



**AHE SIMPLÍCIO – QUEDA ÚNICA**  
**MODELAGEM HIDRODINÂMICA E DE QUALIDADE DA ÁGUA DO**  
**RESERVATÓRIO LOURIÇAL**



Andre Luciano Malheiros, MSc.  
Engenheiro Civil

Eduardo Felga Gobbi, Dr.  
Engenheiro Civil

Guilherme  
Engenheiro Ambiental

Helder Rafael Nocko  
Engenheiro Ambiental

José Eduardo Gonçalves, Dr.  
Oceanógrafo

Rafael Cabral Gonçalves, MSc.  
Engenheiro Ambiental

Setembro de 2009  
Curitiba - PR

## Sumário

1	Introdução.....	8
2	Descrição dos Dados .....	10
2.1	Dados de Contorno e Batimetria.....	10
2.2	Dados Hidrológicos .....	14
2.3	Dados de Qualidade da Água.....	14
3	Metodologia de Modelagem Hidrodinâmica e de Qualidade da Água..	16
3.1	Caracterização da hidrodinâmica .....	16
3.2	Modelagem Hidrodinâmica .....	16
3.2.1	Modelo Hidrodinâmico.....	17
3.3	Modelagem numérica da qualidade da água do reservatório .....	19
3.3.1	Forçantes Meteorológicas.....	22
3.3.2	Forçantes Hidrológicos e Cargas.....	22
3.4	O Modelo de Qualidade de Água.....	22
4	Cenários de Modelagem Hidrodinâmica.....	32
4.1	Cenário VMT .....	32
4.2	Cenário 70.....	32
4.3	Cenário 50.....	33
4.4	Cenário de Estiagem .....	33
4.5	Janelas de Tempo dos Cenários de Modelagem .....	34
5	Resultados da Modelagem Hidrodinâmica .....	37
5.1	Cenário de VMT .....	37
5.2	Cenário 70.....	40
5.3	Cenário 50.....	43
5.4	Cenário de Estiagem .....	46
6	Modelagem do Transporte de Partículas.....	50
6.1	Cenário de VMT .....	50
6.2	Cenário 70.....	57
6.3	Cenário 50.....	62
6.4	Cenário de Estiagem .....	68
7	Resultados da Modelagem da Qualidade da Água.....	76
7.1.1	Cenário de Vazão Máxima Turbinada.....	78
7.1.2	Cenário de 70% da Vazão de Projeto .....	82
7.1.3	Cenário de 50% da Vazão de Projeto .....	85

---

7.1.4	Cenário de Estiagem.....	88
8	Análise Integrada de Resultados e Conclusões.....	92
	Referências Bibliográficas .....	96

## Lista de Figuras

Figura 1 – Contornos novo (à esquerda) e antigo (à direita) do reservatório Louriçal .....	11
Figura 2 – Discretização em áreas dos braços do reservatório de Louriçal .....	13
Figura 3 - Processos simulados na dinâmica do fitoplâncton.....	26
Figura 4 - Processos simulados no ciclo do nitrogênio .....	27
Figura 5 - Processos simulados no ciclo do fósforo.....	27
Figura 6 - Processos simulados na dinâmica OD-DBO .....	28
Figura 7 – Campo de velocidade Res. Louriçal, VMT. ....	38
Figura 8 – Campo de velocidade – foco na entrada do túnel central, VMT.....	39
Figura 9 – Campo de velocidade – foco na saída do reservatório, VMT .....	40
Figura 10 – Campo de velocidade Res. Louriçal, 70 .....	42
Figura 11 – Campo de velocidade – foco na entrada do túnel central, 70. ....	42
Figura 12 – Campo de velocidade – foco na saída do reservatório, 70.....	43
Figura 13 – Campo de velocidade Res. Louriçal, 50. ....	44
Figura 14 – Campo de velocidade – foco na entrada do túnel central, 50. ....	45
Figura 15 – Campo de velocidade – foco na saída do reservatório, 50.....	46
Figura 16 – Campo de velocidade Res. Louriçal, cenário de estiagem.....	47
Figura 17 – Campo de velocidade – foco na entrada do túnel central, estiagem .....	48
Figura 18 – Campo de velocidade – foco na saída do reservatório, estiagem.....	49
Figura 19 – Posição dos traçadores em Louriçal – início do Lançamento .....	50
Figura 20 – Posição dos traçadores em Louriçal após 24 horas do Lançamento .....	51
Figura 21 – Posição dos traçadores em Louriçal após 72 horas do Lançamento .....	52
Figura 22 – Posição dos traçadores em Louriçal após 240 horas do Lançamento .....	53
Figura 23 – Posição dos traçadores em Louriçal após 480 horas do Lançamento .....	54
Figura 24- Traçadores lançados pelo Paraíba do Sul .....	55

---

Figura 25- Posição dos traçadores lançados pelo Paraíba do Sul após 02 horas.....	56
Figura 26- Posição dos traçadores lançados pelo Paraíba do Sul após 10 horas.....	57
Figura 27- Traçadores lançados nos tributários – T=240 H.....	58
Figura 28- Traçadores lançados no rio Paraíba – T=02 H .....	59
Figura 29- Traçadores lançados através do Paraíba – T= 5 H.....	60
Figura 30- Traçadores lançados no rio Paraíba – T=240 H .....	61
Figura 31- Traçadores lançados através dos tributários – T=01 H.....	62
Figura 32- Traçadores lançados através dos tributários – T=24 H.....	63
Figura 33- Traçadores lançados através dos tributários – T=240 H.....	64
Figura 34- Traçadores lançados através dos tributários – T=240 H.....	65
Figura 35- Traçadores lançados através do Paraíba – T=0,25 H.....	66
Figura 36- Traçadores lançados através do Paraíba – T=5 H.....	67
Figura 37- Traçadores lançados através do Paraíba – T=30 D.....	68
Figura 38- Traçadores lançados nos tributários em situação de estiagem – T=240 H .....	69
Figura 39- Traçadores lançados nos tributários em situação de estiagem – T=30 D .....	70
Figura 40- Traçadores lançados nos tributários em situação de estiagem – T=40 D .....	71
Figura 41- Traçadores lançados através do Paraíba – T=0,5 H.....	72
Figura 42- Traçadores lançados através do Paraíba – T=12 H.....	73
Figura 43- Traçadores lançados através do Paraíba – T=30 D.....	74
Figura 44- Tempo para percorrer a distância entre a entrada e saída do córrego Louriçal – Durante estiagem.....	75
Figura 45 – Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de OD (à esquerda) e DBO (à direita) no reservatório de Louriçal, com cenário de vazão máxima turbinada .....	80
Figura 46 - Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de fósforo orgânico (à esquerda) e inorgânico (à direita) no reservatório de Louriçal, com cenário de vazão máxima turbinada.....	81
Figura 47 - Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de fósforo total no reservatório de Louriçal, com cenário de vazão máxima turbinada.....	82
Figura 48– Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de OD (à esquerda) e DBO	

---

(à direita) no reservatório de Louriçal, com cenário de 70% da vazão de projeto .....	83
Figura 49 - Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de fósforo orgânico (à esquerda) e inorgânico (à direita) no reservatório de Louriçal, com cenário de 70% da vazão de projeto.....	84
Figura 50 - Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de fósforo total no reservatório de Louriçal, com cenário de 70% da vazão de projeto.....	85
Figura 51 – Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de OD (à esquerda) e DBO (à direita) no reservatório de Louriçal, com cenário de 50% da vazão de projeto .....	86
Figura 52 - Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de fósforo orgânico (à esquerda) e inorgânico (à direita) no reservatório de Louriçal, com cenário de 50% da vazão de projeto.....	87
Figura 53 - Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de fósforo total no reservatório de Louriçal, com cenário de 50% da vazão de projeto.....	88
Figura 54 – Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de OD (à esquerda) e DBO (à direita) no reservatório de Louriçal, com cenário de vazão de estiagem .....	89
Figura 55 - Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de fósforo orgânico (à esquerda) e inorgânico (à direita) no reservatório de Louriçal, com cenário de vazão de estiagem.....	90
Figura 56 - Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de fósforo total no reservatório de Louriçal, com cenário de vazão de estiagem.....	91

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Vazões mensais das sub-bacias de drenagem dos reservatórios do AHE Simplício .....	14
Tabela 2 – Localização dos pontos de monitoramento de qualidade de água usados na modelagem numérica .....	14
Tabela 3 – Dados de qualidade de água utilizados.....	15
Tabela 4 – Dados de qualidade de água utilizados.....	24
Tabela 5 – Parâmetros utilizados nas equações do modelo de qualidade da água .....	30
Tabela 6 – Ocorrência dos Cenários de Vazões de 1998 a 2008 no Rio Paraíba do Sul.....	34
Tabela 7 – Duração das ocorrências dos Cenários de Vazões de 1998 a 2008 no Rio Paraíba do Sul .....	35
Tabela 8 – Condições iniciais consideradas na modelagem da qualidade da água de todos os cenários .....	76
Tabela 9 – Coeficientes de qualidade de água e seus valores utilizados nas simulações dos reservatórios do AHE Simplício – Queda Única.....	77
Tabela 10 – Valores dos parâmetros das fontes de poluição pontuais consideradas no reservatório de Lourical .....	78

## 1 Introdução

O presente relatório apresenta a atualização dos estudos de modelagem matemática-computacional da hidrodinâmica e da qualidade da água da AHE Simplício – Queda Única, a qual está em fase de construção. Dessa vez, o estudo visa atender ao detalhamento e atualização para o reservatório de Lourical, o terceiro na sequência de Simplício. Com a mudança dos contornos do reservatório, a inclusão do túnel na ligação entre os dois trechos principais, a utilização de seu interior para acondicionamento de novos bota-foras e a atualização de dados batimétricos e topográficos, a circulação de Lourical foi bastante modificada e tornou-se importante a atualização do estudo que já havia sido realizado (Nocko, H. R., et al, 2006).

O projeto do reservatório de Lourical apresenta dois braços longos na direção Norte-Sul, o vale do córrego Areia e o do córrego Lourical, enquanto o fluxo principal se dá na direção Leste-Oeste. Dessa forma, é de interesse entender a interação entre as águas do fluxo principal e aquelas vindas dos afluentes pelos braços do reservatório.

Do mesmo modo que no estudo anterior, foram utilizadas modelagens numéricas hidrodinâmicas e de qualidade da água para o diagnóstico das regiões de baixa circulação, para o conhecimento dos possíveis tempos de detenção do reservatório e prognóstico de alguns aspectos da qualidade das águas.

Visando atender os objetivos acima apresentados, este relatório está estruturado da seguinte forma:

- Descrição dos dados necessários às modelagens numéricas. São eles: dados de qualidade das águas dos rios Paraíba do Sul e seus afluentes principais, de hidrologia, batimétricos e de contorno;
- Modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água, onde é apresentada a fundamentação teórica dos modelos numéricos utilizados nas simulações.
- Simulações hidrodinâmicas, onde são apresentadas as implementações do

---

modelo numérico hidrodinâmico SisBAHIA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental). São apresentados ainda os resultados dos campos de velocidades obtidos com as simulações de quatro cenários com vazões variando entre estiagem e vazão máxima turbinada;

- Simulações do transporte de partículas inertes, sem nenhum tipo de decaimento;
- Simulações de qualidade da água, onde são apresentados os resultados obtidos com as simulações numéricas das variáveis Fósforo, Oxigênio dissolvido e demanda bioquímica de Oxigênio (DBO). Os campos de corrente necessários para a realização das simulações numéricas da qualidade da água foram obtidos das simulações numéricas hidrodinâmicas;
- Conclusões.

## 2 Descrição dos Dados

Este capítulo apresenta e descreve os dados de contorno, batimetria, hidrológicos, meteorológicos, de qualidade da água e de fontes de poluição do reservatório de Lourical que integra o circuito hidráulico do AHE Simplício – Queda Única.

### 2.1 Dados de Contorno e Batimetria

Para a implementação dos modelos hidrodinâmico e de qualidade de água se faz necessária a definição de um domínio dentro do qual as equações matemáticas serão resolvidas. Para a execução dos presentes trabalhos de modelagem, tanto os dados de batimetria quanto os de contorno foram obtidos de mapas em formato *CAD* disponibilizados por FURNAS. Em locais nos quais as curvas de nível existentes não contemplavam o trecho desejado, foram geradas novas batimetrias baseadas em pontos cotados e na profundidade dos diques existentes no reservatório.

Como já citado na introdução desse trabalho, os dados morfométricos do reservatório foram modificados e espera-se uma modificação nos padrões de circulação causada sobretudo pela inclusão de um túnel ligando os dois trechos do reservatório.

A Figura 1 mostra os domínios novo e antigo, respectivamente, para o reservatório Lourical. Percebe-se que as grandes diferenças se concentram:

1. No trecho inicial do reservatório, onde a entrada foi modificada e a geometria do reservatório bastante modificada;
2. Antigo trecho de ligação entre os dois lados do reservatório (a ligação foi suprimida e o reservatório descontinuado);
3. Implantação de túnel de ligação entre os dois lados do reservatório em posição imediatamente superior ao local de um grande bota-fora (em destaque na figura do antigo reservatório);

4. Estreitamento do canal principal do reservatório na saída do canal central dos reservatórios;
5. Alongamento do braço direito;
6. Modificações leves ao longo de todo o contorno do braço esquerdo;
7. Modificações mais perceptíveis no contorno do braço direito.

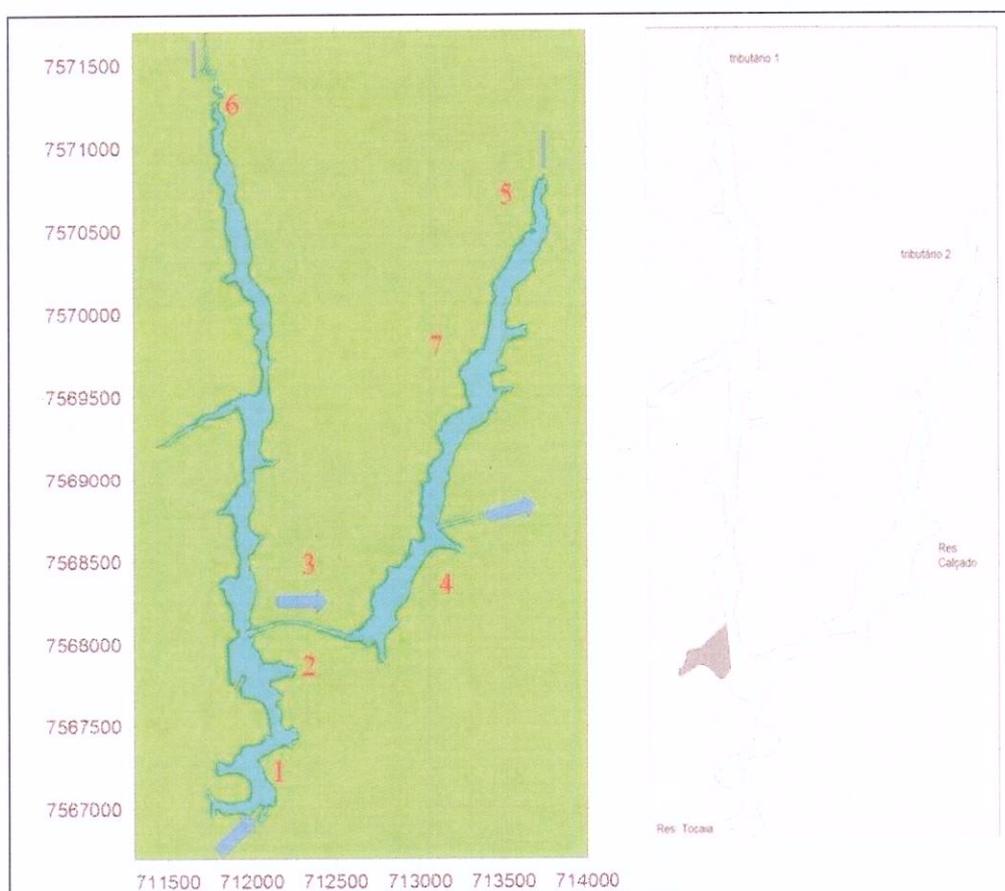


Figura 1 – Contornos novo (à esquerda) e antigo (à direita) do reservatório Louriçal

Com o objetivo de conceder ao leitor deste relatório uma possibilidade de melhor entender quantitativamente os tamanhos e medidas do reservatório de Louriçal, foi produzida a Figura 2 a seguir.

Com o objetivo de conceder ao leitor deste relatório um melhor entendimento

quantitativo das medidas do reservatório de Lourical, foi produzida a Figura 2 a seguir. Essa figura mostra a segmentação dos braços do reservatório em intervalos de 250 metros e as respectivas áreas dos segmentos (da superfície da água). As métricas contidas nessa figura auxiliam a caracterização e interpretação dos resultados obtidos para a hidrodinâmica e a qualidade da águas desses braços e possibilitam quantificar a extensão das áreas atingidas.

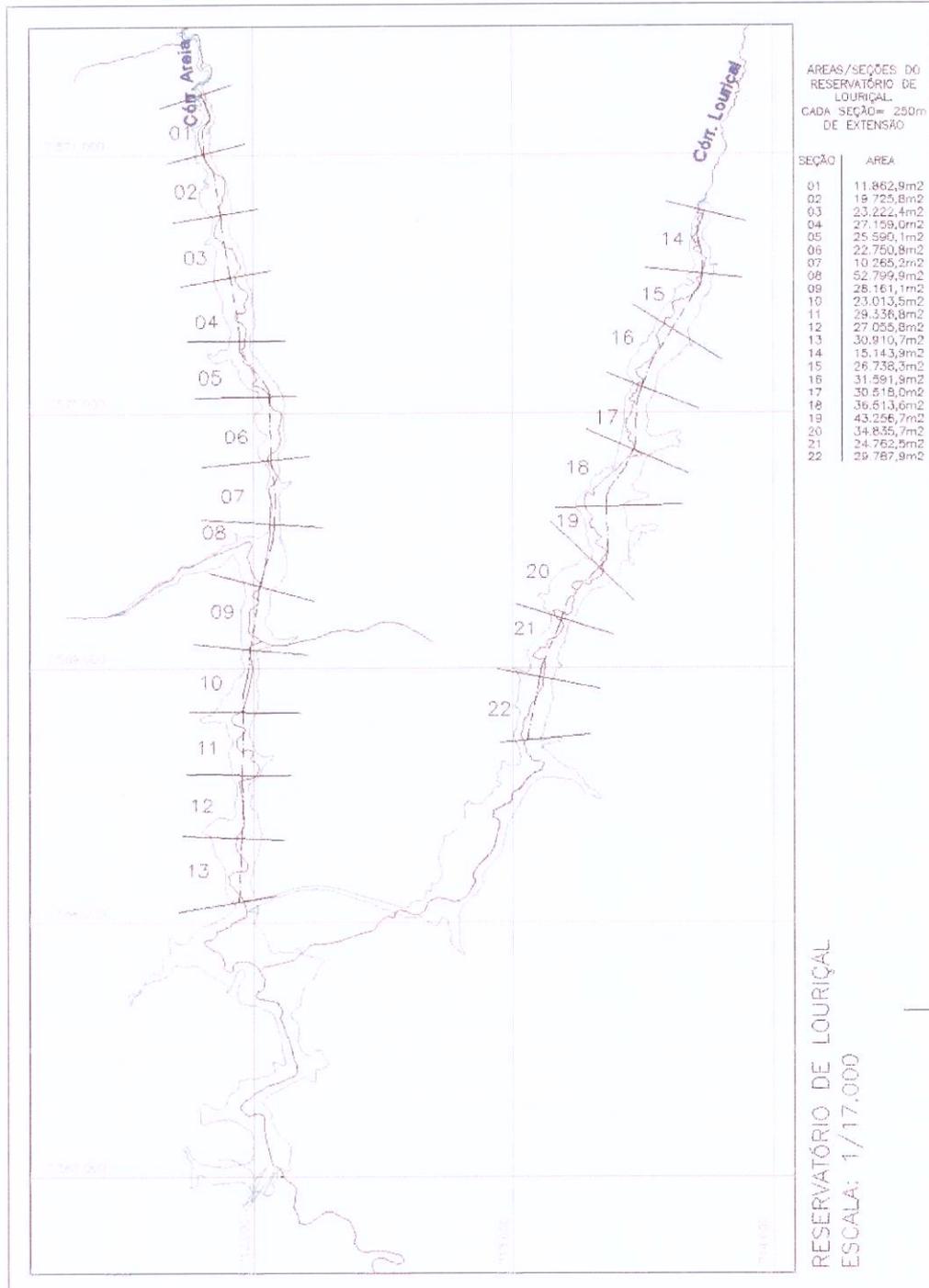


Figura 2 – Discretização em áreas dos braços do reservatório de Louriçal

## 2.2 Dados Hidrológicos

Os dados de vazão necessários para as simulações do reservatório de Louriçal são aquelas advindas dos reservatórios de Tocaia e Anta. Essas vazões são controladas pelo conjunto de turbinas de Simplício e apresentam valores máximo e mínimo teóricos de 340 e 56,5 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

Com relação aos dados de vazões dos rios afluentes aos futuros reservatórios de Tocaia e Louriçal, os mesmos estimados com base nas vazões mensais máxima e mínima nas sub-bacias de drenagem de cada reservatório, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Vazões mensais das sub-bacias de drenagem dos reservatórios do AHE Simplício

SUB-BACIA		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Tocaia	Max	4,13	3,67	3,73	1,73	1,60	1,07	0,94	0,85	0,86	1,23	2,13	2,47
	Med	1,73	1,62	1,39	1,03	0,82	0,68	0,61	0,54	0,55	0,70	0,99	1,49
	Min	0,63	0,32	0,57	0,42	0,37	0,36	0,31	0,29	0,27	0,38	0,50	0,40
Louriçal	Max	11,20	9,96	10,10	4,68	4,34	2,91	2,56	2,29	2,33	3,33	5,77	6,69
	Med	4,68	4,40	3,79	2,79	2,22	1,85	1,66	1,46	1,50	1,91	2,70	4,03
	Min	1,71	0,87	1,54	1,15	0,49	0,98	0,85	0,80	0,75	1,03	1,36	1,00

Fonte: Estudos Ambientais Engevix, 2001

## 2.3 Dados de Qualidade da Água

Foram utilizados dados de DBO, OD, temperatura da água e fósforo total do rio Paraíba do Sul, a montante da foz dos rios Paraibuna e Piabanha, e do rio Areia (tributário do reservatório de Louriçal). Tais dados são provenientes da campanha de monitoramento dos meses de maio e junho de 2006. As Tabelas 2 e 3 apresentam a localização dos pontos de monitoramento e os dados de qualidade de água usados neste estudo.

Tabela 2 – Localização dos pontos de monitoramento de qualidade de água usados na modelagem numérica

Sítio	Localidades	Latitude	Longitude
-------	-------------	----------	-----------

---

1	Montante da foz dos rios Paraibuna e Piabanha	7553367	691239
17	Rio Areia – montante	7567955	711879

Tabela 3 – Dados de qualidade de água utilizados

Sítio	Temperatura (°C)	DBO (mg/L)	OD (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Amônia (mg/L)	Fósforo total (mg/L)
1	22,00	< 2,0	4,35	0,40	0,06	0,06

### **3 Metodologia de Modelagem Hidrodinâmica e de Qualidade da Água**

#### **3.1 Caracterização da hidrodinâmica**

A circulação hidrodinâmica em reservatórios é dominada principalmente pelas descargas dos tributários, pelos ventos e pelo efeito da radiação solar que provoca variações da temperatura da superfície do lago podendo gerar estratificação térmica.

Tendo em vista as características do reservatório Louriçal, podendo ser considerado do tipo fio d'água, é de se esperar que não ocorram estratificações importantes na coluna d'água. Assim sendo, nas simulações hidrodinâmicas dos reservatórios que serão formados, não existe a necessidade de se considerar os efeitos do campo de densidade na circulação dos lagos, ou seja, as simulações foram realizadas considerando um modelo em duas dimensões, desprezando-se qualquer estratificação térmica na vertical.

#### **3.2 Modelagem Hidrodinâmica**

Tendo em vista as situações a serem modeladas, foi utilizado o modelo SisBAHIA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), desenvolvido pela COPPE – UFRJ, uma vez que este possui módulos capazes de resolver a circulação em corpos de água, além da qualidade e do transporte euleriano e lagrangeano de poluentes e partículas.

O modelo SisBAHIA é o resultado de quase 15 anos de pesquisas, com resultados que demonstram sua alta qualidade, em diversos estudos onde foi necessário um amplo conhecimento da dinâmica física do meio ambiente, sendo utilizado como uma ferramenta imprescindível para diagnósticos e prognósticos qualitativos e quantitativos de fenômenos naturais e ações antrópicas potencialmente impactantes.

### 3.2.1 Modelo Hidrodinâmico

As quatro equações necessárias para calcular as quatro incógnitas da circulação hidrodinâmica, velocidade na direção  $x$ , velocidade na direção  $y$ , velocidade na direção  $z$  e elevação da superfície livre ( $u, v, w, \zeta$ , respectivamente), no módulo 3D (tridimensional), estão escritas abaixo:

Equação da quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção  $x$ :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\Phi \operatorname{sen} \theta v \quad (1)$$

Equação da quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção  $y$ :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\Phi \operatorname{sen} \theta u \quad (2)$$

Equação da continuidade (do volume):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Equação da continuidade (do volume) integrada ao longo da vertical:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz = 0 \quad (4)$$

Onde  $u$ ,  $v$  e  $w$  são, respectivamente, as velocidades nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ ,  $\rho_0$  é uma densidade constante de referência,  $\Phi$  é a velocidade angular de rotação da terra no sistema de coordenadas local e os termos com  $\Phi$  são as forças de Coriolis, no qual  $\theta$  é o ângulo de Latitude.  $\zeta$  é a elevação da superfície livre,  $\tau_{ij}$  são as tensões de cisalhamento e  $h$  é a profundidade.

O módulo 2DH (verticalmente integrado) determina as componentes das velocidades

médias na vertical, na direção  $x$  e  $y$ , respectivamente,  $U(x,y,t)$  e  $V(x,y,t)$  e as elevações da superfície livre  $z = \zeta(x,y,t)$ , conforme as seguintes equações:

Equação da quantidade de movimento 2DH, para escoamento integrado na vertical, na direção  $x$ :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^S - \tau_x^B) + 2\Phi \sin \theta U \quad (5)$$

Equação da quantidade de movimento 2DH, para escoamento integrado na vertical, na direção  $y$ :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S - \tau_y^B) - 2\Phi \sin \theta V \quad (6)$$

onde  $H$  é a profundidade,  $\tau_i^S$  e  $\tau_i^B$  são as tensões de atrito na superfície (devido ao vento) e no fundo, respectivamente. O índice  $i$  representa a direção, por exemplo:  $i=1$  componente  $x$ ,  $i=2$  componente  $y$  e  $i=3$  componente  $z$ .

A tensão de atrito devido ao vento é formulada como:

$$\tau_i^S = \rho_{ar} C_D W_{10}^2 \cos \phi_i \quad [i=1,2] \quad (7)$$

onde  $\rho_{ar}$  é a densidade do ar,  $C_D$  é o coeficiente de arrasto do vento,  $W_{10}$  é o valor local da velocidade do vento medida a 10 metros acima da superfície livre, e  $\phi_i$  é o ângulo entre o vetor de velocidade do vento local e a direção  $x_i$ . O coeficiente de arraste do vento pode ser determinado a partir de fórmulas empíricas. A fórmula adotada no modelo SisBahia é:

$$C_D = (0.8 + 0.065 W_{10}) \times 10^{-3}; \quad [W_{10} \text{ em m/s}] \quad (8)$$

A tensão de atrito no fundo pode ser calculada como:

$$\tau_i^B = \rho_0 \beta U_i \quad [i=1,2] \quad (9)$$

onde o parâmetro  $\beta$  depende da maneira em que o módulo 2DH seja empregado, conforme descrito abaixo:

- Módulo 2DH desacoplado do módulo 3D:

$$\beta = \frac{g}{C_h^2} \sqrt{U^2 + V^2} \quad (10)$$

- Módulo 2DH acoplado com o módulo 3D:

$$\beta = \frac{\sqrt{g}}{C_h} |u_*| \quad (11)$$

$C_h$  é o coeficiente de Chézy, definido como:

$$C_h = 18 \log_{10} \left( \frac{6H}{\varepsilon} \right) \quad (12)$$

onde  $\varepsilon$  é a rugosidade do fundo.

Na modelagem da circulação hidrodinâmica, é necessário o estabelecimento de condições de contorno para o campo de velocidade, ou seja, é necessário conhecer a velocidade afluyente ao reservatório, tanto pelo seu canal principal quanto pelos rios tributários.

### 3.3 Modelagem numérica da qualidade da água do reservatório

Os modelos de qualidade da água são instrumentos capazes de avaliar os impactos gerados pelo lançamento de cargas poluidoras em um determinado corpo de água. Basicamente o modelo de qualidade da água resolve a equação do balanço de massa para várias substâncias relacionadas, considerando os processos de transformação de cada substância (ROSMAN, 2008).

A distribuição de uma substância no interior de um corpo de água é realizada através dos mecanismos de transporte advectivo e difusivo. O transporte advectivo pode ser definido como o movimento da substância de uma posição para outra no espaço, ocasionado pelo campo de velocidades do fluxo de água. O transporte difusivo pode ser definido como o movimento da substância de um local mais concentrado para outro menos concentrado, sendo realizado pelos processos de difusão molecular, devido ao movimento aleatório das moléculas de um fluido, e de difusão turbulenta, devido a turbilhões de variados tamanhos e orientações. Em grandes corpos de água como reservatórios ou lagos os processos de difusão tendem a predominar. Nestes casos, o vento é o agente primário na transmissão de movimento aleatório para a água (CHAPRA, 1997).

Os modelos de qualidade da água descrevem o transporte advectivo-difusivo e mudanças nas concentrações das substâncias devido a processos químicos, físicos e biológicos. Usualmente estes modelos são resolvidos desacoplados dos modelos hidrodinâmicos. Entretanto, a circulação hidrodinâmica representa um conjunto de dados de entrada fundamental (ROSMAN, 2008).

A qualidade da água de um reservatório está intimamente ligada ao seu tempo de residência médio, definido como o volume do reservatório dividido pela taxa de afluência média. Em reservatórios largos e profundos, o tempo de residência é, em muitos casos, da ordem de anos, enquanto que em reservatórios construídos a fio d'água, na maioria das vezes para geração de energia elétrica, o tempo de residência pode ser de apenas uma semana. Se o tempo de residência for pequeno, a qualidade da água no reservatório pode ser determinada principalmente pela qualidade dos tributários. Entretanto, se o tempo de residência for longo, pode-se esperar efeitos significativos de fontes vindas da superfície ou do fundo do reservatório e de atividades biológicas (FISCHER et al., 1979).

Em corpos de água continentais podem ser encontrados representantes de praticamente todos os grupos de algas, sendo os principais: Cyanophyta, Chlorophyta, Euglenophyta, Chrysophyta e Pyrrophyta. Todos estes grupos possuem clorofila a em suas células. Por isso, a análise da clorofila é um importante indicador da biomassa da comunidade fitoplantônica. As Cyanophyta, também conhecidas como cianobactérias ou algas azuis, produzem substâncias chamadas de cianotoxinas que podem causar

intoxicações e até levar a morte animais, inclusive os seres humanos, sendo um sério problema de saúde pública em reservatórios de abastecimento. Segundo FOTT (1971, citado por ESTEVES, 1988), este grupo possui cerca de 150 gêneros e cerca de 2.000 espécies, sendo que a maior parte delas é de água doce (ESTEVES, 1988).

A temperatura em lagos tropicais, por estar sempre acima dos valores limitantes ao crescimento, não tem efeitos tão significativos sobre a variação temporal do fitoplâncton como em lagos temperados. No entanto, esta variação é controlada por outros fatores, sendo a disponibilidade de nutrientes e a radiação subaquática os mais importantes. Alguns elementos são chamados de nutrientes por serem essenciais à vida dos organismos aquáticos. Os principais nutrientes são carbono, nitrogênio, fósforo e sílica. Outros micronutrientes como ferro, manganês, enxofre, zinco, cobre, cobalto e molibdênio também são importantes (ESTEVES, 1988).

O crescimento de fitoplâncton é normalmente limitado por fósforo e nitrogênio, com exceção das algas diatomáceas, pertencentes ao grupo Chrysophyta, que frequentemente são limitadas por sílica. As cianobactérias podem fixar nitrogênio atmosférico e, portanto, não são limitadas por esse nutriente. O carbono está normalmente disponível em excesso, não sendo, neste caso, considerado um limitante (BOWIE et al., 1985).

Os nutrientes estão presentes nos sistemas aquáticos das seguintes formas:

- inorgânica dissolvida;
- orgânica dissolvida;
- orgânica particulada;
- sedimento;
- biótica.

Apenas as formas dissolvidas inorgânicas estão disponíveis para o crescimento de fitoplâncton. Cada nutriente sofre uma reciclagem contínua entre as principais formas listadas acima. Por exemplo, os nutrientes inorgânicos dissolvidos são removidos da coluna d'água pelo fitoplâncton e outras plantas aquáticas durante a fotossíntese. Estes

nutrientes são distribuídos para os outros organismos aquáticos através da cadeia alimentar. Os nutrientes inorgânicos dissolvidos retornam para a água através da excreção dos organismos, da decomposição dos detritos e dos sedimentos, e da hidrólise dos nutrientes orgânicos dissolvidos (BOWIE et al., 1985).

### 3.3.1 Forçantes Meteorológicas

Para a modelagem da qualidade da água, há necessidade de conhecimento de parâmetros meteorológicos como velocidade do vento (influencia a oxigenação do corpo d'água), a radiação solar, e a própria temperatura da água.

No caso deste trabalho as forçantes meteorológicas radiação solar e temperatura da água foram utilizadas. A velocidade e direção dos ventos não foram utilizadas, pois o objetivo foi o de simular o caso mais crítico tanto para o tempo de residência das águas nos reservatórios quanto para as taxas de reaeração.

### 3.3.2 Forçantes Hidrológicos e Cargas

Normalmente os reservatórios estão sujeitos a contribuições de vazões e cargas advindas das suas bacias hidrográficas de contribuição. Assim, é importante que se conheça as vazões de entrada e saída do reservatório, para o conhecimento e modelagem da hidrodinâmica.

Além disso, é primordial que se conheça as concentrações (cargas) dos componentes físicos/químicos/biológicos que compõem as contribuições para o reservatório através dos tributários.

## 3.4 O Modelo de Qualidade de Água

O modelo computacional de qualidade da água utilizado neste trabalho é o SisBaHiA<sup>®</sup> (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), desenvolvido pela Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ. O SisBaHiA<sup>®</sup> é capaz de realizar a modelagem de corpos de água costeiros

e continentais e é constituído por um modelo de circulação hidrodinâmica bidimensional para corpos de água rasos, um modelo de transporte Euleriano advectivo-difusivo e um modelo de transporte Lagrangeano advectivo-difusivo. O SisBaHiA<sup>®</sup> utiliza elementos finitos na discretização espacial e diferenças finitas na discretização temporal (ROSMAN, 2008).

O modelo de qualidade de água do SisBaHiA<sup>®</sup> é baseado no modelo de transporte Euleriano advectivo-difusivo integrado na vertical, para escalares passivos e não-conservativos. Escalares não-conservativos sofrem modificação de concentração através de processos físicos, biológicos e químicos. Neste modelo, o campo de velocidades é conhecido, ou seja, o escalar transportado não altera a hidrodinâmica do corpo de água receptor. Como consequência, a modelagem do padrão hidrodinâmico do corpo de água e a modelagem do transporte do escalar são problemas desacoplados. Assim, para que ocorra uma boa simulação do transporte do escalar, uma adequada simulação do campo hidrodinâmico torna-se necessária (ROSMAN, 2008).

Os modelos eulerianos resolvem a equação de transporte sobre uma malha fixa. A integração na direção vertical sugere que este modelo deva ser aplicado em corpos de água rasos, que possuem dimensões horizontais preponderantes sobre a dimensão vertical, com a coluna de água bem misturada, onde a estratificação vertical é pouco relevante. Neste tipo de corpo receptor, o campo de velocidades usado é médio na vertical, não permitindo a descrição do perfil de velocidades. Em relação aos mecanismos de transporte de uma dada substância em um corpo de água, o processo advectivo é normalmente dominante, sugerindo assim uma enorme dependência entre a simulação hidrodinâmica e o processo de transporte. No entanto, os processos difusivos também são muito importantes para a definição do transporte. No modelo de qualidade de água do SisBaHiA<sup>®</sup>, a parte difusiva é modelada segundo as técnicas de filtragem, que são também empregadas na técnica conhecida como Simulação de Grandes Vórtices (ROSMAN, 2008).

A equação integrada em uma camada de espessura  $H$ , que vai do fundo à superfície, descrevendo o transporte de um escalar para variáveis de grande escala, usando a técnica de filtragem para a modelagem das tensões turbulentas é dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( H \left[ D_{ij} \delta_{jk} + \frac{\Lambda_k^2}{12} \left| \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial x_k} \right) \pm \Sigma R$$

onde  $C$  é a concentração do escalar de interesse,  $U_i$  são as componentes da velocidade na direção  $x_i$  promediadas na direção vertical,  $\Sigma R$  representa os processos de transformação,  $H$  é a altura da coluna de água,  $D_{ij}$  é o tensor que representa o coeficiente de difusão turbulenta de massa,  $\delta_{jk}$  representa o delta de Kronecker e  $\Lambda_k$  (igual a  $\alpha_k \Delta_k$ ) é a largura do filtro na dimensão  $x_k$ ,  $\alpha_k$  sendo um parâmetro de escala. Os valores típicos de  $\alpha_k$  calibrados para difusão/advecção são da ordem de 0.25 a 2.0, com valor usual igual a 1.0 (ROSMAN, 2008).

O modelo de qualidade da água atual do SisBaHIA<sup>®</sup> considera as seguintes variáveis:

Tabela 4 – Dados de qualidade de água utilizados

Símbolo	Parâmetro	Unidade
C <sub>1</sub>	Amônia	mgNA/L
C <sub>2</sub>	Nitrato	mgNI/L
C <sub>3</sub>	Fósforo Inorgânico	mgP/L
C <sub>4</sub>	Zooplâncton	mgC/L
C <sub>5</sub>	Demanda Bioquímica de Oxigênio	mgO/L
C <sub>6</sub>	Oxigênio Dissolvido	mgO/L
C <sub>7</sub>	Nitrogênio Orgânico Total	mgNO/L
C <sub>8</sub>	Fósforo Orgânico	mgPO/L
C <sub>9</sub>	Clorofila	µgChla/L
T	Temperatura	°C
S	Salinidade	mg/L

Os processos físicos, químicos e biológicos representados pelo modelo para cada variável, com exceção da temperatura e salinidade, são descritos a seguir:

- Clorofila *a* (fitoplâncton): crescimento, respiração, excreção, mortalidade não-predatória, predação, sedimentação.
- Zooplâncton: crescimento, respiração, excreção, mortalidade não-predatória, predação.
- Nitrogênio Orgânico Total: amonificação, sedimentação, detritos da predação,

excreção de fitoplâncton, excreção de zooplâncton, mortalidade não-predatória de fitoplâncton, mortalidade não-predatória de zooplâncton.

- Amônia: respiração de fitoplâncton, respiração de zooplâncton, mortalidade não-predatória de fitoplâncton, mortalidade não-predatória de zooplâncton, crescimento de fitoplâncton, amonificação, nitrificação.
- Nitrato: nitrificação, desnitrificação, crescimento de fitoplâncton.
- Fósforo Inorgânico: excreção de fitoplâncton, excreção de zooplâncton, mortalidade não-predatória de fitoplâncton, mortalidade não-predatória de zooplâncton, detritos da predação, mineralização, precipitação.
- Fósforo Orgânico: respiração de fitoplâncton, respiração de zooplâncton, mortalidade não-predatória de fitoplâncton, mortalidade não-predatória de zooplâncton, crescimento de fitoplâncton, mineralização.
- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO): decomposição, sedimentação, desnitrificação, detritos da predação, mortalidade não-predatória de fitoplâncton, mortalidade não-predatória de zooplâncton.
- Oxigênio Dissolvido (OD): reaeração, decomposição, nitrificação, fotossíntese, respiração de fitoplâncton, respiração de zooplâncton, demanda de oxigênio no sedimento.

As figuras a seguir demonstram as interações entre as variáveis através dos processos modelados, sendo que a figura 3 representa os processos relacionados à dinâmica do fitoplâncton, a figura 4 representa os processos relacionados ao ciclo do nitrogênio, a figura 5 representa os processos relacionados ao ciclo do fósforo e a figura 6 representa os processos relacionados a dinâmica do OD e da DBO.

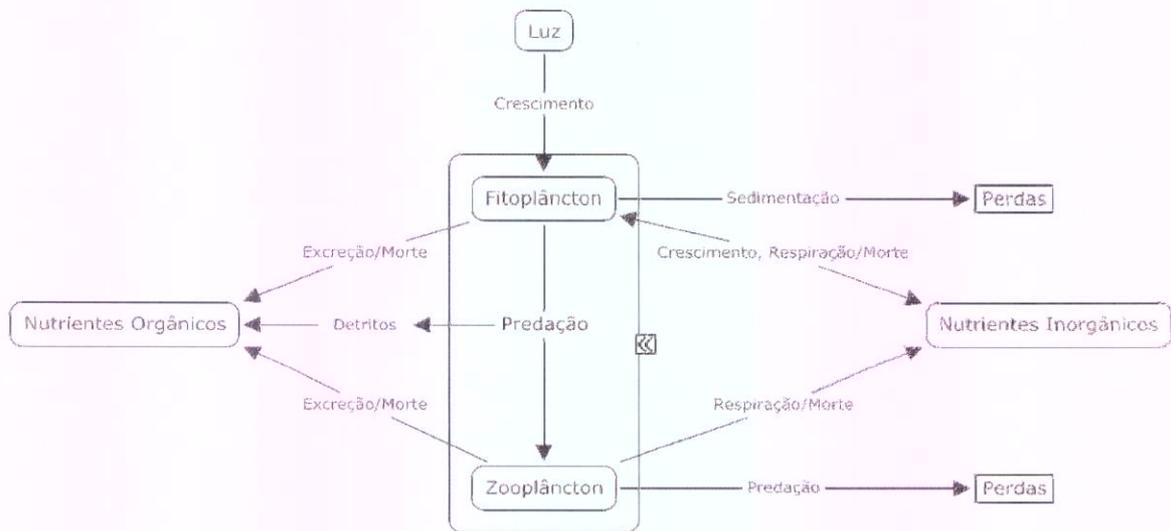


Figura 3 - Processos simulados na dinâmica do fitoplâncton

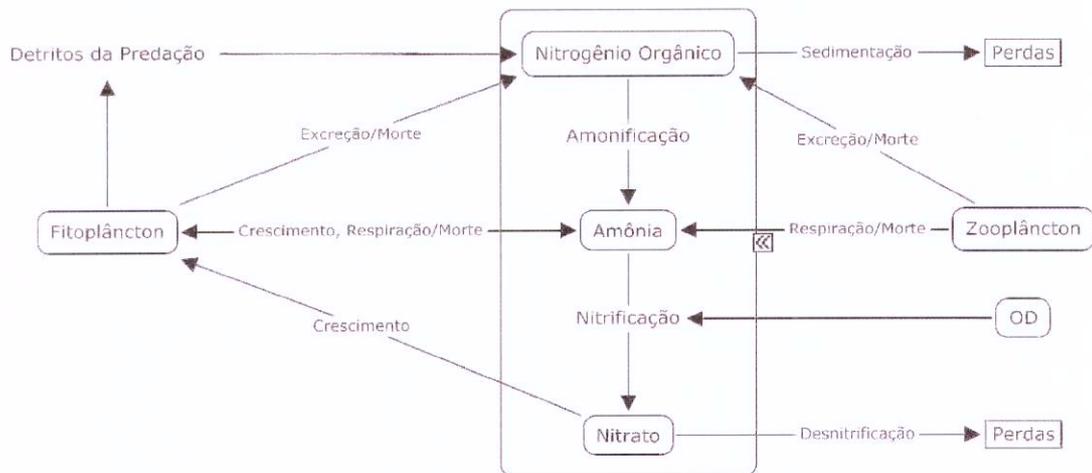


Figura 4 - Processos simulados no ciclo do nitrogênio

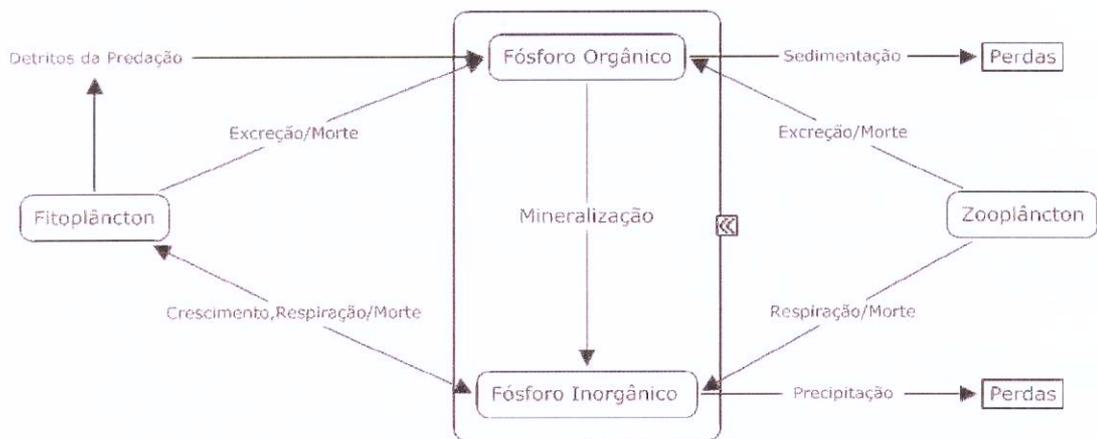


Figura 5 - Processos simulados no ciclo do fósforo

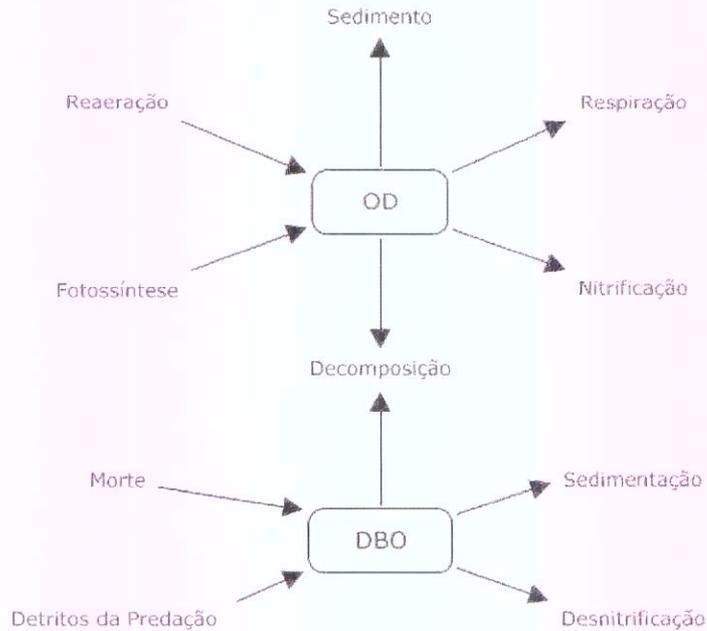


Figura 6 - Processos simulados na dinâmica OD-DBO

Em geral, as taxas da maioria das reações químicas e biológicas crescem com o aumento da temperatura. No SisBaHiA<sup>®</sup> a dependência da temperatura nas taxas das reações é representada através da equação de Arrhenius, em uma temperatura de referência de 20°C:

$$k(T) = k(20)\theta^{T-20}$$

As equações dos processos de transformação do modelo de qualidade de água do SisBaHiA<sup>®</sup> são mostradas a seguir.

$$\sum R_1 = \underbrace{r_{na} k_{ra} (1 - f_{on}) C_9}_{\text{resp. de fitoplâncton}} + \underbrace{\frac{r_{na}}{r_{ca}} k_{rz} (1 - f_{on}) C_4}_{\text{resp. de zooplâncton}} + \underbrace{r_{na} k_{ea} (1 - f_{on}) C_9}_{\text{morte de fitoplâncton}} + \underbrace{\frac{r_{na}}{r_{ca}} k_{ez} (1 - f_{on}) C_4}_{\text{morte de zooplâncton}}$$

$$\sum R_2 = \underbrace{k_{12}C_1}_{\text{nitrificação}} - \underbrace{k_{2D}C_2}_{\text{desnitrificação}} - \underbrace{\left(1 - \frac{C_1}{(k_{am} + C_1)}\right) r_{na} K_g C_9}_{\text{crescimento de fitoplâncton}}$$

$$\begin{aligned} \sum R_3 = & \underbrace{r_{pa} k_{ra} (1 - f_{op}) C_9}_{\text{resp. de fitoplâncton}} + \underbrace{\frac{r_{pa}}{r_{ca}} k_{rz} (1 - f_{op}) C_4}_{\text{resp. de zooplâncton}} + \underbrace{r_{pa} k_{ea} (1 - f_{op}) C_9}_{\text{morte de fitoplâncton}} \\ & + \underbrace{\frac{r_{pa}}{r_{ca}} k_{ez} (1 - f_{op}) C_4}_{\text{morte de zooplâncton}} - \underbrace{r_{pa} k_g C_9}_{\text{cresc. de fitoplâncton}} + \underbrace{k_{83} C_8}_{\text{mineralização}} - \underbrace{\frac{v_{fr}}{H} C_3}_{\text{precipitação}} \end{aligned}$$

$$\sum R_4 = \underbrace{r_{ca} E_z k_{gz} C_9 C_4}_{\text{crescimento}} - \underbrace{k_{rz} C_4}_{\text{respiração e excreção}} - \underbrace{k_{ez} C_4}_{\text{mortalidade}} - \underbrace{k_{gzc} C_4}_{\text{predação}}$$

$$\begin{aligned} \sum R_5 = & - \underbrace{k_D C_5}_{\text{decomposição}} - \underbrace{\frac{V_{s3}(1 - f_{D5})}{H} C_5}_{\text{sedimentação}} - \underbrace{\frac{5}{4} \frac{32}{14} k_{2D} C_2}_{\text{desnitrificação}} \\ & + \underbrace{r_{oc} r_{ca} (1 - E_z) k_{gz} C_9}_{\text{detritos da predação}} + \underbrace{r_{oc} r_{ca} k_{ea} C_9}_{\text{morte de fitoplâncton}} + \underbrace{r_{oc} k_{ez} C_4}_{\text{morte de zooplâncton}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum R_6 = & \underbrace{k_a (O_s - C_6)}_{\text{reaeração}} - \underbrace{k_D C_5}_{\text{decomposição}} - \underbrace{r_{on} k_{12} C_1}_{\text{nitrificação}} + \underbrace{r_{oc} r_{ca} k_g C_9}_{\text{fotossíntese}} \\ & - \underbrace{r_{oc} r_{ca} k_{ra} C_9}_{\text{respiração de fitoplâncton}} - \underbrace{r_{oc} k_{rz} C_4}_{\text{respiração de zooplâncton}} - \underbrace{\frac{SOD}{H}}_{\text{sedimento}} \end{aligned}$$

$$\sum R_7 = - \underbrace{k_{71} C_7}_{\text{amonificação}} - \underbrace{\frac{V_{s3}(1 - f_7)}{H} C_7}_{\text{sedimentação}} + \underbrace{r_{na} (1 - E_z) k_{gz} C_9 C_4}_{\text{detritos da predação}} + \underbrace{r_{na} k_{ra} f_{on} C_9}_{\text{excr. de fitoplâncton}}$$

$$\begin{aligned} \sum R_8 = & \underbrace{r_{pa} K_{ra} f_{op} C_9}_{\text{excr. de algas}} + \underbrace{\frac{r_{pa}}{r_{ca}} K_{rz} f_{op} C_4}_{\text{excr. de zooplâncton}} + \underbrace{r_{pa} K_{ea} f_{op} C_9}_{\text{morte de algas}} + \underbrace{\frac{r_{pa}}{r_{ca}} K_{ez} f_{op} C_4}_{\text{morte de zooplâncton}} \\ & + \underbrace{r_{pa} (1 - E_z) K_{gz} C_9 C_4}_{\text{detritos da predação}} - \underbrace{K_{83} C_8}_{\text{mineralização}} - \underbrace{\frac{V_{s3}(1 - f_{D8})}{H} C_8}_{\text{sedimentação}} \end{aligned}$$

$$\sum R_9 = \underbrace{k_g C_9}_{\text{crescimento}} - \underbrace{k_{ra} C_9}_{\text{respiração e excreção}} - \underbrace{k_{ea} C_9}_{\text{mortalidade}} - \underbrace{k_{gz} C_9}_{\text{predação}} - \underbrace{\frac{v_s}{H} C_9}_{\text{sedimentação}}$$

$$\sum R_T = \frac{1}{H} \frac{H_n}{\rho c}$$

Tabela 5 – Parâmetros utilizados nas equações do modelo de qualidade da água

Símbolo	Parâmetro
$k_g$	Taxa de crescimento do fitoplâncton
$k_{ra}$	Taxa de perdas devido à respiração e excreção
$k_{ea}$	Taxa de mortalidade não predatória
$k_{gz}$	Taxa de perdas devido à predação por zooplâncton
$v_s$	Velocidade de sedimentação de fitoplâncton
$H$	Espessura da camada de água
$r_{ca}$	Razão carbono/clorofila na biomassa das algas
$E_z$	Eficiência de predação do zooplâncton sobre algas
$k_{rz}$	Taxa de perdas do zooplâncton por respiração e excreção
$k_{ez}$	Taxa de perdas do zooplâncton por mortalidade não-predatória
$k_{gzc}$	Taxa de perdas do zooplâncton por predação
$r_{na}$	Razão entre nitrogênio e clorofila
$k_{71}$	Taxa de amonificação do nitrogênio orgânico
$v_{s3}$	Velocidade de sedimentação de substâncias orgânicas
$f_7$	Fração de nitrogênio orgânico dissolvido na coluna d'água
$f_{on}$	Fração da respiração e excreção do fitoplâncton e do zooplâncton reciclada para nitrogênio orgânico
$k_{12}$	Taxa de nitrificação
$k_{am}$	Constante de meia saturação para preferência de amônia
$k_{2D}$	Taxa de desnitrificação
$k_{NO3}$	Constante de meia saturação para desnitrificação
$r_{pa}$	Razão entre fósforo e clorofila no fitoplâncton
$k_{83}$	Taxa de mineralização do fosfato não-reativo
$f_{D8}$	Fração de fósforo orgânico dissolvido na coluna d'água
$f_{op}$	Fração da respiração e excreção do fitoplâncton e do zooplâncton reciclada para fosfato não-reativo
$v_{fp}$	Velocidade de precipitação do fósforo inorgânico
$k_d$	Taxa de decomposição da DBO
$k_a$	Taxa de reaeração
$O_s$	Concentração de saturação do oxigênio
$r_{on}$	Razão de oxigênio consumido por unidade de massa de nitrogênio oxidado no processo total de nitrificação

---

$k_n$	Taxa de nitrificação
$r_{oa}$	Quantidade gerada de oxigênio por unidade de biomassa de fitoplâncton produzida
$r_{oc}$	Quantidade de oxigênio consumido na decomposição de um grama de carbono orgânico
$f_{D5}$	Fração da DBO dissolvida
$H_n$	Fluxo total de calor na interface ar-água
$\rho$	Massa específica da água
$c$	Calor específico da água

## 4 Cenários de Modelagem Hidrodinâmica

Os cenários de modelagem hidrodinâmica para o reservatório de Louriçal foram criados para diagnosticar regiões de estagnação, seja no canal principal ou no leito de seus braços tributários, e servir de dados de entrada para as modelagens de partículas e de qualidade da água. Deste modo foram simulados quatro cenários hidrológicos distintos em cada um dos reservatórios, os quais serão descritos a seguir:

- i. O cenário de Vazão Máxima Turbinada (VMT);
- ii. O cenário com 70% da VMT (aqui chamado cenário 70);
- iii. O cenário com 50% da VMT (aqui chamado cenário 50) e;
- iv. O cenário de estiagem crítica.

### 4.1 Cenário VMT

Para esse cenário, foram utilizadas as vazões máximas advindas dos reservatórios de Anta e Tocaia. Essas vazões são função da máxima vazão turbinada pela usina de Simplício. Como resultado da soma da vazão máxima turbinada com a vazão dos tributários em Tocaia, tem-se uma vazão afluyente ao canal principal do reservatório de Louriçal de  $342 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Já nos tributários aos reservatórios foi considerada a média das máximas vazões mensais de suas respectivas sub-bacias de drenagem, apresentadas na Tabela 1. Esses valores variaram em torno de  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$  para cada um dos tributários.

### 4.2 Cenário 70

Considerando que uma usina hidrelétrica é projetada para operar o máximo de tempo com todas as máquinas em funcionamento, as vazões próximas da VMT são bastante prováveis dentro do circuito. Dessa forma, as vazões de 70% em relação à VMT são importantes na avaliação da hidrodinâmica e da qualidade da água em Louriçal.

A vazão utilizada para esse cenário será de 240 m<sup>3</sup>/s pelo canal principal do reservatório. Já para os tributários, cada um deles afluirá ao reservatório com 1,37 m<sup>3</sup>/s.

### 4.3 Cenário 50

A operação de uma máquina e meia para a usina em Simplício já é um cenário considerado desfavorável para a produção de energia, pois a usina fica inaproveitada em 50%. Dessa forma, o cenário 50 já pode ser considerado um cenário de estiagem, ainda que não seja um cenário extremo.

A vazão utilizada para esse cenário será de 171 m<sup>3</sup>/s pelo canal principal do reservatório. Já para os tributários, cada um deles afluirá ao reservatório com 1,37 m<sup>3</sup>/s.

### 4.4 Cenário de Estiagem

Para a definição das vazões afluentes para o cenário de estiagem buscou-se o período mais crítico de operação do AHE Simplício – Queda Única. A usina de Simplício possuirá três turbinas com vazão nominal de 113 m<sup>3</sup>/s cada uma. Uma vez que a vazão mínima de operação de cada turbina é de 50% da vazão nominal e que o cenário mais crítico de turbinamento é o funcionamento de apenas uma turbina, a vazão mínima que deve ser turbinada é de 56,5 m<sup>3</sup>/s, que somada às vazões de afluência em Tocaia geram 57 m<sup>3</sup>/s afluentes em Louriçal.

A vazão utilizada para os tributários Louriçal e Areia foi a do mês mais crítico (maio), conforme pode ser observado na Tabela 1. Dessa forma, cada um dos braços do reservatório é abastecido com uma vazão de 0,25 m<sup>3</sup>/s.

Cabe aqui considerar que esse é um cenário considerado significativamente crítico, pois a observação da série de vazões fornecidas por FURNAS para o período entre 1998 e 2008 demonstrou a inexistência de valores dessa ordem de grandeza para o Rio Paraíba do Sul. Todavia, ainda que fossem registradas essas vazões pelo fluxo principal do reservatório, isso teria que acontecer ao mesmo tempo em que os tributários também estivessem no período de estiagem mais crítico, que foi identificado como sendo o mês de maio.

Dessa forma, os resultados desse cenário devem ser interpretados com cautela, devido à pequena incidência, segundo dados fornecidos por FURNAS, nos registros históricos de configurações hidrológicas compatíveis com esse cenário e, portanto, não deve levar à definição de um impacto classificado como certo. O objetivo da simulação desse cenário foi mostrar o risco ambiental associado a uma situação extrema e de baixa probabilidade no decorrer da operação da usina.

#### 4.5 Janelas de Tempo dos Cenários de Modelagem

Ao fim da descrição de cada um dos cenários de modelagem cabem duas indagações: quais cenários são mais prováveis? Por quanto tempo o reservatório permanece de forma contínua em cada um dos cenários?

Com o objetivo de responder essas perguntas FURNAS forneceu uma análise feita a partir série de dados de 1998 a 2008 da estação fluviométrica ANTA G (código ANA: 58630002) mostrando quantas vezes nos últimos 10 (dez) anos cada um dos cenários se mostrou presente e por quanto tempo essa situação persistiu.

Chamamos aqui de janela de tempo o período em dias que cada um dos cenários esteve presente de forma contínua. As Tabelas 6 e 7 a seguir mostram um resumo desse trabalho.

Tabela 6 – Ocorrência dos Cenários de Vazões de 1998 a 2008 no Rio Paraíba do Sul

	VMT > Q > 70%VMT	70%VMT > Q > 50%VMT	50%VMT > Q > QMIN	Q < QMIN
NÚMERO DE OCORRÊNCIAS EM 10 ANOS	106	123	142	0
MAIOR PERÍODO OBSERVADO (Dias)	238	228	177	0
MEDIANA DOS PERÍODOS OBSERVADOS (Dias)	4	5	3,5	0
MÉDIA DOS PERÍODOS OBSERVADOS (Dias)	16,48	17,80	11,30	0
DESVIO PÁDRÃO (Dias)	42,97	41,34	26,09	0

Fonte: FURNAS (2009) - estação fluviométrica ANTA G ( código ANA: 58630002)

Tabela 7 – Duração das ocorrências dos Cenários de Vazões de 1998 a 2008 no Rio Paraíba do Sul

PERÍODOS CONTÍNUOS (Dias)	VMT > Q > 70%VMT		70%VMT > Q > 50%VMT		50%VMT > Q > QMIN	
	Ocorrências (n)	Percentual	Ocorrências (n)	Percentual	Ocorrências (n)	Percentual
0 a 10	84	79%	87	71%	117	83%
10 a 20	12	11%	19	15%	6	4%
20 a 30	1	1%	6	5%	8	6%
30 a 40	1	1%	1	1%	2	1%
40 a 50	0	0%	1	1%	1	1%
50 a 60	1	1%	0	0%	1	1%
60 a 70	0	0%	0	0%	0	0%
70 a 80	1	1%	1	1%	0	0%
80 a 90	1	1%	0	0%	2	1%
90 a 100	0	0%	0	0%	0	0%
100 a 110	0	0%	1	1%	0	0%
110 a 120	0	0%	0	0%	1	1%
120 a 130	0	0%	1	1%	0	0%
130 a 140	0	0%	1	1%	2	1%
140 a 150	0	0%	1	1%	0	0%
150 a 160	1	1%	0	0%	0	0%
160 a 170	1	1%	0	0%	0	0%
170 a 180	0	0%	0	0%	1	1%
180 a 190	0	0%	2	2%	0	0%
190 a 200	1	1%	0	0%	0	0%
200 a 210	0	0%	1	1%	0	0%
210 a 220	0	0%	0	0%	0	0%
220 a 230	0	0%	1	1%	0	0%
230 a 240	2	2%	0	0%	0	0%
240 a 250	0	0%	0	0%	0	0%

Fonte: FURNAS (2009) - estação fluviométrica ANTA G ( código ANA: 58630002)

Ao se analisar as tabelas 6 e 7 pode-se concluir que:

- Embora número de ocorrências nas faixas de vazões analisadas terem sido próximos, as vazões compreendidas entre a de estiagem e a de 50% da VMT foram as de maior incidência no período de 10 anos. A média dos eventos desse intervalo é de 11,3 dias e 83% das ocorrência duraram menos de 10 dias confirmando a mediana observada de 3,5 dias;
- Vazões entre 50% e 70% de VMT se mostraram presentes 123 vezes, sendo

que o tempo médio de cada evento é o mais alto – 17,8 dias. A maioria das ocorrências é inferior a dez dias o que também corrobora a mediana de 5 dias;

- Vazões entre 70% de VMT e VMT puderam ser observadas incidência semelhante das demais. Os eventos nessa configuração têm média e mediana de 16,48 e 4 dias respectivamente;
- Em todas as configurações foram observadas janelas de longa duração sendo que suas ocorrências não ultrapassam o total de quatro eventos para o período de dez anos contínuos de registro de vazões (1998 a 2008);
- Por fim, fica claro nas tabelas que não foram registrados, nos últimos 10 anos de dados analisados, eventos com vazões referentes ao cenário de estiagem do presente trabalho. Tal fato evidencia a baixa probabilidade de ocorrência de vazões dessa ordem.

## 5 Resultados da Modelagem Hidrodinâmica

### 5.1 Cenário de VMT

O reservatório de Lourival é composto por duas regiões distintas de campo de velocidade para o cenário de vazão máxima, o qual consistiu em forçar o modelo com uma vazão de  $342 \text{ m}^3/\text{s}$  na entrada principal e  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  em cada um dos tributários.

Percebe-se claramente na Figura 7 a dominância do escoamento principal com velocidades significativamente mais altas do que aquelas presentes nos dois tributários. Antes de passar pelo canal que divide o reservatório, a região mais intensa apresenta velocidades máximas da ordem de  $0,55 \text{ m/s}$ . O túnel central e o de saída são os locais com as maiores velocidades, de  $1,5$  e  $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivamente.

O córrego Areia possui extensão pouco superior a  $3500$  metros, e o córrego Lourival possui um comprimento da ordem de  $2200$  metros. O fluxo gerado pela descarga de  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , máxima vazão apresentada pelos tributários, gerou máximas velocidades da ordem de  $0,09 \text{ m/s}$  na entrada dos braços, de  $0,015 \text{ m/s}$  na porção mais central e inferior e voltou a gerar velocidades mais altas ( $0,1 \text{ m/s}$ ) na junção dos braços com a entrada do túnel central e do túnel de saída.

As regiões com os maiores gradientes de velocidade são as entradas dos dois túneis (central e de saída) do reservatório. Dessa forma, foram geradas imagens localizadas sobre esses pontos para melhor visualização.

A Figura 8 mostra o trecho em torno do túnel central do reservatório. Na entrada do braço esquerdo do reservatório ao túnel percebe-se um aumento das velocidades de fluxo. Nesse local, ainda no braço, percebe-se a formação de dois vórtices girando em sentido contrário. Esses vórtices são importantes por um lado para a manutenção de velocidades razoáveis dentro do reservatório. Porém, por outro lado, são responsáveis também pelo aumento do tempo de residência da água nesse local. Esse fato será melhor comentado e observado quando for mostrado o transporte de partículas.

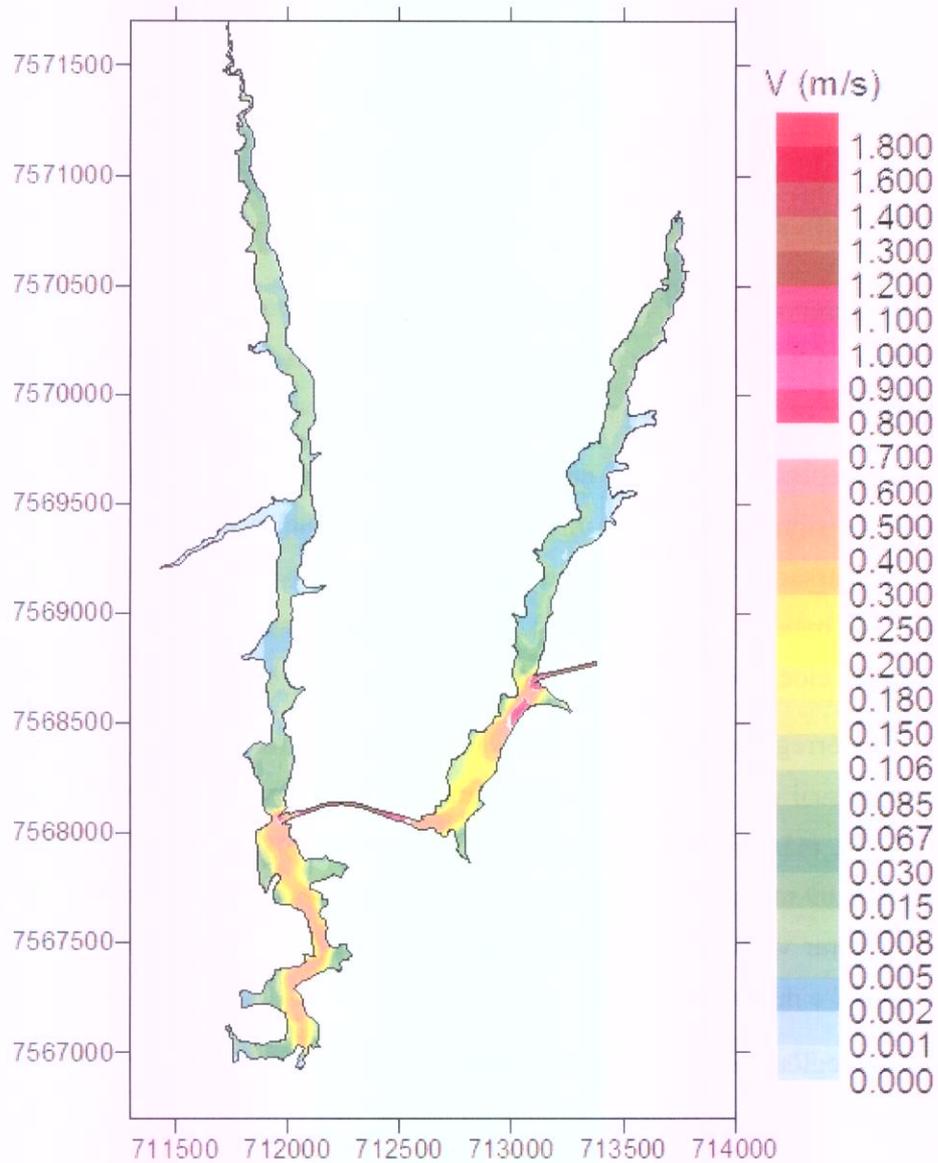


Figura 7 – Campo de velocidade Res. Louriçal, VMT.

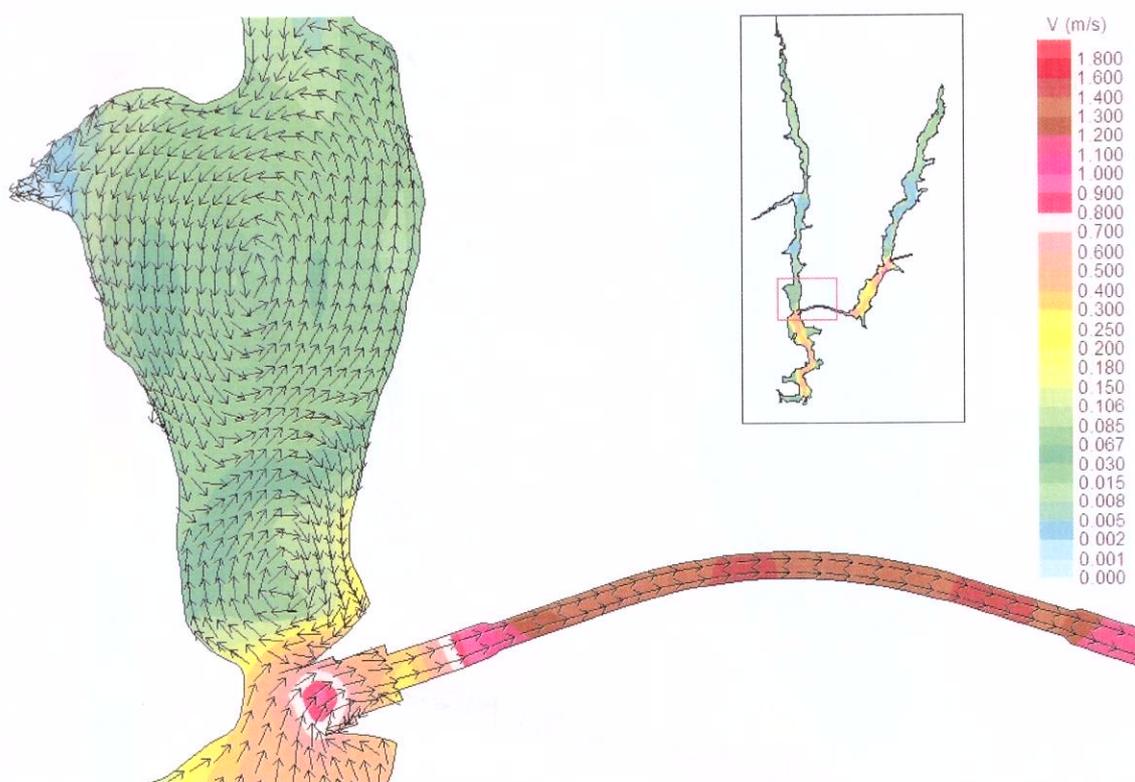


Figura 8 – Campo de velocidade – foco na entrada do túnel central, VMT.

A Figura 9 mostra o foco na região de saída do reservatório e na entrada do braço direito no fluxo principal. Esse braço apresenta velocidades da mesma ordem daquelas vistas no outro. Todavia, sua forma mais larga e seu comprimento mais curto tornam o tempo de residência nele menor.

O trecho final desse braço apresenta uma grande turbulência aparente, com o fluxo em várias direções distintas e com recirculações mal definidas, diferentes daquelas vistas na saída do braço direito. A interação do fluxo do braço com o fluxo principal do reservatório causa também o aumento das velocidades nessa região, como também pode ser visto na Figura 9.

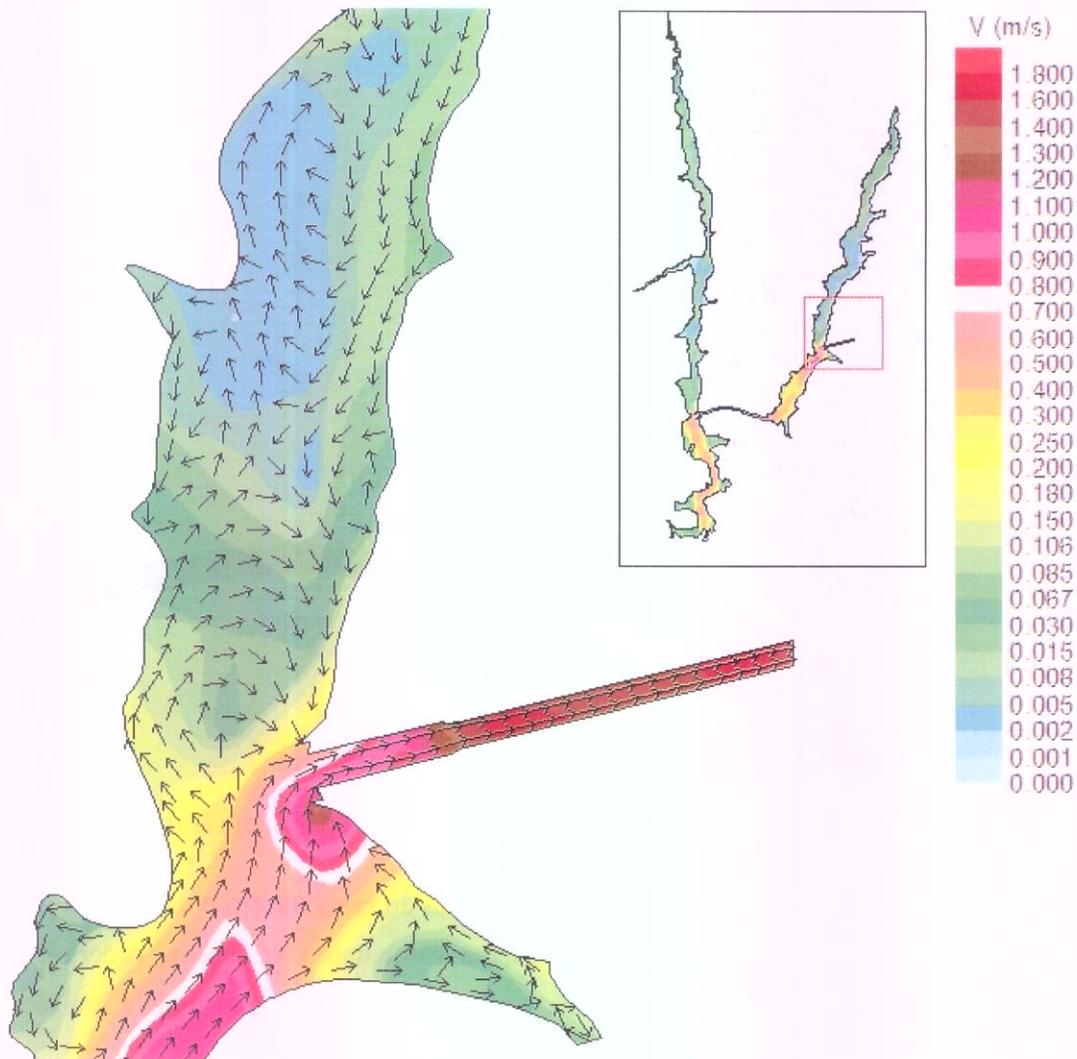


Figura 9 – Campo de velocidade – foco na saída do reservatório, VMT.

## 5.2 Cenário 70

Conforme já comentado na descrição dos cenários de modelagem, espera-se que o cenário 70 apresente frequência significativa durante a operação da usina de Simplício. Ele representa o cenário em que o reservatório recebe a afluência de 70% da Vazão Máxima Turbinável.

A Figura 10 apresenta o campo de velocidades obtido para esse cenário. Percebe-se

velocidades máximas da ordem de 0,9 m/s, principalmente no túnel central. Percebe-se, como no cenário anterior, o domínio do escoamento principal, mantendo um fluxo com velocidade significativamente maior que a aquela observada nos dois braços do reservatório.

Na maior parte dos dois braços o escoamento flui com velocidades entre 0,002 e 0,005 m/s, com acelerações situadas nas extremidades norte e sul de cada um.

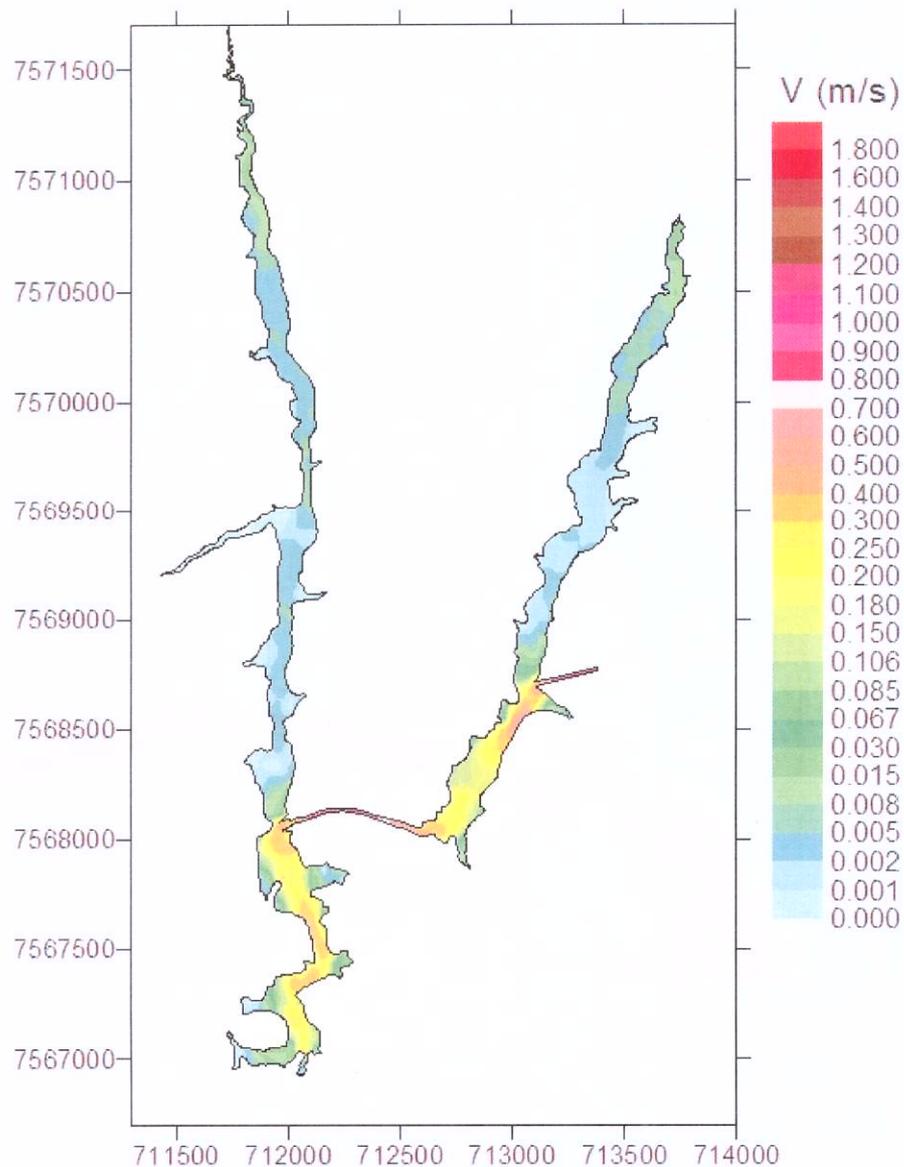


Figura 10 – Campo de velocidade Res. Lourical, 70

Para observar as regiões de grande interesse, na interação entre o escoamento principal e os braços do reservatório, produziu-se as figuras 11 e 12.

É interessante observar (Figura 11) que, na saída do braço esquerdo do reservatório, as recirculações se apresentam de forma diferenciada em relação ao cenário VMT, principalmente para recirculação do norte, que foi perturbada e perdeu sua forma, local em que o fluxo no sentido norte já não consegue mais avançar.

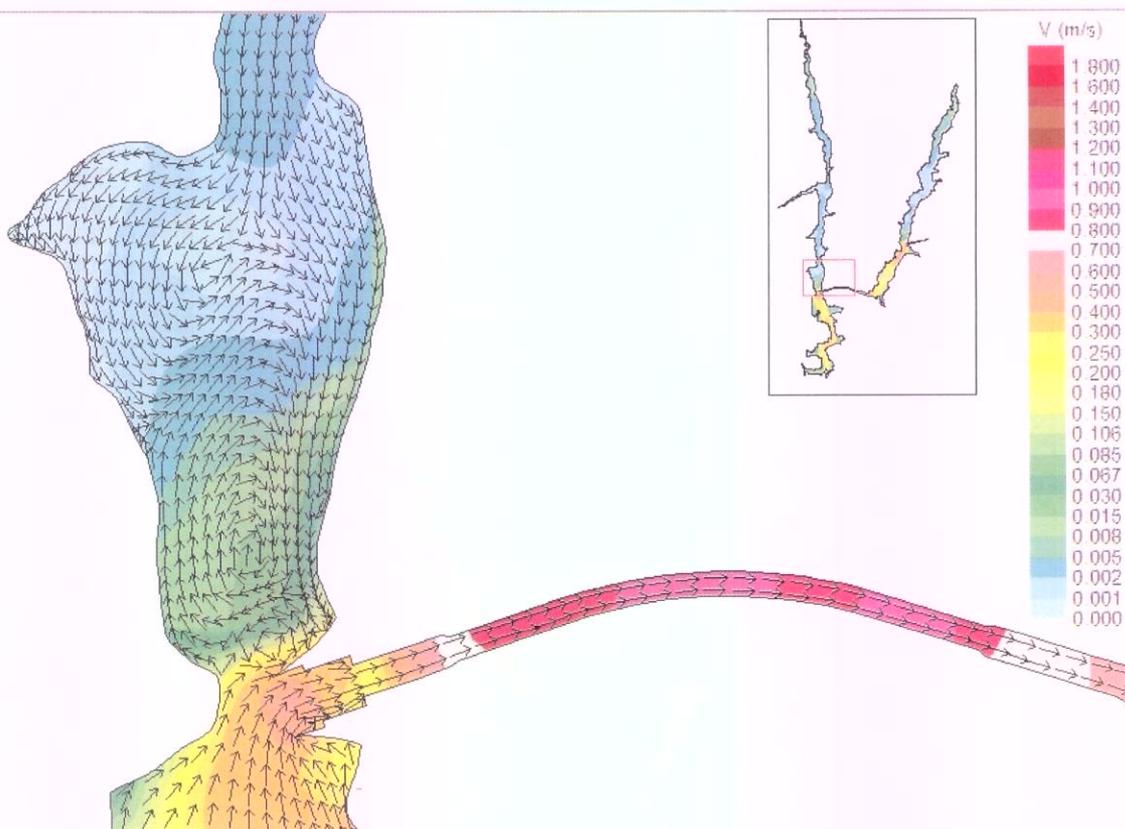


Figura 11 – Campo de velocidade – foco na entrada do túnel central, 70.

A Figura 12 a seguir foca a saída do reservatório e mostra o fluxo na saída do braço direito. Quando se compara com o cenário VMT, percebe-se que o escoamento mostrou-se mais organizado, sem recirculação completa e com velocidades mínimas da ordem de 0,001 m/s.

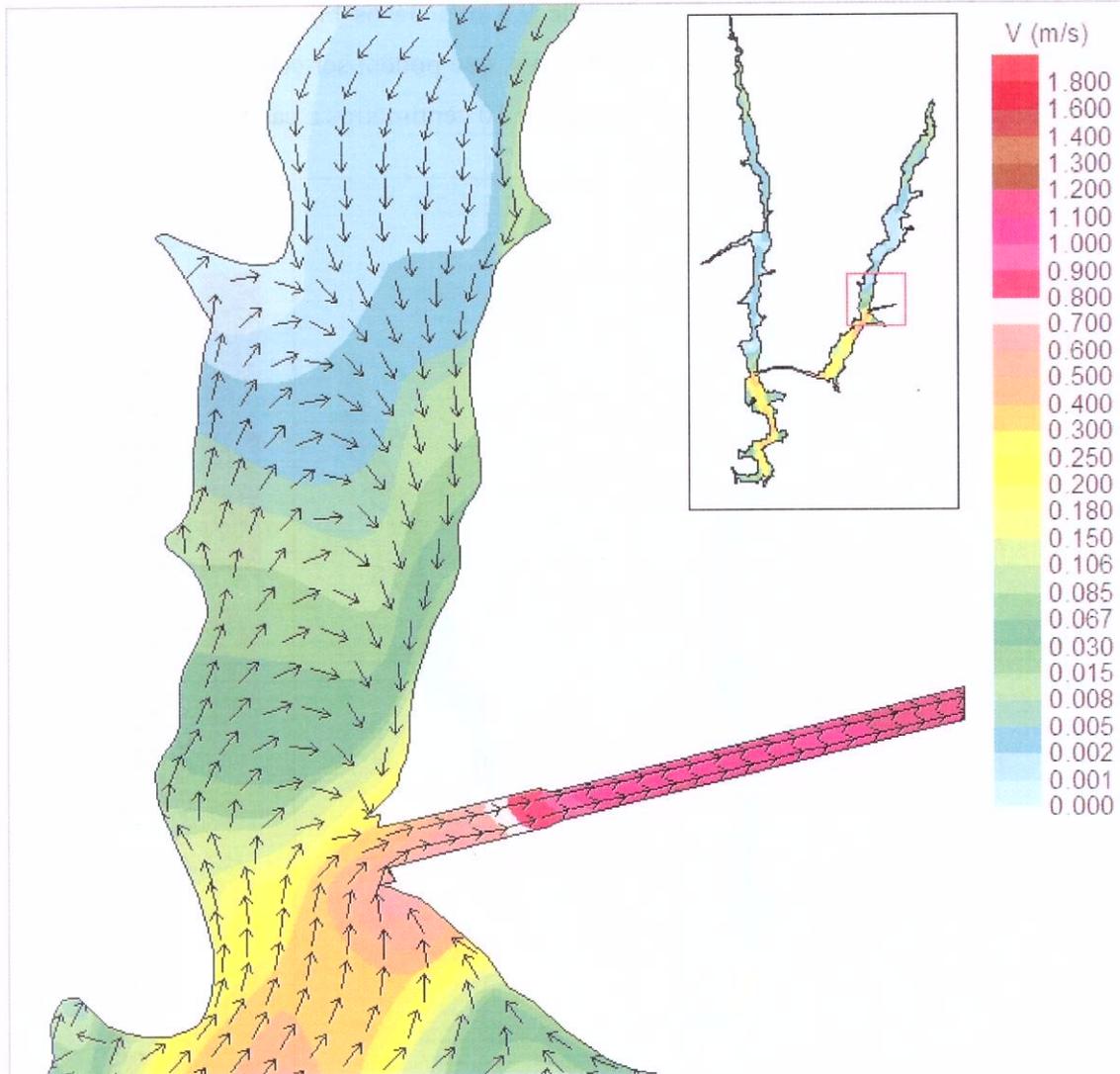


Figura 12 – Campo de velocidade – foco na saída do reservatório, 70.

### 5.3 Cenário 50

A seguir seguem os resultados da modelagem hidrodinâmica para o cenário de 50% da Vazão Máxima Turbinada. A vazão dos tributários foi mantida igual ao do cenário 70%.

A Figura 13 apresenta o resultado para todo o domínio do reservatório de Louriçal com o campo de velocidades obtido. Percebe-se que a velocidade no túnel central (região

de circulação mais intensa) foi da ordem de 0,8 m/s. Já os braços apresentam, em sua maior parte, velocidades entre 0,002 e 0,008 m/s, que podem ser consideradas baixas pois mostram que a partícula se movimenta menos de 10 centímetros a cada segundo.

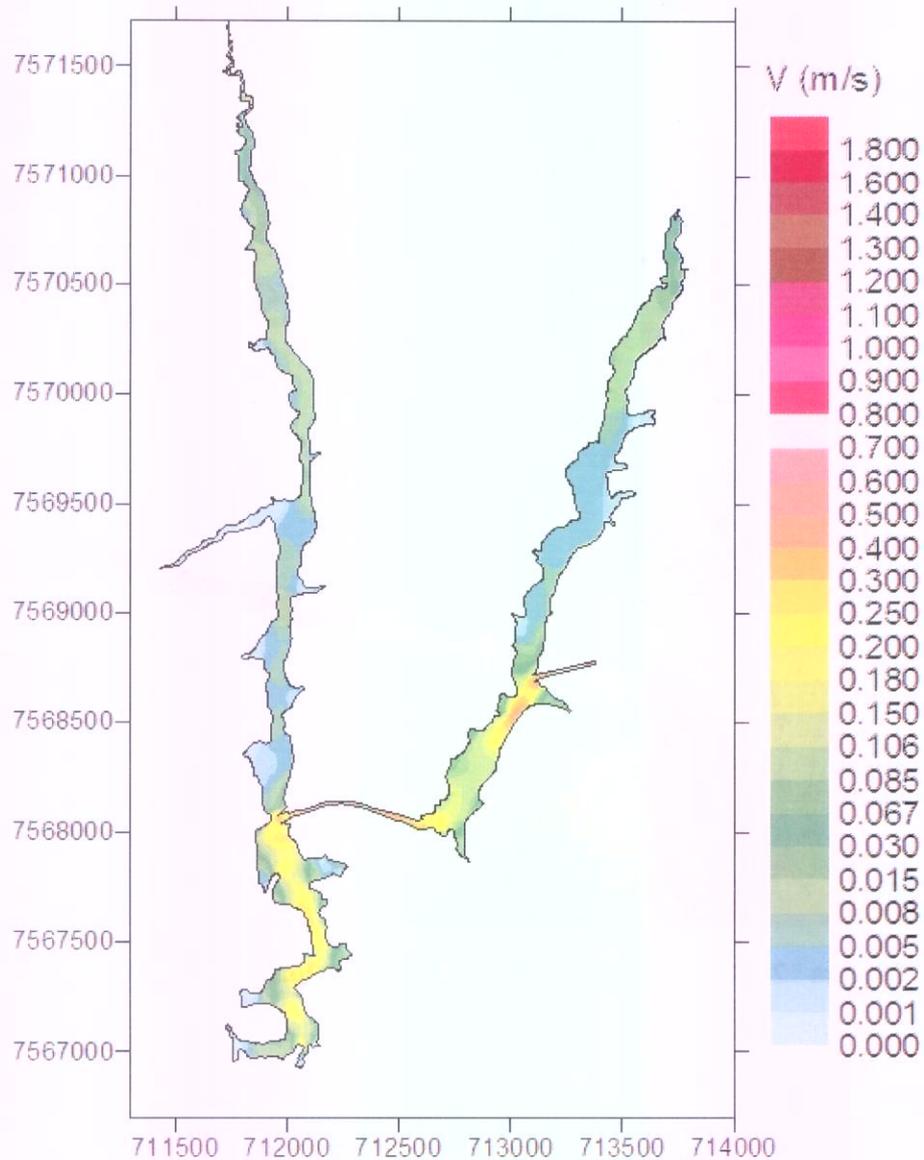


Figura 13 – Campo de velocidade Res. Louriçal, 50.

Como já apresentado nos outros cenários, a seguir é apresentado o resultado do campo hidrodinâmico com foco na entrada do túnel central e no túnel de saída.

Um fato importante a ser notado na Figura 14 a seguir é que o fluxo do braço

esquerdo do reservatório encontra o fluxo principal com mais intensidade, fazendo com que enxergue-se apenas uma recirculação na interação entre os dois fluxos. Percebe-se ainda que as menores velocidades observadas situam-se em uma reentrância do lado esquerdo da saída do braço. Essas velocidades apresentam valores da ordem de 0,001 m/s.

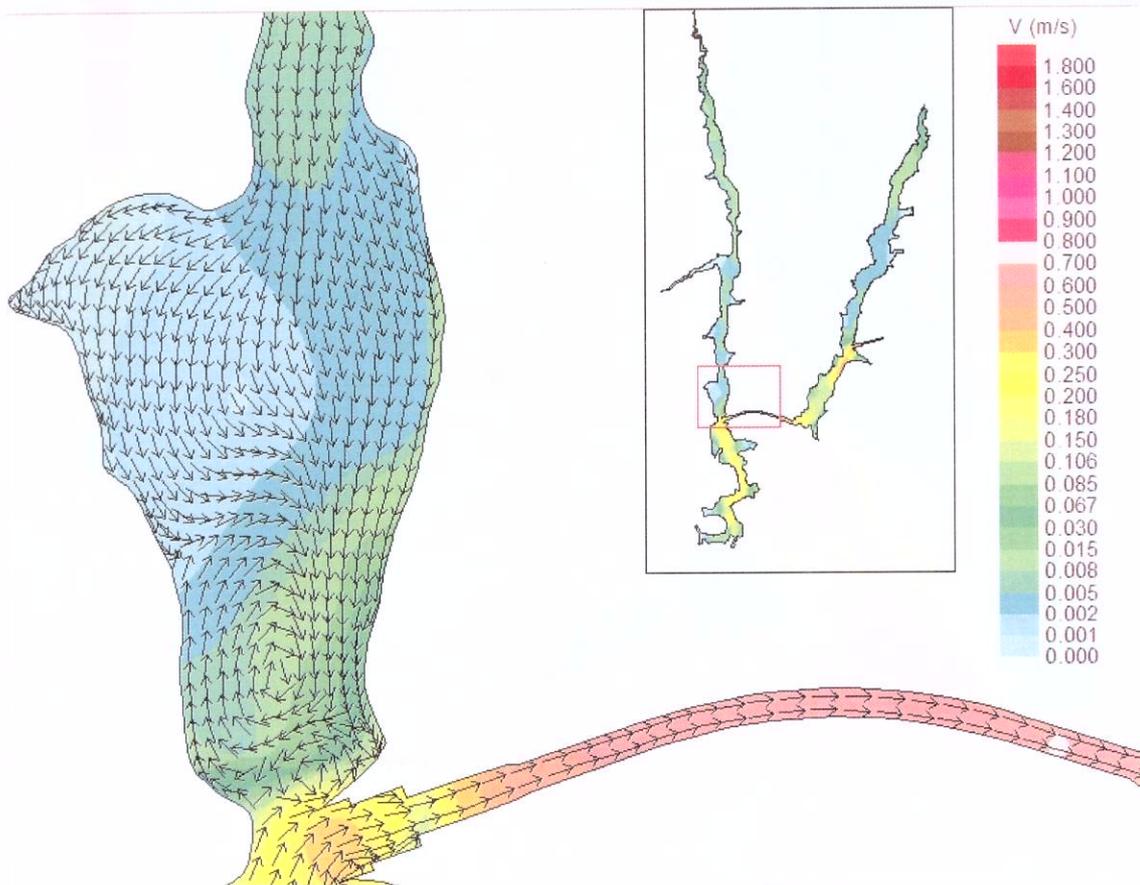


Figura 14 – Campo de velocidade – foco na entrada do túnel central, 50.

Para a saída do reservatório (Figura 15) observa-se o mesmo que já foi visto no cenário 70% - não há recirculação completa perceptível. A grande diferença, porém, está na maior facilidade com que o fluxo proveniente do braço consegue descer até o túnel de saída. Percebe-se velocidades maiores quando se compara com o cenário de 70% e também um prolongamento do fluxo na direção sul.

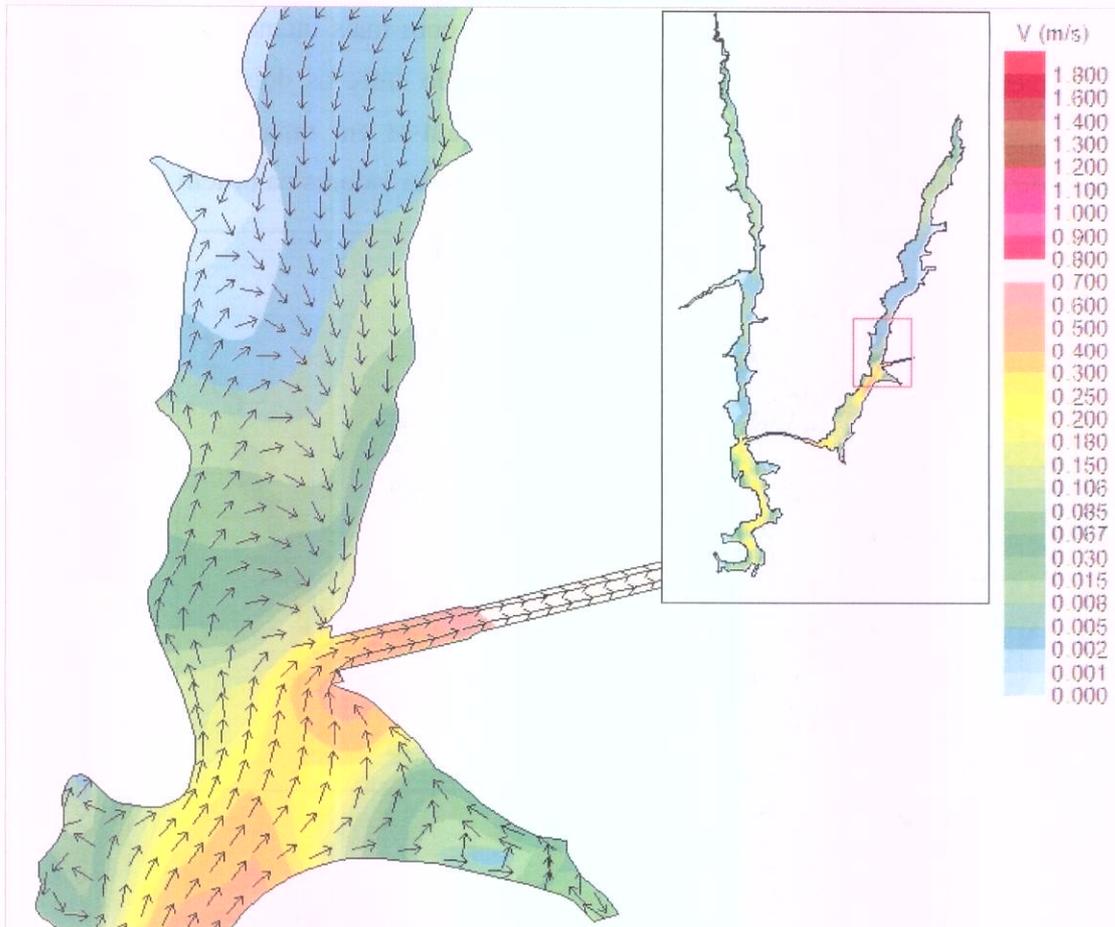


Figura 15 – Campo de velocidade – foco na saída do reservatório, 50.

## 5.4 Cenário de Estiagem

De forma análoga aos outros cenários, a circulação dentro do reservatório de Louriçal divide-se em duas regiões distintas: uma área com circulação mais intensa e, dentro dos braços, áreas com regime de velocidades menos intensas.

Neste cenário, as velocidades máximas observadas não foram superiores a 0,25 m/s. As mínimas, localizadas nas regiões de baixa circulação, apresentaram valores da ordem de 0,001 m/s (ver Figura 16).

Mais uma vez a dominância do fluxo principal no controle da hidrodinâmica é clara, ainda que não se verifique significativa heterogeneidade dentro dos braços em

relação às velocidades, ou seja, percebe-se uma influência mais prolongada das velocidades de entrada dos tributários, fazendo com que as velocidades mais baixas se concentrem mais no trecho intermediário.

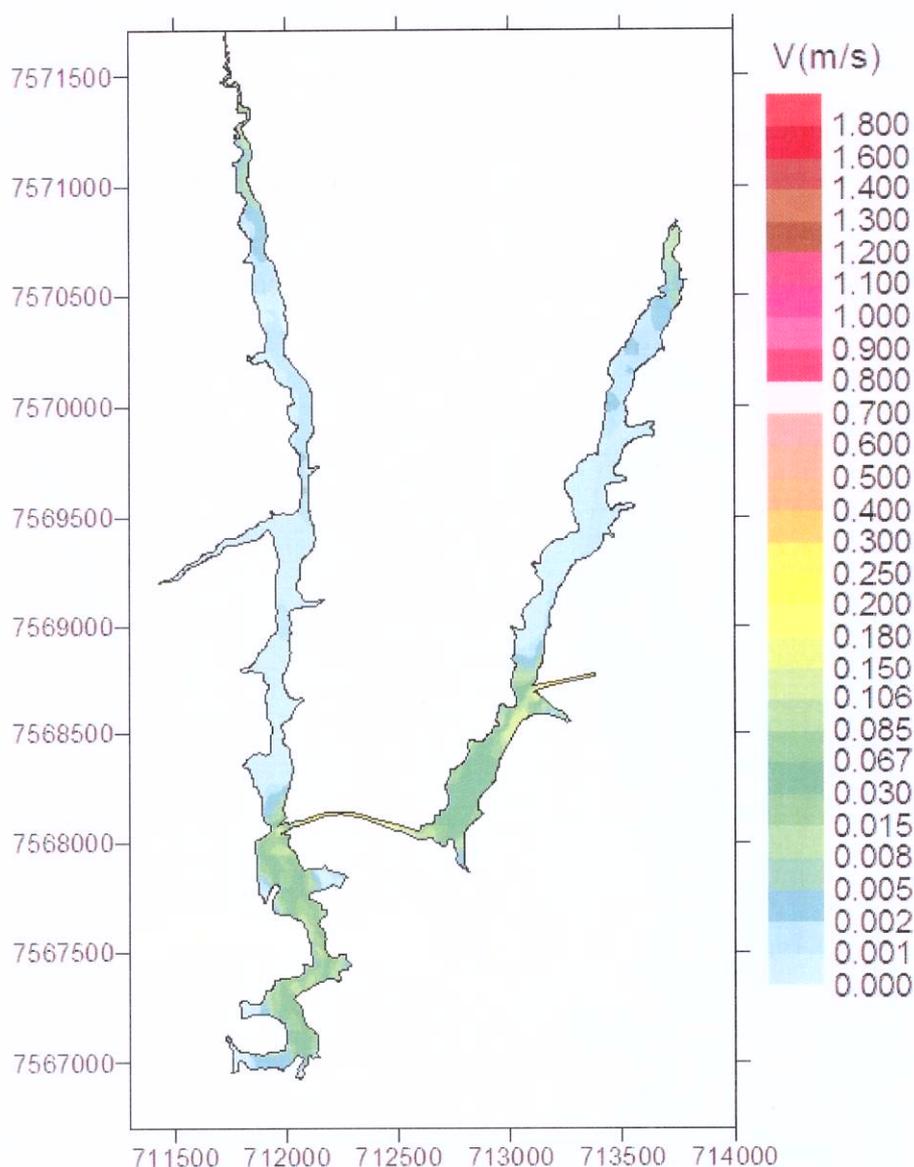


Figura 16 – Campo de velocidade Res. Louriçal, cenário de estiagem

Como mais uma vez os locais de interesse estão situados nos trechos mais ao Sul dos braços dos reservatórios, foram produzidas figuras focalizadas nesses pontos (Figuras 17 e 18).

Percebe-se, na Figura 17, que existem duas recirculações na saída do braço direito do reservatório. A recirculação mais ao norte é apenas parcial, pois não há uma inversão total de direção do fluxo. Esse é um fato relevante, pois essa forma de circulação hidrodinâmica é capaz de manter a água em movimento, ainda que com baixa velocidade e sem restringir sua passagem rumo ao canal principal do reservatório.

A recirculação mais próxima do túnel central apresenta-se mais bem definida e intensa com velocidades máximas em torno de 0,07 m/s. Logo abaixo dela percebe-se a quebra do padrão de recirculação, devido ao encontro de duas linhas de corrente com sentidos opostos, resultando em fluxos em diversas direções.

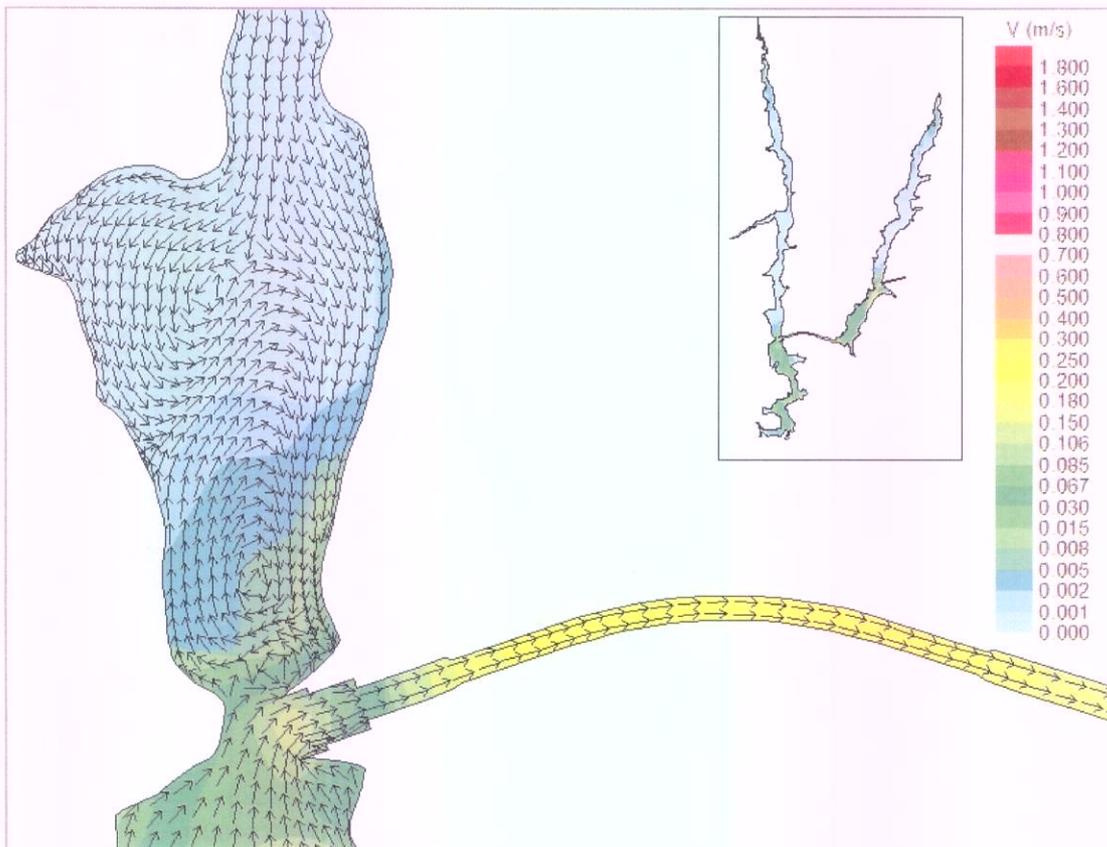


Figura 17 – Campo de velocidade – foco na entrada do túnel central, estiagem

A Figura 18 apresenta o campo de velocidade para a área próxima à saída do reservatório em cenário de estiagem. Percebe-se que no encontro entre o fluxo do tributário e aquele vindo do canal principal não há a formação de uma recirculação completa. Ao observar a Figura 18 nota-se claramente a presença de gradientes de velocidade nesse local. As máximas velocidades no tributário são de aproximadamente 0,001 m/s em local sem a influência do fluxo principal e atinge velocidades de 0,02 m/s depois do encontro dos dois escoamentos. No túnel de saída percebe-se a aceleração do fluido, causada pela restrição de área para a passagem do mesmo.

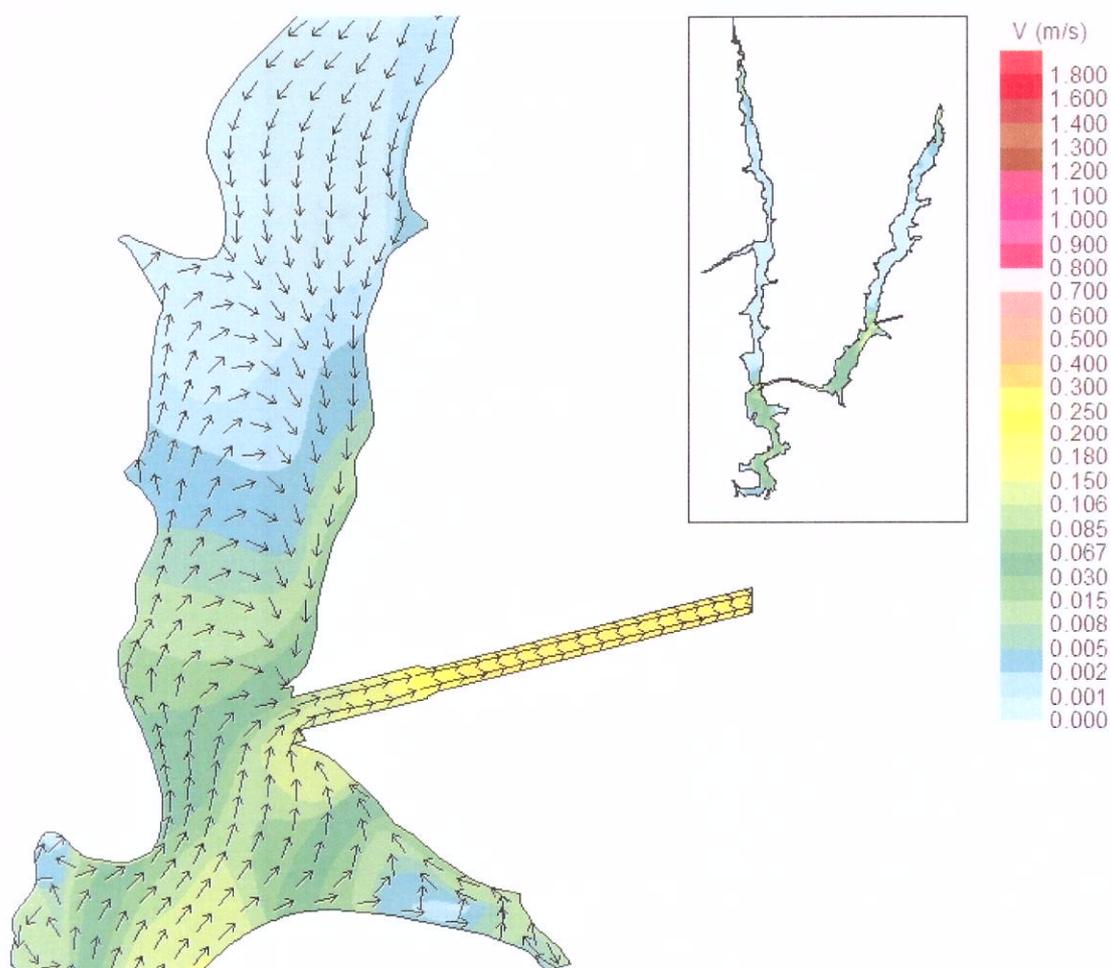


Figura 18 – Campo de velocidade – foco na saída do reservatório, estiagem

## 6 Modelagem do Transporte de Partículas

### 6.1 Cenário de VMT

A Figura 19 mostra o comportamento de um traçador passivo lançado nas extremidades dos córregos Areia e Louriçal. Este tipo de simulação foi elaborado para determinação de pontos de recirculação e possíveis estagnações do fluxo.

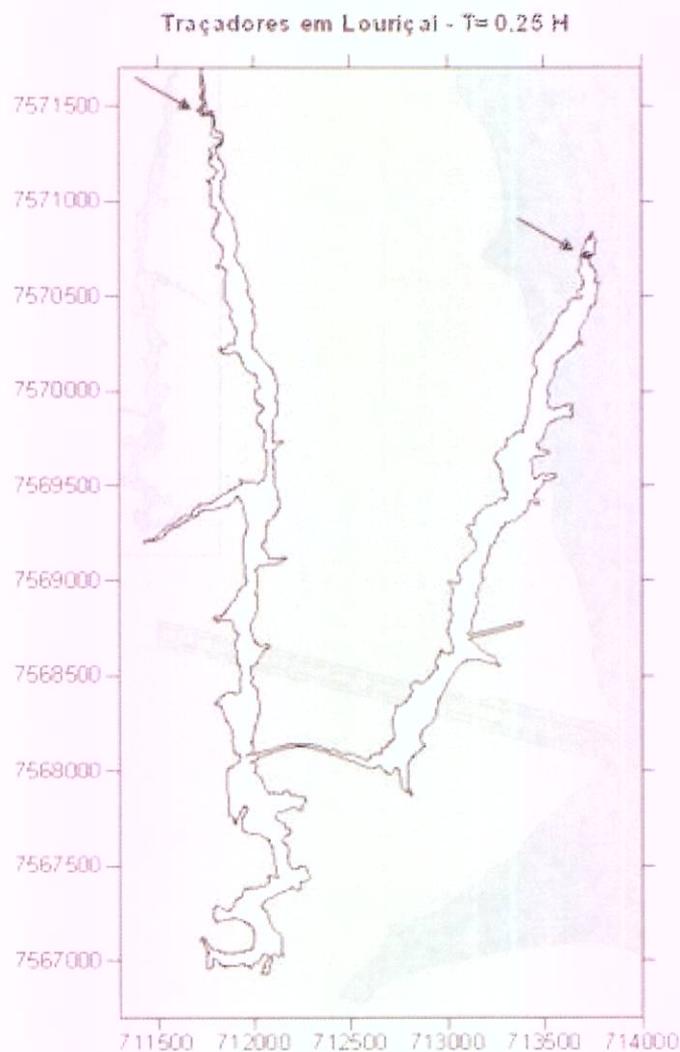


Figura 19 – Posição dos traçadores em Louriçal – início do Lançamento

Nas entradas dos córregos Areia e Louriçal, a circulação é dominada pelas descargas desses tributários e o grupo de partículas traçadoras são advectadas, se afastando de suas posições de lançamento. A Figura 20 apresenta a posição das partículas a 24 horas do lançamento. Para este instante, observa-se um deslocamento aproximado de 1 km do ponto de lançamento e não se observa nenhum ponto de estagnação, de forma que as partículas se deslocam praticamente em um único grupo.

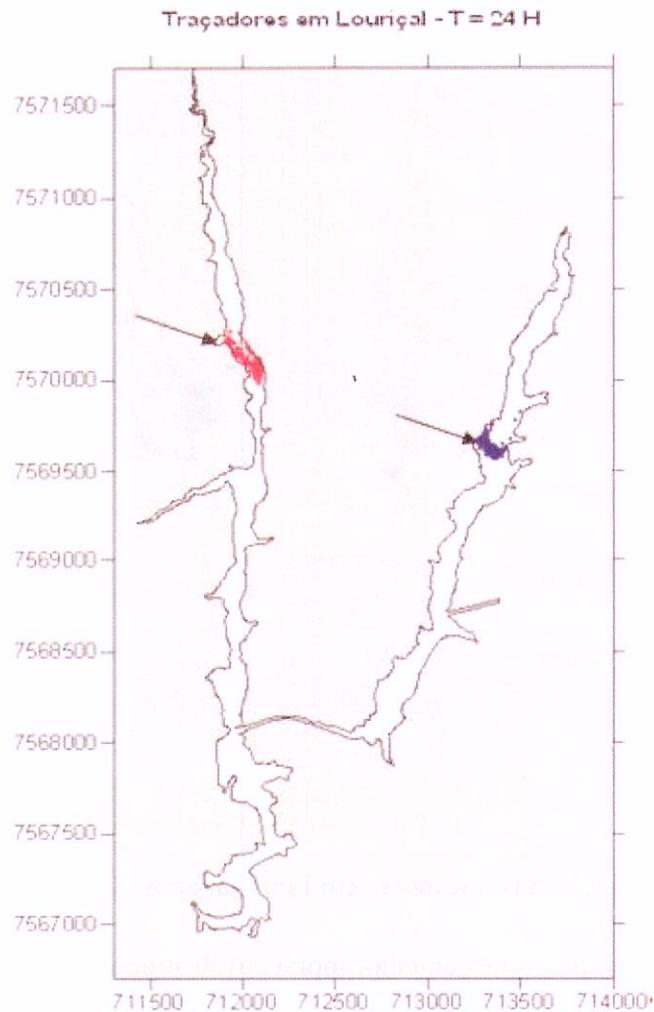


Figura 20 – Posição dos traçadores em Louriçal após 24 horas do Lançamento

Para  $t = 72$  horas (Figura 21) do lançamento, observa-se um maior espalhamento

das partículas ao longo dos braços do reservatório. Na área alagada do córrego Louriçal, as partículas já se encontram próximas da saída, ponto indicado pela seta preta na figura. No braço esquerdo, o maior grupo de traçadores se aproxima do túnel, mas uma parte deles se encontra atrasado.

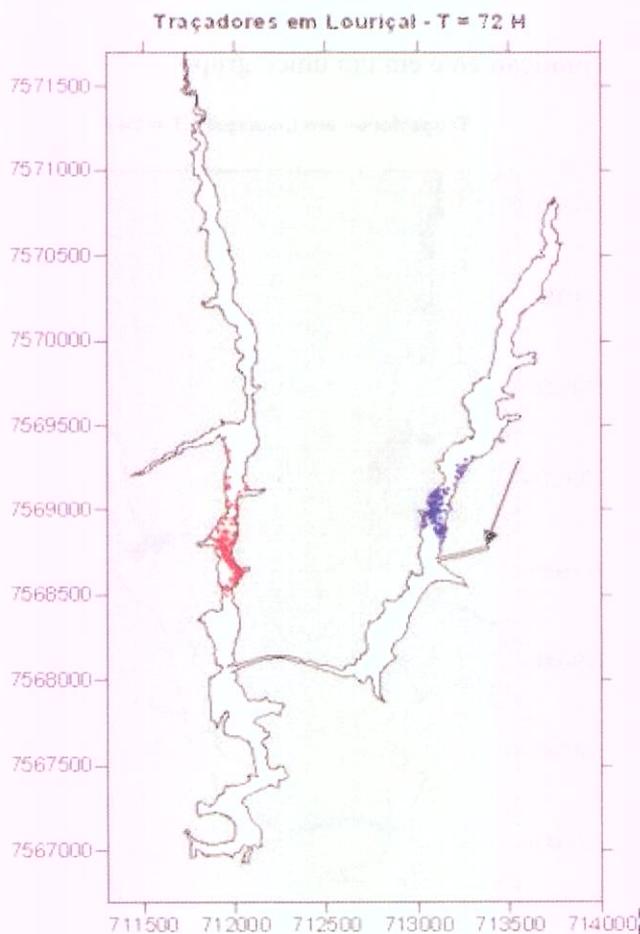


Figura 21 – Posição dos traçadores em Louriçal após 72 horas do Lançamento

Com dez dias após o lançamento, momento ilustrado na Figura 22, a maior parte dos traçadores do braço direito (córrego Louriçal) foram expulsos do reservatório, sendo que um grupo permanece na região do braço esquerdo (córrego Areia). Isso ocorre devido a uma área de recirculação, indicada pela seta localizada pouco acima do túnel de conexão entre as duas regiões.

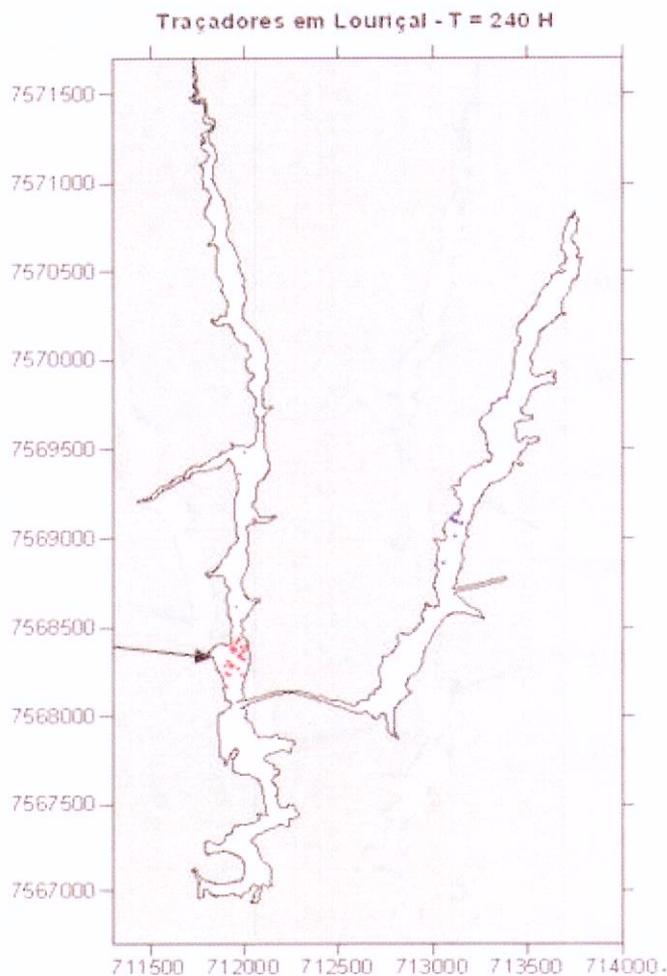


Figura 22 – Posição dos traçadores em Louriçal após 240 horas do Lançamento

Como pode ser observado na Figura 23, o tempo necessário para a maioria das partículas serem expulsas dos braços do reservatório de Louriçal é da ordem de 20 dias no cenário de vazão máxima.

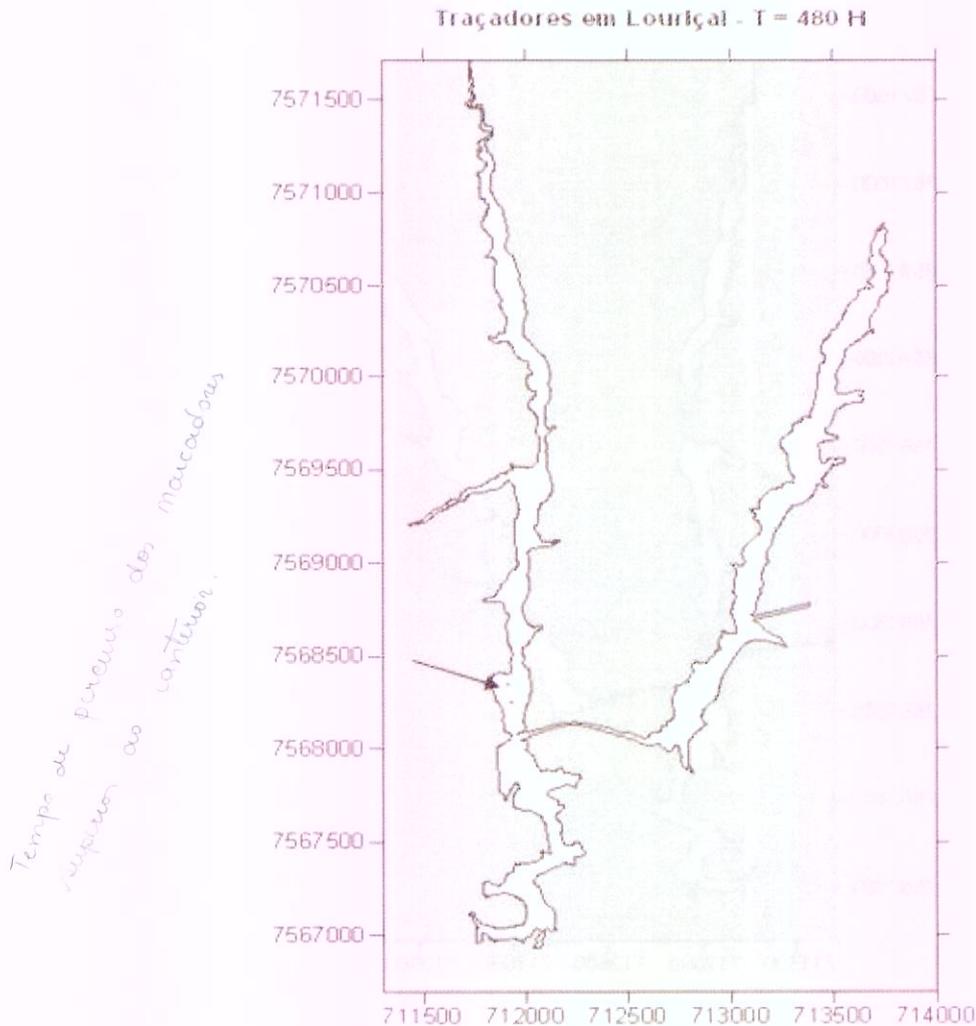


Figura 23 – Posição dos traçadores em Louriçal após 480 horas do Lançamento

Este tipo de análise mostra que em nenhum dos braços existe regiões de recirculação capazes de reter partículas traçadoras por períodos superiores a 20 dias. Em situações mais realistas, fazendo analogia entre o comportamento dessas partículas com entidades como os coliformes, ou qualquer outra substância que possa vir a interferir na qualidade da água do reservatório, é possível conjecturar que em situações de vazão máxima o reservatório de Louriçal não apresenta áreas de estagnação que possam vir a apresentarem degradação acentuada da qualidade de suas águas.

A Figura 24 mostra traçadores lançados no reservatório, através do rio Paraíba do

Sul. No início do processo, as partículas seguem o fluxo principal e são encaminhadas em direção ao túnel de conexão entre as duas áreas.

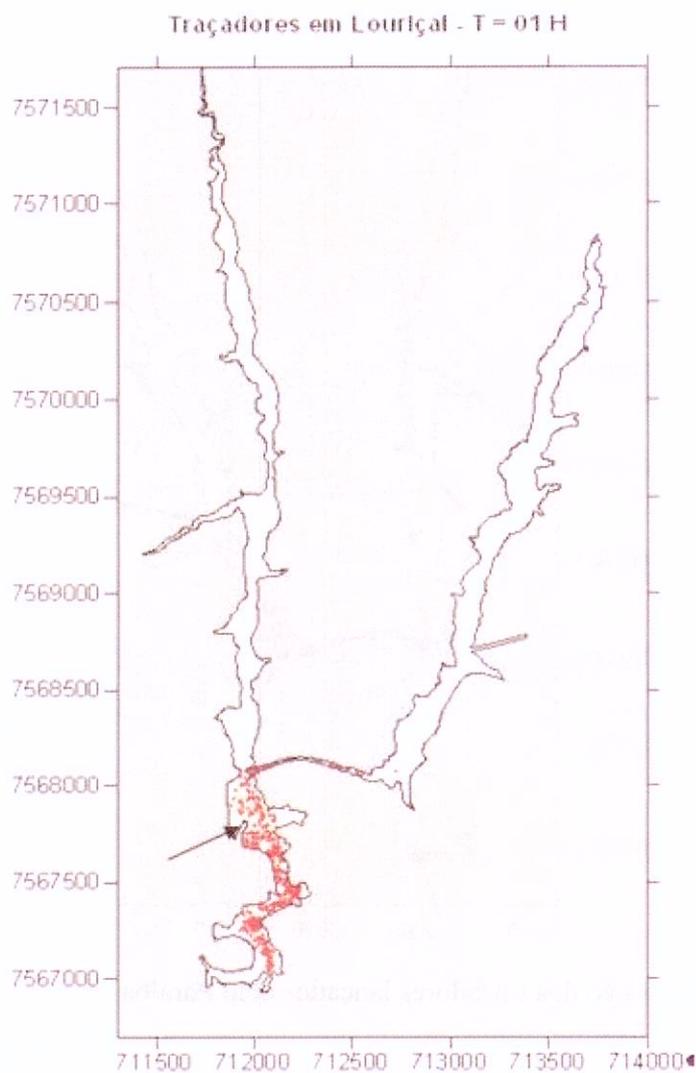


Figura 24- Traçadores lançados pelo Paraíba do Sul

Após duas horas do lançamento, as partículas foram transportadas através do túnel de conexão para o braço direito do reservatório, seguindo em direção ao segundo túnel do complexo, como indicado na Figuras 25.

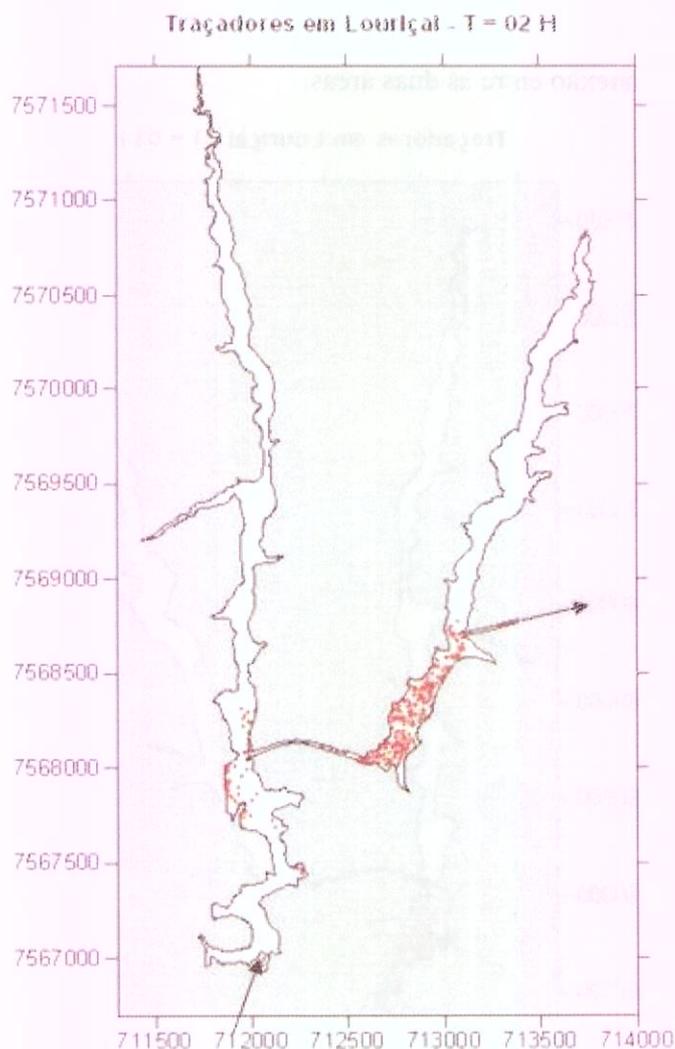


Figura 25- Posição dos traçadores lançados pelo Paraíba do Sul após 02 horas.

Após dez horas do lançamento, Figura 26, observa-se que parte dos traçadores lançados no Paraíba do Sul entra na região de circulação acima do túnel localizado no braço esquerdo do reservatório. As partículas permanecem confinadas em uma pequena área do braço, sem serem transportadas reservatório acima. Esse experimento mostrou que os traçadores injetados pelo Paraíba do Sul, permanecem na área confinada pela recirculação ao redor de 10 dias e acabam sendo eliminados pelo fluxo principal em direção ao canal localizado no braço direito.

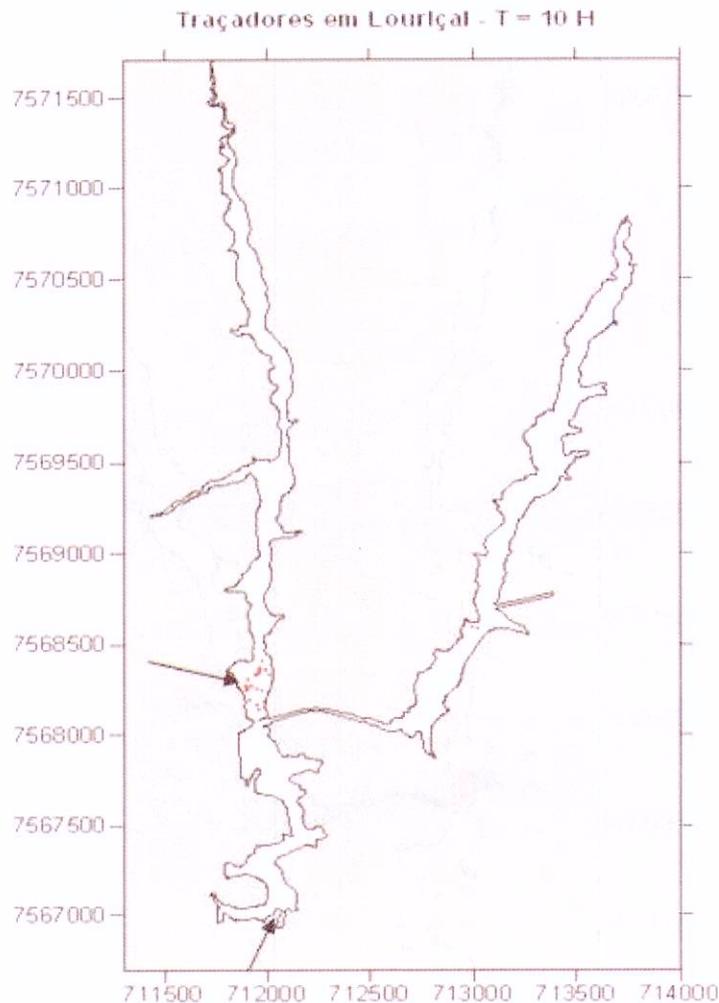


Figura 26- Posição dos traçadores lançados pelo Paraíba do Sul após 10 horas

## 6.2 Cenário 70

Em um cenário onde o regime fluvial é da ordem de 0,7 m/s do valor das vazões observadas em regime de cheia, o transporte dos traçadores se dá de forma análoga ao observado no regime de máxima ou no regime de vazões médias (50%). Ou seja, as partículas injetadas pelo tributário esquerdo são transportadas sem muito espalhamento até atingirem a região de recirculação, onde são aprisionadas no sistema por períodos da ordem de 30 dias. No braço direito, esse tipo de comportamento não é observado, todas as partículas são eliminadas do sistema em um período inferior a 240 horas, Figura 27.

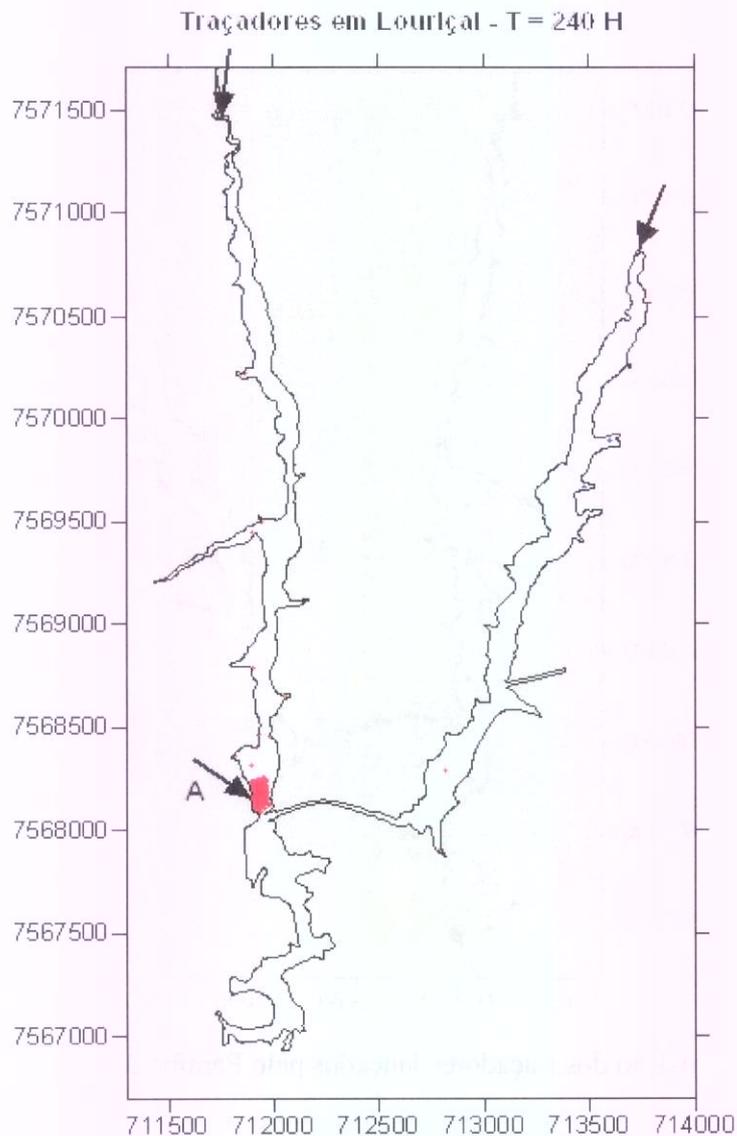


Figura 27- Traçadores lançados nos tributários – T=240 H

O transporte dos traçadores injetados pelo rio Paraíba do Sul também segue o padrão das simulações realizadas com os outros regimes fluviais. A maior parte dos traçadores é transportada pelo fluxo principal em direção ao ponto de conexão entre os dois ramos do reservatório e é rapidamente eliminada na região denotada pelo vetor B na seqüência das figuras 28 e 29 para os tempos  $t = 02$  H e  $05$  H.

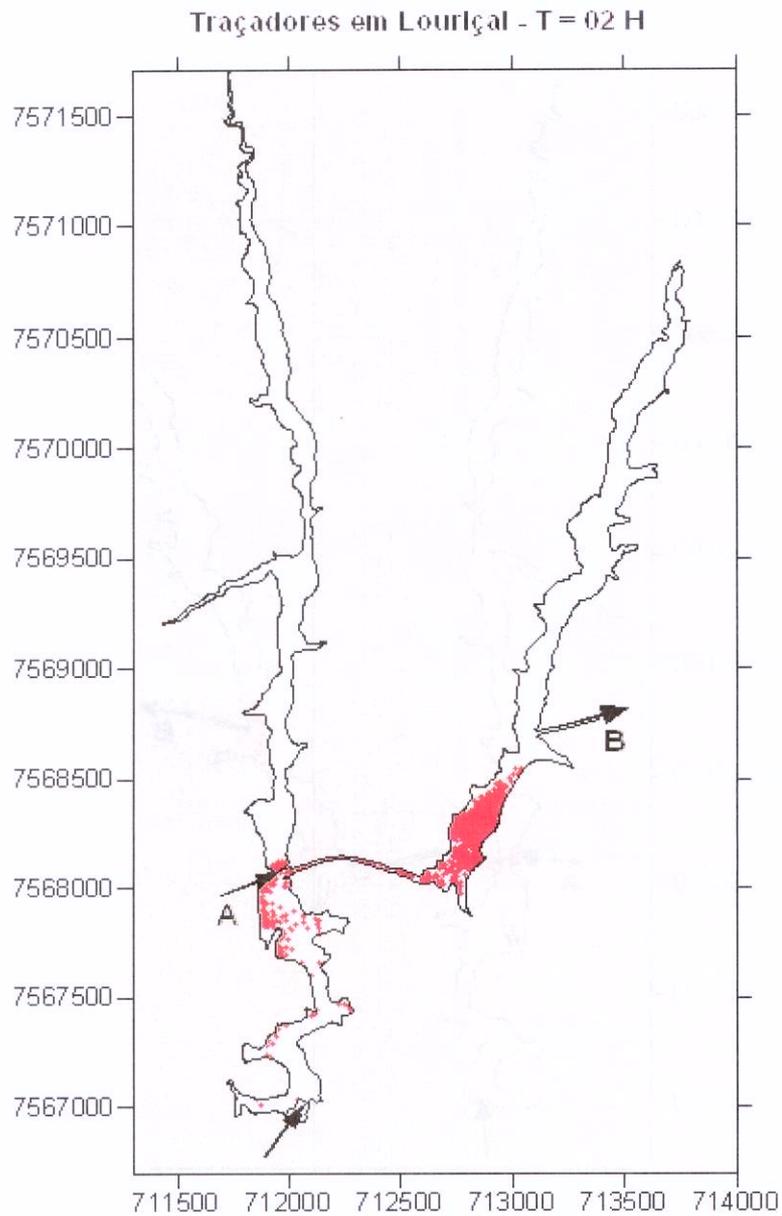


Figura 28- Traçadores lançados no rio Paraíba – T=02 H

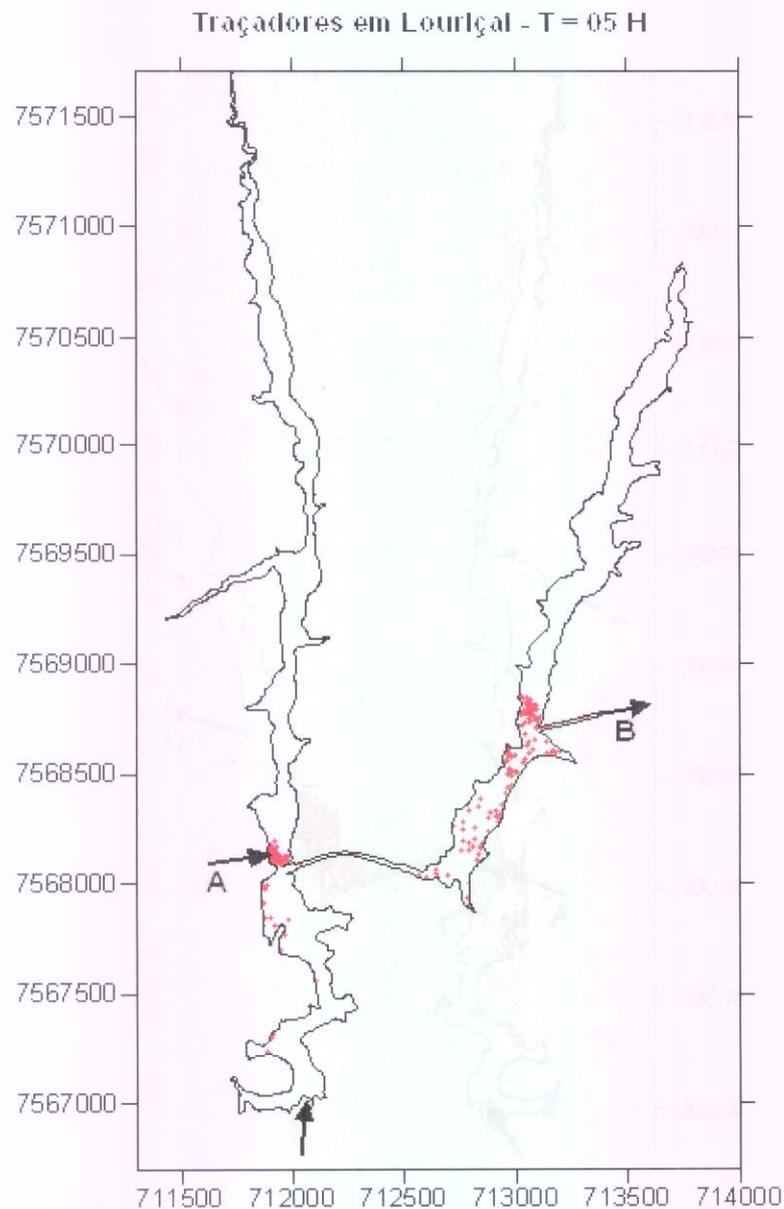


Figura 29- Traçadores lançados através do Paraíba – T= 5 H

Da mesma forma que nos regimes anteriores, parte das partículas ultrapassa o ponto de conexão (A), e entra na área de recirculação, como mostrado na Figura 30 onde pode ser observada a posição dos traçadores que permaneceram no sistema após 10 dias do lançamento. Seguindo o padrão anteriormente observado, esse grupo de partículas é

gradualmente eliminado do sistema.

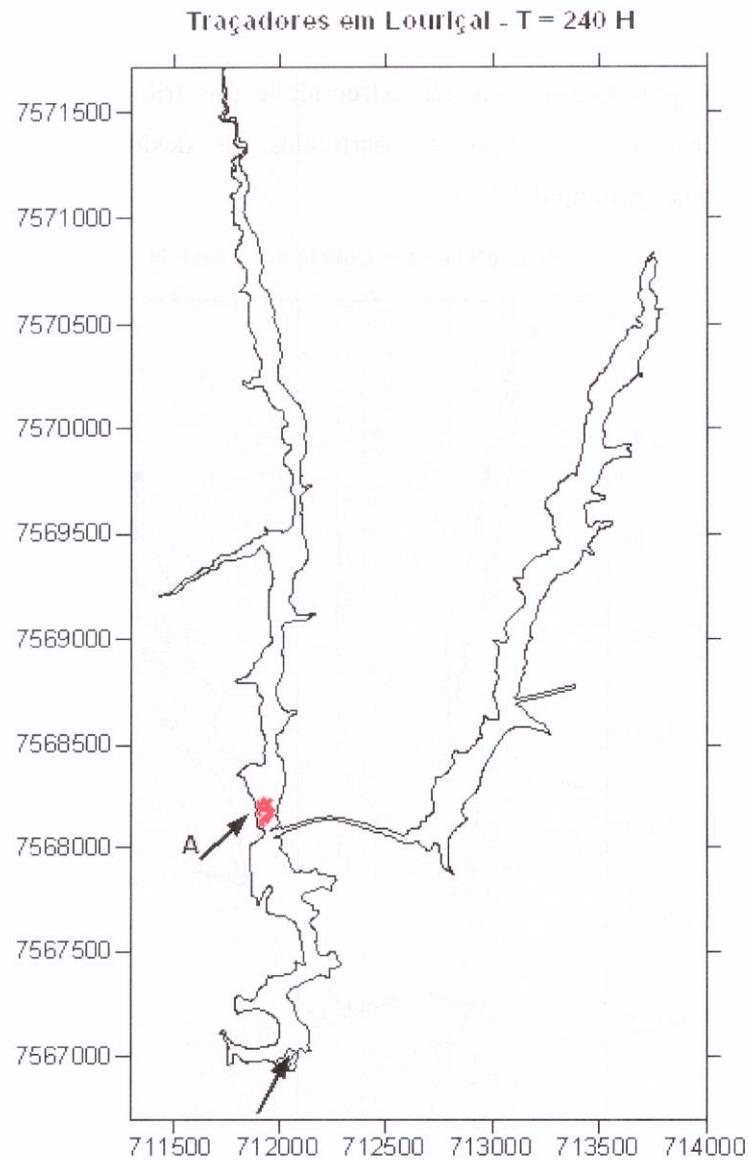


Figura 30- Traçadores lançados no rio Paraíba – T=240 H

### 6.3 Cenário 50

A Figura 31 mostra o resultado da simulação de traçadores após 01 hora do lançamento em um ponto localizado na extremidade dos tributários. Analogamente ao observado anteriormente, o grupo de partículas se desloca reservatório abaixo, transportado pelo fluxo principal.

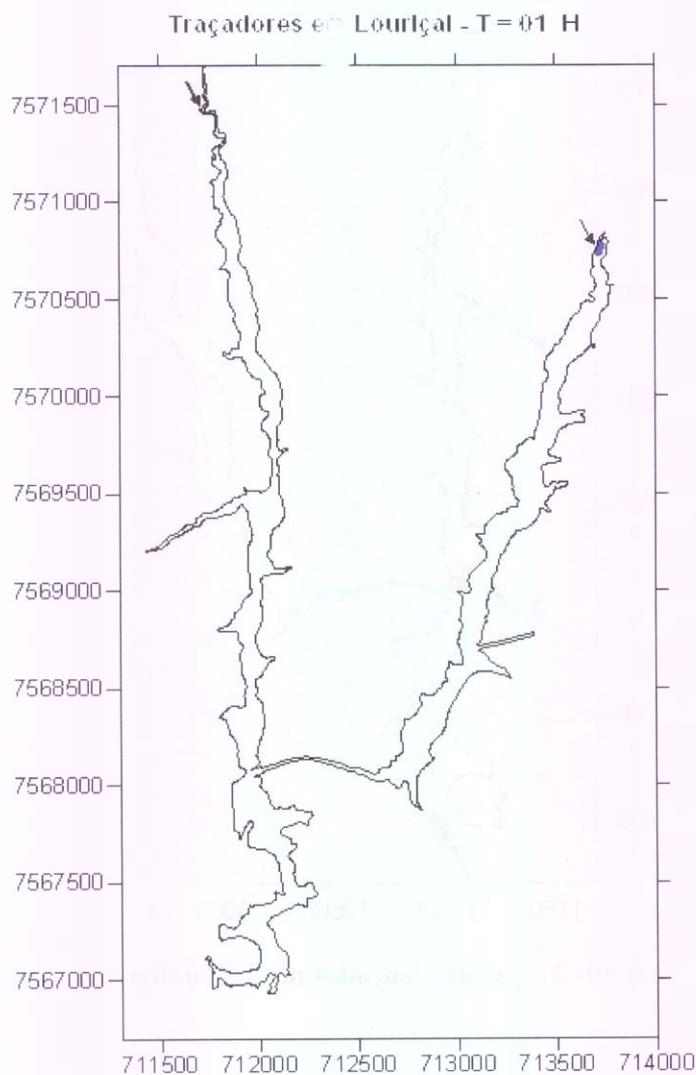


Figura 31- Traçadores lançados através dos tributários – T=01 H

Comparado com o deslocamento sofrido pelas partículas transportadas pelo fluxo de máxima vazão, descrito na seção 6.1, as partículas do braço esquerdo da Figura 32, transportadas em um regime de fluxo 50 % inferior, se deslocaram ao redor de 1,5 km após 24 horas do lançamento. Como era de se esperar um transporte menos eficiente do que o observado em uma situação de cheia.

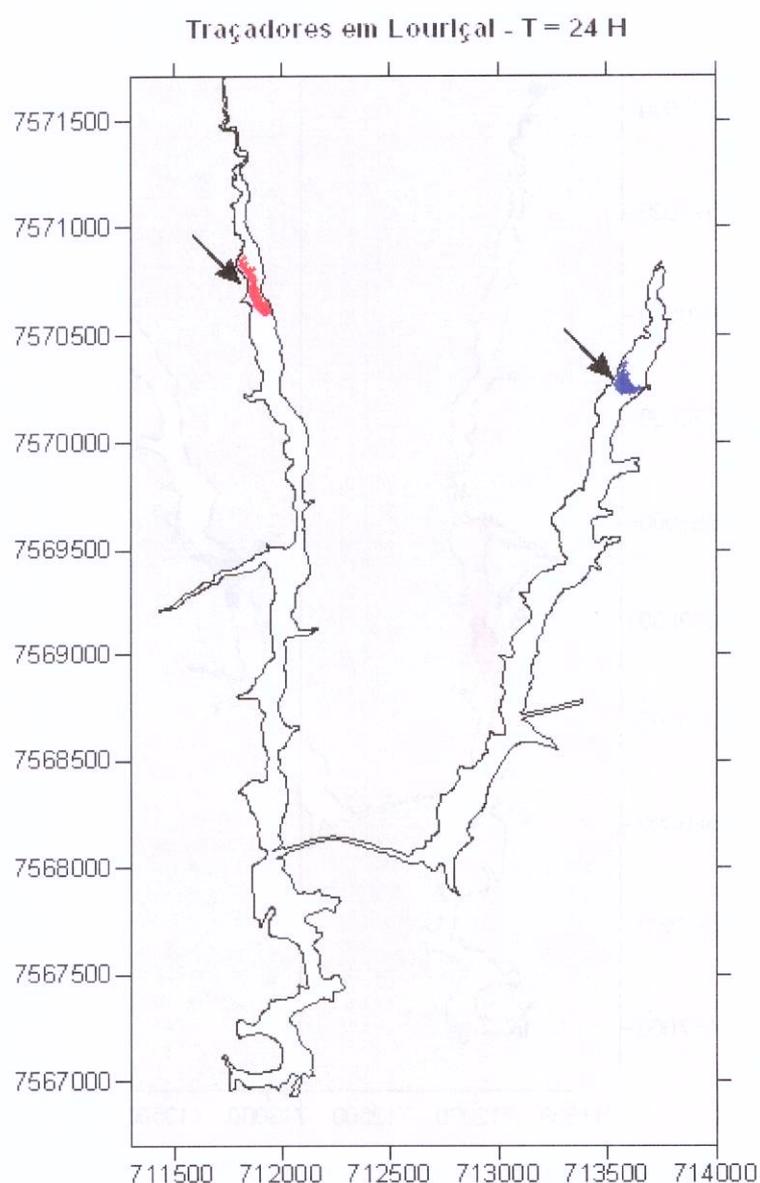


Figura 32- Traçadores lançados através dos tributários – T=24 H

No cenário de fluxo de 50% da vazão máxima, as partículas se deslocam em

grupos homogêneos com pouco espalhamento. Na realidade esse comportamento foi observado em todas as situações simuladas para diferentes intensidades de fluxos. Após 240 horas do lançamento os dois grupos de partículas ainda se encontram no interior do reservatório, regiões A e B da Figura 33, ao redor de 500 m do ponto onde se inicia o processo de retirada das partículas das águas do reservatório.

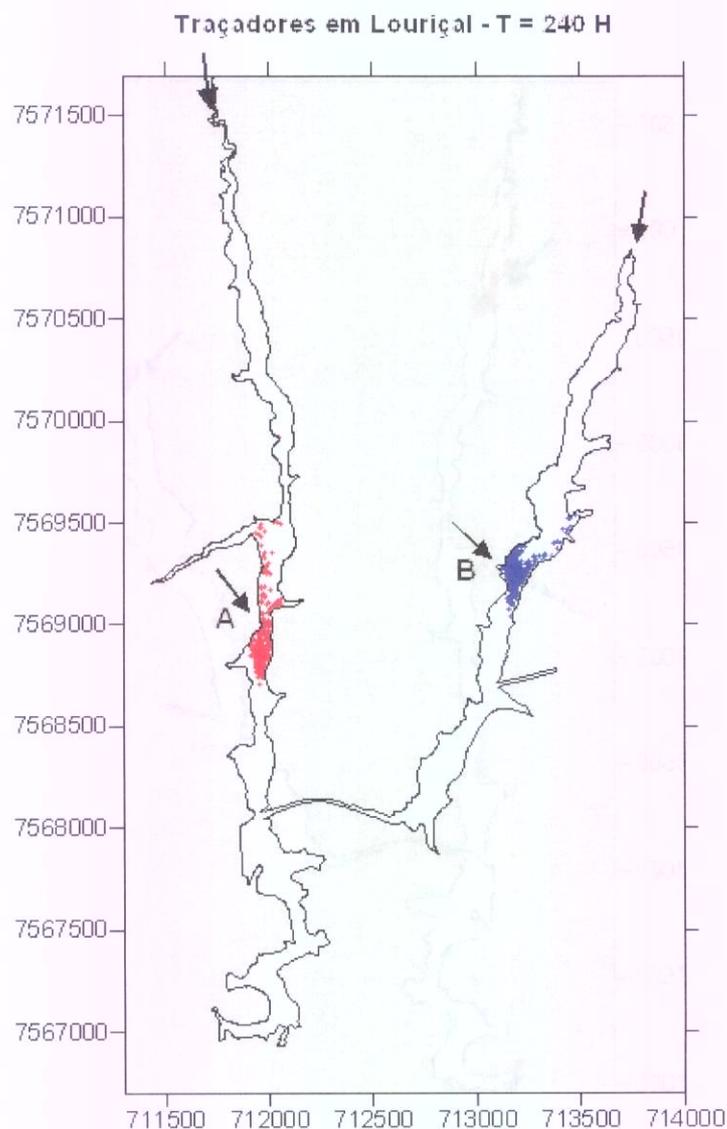


Figura 33- Traçadores lançados através dos tributários – T=240 H

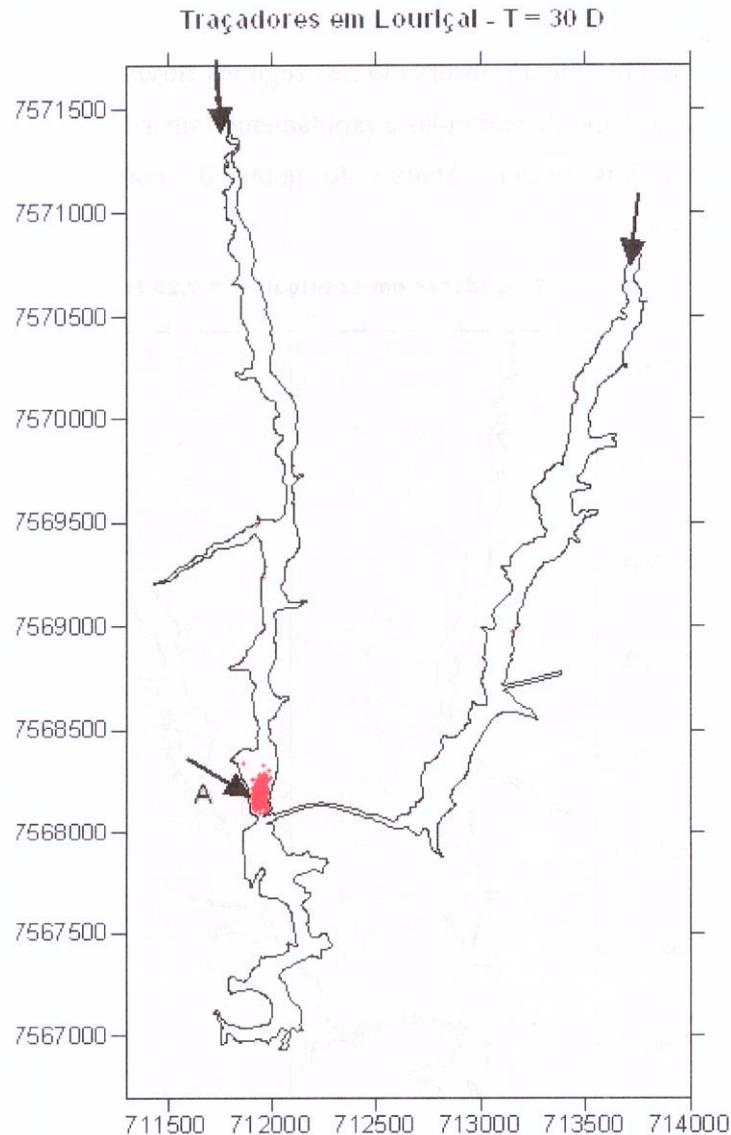


Figura 34- Traçadores lançados através dos tributários – T=240 H

A Figura 34 mostra que o braço direito do reservatório não apresenta nenhuma área de recirculação e após 30 dias do lançamento todas as partículas lançadas foram eliminadas. Por outro lado, na área alagada do córrego Areia existe uma área de recirculação que atrasa saída dos traçadores do interior do reservatório.

Para entender o comportamento de partículas transportadas pelo fluxo do rio Paraíba do Sul, a Figura 35 mostra o transporte de um grupo de traçadores que entraram

no sistema no limite inferior do domínio, ou seja, através do Paraíba do Sul. Analogamente ao comportamento observado nos regimes fluviais anteriores, ao entrar na área do reservatório, o grupo de partículas é rapidamente transportado em direção ao canal de ligação entre os dois braços. Abaixo do ponto de conexão, nenhuma área de recirculação é observada.

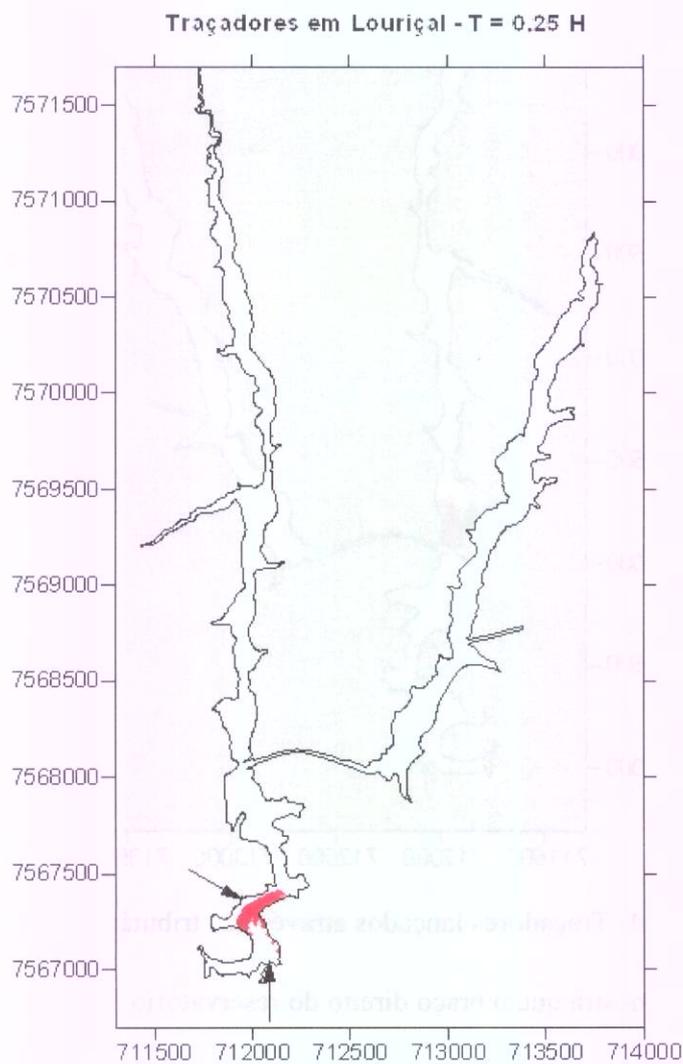


Figura 35- Traçadores lançados através do Paraíba – T=0,25 H

Após 5 horas do lançamento, o grupo de traçadores foi transportado através do túnel de conexão entre os dois ramos e deslocados em direção à saída desse sistema na área indicada pelo vetor B. Da mesma forma que nas simulações realizadas com outros

regimes de correntes, parte das partículas ultrapassa o ponto de conexão entre os dois ramos e entram na zona de recirculação denotada pelo vetor A na Figura 36.

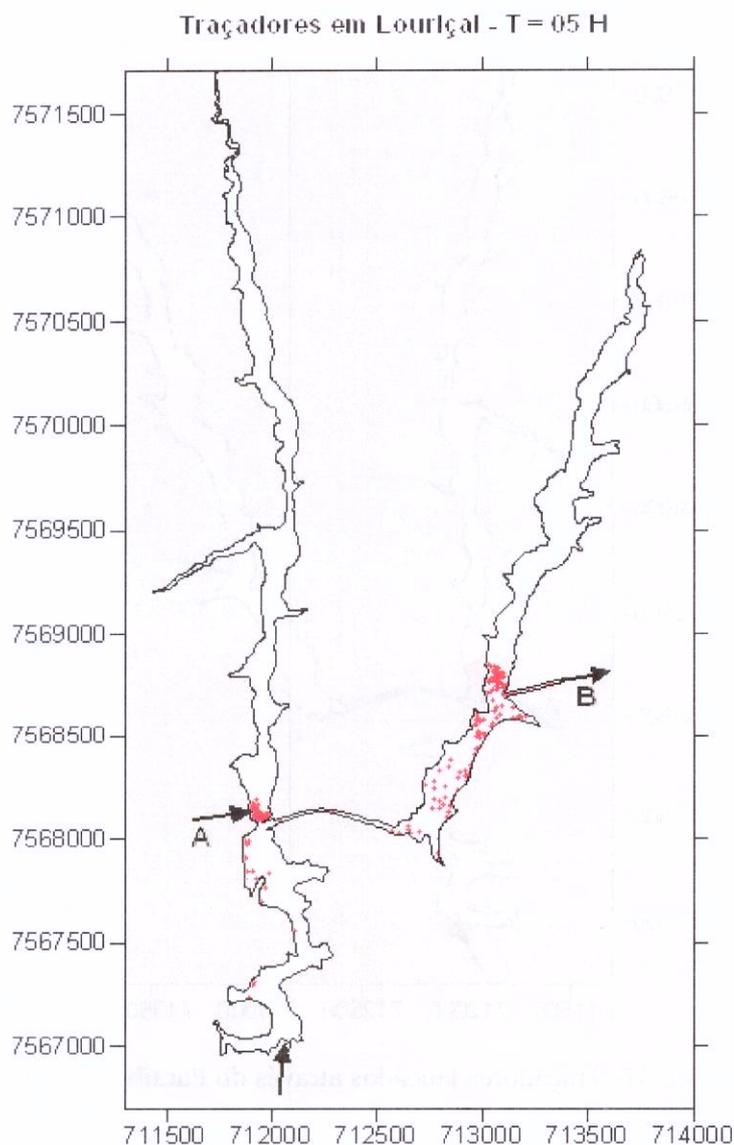


Figura 36- Traçadores lançados através do Paraíba – T=5 H

Após 30 dias a maior parte das partículas injetadas pelo rio Paraíba do Sul foram eliminadas do sistema, restando uma parte que permaneceu na área de recirculação, Figura 37.

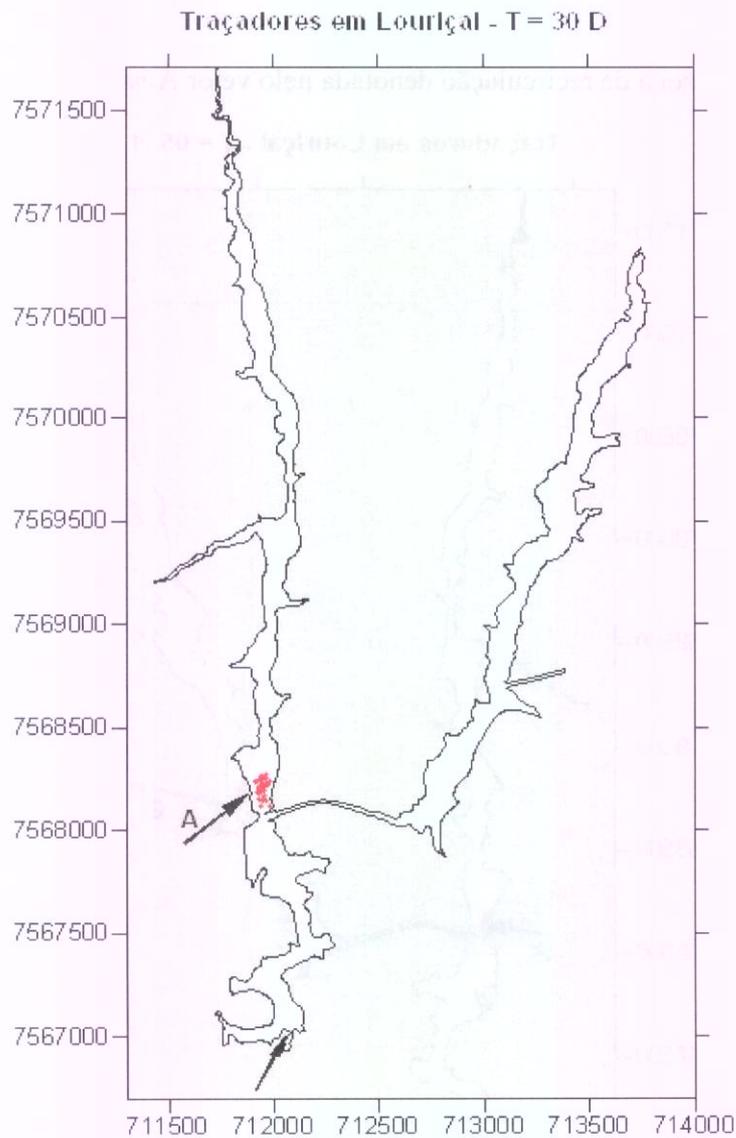


Figura 37- Traçadores lançados através do Paraíba – T=30 D

#### 6.4 Cenário de Estiagem

Devido às baixas velocidades obtidas com as simulações do cenário de mínima vazão, os experimentos com traçadores mostraram um tempo de permanência das partículas muito superior aos anteriores. A Figura 38 mostra a posição do grupo de traçadores após 10 dias do lançamento, onde é possível observar que ambos os braços do

reservatório ainda contém praticamente todas as partículas lançadas.

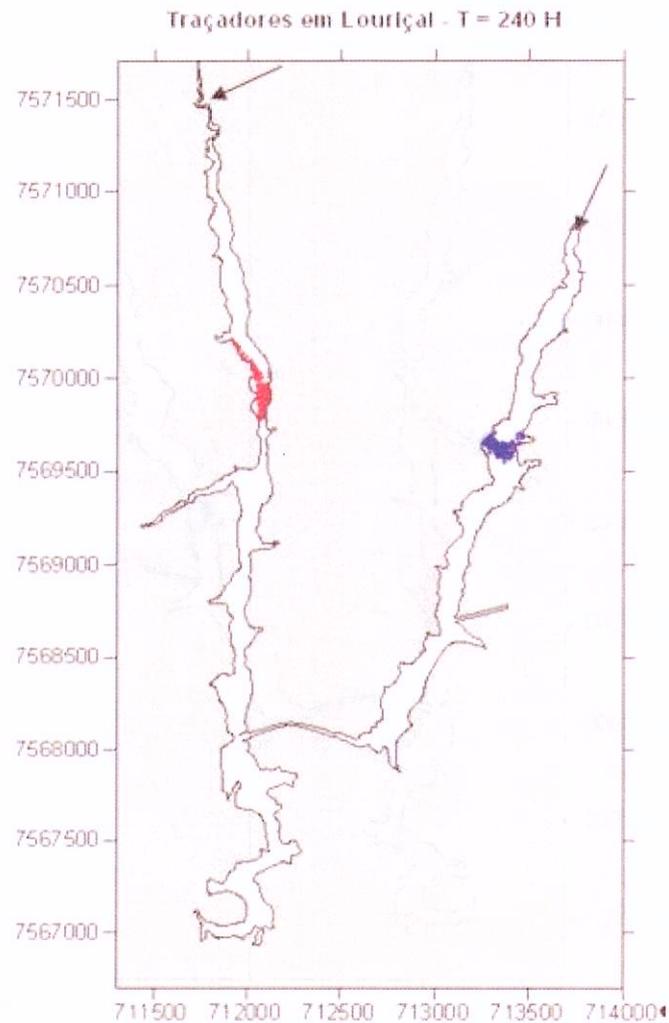


Figura 38- Traçadores lançados nos tributários em situação de estiagem – T=240 H

Após trinta dias, Figura 39, a maior parte das partículas lançadas nos tributário ainda permanece no interior do reservatório, evidenciando a lenta circulação que ocorre em condições de vazões muito baixas.

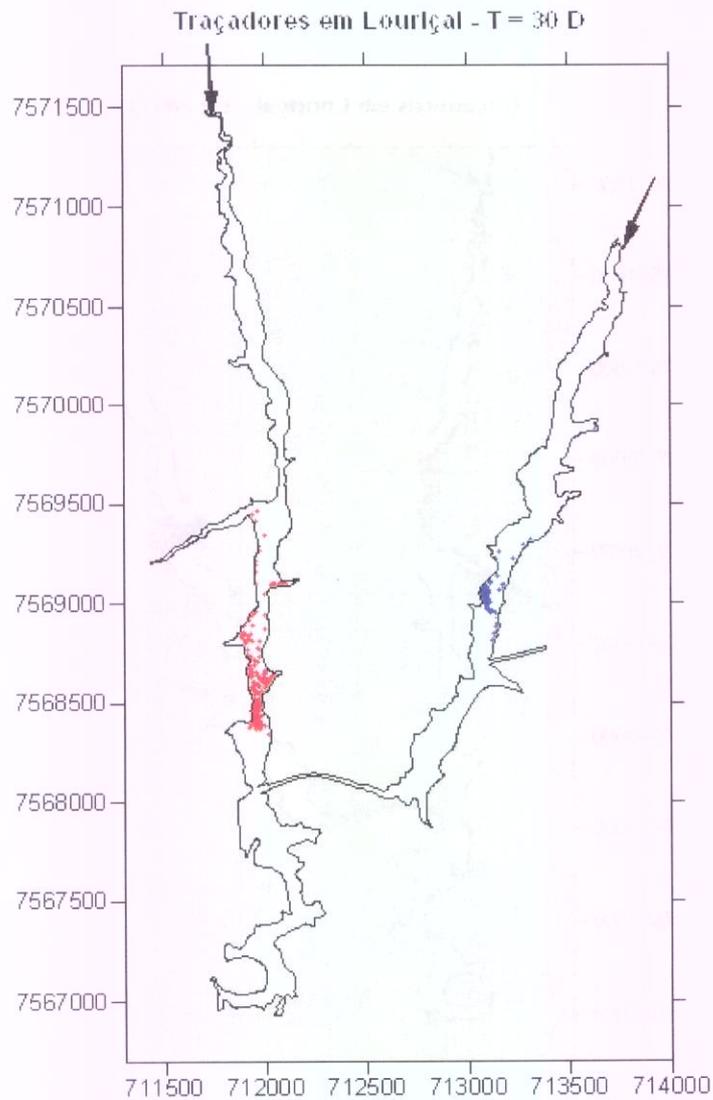


Figura 39- Traçadores lançados nos tributários em situação de estiagem – T=30 D

Devido às baixas velocidades obtidas em um regime de extrema estiagem, as partículas do braço direito levaram ao redor de 35 dias para serem eliminadas do reservatório. No lado oposto, observa-se que o grupo de traçadores necessita ao redor de 40 dias para atingir a região de conexão entre os dois ramos dos reservatórios. Nesse ponto é importante frisar que vazões da ordem de grandeza similar à utilizada nesse cenário de estiagem não foram observadas no período de dez anos de dados utilizados no projeto desse AHE.

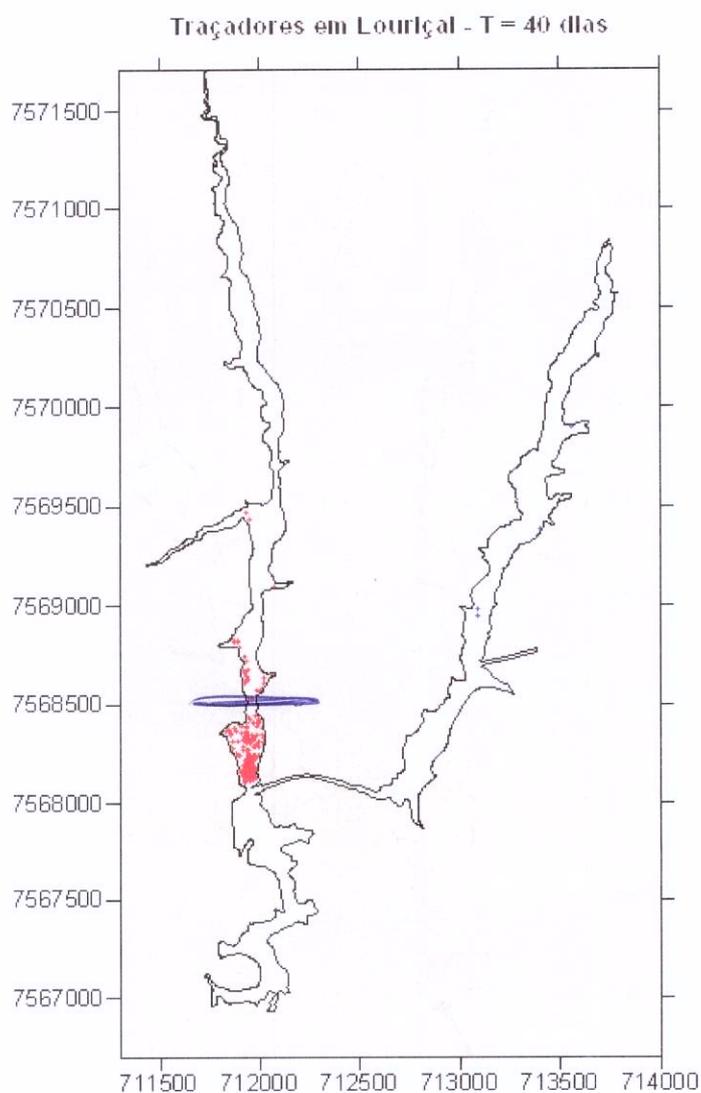


Figura 40- Traçadores lançados nos tributários em situação de estiagem – T=40 D

A Figura 41 mostra a posição, após 0,5 H, de um grupo de traçadores passivos injetados no sistema através do Paraíba do Sul. No início do processo os traçadores se deslocam com um único bloco sem apresentarem grande espalhamento.

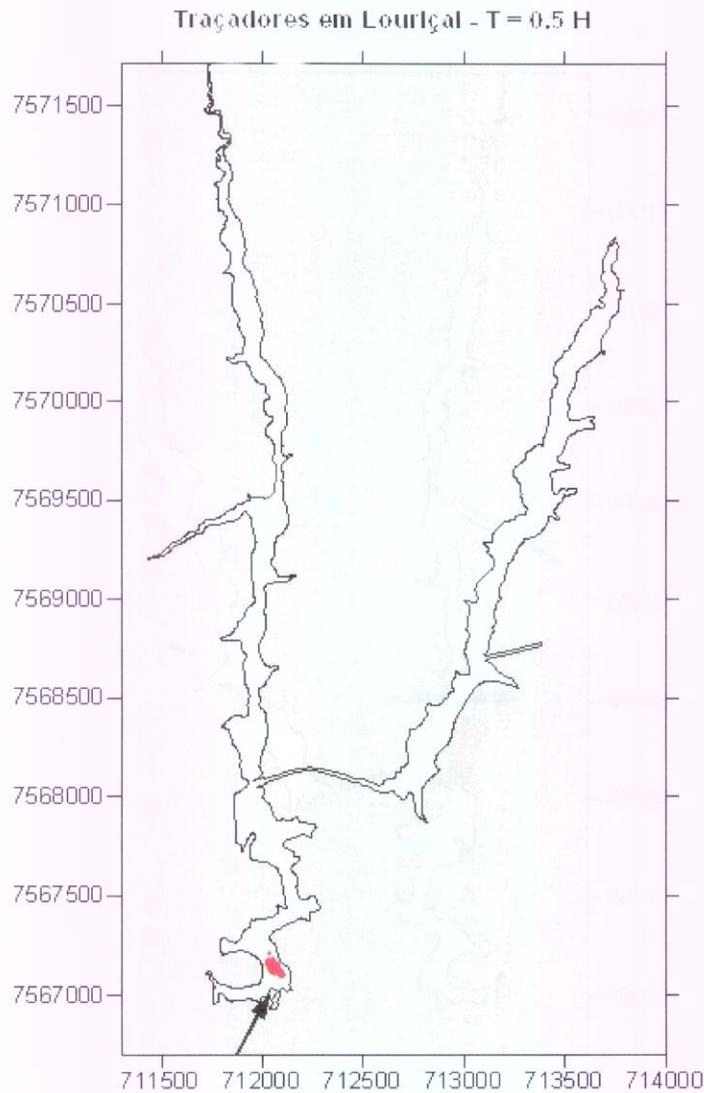


Figura 41- Traçadores lançados através do Paraíba – T=0,5 H

Após 12 horas do lançamento, Figura 42, é possível observar que parte do grupo de traçadores ultrapassa o ponto de conexão entre os dois braços do reservatório e entra em uma região de recirculação, indicado pelo vetor A. Embora esse grupo seja transportado para o braço direito através do túnel de conexão, eles permanecem por um período de 30 dias nessa posição, até serem totalmente eliminados, como pode ser visto na Figura 43.

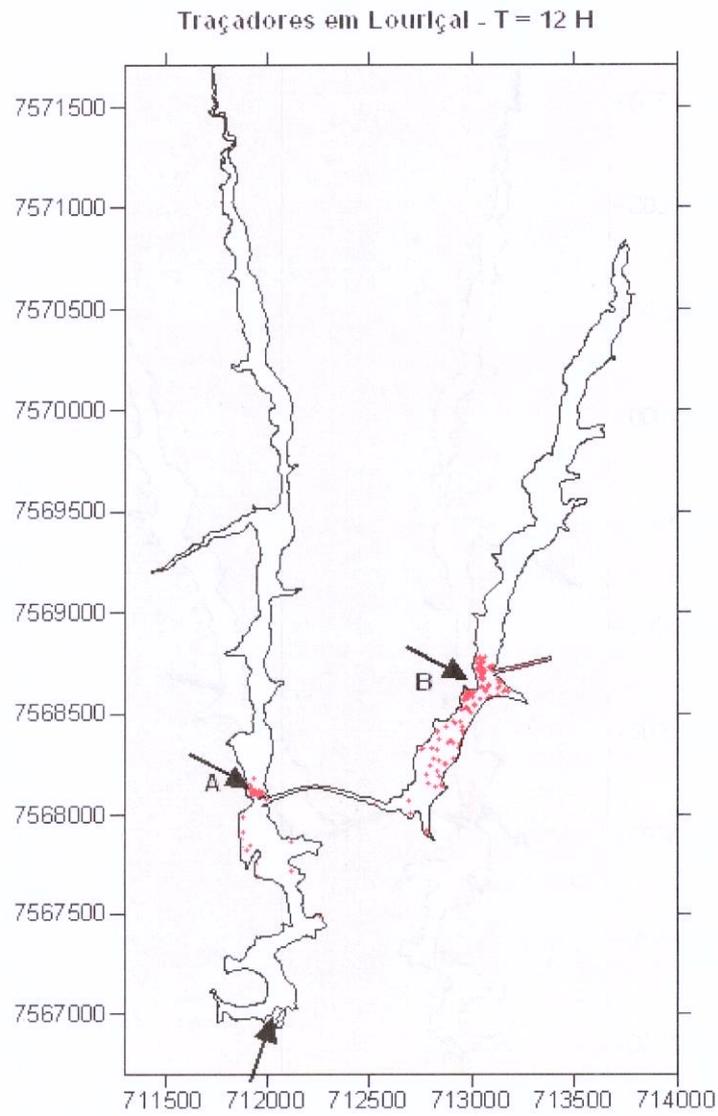


Figura 42- Traçadores lançados através do Paraíba – T=12 H

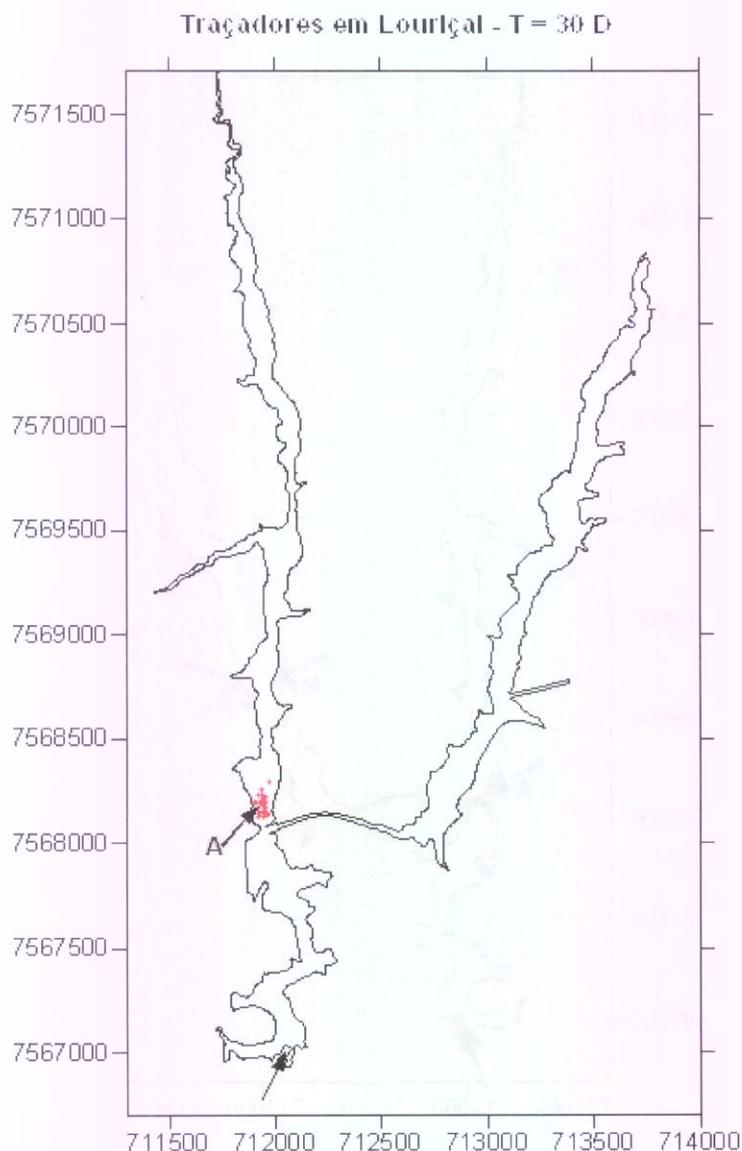


Figura 43- Traçadores lançados através do Paraíba – T=30 D

A Figura 43 ainda mostra a posição de um pequeno grupo de traçadores retidos na região de recirculação indicada pelo vetor A, evidenciando que a massa de água oriunda do rio Paraíba do Sul, não é capaz de fluir reservatório acima, ficando restrita a uma pequena região com alcance máximo da ordem de 200 metros.

Nesse cenário, prestou-se atenção em segmento do canal principal do reservatório

onde o modelo hidrodinâmico mostrou velocidades baixas em relação aos outros trechos do fluxo principal. Como mostra a Figura 44, um grupo de partículas leva ao redor de 14 horas para percorrer a distância localizada entre os dois túneis do córrego Louriçal.

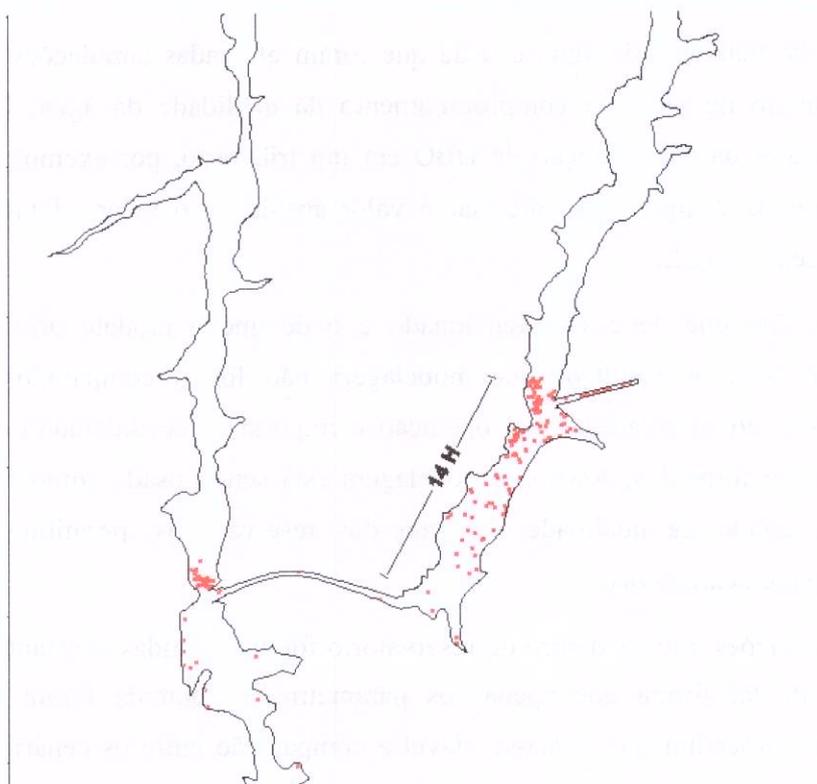


Figura 44- Tempo para percorrer a distância entre a entrada e saída do córrego Louriçal – Durante estiagem.

Vale aqui ressaltar que, segundo as análises das janelas temporais já apresentadas, todos os resultados de deriva de partículas que apontaram tempos de estabilização superiores a 30 dias têm probabilidade de ocorrência bastante reduzida.

## 7 Resultados da Modelagem da Qualidade da Água

Um importante fato a ser destacado antes de serem apresentados os cenários de modelagem da qualidade da água é o de que foram efetuadas simulações de situações críticas do ponto de vista do comprometimento da qualidade da água. Dessa forma, quando medições da concentração de DBO em um tributário, por exemplo, apontavam valores abaixo de 2 mg/L (sem precisar o valor absoluto), o valor adotado foi o pior possível, ou seja, 2 mg/L.

Outro fato que deve ser mencionado é o de que o modelo utilizado não foi calibrado, ou seja, os resultados da modelagem não foram comparados com dados medidos dentro do reservatório. Tal operação é impossível considerando que os lagos ainda não foram formados. Assim, a modelagem está sendo usada como ferramenta de predição do estado da qualidade da água dos reservatórios, permitindo avaliações majoritariamente qualitativas.

As condições iniciais dentro do reservatório foram mantidas constantes para todos os cenários de tal forma que apenas os parâmetros de entrada foram modificados. Seguindo esse procedimento, torna-se viável a comparação entre os cenários de cheia e estiagem. Os parâmetros usados pelo modelo estão listados na Tabela 9, e corresponde a valores observados na literatura (Canu et al., 2001 e Schalodow & Hamilton, 1997).

As condições iniciais consideradas nas simulações encontram-se na tabela 8.

Tabela 8 – Condições iniciais consideradas na modelagem da qualidade da água de todos os cenários

Temperatura (°C)	DBO (mg/L)	OD (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Amônia (mg/L)	Fósforo total (mg/L)
20	0	10,0	0	0	0

Tabela 9 – Coeficientes de qualidade de água e seus valores utilizados nas simulações dos reservatórios do AHE Simplício – Queda Única

Símbolo	Parâmetro	Unidade
$\Theta_{12}$	Coeficiente de temperatura para a nitrificação	1,08
$\Theta_{1R}$	Coeficiente de temperatura para a respiração da biomassa.	1,045
$\Theta_{2D}$	Coeficiente de temperatura para desnitrificação	1,045
$\Theta_{71}$	Coeficiente de temperatura para a mineralização do nitrogênio orgânico	1,08
$\Theta_{83}$	Coeficiente de temperatura para a mineralização do fósforo orgânico	1,08
$\Theta_a$	Coeficiente de temperatura para a reaeração	1,024
$\Theta_D$	Coeficiente de temperatura para a desoxigenação	1,047
$\Theta_s$	Coeficiente de temperatura para o SOD	1,08
$a_{nc}$	Relação nitrogênio-carbono	0,25 mg N/mg C
$a_{pc}$	Relação fósforo-carbono	0,025 mg P/mg C
$F_{D5}$	Fração de DBO dissolvido na coluna de água	0,5
$f_{D7}$	Fração de nitrogênio orgânico dissolvido na coluna de água	1,0
$f_{D8}$	Fração de fósforo orgânico dissolvido na coluna de água.	0,85
$K_{12}$	Coeficiente de nitrificação em 20°C	0,1 /dia
$K_{2D}$	Coeficiente de desnitrificação em 20°C	0,09 /dia
$K_{71}$	Coeficiente de mineralização do nitrogênio orgânico	0,08 /dia
$K_{83}$	Coeficiente de mineralização do fósforo orgânico	0,20/dia
$K_a$	Coeficiente de reaeração em 20°C	0,20 /dia
$K_D$	Coeficiente de desoxigenação em 20°C	0,2 /dia
$K_{DBO}$	Constante de meia saturação para oxidação da DBO	0,50 mg O <sub>2</sub> /L
$K_{mN}$	Coeficiente usado para calcular o P <sub>NH3</sub>	0,025 mg N/L
$K_{NIT}$	Constante de meia saturação para OD limitado pelo processo de nitrificação	2,0 mg O <sub>2</sub> /L

Símbolo	Parâmetro	Unidade
$K_{NO_3}$	Constante de meia saturação limitado pelo OD	0,1 mg N/L
SOD	Demanda de oxigênio no sedimento	1 g/m <sup>2</sup> dia
$V_{S3}$	Velocidade de deposição de substâncias orgânicas	0,01 m/dia

O reservatório de Louriçal recebe a defluência do reservatório de Tocaia e descarrega água no reservatório de Calçado. De acordo com as simulações hidrodinâmicas, foram simulados quatro cenários de qualidade de água do reservatório de Louriçal: cheia, 70% da vazão de projeto, 50% da vazão de projeto e estiagem. Nestes cenários foram especificados nos dois principais tributários do reservatório de Louriçal, que são o Córrego Areia e o Córrego Louriçal, (Figuras 1 e 2) os valores de parâmetros de qualidade da água (DBO, OD, nitrato, amônia, fósforo total e temperatura) do sítio “Rio Areia – Montante” (Tabela 10), provenientes das medições dos meses de maio e junho de 2006. Na entrada do reservatório, foram especificados os valores de parâmetros de qualidade da água do rio Paraíba do Sul, sítio “Montante da foz dos rios Paraibuna e Piabanha”, apresentados na Tabela 3.

Tabela 10 – Valores dos parâmetros das fontes de poluição pontuais consideradas no reservatório de Louriçal

Fronteira no modelo	Temperatura (°C)	DBO (mg/L)	OD (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Amônia (mg/L)	Fósforo total (mg/L)
Córrego Areia (oeste) e Córrego Louriçal (leste)	18,58	< 2,0	7,09	0,10	< 0,01	0,02

### 7.1.1 Cenário de Vazão Máxima Turbinada

As concentrações de OD (Figura 45) denotam três regiões distintas: o canal principal (com valores entre 4,0 e 5,0 mg/L) e os leitos dos córregos Areia e Louriçal (com valores entre 5,0 e 8,0 mg/L). No canal principal a distribuição das concentrações de OD se mostra intensamente dependente da qualidade da água do rio Paraíba do Sul, cuja concentração de OD usada nas simulações foi de 4,35 mg/L (Tabela 3). Isto ocorre porque

a significativa advecção no canal principal em condições de vazão máxima turbinada oferece tempo de residência insuficiente para que o coeficiente de reaeração incremente o OD na água. Neste cenário, as altas concentrações de OD que chegam no reservatório por meio dos tributários (7,09 mg/L) permanecem na faixa entre 6,0 e 7,0 mg/L até a seção 11 para o córrego Areia e a seção 20 para o córrego Louriçal. Isto significa que a maior parte da área alagada destes tributários permanece com concentrações de OD condizentes com padrões da classe 1 da Resolução Conama nº 357/2005. As concentrações de OD atingem a faixa de 4,0 a 5,0 mg/L somente nas seções 13 e 22 dos córregos Areia e Louriçal, respectivamente. Estas baixas concentrações de OD devem-se às significativas recirculações hidrodinâmicas e consequentes misturas por advecção nas áreas que se situam próximas às entradas do canal intermediário e do túnel de saída.

Os resultados da simulação de qualidade da água do reservatório de Louriçal com cenário de vazão máxima turbinada mostraram que a DBO é mantida em torno de 2 mg/L por quase toda a extensão do reservatório (Figura 45), especialmente porque as concentrações deste parâmetro em todos os contribuintes ao reservatório se encontram no limite de detecção laboratorial, que é de 2 mg/L.

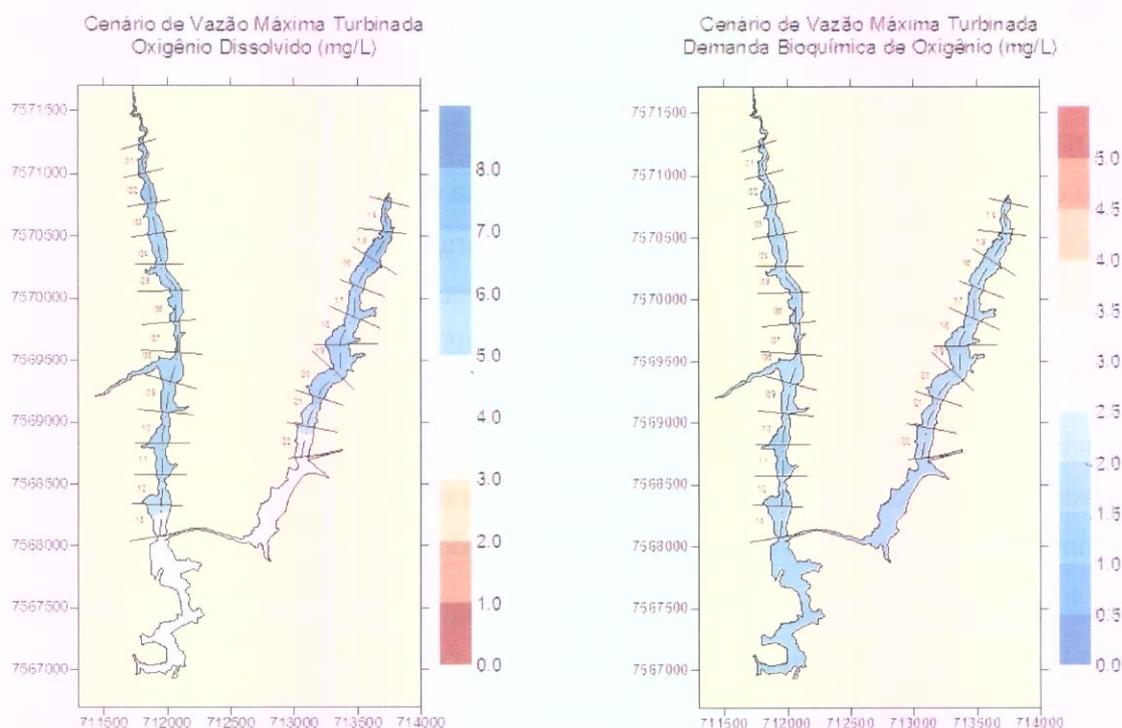


Figura 45 – Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de OD (à esquerda) e DBO (à direita) no reservatório de Louriçal, com cenário de vazão máxima turbinada

Nas simulações, o regime estacionário das concentrações de fósforo orgânico e inorgânico (Figura 46) demandou 09 dias para sua configuração e apresentou padrão semelhante às concentrações de OD. Verificou-se que na parcela da extensão dos tributários a mistura de concentrações mais altas (0,06 mg/L de fósforo total proveniente do rio Paraíba do Sul – Figura 47) fica restrita aos trechos de cerca de 500 metros próximos às entradas do canal intermediário e do túnel de saída (seções 12 e 13 do córrego Areia e 21 e 22 do córrego Louriçal). No caso do fósforo orgânico as concentrações se estabilizaram na faixa entre 0,010 e 0,020 mg/L ao norte da seção 11 do córrego Areia e da seção 20 do córrego Louriçal. Nessas mesmas regiões, as concentrações de fósforo inorgânico se estabilizaram entre 0,005 e 0,010 mg/L.

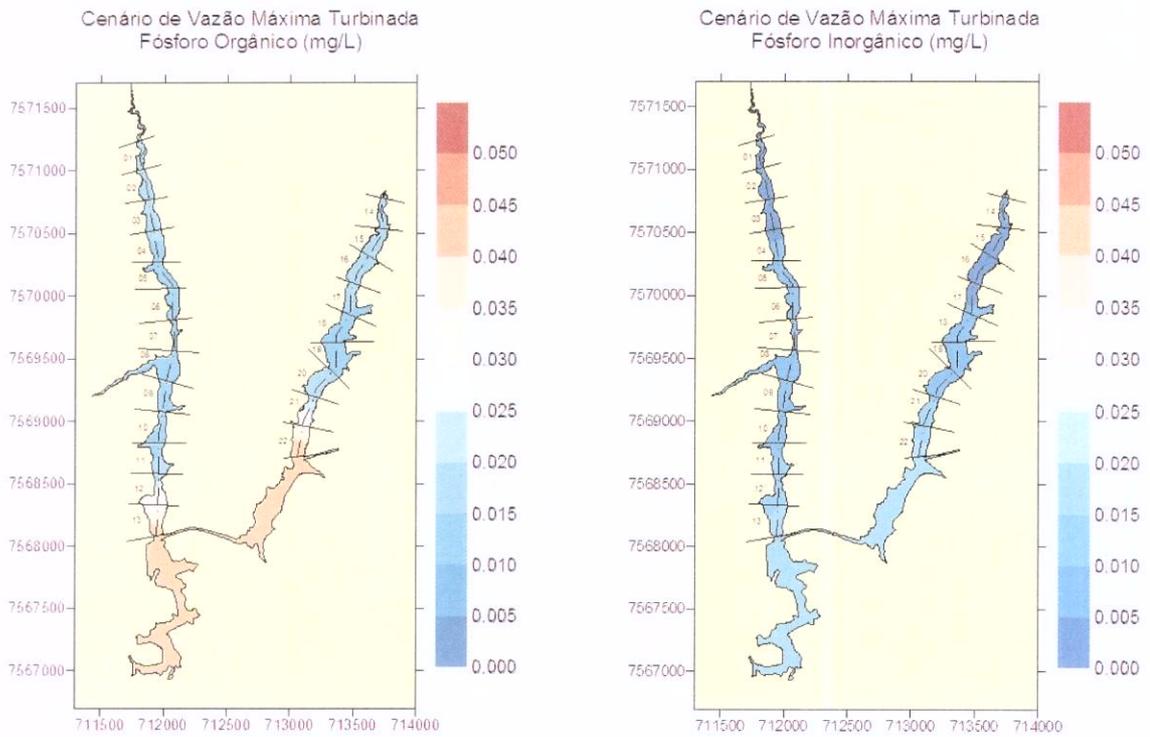


Figura 46 - Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de fósforo orgânico (à esquerda) e inorgânico (à direita) no reservatório de Louriçal, com cenário de vazão máxima turbinada

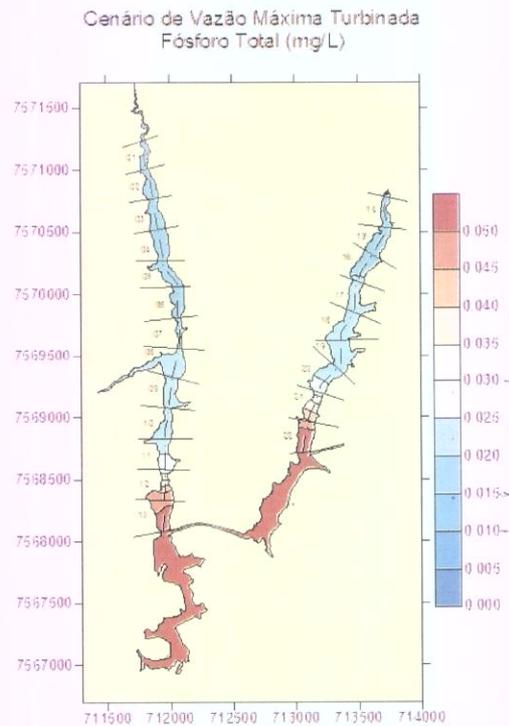


Figura 47 - Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de fósforo total no reservatório de Louriçal, com cenário de vazão máxima turbinada

### 7.1.2 Cenário de 70% da Vazão de Projeto

Os resultados das simulações de qualidade da água no cenário de 70% de vazão de projeto produziram concentrações de OD e DBO próximas às obtidas no cenário de vazão máxima turbinada. Percebe-se uma menor extensão da faixa de OD com valores entre 7,0 e 8,0 mg/L na entrada dos tributários, alcançando uma pequena parcela da seção 03 do córrego Areia e mais da metade da seção 15 do córrego Louriçal. Assim, as concentrações de OD se situaram entre 6,0 e 7,0 mg/L (correspondente a uma situação de classe 1 da Resolução Conama nº 357/2005) entre as seções 03 e 12 do córrego Areia e 15 e 21 do córrego Louriçal.

As concentrações de DBO, a exemplo do verificado nas simulações com vazão máxima turbinada, permaneceram praticamente uniformes na extensão do reservatório Louriçal.

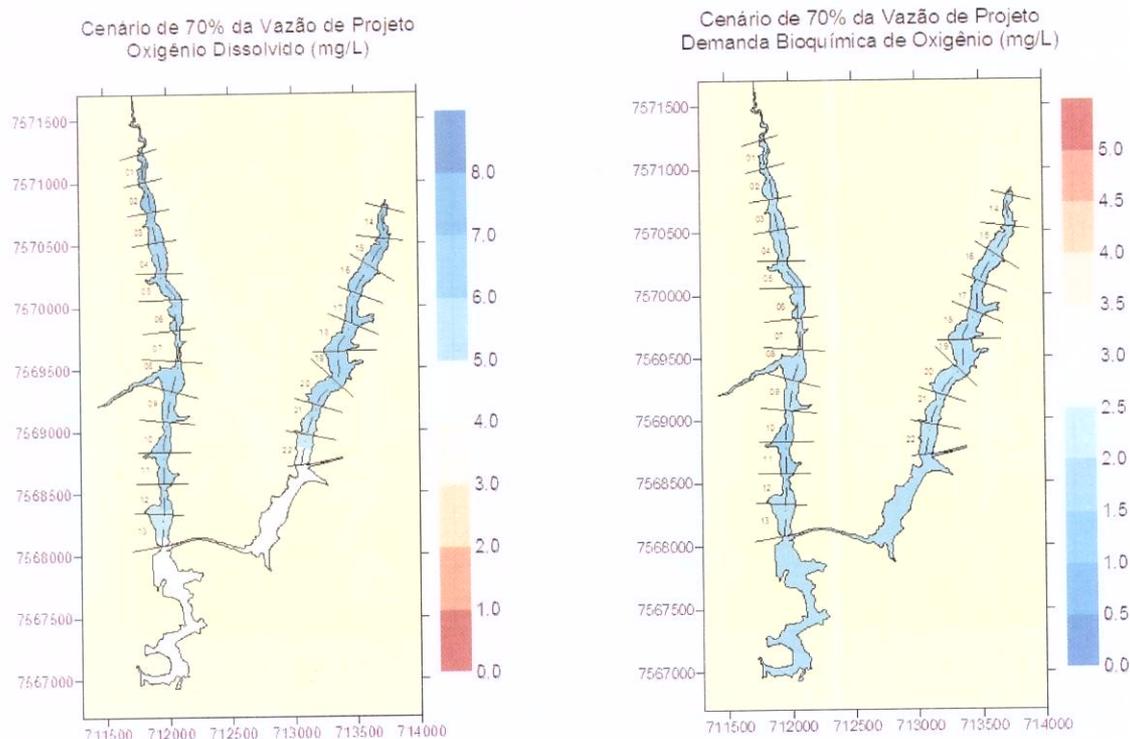


Figura 48– Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de OD (à esquerda) e DBO (à direita) no reservatório de Louriçal, com cenário de 70% da vazão de projeto

Nas simulações, o regime estacionário das concentrações de fósforo orgânico e inorgânico no cenário de 70% de vazão de projeto (Figura 49) demandou 08 dias para sua configuração.

Concentrações de fósforo total acima de 0,050 mg/L foram obtidas apenas nas recirculações de entrada do canal intermediário e do túnel de saída (em estirões com 250 metros), correspondendo às seções 13 e 22 dos córregos Areia e Louriçal, respectivamente. Entretanto, as altas velocidades e profundidades verificadas nestas regiões minimizam o risco de eutrofização. Ao norte destas seções as concentrações de fósforo total decresceram de 0,040 para 0,015 mg/L de sul para norte, até as entradas de ambos os tributários.

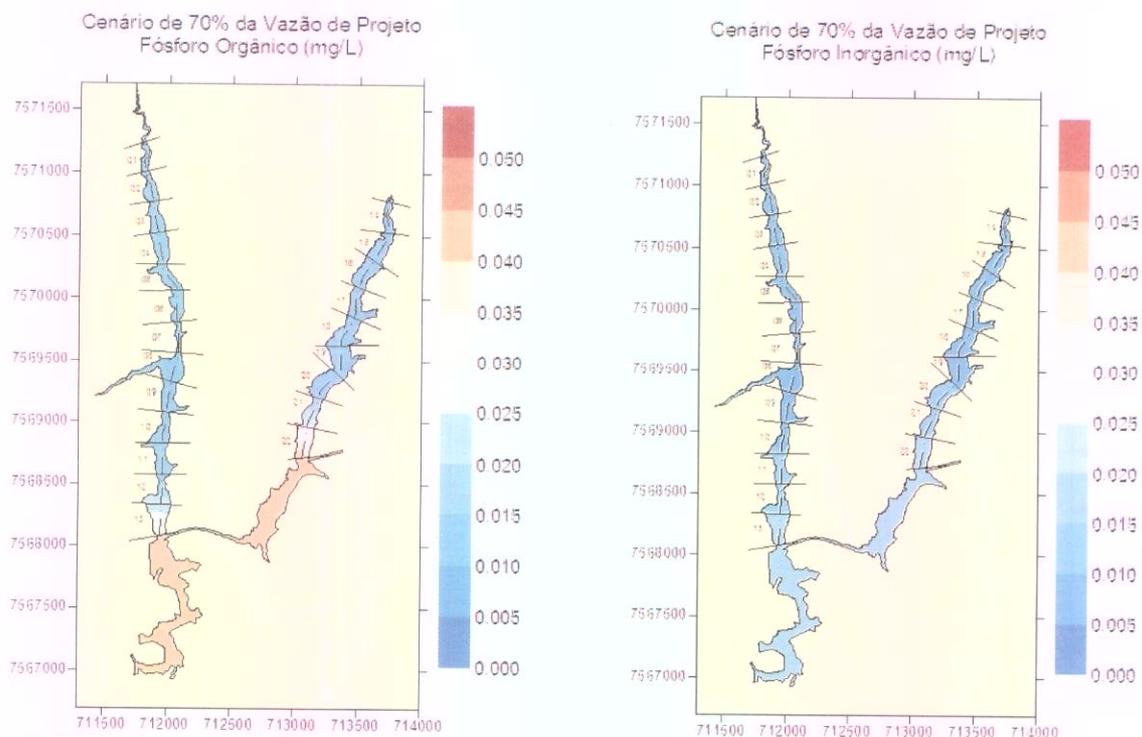


Figura 49 - Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de fósforo orgânico (à esquerda) e inorgânico (à direita) no reservatório de Louriçal, com cenário de 70% da vazão de projeto

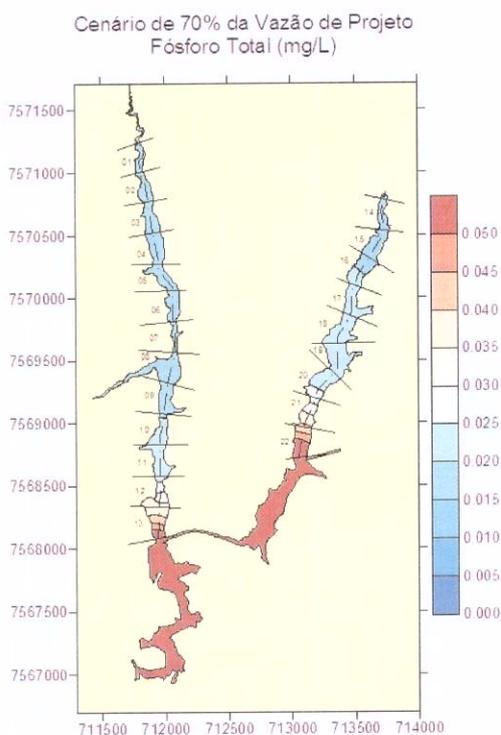


Figura 50 - Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de fósforo total no reservatório de Louriçal, com cenário de 70% da vazão de projeto

### 7.1.3 Cenário de 50% da Vazão de Projeto

As simulações de qualidade da água que consideraram vazões de 50% de projeto mostraram que, apesar da maior proximidade às condições de estiagem, as concentrações de OD permaneceram acima de 6 mg/L (correspondente à classe 1 da Resolução Conama nº 357/2005) ao norte das seções 12 e 21 dos córregos Areia e Louriçal, respectivamente, o que correspondente à maior parte da área alagada destes tributários. A região do canal principal, assim como nos cenários anteriormente apresentados, se mostrou fortemente influenciada pelo transporte advectivo das concentrações de OD provenientes do rio Paraíba do Sul.

As concentrações de DBO, a exemplo do verificado nos cenários acima, permaneceram praticamente uniformes na extensão do reservatório Louriçal.

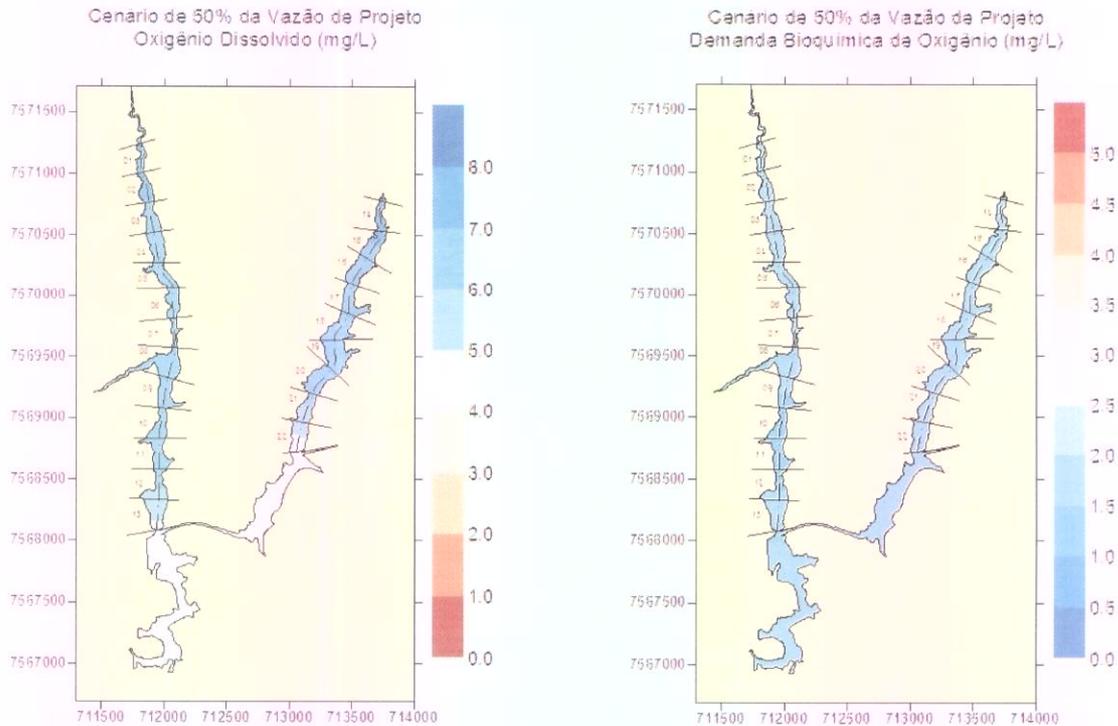


Figura 51– Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de OD (à esquerda) e DBO (à direita) no reservatório de Louriçal, com cenário de 50% da vazão de projeto

Nas simulações, o regime estacionário das concentrações de fósforo orgânico e inorgânico no cenário de 50% de vazão de projeto (Figura 52) demandou 09 dias para sua configuração.

As concentrações de fósforo total se mantiveram abaixo de 0,030 mg/L ao norte da seção 11 no córrego Areia e da seção 20 no córrego Louriçal (correspondendo a estirões com 750 metros). Na entrada do canal intermediário (seção 13) a concentração máxima de fósforo total verificada foi de 0,055 mg/L, entretanto as altas velocidades associadas às significativas profundidades desta região minimizam os riscos de eutrofização. A mesma situação é verificada na região do túnel de saída (seção 22), em que as concentrações de fósforo total chegam a 0,060 mg/L, entretanto a física dominada por altas velocidades e a extinção da luz na profundidade da coluna d'água são fatores que controlam potenciais

florações de algas nesta região.

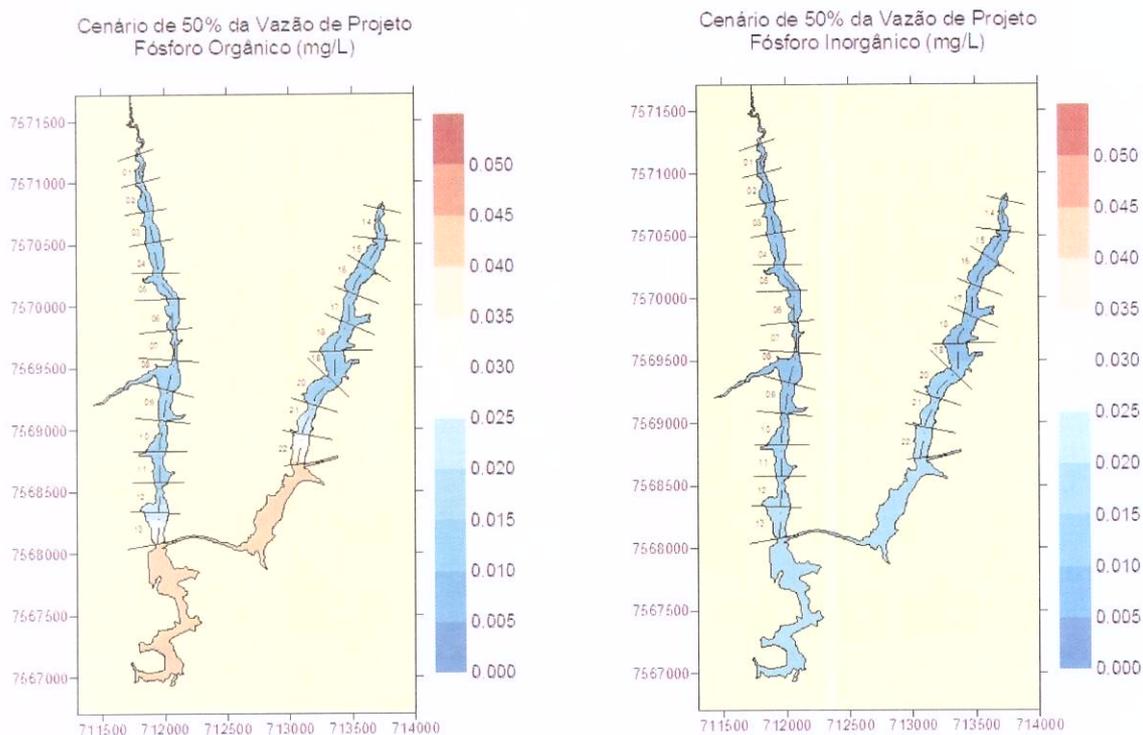


Figura 52 - Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de fósforo orgânico (à esquerda) e inorgânico (à direita) no reservatório de Louriçal, com cenário de 50% da vazão de projeto

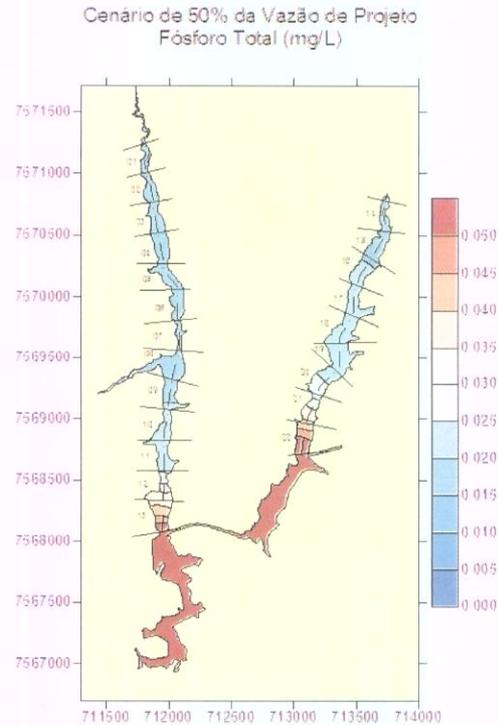


Figura 53 - Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de fósforo total no reservatório de Louriçal, com cenário de 50% da vazão de projeto

#### 7.1.4 Cenário de Estiagem

O cenário de estiagem é o que mostra as maiores misturas entre as concentrações dos parâmetros de qualidade da água dos tributários com as do rio Paraíba do Sul. Excetuando-se a DBO, que permanece próxima à 2,0 mg/L ao longo de todo o reservatório, percebe-se maior alcance sobre os tributários da pluma com concentrações características da qualidade da água do rio Paraíba do Sul. Outra característica notável deste cenário é a diluição das concentrações de fósforo orgânico e inorgânico no fluxo principal estabelecido pela vazão do rio Paraíba do Sul, no trecho entre o canal intermediário e o túnel de saída.

Ao contrário dos cenários anteriormente expostos as concentrações de OD na faixa entre 5,0 e 6,0 mg/L se estenderam por um trecho significativo no córrego Areia, compreendido entre a entrada no reservatório e a seção 12, e em quase a totalidade do

córrego tributário, com exceção da seção 22 e de uma pequena parcela da seção 21. Concentrações respectivas à condição de classe 3, segundo a Resolução Conama nº 357/2005, representando valores entre 4,0 e 5,0 mg/L de OD, foram verificadas apenas nas regiões próximas às entradas do canal intermediário e do túnel de saída (seções 12 e 13 do córrego Areia e 21 e 22 do córrego Louriçal).

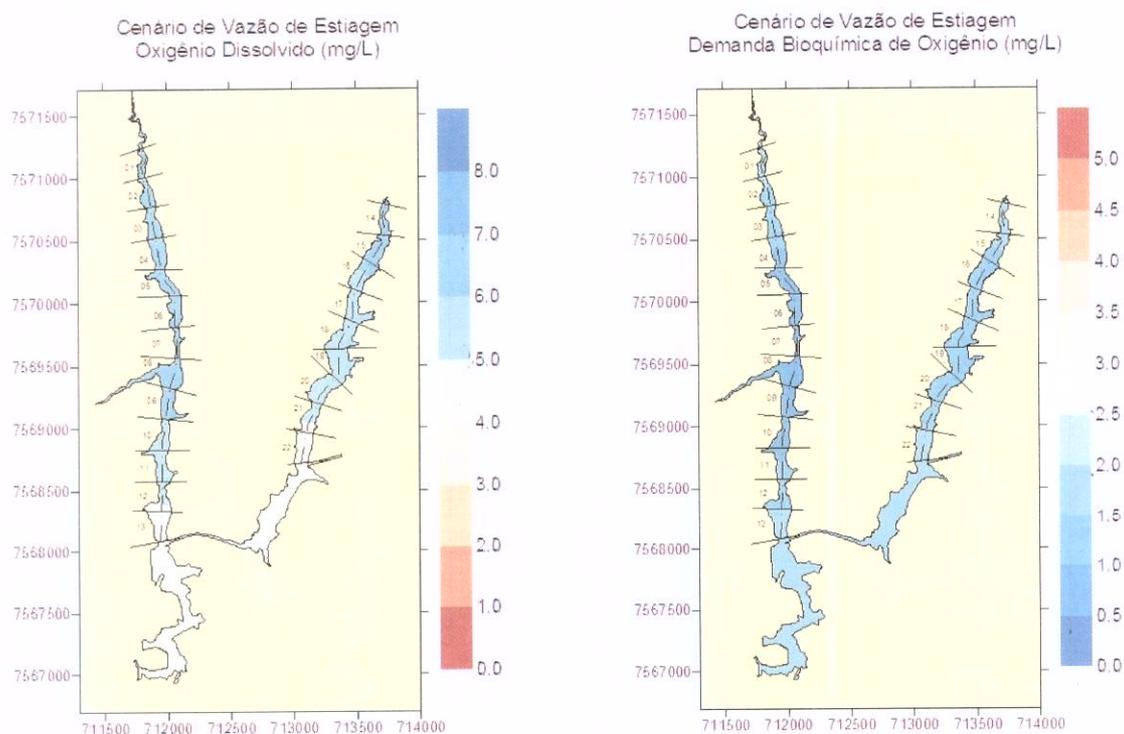


Figura 54 – Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de OD (à esquerda) e DBO (à direita) no reservatório de Louriçal, com cenário de vazão de estiagem

Nas simulações, o regime estacionário das concentrações de fósforo orgânico e inorgânico no cenário de estiagem (Figura 55) demandou 32 dias para sua configuração.

O maior alcance da pluma de fósforo do Rio Paraíba do Sul sobre os tributários resultou em concentrações de fósforo total entre 0,040 e 0,060 mg/L ao sul da seção 09 do córrego Areia e ao sul da seção 17 do córrego Louriçal (correspondendo a estirões com 1000 metros). Estas magnitudes associadas à maior disponibilidade de fósforo na forma

inorgânica, às menores velocidades no cenário de estiagem e à maior penetração da luz devido à diminuição da lâmina d'água, convergem no sentido da eutrofização das seções dos tributários com os maiores teores de fósforo. Todavia, apesar da alta concentração de fósforo total no canal principal, resultante da simulação em cenário de estiagem, o risco de eutrofização neste sítio é minimizado devido às maiores velocidades e profundidades ali verificadas.

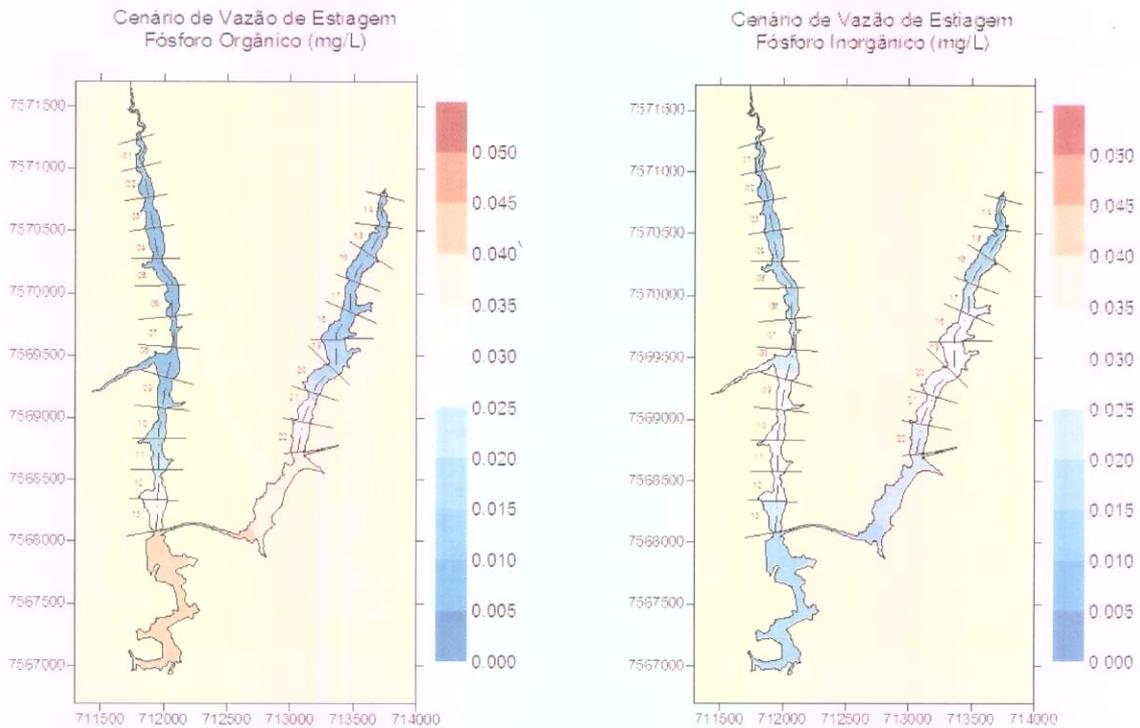


Figura 55 - Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de fósforo orgânico (à esquerda) e inorgânico (à direita) no reservatório de Louriçal, com cenário de vazão de estiagem

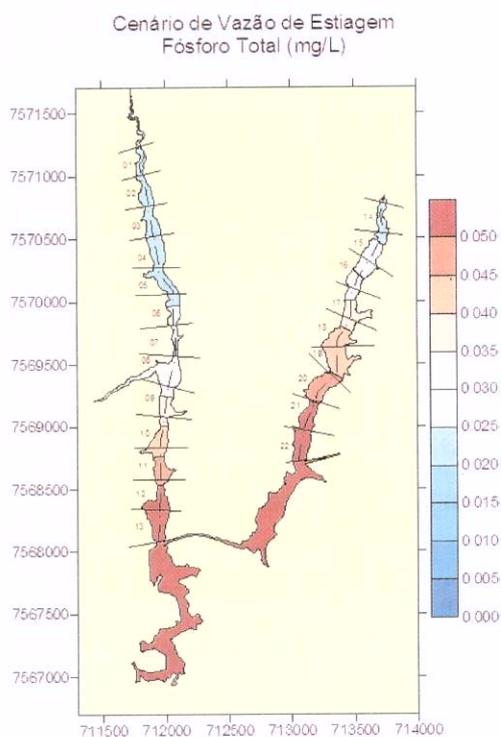


Figura 56 - Distribuição espacial das concentrações estabilizadas de fósforo total no reservatório de Lourival, com cenário de vazão de estiagem

Uma vez mais vale ressaltar que, segundo as análises das janelas temporais já apresentadas, todos os resultados de estabilização de regimes estacionários que apontaram tempos superiores a 30 dias têm probabilidade de ocorrência bastante reduzida.

## 8 Análise Integrada de Resultados e Conclusões

A modelagem da hidrodinâmica do reservatório de Louriçal mostrou velocidades significativas de escoamento para o fluxo principal do reservatório tanto para o cenário VMT quanto para o cenário 70. Para os cenários 50 e de estiagem há trechos localizados com velocidades em torno de 10 cm/s, ou seja, pode-se considerar o local como ambiente lântico.

Com relação à hidrodinâmica dos braços córrego Areia e Louriçal, percebe-se o fluxo bem mais lento da água se compararmos com o canal principal, com o regime sendo lântico ao longo de toda extensão dos braços, de forma geral. Quando se analisa os cenários de 50 e de estiagem, pode-se dizer que as velocidades realmente se mostraram baixas, girando entre 0,002 e 0,008 m/s para o cenário 50 e próximas de 0,001 m/s para estiagem.

Além das velocidades, os aspectos de circulação importantes a se destacar são as recirculações e as inversões de direção de linhas de corrente nos locais de interação entre o fluxo principal e o fluxo chegando através dos braços. No caso do braço do córrego Areia percebe-se a presença de duas recirculações bem evidentes no cenário VMT. Para os demais cenários a segunda recirculação se descaracteriza e praticamente se anula.

Com relação à interação entre o braço córrego Louriçal com o fluxo principal, no cenário VMT foi possível enxergar uma recirculação fraca perto do túnel de saída e um fluxo mais caótico acima dela. Para os outros cenários não foi possível caracterizar uma recirculação completa e a diferença se deu basicamente por conta do local onde havia a inversão no sentido das linhas de corrente.

As simulações realizadas com traçadores passivos, considerando quatro diferentes regimes hidrológicos, evidenciaram importantes características da circulação hidrodinâmica do reservatório bem como a localização de áreas de recirculação que retardam a eliminação dos traçadores do seu interior.

Os cenários com regime hidrológico representando as máximas vazões ( $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) descarregadas em cada um dos contribuintes mostrou que os traçadores são rapidamente

eliminados do sistema. Sendo possível observar que a circulação do córrego Louriçal (braço direito) é mais eficiente do que a circulação observada no córrego Areia, o qual possui área de recirculação capaz de reter as partículas por um período da ordem de 15 dias. Analogamente, os regimes hidrológicos com vazões 0,7 e 0,5 da vazão máxima são eficientes no transporte dessas partículas, sendo que as mesmas são eliminadas em intervalos de 30 e 40 dias, respectivamente, ainda que esses intervalos sejam pouco existentes conforme mostrou o estudo das janelas de persistência.

Como regra, o transporte dos traçadores lançados nos tributários apresenta sempre o mesmo padrão, ou seja, independentemente do regime hidrológico, a eliminação das partículas se dá mais rapidamente pelo córrego Louriçal do que pelo córrego Areia. Um exemplo desse fenômeno pode ser observado no regime de estiagem, onde os traçadores lançados na entrada do córrego Louriçal começam a ser eliminados do sistema após 25 dias. Isso se deve basicamente a dois fatores: (1) o ponto de eliminação do córrego Louriçal se encontrar a aproximadamente 1,4 km do ponto de lançamento; (2) o córrego Areia ser mais longo e ainda apresentar uma área de recirculação que retarda a eliminação dos traçadores do sistema.

Os traçadores injetados no sistema através do rio Paraíba do Sul também mostraram comportamento similar, independentemente do regime de correntes. Em todos os cenários simulados, a maior parte das partículas é rapidamente transportada através do túnel e levadas para o córrego Louriçal e então eliminadas do sistema. No cenário de estiagem, que é o mais desfavorável do ponto de vista hidrodinâmico, o grupo de partículas leva ao redor de 14 horas para percorrer a distância localizada entre os dois túneis do reservatório Louriçal, como indicado na Figura 44. Sendo que em todos os cenários, um pequeno grupo de traçadores é transportado para a região de recirculação, localizada acima do túnel do córrego Areia, sendo retidas nesse ponto, provocando um atraso na sua eliminação.

Em relação à qualidade da água, foram simulados os comportamentos das concentrações de OD, DBO e fósforo considerando os quatro diferentes cenários da modelagem hidrodinâmica. De forma geral, no escoamento principal, que é fortemente dependente da qualidade da água do rio Paraíba do Sul, principal contribuinte do

reservatório, a modelagem mostrou que as concentrações de OD se mantiveram próximas a 5 mg/L nos quatro cenários hidrológicos considerados. A DBO permaneceu em torno de 2 mg/L, tanto no escoamento principal quanto nos tributários (córrego Areia e córrego Louriçal). As concentrações de fósforo total no escoamento principal variaram entre aproximadamente 0,055 mg/L (para o cenário de estiagem) e 0,060 mg/L (para o cenário de VMT).

Para o escoamento principal, a conjugação dos resultados da modelagem hidrodinâmica, do transporte de partículas e da qualidade da água obtidos nos cenários de 50% da VMT e de estiagem apontam para concentrações de fósforo total acima de 0,050 mg/L. Ambientes lênticos, com velocidades abaixo de 0,1 m/s e com concentrações de fósforo total acima de 0,050 mg/L são considerados eutróficos (ESTEVEZ, 1998 e TUNDISI, 2000) viáveis para o crescimento planctônico. Entretanto, é importante frisar que segundo a modelagem de partículas, o tempo de viagem do escoamento principal, no trecho entre o canal intermediário e o túnel de saída, é de no máximo 14 horas com vazão de estiagem.

Os córregos Areia e Louriçal apresentaram melhor qualidade da água que o escoamento principal. Com exceção das regiões de entrada do canal intermediário e do túnel de saída, onde há mistura entre as águas do rio Paraíba do Sul e dos tributários, as concentrações de OD se mantiveram acima de 6 mg/L, que é o padrão deste parâmetro para corpos hídricos classe 1. Apesar das baixas velocidades nas áreas alagadas destes córregos (com regiões abaixo de 0,001 m/s), ocasionando baixa reaeração, não houve consumo significativo de OD porque as concentrações de DBO se mantiveram em torno de 2 mg/L.

Nos três cenários de maior vazão (VMT, 70% da VMT e 50% da VMT) também não foram identificadas concentrações de fósforo total teóricas capazes de degradar a qualidade da água do reservatório. O valor máximo obtido foi de 0,030 mg/L. No cenário de vazão de estiagem, o mais improvável de todos os panoramas simulados, as concentrações de fósforo total se situaram na faixa de 0,040 e 0,060 mg/L entre as seções 09 e 12 do córrego Areia e seções 19 e 21 do córrego Louriçal, correspondendo a estirões de 1000 metros. Nessas seções, em situações de estiagem, observou-se uma fragilidade

nas condições desse corpo hídrico, onde podem surgir ambientes eutrofizados devido à penetração da pluma de fósforo total proveniente do rio Paraíba do Sul.

## Referências Bibliográficas

1. ABBOT, M. B & BASCO, R. (1989) *Computational Fluid Mechanics, An Introduction for Engineering*, Longman Group, UK Limited.
2. BOWIE, G.L., W.B. Mills, D.B. Porcella, C.L. Campbell, J.R.Pagenkopf, G.L. Rupp, K.M. Johnson, P.W.H. Chan, S.A. Gherini and C.E. Chamberlin *Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling*. Second Edition. U.S. Environmental Protection Agency Athens, GA. EPA-600/3-85-040, 1985.
3. CANU, M., UMGIESSER, G., SOLIDORO, C. (2001) Short-term simulations under winter conditions in the lagoon of Venice: a contribution to the environmental impact assessment of temporary closure of the inlets. *Ecological Modelling*, v. 138, p. 215-230
4. CHAPRA, S.C. *Surface Water-Quality Modeling*. United States of America: McGraw-Hill Companies, 1997.
5. CUNHA, C. L. N., MONTEIRO, T. C. M., ROSMAN, P. C. C. (2001) Modelagem bidimensional de transporte de escalares não-conservativos em corpos d'água rasos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.7, n. 2.
6. CUNHA, C. L. N, ROSMAN, P. C. C., MONTEIRO, T. C. M. (2003) Controle e Avaliação da Poluição em rios Usando Modelagem Computacional, *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Aceito em maio de 2003.
7. DEMUYNCK C., BAUWENS, W. De PAUWN N., DOBBELAERE I., POELMAN E. (1997) Evaluation of pollution reduction scenarios in river basin: application of long term water quality simulations. *Water Science and Technology*, v. 35, n. 9, p. 65-75.
8. ESTEVES, F.A. 1998. *Fundamentos de limnologia*. Rio de Janeiro, Interciência.
9. KALFF, J. 2002. *Limnology: Inland Water Ecosystems*. New Jersey, Prentice-Hall, Inc.
9. FISCHER, H. B. (Ed.) (1979), *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic

---

Press Inc., New York.

10. HARLEMAN, D. R. F. (1978) A comparison of water quality models of the aerobic nitrogen cycle. Personal report, Massachusetts Institute of Technology.
11. LOSODO, T. M. & PIDRAHITA, R. H. (1991) Modelling temperature variation and thermal stratification in shallow aquaculture ponds. *Ecological Modelling*, v. 54, p.189-226.
12. MUHAMMETOGLU, A. B. & SOYUPAK, S. (2000) A three-dimensional water quality-macrophyte interaction model for shallow lakes. *Ecological Modelling*, v. 113, p. 161-180.
13. Nocko, H. R., et al, AHE Simplicio – Queda Única. Modelagem Hidrodinâmica e de Qualidade da Água. Agosto de 2006.
14. ROSMAN, P. C. C. . *Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos*. In: Rui Vieira. (Org.). Métodos Numéricos em Recursos Hídricos. : ABRH, 1997, v. 3, p. 231-343.
15. ROSMAN, P. C. C. *Referência Técnica do SISBAHIA® – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental*. Disponível em: <http://www.sisbahia.coppe.ufjf.br/>. Acesso em: 10/06/08.
16. SELLERS, W. D. (1965) *Physical Climatology*. The University of Chicago Press/ Chicago & London.
17. SHENG, Y. P. & VILLARET (1989) Modeling the effect of Suspended Sediment Stratification on Bottom Exchange Processes. *Journal geophys. Res.*, v. 94, P.1429-1444.
18. THOMANN, R. V. AND MULLER, J. A. (1987) *Principle of Surface Water Quality Modeling and Control*. Harper and Row, New York.
19. UMGIESSER, G., CANU, D. M., SOLIDORO, C., AMBROSE, R. (2003). A Finite element ecological model: a first application to the venice Lagoon. *Environmental Modelling & Software*, 18: 131-145.

