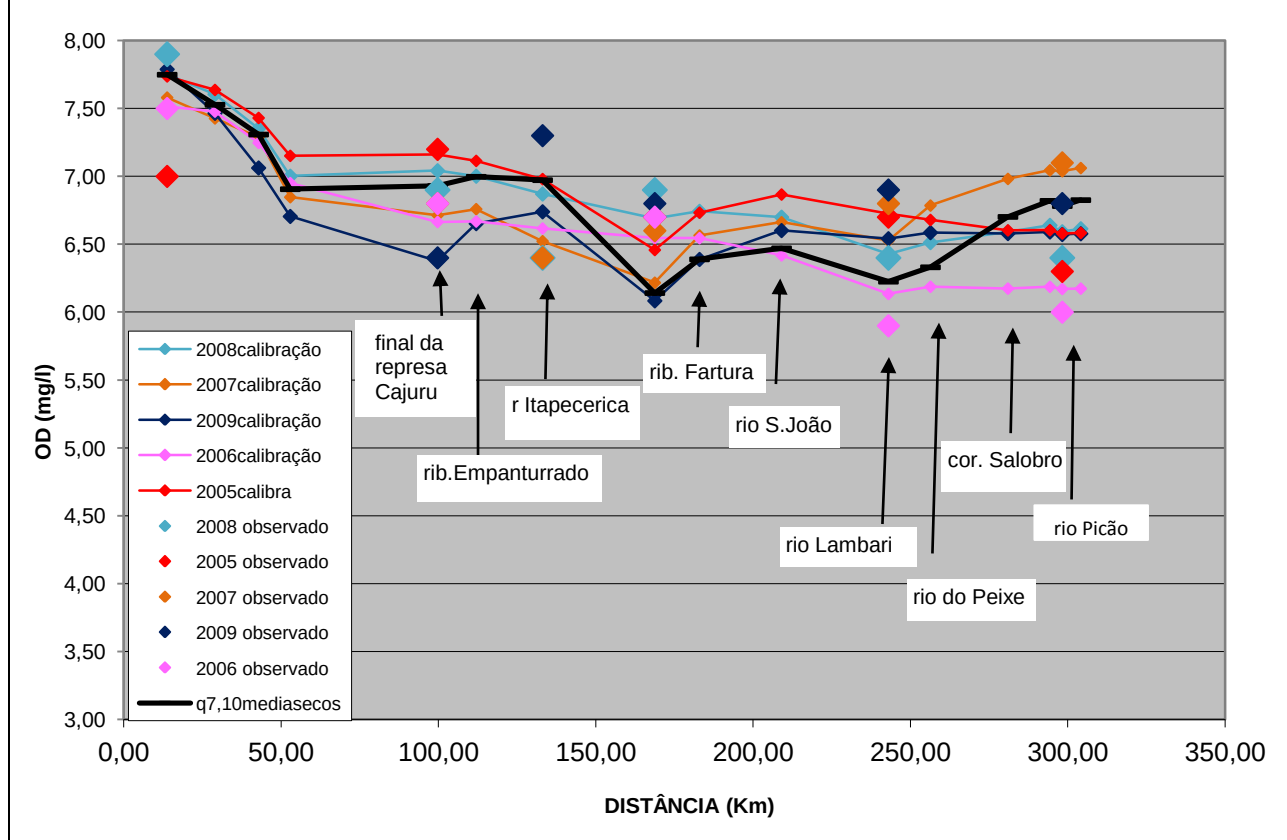


TABELA 3.11 - CALIBRAÇÃO DO COEFICIENTE K2 – VALORES DOS COEFICIENTES DE REAERAÇÃO K2 ADOTADOS PARA OS TRECHOS ESTUDADOS – ANOS MAIS SECOS E Q_{7,10} - RIO PARA

SEÇÃO	Coefic. de ajuste médio	VALORES DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO K ₂ ANOS MAIS SECOS E Q _{7,10}					
		2005	2006	2007	2008	2009	Q _{7,10}
Desterro de Entre Rios	0,44	0,98	1,54	1,58	1,41	1,6	2,11
Encontro c/ rib. Passa Tempo	0,14	2,22	1,59	1,22	2,0	1,03	1,97
Encontro com rio do Peixe	0,14	1,57	1,11	0,89	1,44	0,71	1,53
Encontro com ribeirão Paiol	0,14	1,11	0,78	0,64	1,03	0,54	1,24
Encontro com rib. Itaguara	0,13	1,0	0,46	0,58	0,93	0,48	1,05
Final da represa Cajuru	0,19	0,65	0,52	0,67	0,63	1,27	1,12
Encontro c/ rib. Empanturrado Carmo do Cajuru	0,19	0,6	0,48	0,62	0,58	1,17	1,04
Encontro com rio Itapecerica	0,72	0,93	0,90	0,69	1,23	0,49	1,1
Encontro com córrego Pinto S. Gonçalves do Pará	1,0	1,53	0,87	1,35	1,32	1,28	1,49
Encontro com ribeirão Fartura	1,0	1,52	0,86	1,33	1,31	1,27	1,48
Enc. com rio S. João Pitangui e Conceição do Pará	1,0	1,38	0,78	1,22	1,19	1,13	1,39
Encontro com rio Lambari	1,0	1,03	0,69	1,66	1,07	1,00	1,37
Encontro com rio do Peixe	1,0	1,0	0,68	1,62	1,05	0,97	1,71
Encontro com córrego Salobro	1,0	0,97	0,66	1,58	1,02	0,94	1,67
Encontro com ribeirão Picão	1,0	0,94	0,63	1,53	0,99	0,91	1,63
Foz no rio São Francisco	1,0	0,94	0,63	1,52	0,98	0,91	1,63

TABELA 3.12 - CALIBRAÇÃO DO COEFICIENTE K2 – VALORES DOS COEFICIENTES DE REAERAÇÃO K2 NOS TRECHOS ESTUDADOS – ANOS MAIS SECOS E Q_{7,10} - TRIBUTÁRIOS DO PARA

MANANCIAL	Coefic. de ajuste médio	VALORES DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO K ₂ ANOS MAIS SECOS E Q _{7,10}					
		2005	2006	2007	2008	2009	Q _{7,10}
Rib. Passa Tempo-Passa Tempo	0,1	1,92	1,91	1,92	1,95	1,92	2,03
Rio do Peixe-Piracema	0,046	1,04	0,72	0,73	0,61	0,73	0,81
Rib. Paiol-Carmópolis de Minas	0,034	0,73	0,59	0,60	0,56	0,7	0,65
Ribeirão Itaguara- Itaguara	0,05	0,98	0,93	0,95	0,99	0,96	1,01
Ribeirão do Claudio- Claudio	0,08	0,90	1,65	1,70	0,92	1,74	1,53
Rib. Boa Vista - Carmo da Mata	0,27	0,67	0,67	0,80	0,80	0,72	0,72
Rio Itapecerica - Itapecerica	0,34	0,67	0,67	0,80	1,07	0,80	0,80
Rio Itapecerica - Enc. c/ rib. Boa Vista- S. Sebast. do Oeste	0,34	0,64	0,60	0,74	1,03	1,25	0,90
Rio Itapecerica - Divinópolis	0,38	0,63	0,59	0,73	1,02	1,73	1,0
Rib. Fartura - Nova Serrana	1,11	2,86	2,85	5,37	5,72	3,04	3,99
Rio S. João - PA 036	0,32	1,42	0,71	0,71	1,06	0,35	1,15
Rio S. João - Itaúna	0,36	1,34	0,66	0,99	0,99	1,99	1,24
Rio S. João- Igaratinga	0,44	1,57	1,24	1,22	0,92	1,86	1,46
rio S. João enc. c/ rib. Paciência	0,44	1,41	1,1	1,08	0,82	1,65	1,35
Rib. Paciência- Pará de Minas	0,28	2,07	4,75	2,00	2,68	3,38	3,23
Rio Lambari - Pedra do Indaiá	0,31	2,0	1,16	0,78	0,76	0,76	1,14
Rio Lambari-Enc.rib. Diamante	0,33	1,77	0,97	0,82	0,61	0,94	1,15
Rio Lambari -PerdigãoeAraújos	0,38	1,72	0,93	0,78	0,88	0,90	1,19
Rib. Diamante- Sto Ant.do Monte	0,31	2,01	1,17	,56	1,15	1,54	1,55
Rio do Peixe - Papagaios	0,36	1,05	1,05	1,04	1,04	1,22	1,10
Córrego Salobro	0,36	1,06	1,06	1,06	1,06	2,12	1,29
Rib. Picão - Martinho Campos	0,19	0,78	0,78	1,2	0,39	0,79	0,82
Rib. Picão- Enc. com rio Pará	0,28	0,68	0,68	1,07	0,35	0,51	0,73

**TABELA 3.13– CONCENTRAÇÕES DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO SIMULADAS NAS ESTAÇÕES DE QUALIDADE UTILIZADAS NA CALIBRAÇÃO – MÊS DE OUTUBRO DOS ANOS INDICADOS
RIO PARÁ**

Anos	ESTAÇÃO											
	PA-01		PA-03		PA-05		PA-013		PA-019		PA-028	
	Passa Tempo		Enc.c/rib. Itaguara		Enc.c/rio Itapecerica		Enc.c/ rio.S.João		Enc.c/ rib. Picão		Carmo do Cajuru	
	Simul	Obser	Simul.	Obser	Simul.	Obser	Simul.	Obser	Simul.	Obser	Simul	Obser
2000	7,77	7,7	7,69	7,9	6,89	7,2	7,22	7,7	7,25	8,8	7,26	
2001	7,75	7,6	7,53	7,6	6,33	6,5	6,96	6,8	7,21	7,6	7,12	
2002	7,77	7,9	7,76	8,1	7,17	7,8	6,95	8,1	7,07	8,5	7,24	
2003	7,77	7,7	7,53	7,7	6,82	7,3	6,62	6,9	6,74	6,8	7,1	
2004	7,75	8,1	7,69	8,1	6,82	7,0	7,09	7,8	7,11	7,6	7,25	
2005	7,74	7,0	7,16	7,2	6,46	6,7	6,73	6,7	6,58	6,3	6,98	
2006	7,51	7,5	6,66	6,8	6,54	6,7	6,13	5,9	6,17	6,0	6,62	
2007	7,58	7,6	6,71	6,8	6,22	6,6	6,53	6,8	7,04	7,1	6,52	6,4
2008	7,75	7,9	7,04	6,9	6,69	6,9	6,43	6,4	6,59	6,4	6,87	6,4
2009	7,46	7,6	6,38	6,4	6,08	6,8	6,54	6,9	6,57	6,8	6,74	7,3

4. SIMULAÇÕES DO BALANÇO DE OXIGÊNIO

O balanço de oxigênio foi simulado na bacia do rio Pará para o cenário crítico de estiagem de ocorrência da vazão mínima $Q_{7,10}$, nas situações anteriores e posteriores à implantação das ETEs nas localidades desta bacia. Considerou-se a população atual e os horizontes populacionais de 2020 e 2030. Os resultados obtidos para tais cenários estão apresentados nas figuras 4.1 a 4.4. Na figura 4.1 estão apresentadas as simulações das evoluções do oxigênio do rio Pará considerando a vazão $Q_{7,10}$ e a população atual. Nas figuras 4.2 e 4.3, estão apresentadas estas mesmas simulações, considerando-se as populações projetadas para os anos de 2020 e 2030. Na figura 4.4, estão apresentadas as evoluções de OD antes e após o tratamento de esgotos ao longo dos principais tributários do rio Pará, que são os rios Itapecerica, São João e Lambarí. O rio Pará foi enquadrado pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos na classe 2, onde deve ser observada a concentração mínima de 5,0 mg/l de oxigênio dissolvido. Tal padrão está também representado nestas figuras.

Observa-se nas figuras 3.2, 3.3 e 4.1 a 4.4, que apenas no rio São João são observados níveis de oxigênio inferiores ao padrão da classe 2. Nos outros mananciais, as concentrações de oxigênio dissolvido, tanto observadas (figuras 3.2 e 3.3), quanto simuladas para a vazão $Q_{7,10}$, são mais elevadas que o padrão exigido pela legislação. Tais resultados podem subsidiar o processo de priorização da implantação das estações de tratamento de esgoto nas localidades desta bacia hidrográfica.

FIGURA 4.1 - EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DO OXIGÊNIO DISSOLVIDO AO LONGO DO RIO PARÁ ANTES E APÓS A IMPLANTAÇÃO DAS ETES - VAZÃO Q 7,10 - POPULAÇÃO 2010

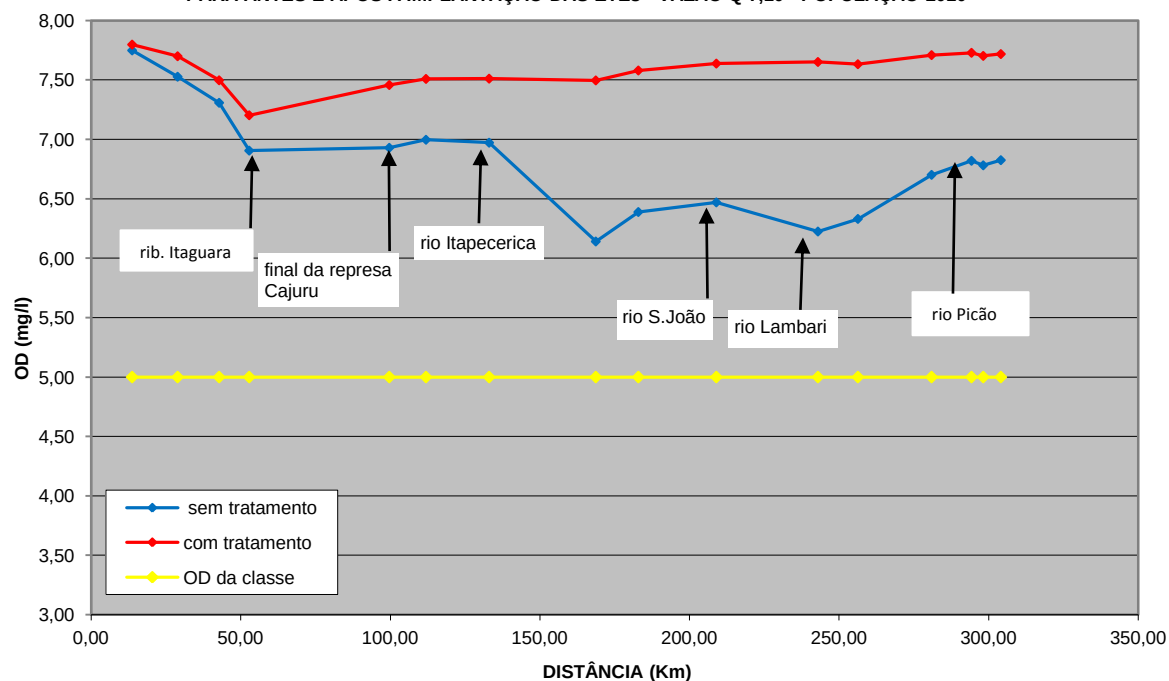


FIGURA 4.2 - EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DO OXIGÊNIO DISSOLVIDO AO LONGO DO RIO PARÁ ANTES E APÓS A IMPLANTAÇÃO DAS ETES - VAZÃO Q 7,10 - POPULAÇÃO 2020

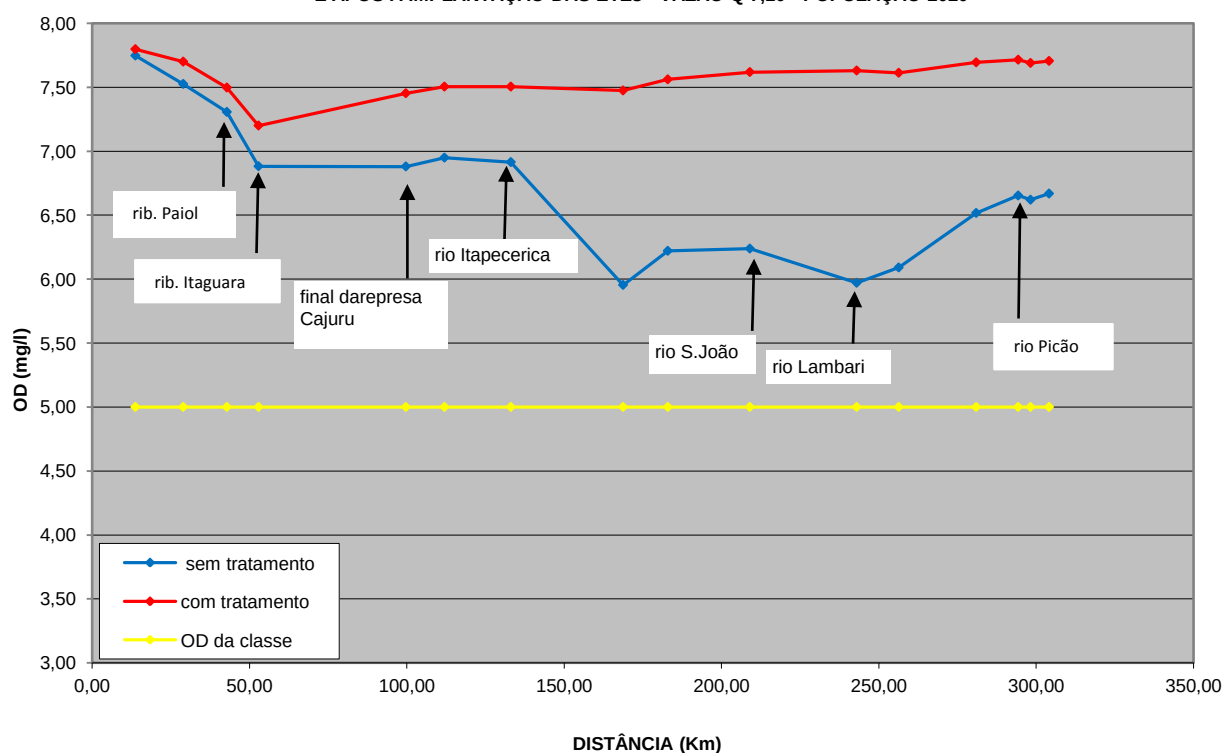


FIGURA 4.3- EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DO OXIGÊNIO DISSOLVIDO AO LONGO DO RIO PARÁ ANTES E APÓS A IMPLANTAÇÃO DAS ETES - VAZÃO Q 7,10 - POPULAÇÃO 2030

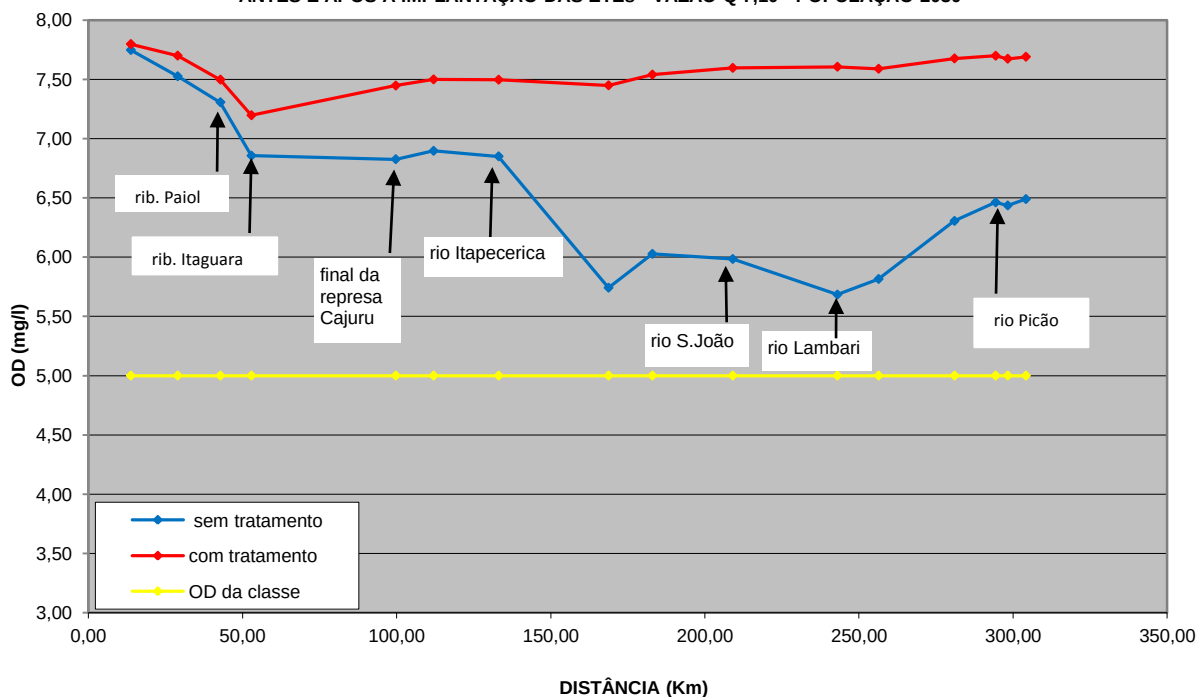
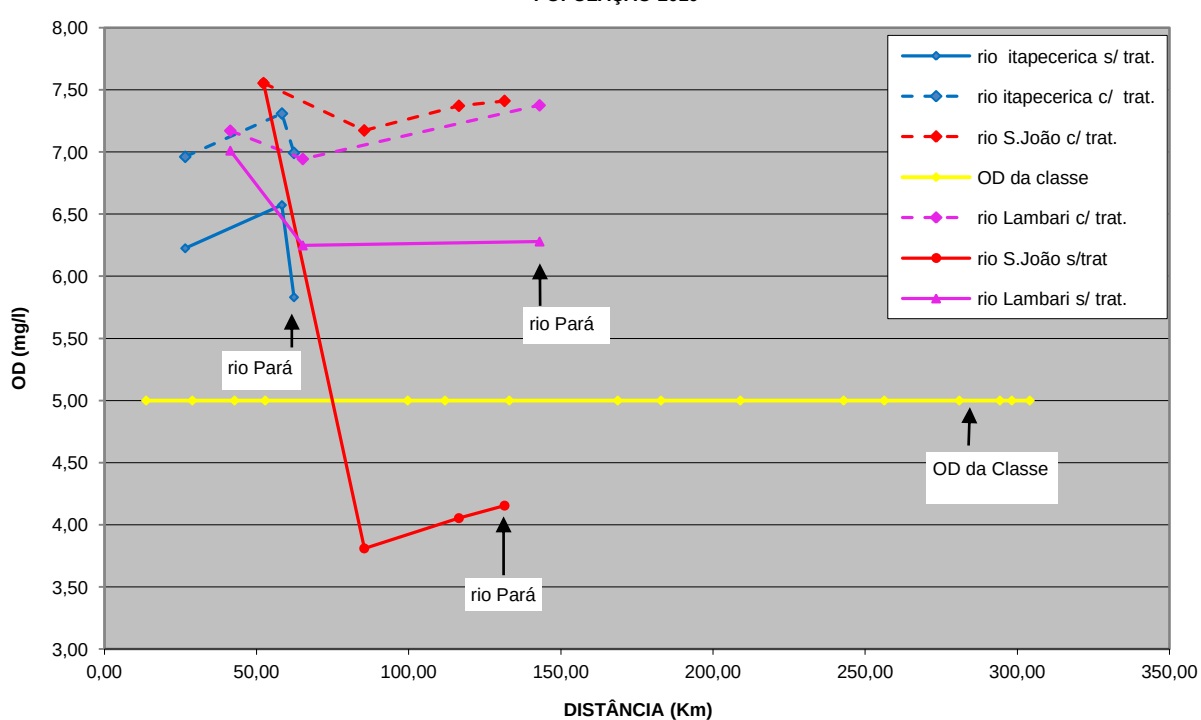


FIGURA 4.4 - EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DO OXIGÊNIO DISSOLVIDO AO LONGO DOS PRINCIPAIS TRIBUTÁRIOS DO RIO PARÁ ANTES E APÓS A IMPLANTAÇÃO DAS ETES - VAZÃO Q 7,10 - POPULAÇÃO 2010



5. CONCLUSÕES

Observando-se os resultados da simulação do balanço de oxigênio dissolvido na bacia do rio Pará apresentados nas figuras 4.1 a 4.4, verifica-se que a implantação do tratamento secundário de esgotos nos municípios desta bacia hidrográfica provocará um incremento significativo nos níveis de oxigênio dissolvido dos mananciais. Com exceção do rio São João, os níveis de oxigênio dos mananciais desta bacia antes do tratamento de esgotos, já se encontram acima do padrão exigido pela classe 2, que é de 5,0 mg/l. A implantação das ETEs provocará um incremento nas concentrações deste parâmetro, levando as concentrações de OD para níveis em torno de 7,0 mg/l.

Tais resultados fornecem um subsídio para a COPASA na priorização da implantação do tratamento de esgoto nas diversas localidades desta e de outras bacias hidrográficas.

Observou-se que os níveis de oxigênio simulados para a vazão $Q_{7,10}$ se encontram no centro da envoltória das simulações do balanço de OD para os anos mais secos. Esperava-se que fossem observadas concentrações de oxigênio mais reduzidas para a $Q_{7,10}$, que é uma vazão menor. De acordo com a formulação de O'Connor & Dobbins, o coeficiente K_2 é inversamente proporcional à profundidade e diretamente proporcional à velocidade. Sendo assim, profundidades mais reduzidas com redução não muito significativa das velocidades observadas na vazão $Q_{7,10}$, levam a valores mais elevados para o coeficiente K_2 e conseqüentemente, níveis de oxigênio dissolvido também mais elevados. Este problema pode ser contornado com uma calibração do K_2 , que será tão mais eficiente quanto melhor a qualidade dos dados disponibilizados.

Ressalta-se também a importância de se fazer um estudo integrado do balanço de oxigênio dissolvido em toda a bacia hidrográfica, considerando-se as cargas de DBO lançadas em todos os mananciais, possibilitando-se desta forma que seja efetuada a calibração do coeficiente K_2 . Tal procedimento mostrou que os valores deste coeficiente calculados pelas formulações existentes na literatura em determinadas situações se distanciam muito daqueles estimados a partir de calibração, além de apresentar algumas inconsistências como aquela abordada no parágrafo anterior.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCEIVALA, S. J. (1981) - *Wastewater treatment and disposal: engineering and ecology in pollution control*. New York: Marcel Dekker, Inc.1991. 892p.

STREETER, W. H.; PHELPS, E., B (1925). *A study of the pollution and natural purification of the Ohio River*. U.S. Public Health Bulletin, 146, Washington D. C.

VON SPERLING M. (2007) – *Estudos e modelagem da qualidade da água em rios* - Departamento de Engenharia Ambiental da UFMG. Belo Horizonte, 588p.

O'CONNOR, D.J., DOBBINS, W.E. (1958). Mechanism of reaeration in natural streams. *Journal Sanitary Engineering Division, ASCE*, 123 p. 641-666.