



**SIMULAÇÃO BIDIMENSIONAL DA QUALIDADE DA ÁGUA DO
LAGO DO DESCOBERTO (DF/GO).**

GLÉCIA VIRGOLINO DA SILVA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**SIMULAÇÃO BIDIMENSIONAL DA QUALIDADE DA
ÁGUA DO LAGO DO DESCOBERTO (DF/GO).**

GLÉCIA VIRGOLINO DA SILVA

ORIENTADOR: Prof. Dr. ANTÔNIO BRASIL C. P. JÚNIOR

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. SÉRGIO KOIDE

MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

PUBLICAÇÃO: ENM . DM – 134 A /2009

BRASÍLIA/DF: JUNHO – 2009

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**SIMULAÇÃO BIDIMENSIONAL DA QUALIDADE DA ÁGUA
DO LAGO DO DESCOBERTO (DF/GO).**

GLÉCIA VIRGOLINO DA SILVA

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.**

APROVADA POR:

**Prof. Dr. Antônio Brasil C. P. Júnior (ENM-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Dr. Sérgio Koide (ENC-UnB)
(Co-Orientador)**

**Prof.Dr. Armando de Azevedo Caldeira Pires (ENM-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Dra. Yovanka Pérez Ginoris (Engenharia-UnB/GAMA)
(Examinadora Externa)**

BRASÍLIA/DF, 30 DE JUNHO DE 2009

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, GLÉCIA VIRGOLINO DA

Simulação Bidimensional da Qualidade da Água do Lago do Descoberto (DF/GO). [Distrito Federal] 2009.

xiv, 117p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2009).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Simulação Numérica

2. Qualidade da Água

3. Lago do Descoberto

4. CE-QUAL-W2

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, G. V. (2009). Simulação Bidimensional da Qualidade da Água do Lago do Descoberto (DF/GO). Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM . DM – 134 A /2009, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Glécia Virgolino da Silva.

TÍTULO: Simulação Bidimensional da Qualidade da Água do Lago do Descoberto (DF/GO).

GRAU: Mestre

ANO: 2009

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Glécia Virgolino da Silva
QNM 1 conjunto F casa 42, Ceilândia Sul.
72215016 Ceilândia - DF – Brasil.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família que tanto me apoiou durante este processo. Aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado, principalmente nos momentos que mais precisei. E dedico especialmente a Deus, por me orientar e dar forças para continuar e concluir com êxito essa etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por todas as graças que me tem dado durante minha vida. A Nossa Senhora, mãe de Jesus, por interceder por nós, junto a Deus. Aos meus irmãos Gleidson, Glauber, e em especial, à minha irmã e melhor amiga Gleide. Aos meus pais, Dalvina e Ernani, por sempre me compreenderem e por me dar todo o amor, carinho e apoio que um filho pode receber.

Agradeço a Capes, pelo fomento tão necessário ao pesquisador e ao desenvolvimento científico e tecnológico do nosso país.

Agradeço também ao apoio que o Departamento de Engenharia Mecânica/UnB, incluindo seus professores e funcionários, principalmente ao professor Antônio Brasil e de maneira especial, ao professor Koide do PTARH/UnB pela excelente orientação em meu trabalho. Aos funcionários do Bloco G/FT.

E não poderia deixar de ser grata aos funcionários da CAESB, como o engenheiro José Ricardo Moraes (CAESB-TEAP), que me forneceram dados e me deram suporte para que esta pesquisa fosse possível. E a Prof. Dra. Maria Del Pilar Hidalgo Falla, pelo apoio prestado para conclusão deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos meus amigos por me acompanharem nesta caminhada e permacerem ao meu lado nos altos e baixos desta jornada. Dentre muitos cito: Mitsuko, Júnior, Waldene, Manuela, Nuno, Fernanda, Ana Paula, Letícia, Adão, Carlos Petrônio, Luciano, Vinicius, Gladys, entre muitos outros. Obrigada Petrônio, por dispor de seu precioso tempo para me auxiliar. Realmente sou agraciada com tantos amigos incomparáveis.

RESUMO

A eutrofização dos corpos d'água é provocada pela alta concentração de fósforo e nitrogênio que pode levar à proliferação de algas, causando a diminuição da qualidade da água. No sentido de se avaliar a qualidade de água para abastecimento público, é fundamental analisar a possibilidade de ocorrência de eutrofização dos reservatórios de água. Esta pesquisa visa mostrar o comportamento dinâmico das concentrações dos referidos nutrientes, do oxigênio dissolvido e da temperatura da água no Lago do Descoberto que é o principal reservatório de abastecimento público de água do Distrito Federal e entorno, correspondendo a aproximadamente 65% da água distribuída nesta região. A pesquisa abrangeu o período final de 2003 ao início de 2005. Para tal, foi utilizado o modelo CE-QUAL-W2. Trata-se de um modelo bi-dimensional, longitudinal/vertical, para análise da hidrodinâmica e da qualidade da água de corpos hídricos. O programa utiliza, entre outras ferramentas, os conceitos de mecânica dos fluidos, modelagem por diferenças finitas e escoamentos ambientais. Outro objetivo deste trabalho foi a avaliação da aplicabilidade do modelo e a coerência dos valores obtidos, para posteriores aplicações em cenários prognósticos. Os resultados do módulo hidráulico tiveram uma boa representatividade nas simulações com o coeficiente de Manning de 0,04, obtendo erro médio absoluto de 0,34m para as elevações do nível de água do reservatório durante o período modelado. Em geral, os resultados dos parâmetros de qualidade da água tiveram um ajuste satisfatório em comparações dos dados observados com os simulados. Por fim, os resultados obtidos a partir dos estudos realizados indicam uma satisfatória aplicabilidade do modelo para a obtenção de cenários prognósticos referentes à qualidade de água do Lago do Descoberto.

Palavras-chave: Simulação Numérica, Qualidade de água, Lago do Descoberto, CE-QUAL-W2.

ABSTRACT

Eutrophication of water bodies is caused by high concentrations of phosphorus and nitrogen, leading to water quality declining. Accordingly, there is a concern to evaluate the quality of water for public supply. This research aims to show the dynamic behavior of the concentrations of these nutrients, dissolved oxygen and water temperature in Descoberto Lake which is the main reservoir of public water supply and environment of the Distrito Federal and neighboring cities, corresponding to approximately 65% of water distributed in the region. The research covered the end of period 2003 to early 2005. The model CE-QUAL-W2 was used for developing the experimental research. CE-QUAL-W2 is a two-dimensional model, laterally averaged, for analysis of hydrodynamics and water quality of water bodies. The program uses, among other tools, the concepts of fluid mechanics, modeling by finite differences and environmental flows. Another objective of this study was to evaluate the model applicability and the consistency of results for subsequent applications in scenarios predictions. The hydraulic results had a good representation in simulations with the Manning coefficient of 0.04, obtaining average absolute error of 0.34 m for the elevation of water level of the reservoir during the period modeled. In general, the results of water quality parameters had a satisfactory adjustment in comparisons of those observed with simulated data. Finally, the results indicate a satisfactory applicability of the model to obtain predictions of scenarios regarding the quality of water from the Descoberto Lake and other research.

Key Words: Numerical Simulation, Water Quality, Descoberto Lake, CE-QUAL-W2.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SIMBOLOS E SIGLAS	xiii
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
3.1- ASPECTOS GERAIS SOBRE LIMNOLOGIA	9
3.2- CARACTERIZAÇÃO DO LAGO DESCOBERTO	12
3.2.1- Localização	12
3.2.2- Características gerais do uso do solo e da água.....	13
3.3- CONSIDERAÇÕES SOBRE QUALIDADE DA ÁGUA	17
3.4- OXIGÊNIO DISSOLVIDO	18
3.4.1- Distribuição e difusão de oxigênio dentro do ecossistema.....	19
3.4.2- Dinâmica do oxigênio em lago tropical.....	20
3.4.2.1- Extensão do período de estratificação térmica.....	21
3.4.2.2- Concentração de matéria orgânica	23
3.5- EUTROFIZAÇÃO	24
3.6- NUTRIENTE LIMITANTE.....	27
3.6.1- Fósforo.....	28
3.6.2- Nitrogênio	29
3.7- MODELAGEM DA QUALIDADE DE ÁGUA.....	31
3.7.1- Evolução dos Modelos	31
3.7.2- Modelos de Qualidade de Água.....	32
3.7.2.1- Modelo CE-QUAL-W2 versão 3.6.....	33
3.7.3- Modelos Matemáticos – Equações Governantes	38
3.7.3.1- Médias Laterais	39
3.7.3.2- Sumário das equações de médias laterais	44
3.7.3.3- Simplificação do termo de pressão	44
3.7.3.4- Superfície de água livre	46

3.7.3.5-	Equação De Estado	48
3.7.3.6-	Comportamento da Concentração do Fósforo	50
3.7.3.7-	Comportamento da Concentração do Nitrogênio	52
3.7.3.8-	Comportamento da Concentração do Oxigênio Dissolvido (OD)	56
4 -	METODOLOGIA	59
4.1-	GEOMETRIA DO RESERVATÓRIO	60
4.2-	CONDIÇÕES DE CONTORNO	64
4.2.1 -	Vazão	65
4.2.2 -	Temperatura da água	66
4.2.3 -	Qualidade da Água	66
4.2.4 -	Dados Meteorológicos	75
4.2.5 -	Parâmetros cinéticos	77
4.2.6 -	Análise de sensibilidade	79
4.2.7 -	Calibração	79
4.2.8 -	Confirmação	79
5 -	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
5.1-	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA VAZÃO E NÍVEL D'ÁGUA	80
5.2-	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA.....	81
5.3-	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	84
5.3.1 -	Fósforo Dissolvido (P-PO ₄).....	85
5.3.2 -	N-Amoniacal	89
5.3.3 -	Nitrato + Nitrito (NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻).....	93
5.3.4 -	Oxigênio Dissolvido (OD)	96
6 -	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	101
APÊNDICES	111
APÊNDICE A -	BACIAS HIDROGRÁFICAS DO DISTRITO FEDERAL.....	112
APÊNDICE B -	VAZÕES DE ENTRADA	113
APÊNDICE C -	TEMPERATURA DA ÁGUA	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Valores de fósforo e seus respectivos estados tróficos associados	26
Tabela 3.2 - Comparação entre os Modelos de Qualidade de Água.....	33
Tabela 3.3- Equações governantes com e sem declive no canal. (Cole & Wells, 2002)	49
Tabela 4.1- Parâmetros Cinéticos.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Lago do Descoberto GO/DF. Fonte: Google Maps. Disponível em: http://maps.google.com.br/ . Acesso dia 28 abril de 2008.	12
Figura 3.2- Lago do Descoberto – (a)Proximidades da Barragem do Descoberto. (b)Barragem do Descoberto. Fonte: Google Maps. Disponível em: http://maps.google.com.br/ . Acesso dia 28 abril de 2008.	13
Figura 3.3- Distribuição vertical de oxigênio e CO ₂ total no lago Curuçá (lago de várzea do Rio Trombetas, Pará). Fonte: Esteves, 1998.	20
Figura 3.4- Ciclo do Fósforo em Corpos Hídricos . Fonte: SILVA, 2006.	28
Figura 3.5 - Parte do Ciclo do Nitrogênio destacando-se as atividades agrícolas. (C,H,O,N) corresponde à matéria orgânica. Fonte: Chagas (2007)	31
Figura 3.6 - Interface visual do programa CE-QUAL-W2 versão 3.6	36
Figura 3.7 - Interface visual do arquivo de controle de dados do programa CE-QUAL-W2 versão 3.6.	36
Figura 3.8 - Exemplo de simulação do modelo CE-QUAL-W2 versão 3.6.	37
Figura 3.9- Esquematização para a simplificação do termo de pressão. Fonte: Cole & Wells, 2008.	45
Figura 3.10- Sistema de coordenadas, sem declive no canal.	46
Figura 3.11- Sistema de coordenadas, com declive no canal.	47
Figura 3.12 - Fluxo interno de fósforo do modelo CE-QUAL-W2. Fonte: Cole & Wells, 2002.	50
Figura 3.13 - Fluxo interno de amônio. Fonte: Cole & Wells, 2002.	52
Figura 3.14 - Fluxo interno de Nitrito e Nitrato. Fonte: Cole & Wells, 2002.	55
Figura 3.15 - Fluxo interno de OD. Fonte: Cole & Wells, 2002.	56
Figura 4.1 - Imagens georeferenciadas da região do Lago do Descoberto.	60
Figura 4.2 - Grade Retangular do Lago do Descoberto.	60
4.3- Grade Triangular – Arquivo de extensão “.TIN”.	62
4.4- Valores de elevações da superfície do lago. Metros acima do nível do mar.	62
Figura 4.5 - Discretização longitudinal do Lago do Descoberto evidenciando seus braços e respectivos segmentos, gerada pelo modelo.	63
Figura 4.6 - Perfil vertical do Lago Descoberto, gerada pelo modelo e seus braços com os respectivos segmentos que os compõem	64
Figura 4.7 - Localização da entrada de dados dos tributários inseridos no modelo.	65
Figura 4.8- Condição inicial para temperatura de água, por camada.	66
Figura 4.9 – Valores de cargas de fosfato para entrada no modelo, referente ao braço 1.	67
Figura 4.10 – Valores de cargas de fosfato para entrada no modelo, referente ao braço 2.	67
Figura 4.11 – Valores de cargas de fosfato para entrada no modelo, referente ao braço 3.	68
Figura 4.12 – Valores de cargas de fosfato para entrada no modelo, referente ao braço 4.	68
Figura 4.13 – Valores de cargas de N-amoniaco para entrada no modelo, referente ao braço 1.	69
Figura 4.14 – Valores de cargas de N-amoniaco para entrada no modelo, referente ao braço 2.	69

Figura 4.15 – Valores de cargas de N-amoniacoal para entrada no modelo, referente ao braço 3.	70
Figura 4.16 – Valores de cargas de N-amoniacoal para entrada no modelo, referente ao braço 4.	70
Figura 4.17 - Valores de cargas de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ para entrada no modelo, referente ao braço 1.	71
Figura 4.18 -Valores de cargas de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ para entrada no modelo,.....	71
Figura 4.19 - Valores de cargas de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ para entrada no modelo, referente ao braço 3.	72
Figura 4.20 -Valores de cargas de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ para entrada no modelo, referente ao braço 4.	72
Figura 4.21 – Valores de cargas de OD para entrada no modelo, referente ao braço 1.	73
Figura 4.22 – Valores de cargas de OD para entrada no modelo, referente ao braço 2.	73
Figura 4.23 – Valores de cargas de OD para entrada no modelo, referente ao braço 3.	74
Figura 4.24 – Valores de cargas de OD para entrada no modelo, referente ao braço 4.	74
Figura 4.25 - Temperatura do ar. Fonte: INMET (2009).	75
Figura 4.26 - Temperatura do ponto de orvalho. Fonte: INMET (2009).	75
Figura 4.27 - Valores de velocidade do vento. Fonte: INMET (2009).	76
Figura 4.28 - Ângulos de direção do vento. Fonte: INMET (2009).	76
Figura 4.29 - Potência da radiação solar incidente no lago do Descoberto.	76
Figura 4.30 – Precipitação verificada sob a região do lago do Descoberto no período de 2003 a 2005. Fonte: INMET (2009).	77
Figura 5.1- Elevações observadas e simuladas do lago do Descoberto.	80
Figura 5.2- Comparação de dados de temperatura da água simulado e predito, do último segmento do lago (segmento 20).	81
Figura 5.3 – Perfis verticais de temperatura da água, gerados pelo modelo.	83
Figura 5.4 – Concentrações de fosfato próximo à barragem, simulados com o modelo.	85
Figura 5.5-Perfis de concentração de fosfato próximos á barragem, simulados pelo modelo CE-QUAL-W2 versão 3.6.	87
Figura 5.6 - Concentrações de N-amoniacoal, próximo à barragem, simulados com o modelo CE-QUAL-W2.	89
Figura 5.7 - Perfis de concentração de N-amoniacoal, próximos à barragem, simulados pelo modelo CE-QUAL-W2 versão 3.6.	91
Figura 5.8 - Concentrações de nitrato+nitrito da superfície, próximo à barragem, simulados com o modelo CE-QUAL-W2.	93
Figura 5.9 – Perfis de concentração de Nitrato+Nitrito, próximos à barragem, simulados pelo modelo CE-QUAL-W2 versão 3.6.	95
Figura 5.10 -Concentrações de oxigênio dissolvido, na superfície da água e próximo à barragem, simulados com o modelo CE-QUAL-W2	97
Figura 5.11 - Perfis de concentração de OD, próximos á barragem, simulados pelo modelo CE-QUAL-W2 versão 3.6.	99

LISTA DE SIMBOLOS E SIGLAS

ADN- ácido desoxirribonucléico
APA – área de Proteção Ambiental
ARN - ácido ribonucléico
ATP - fosfato de adenosina
CAESB – Companhia de Água e Esgoto do Distrito Federal
d – dias
DBO – demanda bioquímica de oxigênio
DBO_{5, 20} – demanda bioquímica de oxigênio medida a 5 dias e 20°C
DBO_{7, 20} – demanda bioquímica de oxigênio medida a 7 dias e 20°C
DBOC ou CBDO - demanda bioquímica de oxigênio carbonácea
DBON - demanda bioquímica de oxigênio nitrogenada
DF – Distrito Federal
DQO - demanda química de oxigênio
EM – Erro Percentual Médio
EMA – Erro médio absoluto
EP – Erro Padrão
ETA - Estações de Tratamento de Água
EUA – Estados Unidos da América
GO – Estado de Goiás
H – profundidade média
H₂S – ácido sulfídrico
IBP - International Biological Programm
IET – Índice de Eutrofização
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
INPA - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IQA – Índice de Qualidade da água
N – nitrogênio
NH₃ – amônia
NO₂ – nitrito
NO₃ – nitrato
NPK – adubo
OD – oxigênio dissolvido
OMS - Organização Mundial de Saúde
P – fósforo
pH – potencial hidrogeniônico
PO₄ – fosfato
PTARH - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Recursos Hídricos
SIG - Sistema de Informações Geográficas
SNUC - Sistema Nacional de Unidades de Conservação

SPRING - Integrating Remote Sensing and GIS

SS – sólidos suspensos

TIAER - Instituto de Pesquisa Aplicada ao Meio Ambiental do Texas

U – velocidade média

UnB – Universidade de Brasília

UHE - Usina Hidrelétrica Funil

1 - INTRODUÇÃO

É reconhecido mundialmente que a água é fonte de vida dos seres residentes no planeta. Assim, é possível dizer que a qualidade da água está diretamente relacionada à saúde dos mesmos. Neste contexto a Organização Mundial de Saúde, em 1998, referenciou que não se pode separar a qualidade da água da saúde da população, pois a qualidade desta contribui para a qualidade de vida. Assim existe uma preocupação crescente sobre estudos das características físico-químicas e biológicas da água destinada ao abastecimento público, devido ao crescimento desordenado e ocupação desorganizada da população nas imediações dos recursos hídricos, podendo contribuir para o aumento da poluição de rios e lagos.

Segundo Lanna (1993) “os recursos hídricos são bens de relevante valor para a promoção do bem estar de uma sociedade”. Em quase todas as atividades humanas a água está intimamente ligada como um bem de consumo final ou intermediário. Ao aumentar a intensidade e a diversidade do uso da água, conflitos entre os usuários podem começar a surgir. Para se evitar e administrar estes conflitos é necessária a gestão integrada do uso dos recursos hídricos, seu controle e conservação. Essas ações devem considerar uma multiplicidade de objetivos (econômicos, ambientais, sociais, dentre outros), usos e atitudes alternativas como: irrigação, geração de energia, abastecimento, etc.

A água disponível em lagos e rios, que é a mais fácil e direta de ser explorada, representa apenas 0,266% de toda a água doce do planeta. No entanto esta pequena porção de água do planeta é afetada pela poluição provocada pelas atividades humanas. Se estas ações poluidoras se tornarem constantes possivelmente existirá a necessidade de se procurar corpos hídricos distantes de regiões com grandes densidades populacionais com o intuito de se aproveitar recursos hídricos que possuam uma melhor qualidade de água. Se esta ação permanecer se esgotarão os recursos hídricos com boa qualidade de água, resultando em uma poluição geral conseqüente da despreocupação humana. No sentido de evitar tal situação é necessário, então, o estudo dos corpos hídricos próximos às grandes cidades com o a intenção de se prever o aumento ou a não degradação da qualidade da água. Assim este trabalho tem como objeto de estudo o lago Descoberto que se encontra dentro da bacia do Descoberto, localizando entre cidades com elevada taxa de crescimento populacional.

Os problemas encontrados na bacia do Descoberto estão intimamente ligados à ocupação intensiva, diversificada e desordenada, como o aparecimento de parcelamentos, assentamentos, condomínios, invasões, incluindo atividades agrícolas, pecuária e extrativismo mineral. Cita-se como extrativismo mineral, por exemplo: areia, terra e brita. Todas estas atividades prejudicam a manutenção da preservação do solo e da água por não serem desenvolvidas com as devidas medidas de gestão ambiental. (Bicalho, 2006)

O lago Descoberto está situado entre os estados do Distrito Federal e Goiás, abastecendo cerca de 2 milhões de habitantes do Distrito Federal, o que representa 65% da população do distrito. Assim, desde o ano 2005, o Governo do Distrito Federal (GDF) tem posto em prática o projeto “Programa Brasília Sustentável” (Banco Mundial, 2005), que também possui a contribuição de diversas instituições e o Banco Mundial, para a melhoria das cidades.

Silva (2006), na sua pesquisa sobre o reservatório de Fiú, localizado no Estado do Paraná, trabalhou com a hipótese de que modelos matemáticos são uma ferramenta de apoio à decisão no processo de contenção da eutrofização para o desenvolvimento sustentável, confirmando sua hipótese ao concluir seu trabalho. Assim umas das metodologias para se avaliar e prever a qualidade de água em corpos hídricos é recorrer a programas de simulação numérica que são capazes de indicar a dinâmica da poluição em função do aumento da existência de cargas poluidoras originárias do aumento populacional.

As ferramentas de simulação têm vindo a ser uma alternativa freqüentemente utilizada para estudos da qualidade da água de lagos e reservatórios incluindo a análise do transporte de nutrientes e demais constituintes. A evolução dos modelos matemáticos tem permitido a realização de análises multidimensionais da hidrodinâmica da coluna d’água (Orlob, 1983; Thomann e Muller, 1987; Chapra, 1997; Kuo *et al.*, 2002, Silva, 2006; Kuo *et al.*, 2006), gerando previsões mais adequadas dos processos físico-químicos e biológicos que ocorrem. Modelos de qualidade da água podem explorar a dinâmica do processo de eutrofização no ecossistema aquático e as implicações desta na qualidade da água dando valiosas contribuições para o monitoramento do reservatório.

Assim estudos de cenários prognósticos do lago do Descoberto, aplicando ferramentas de simulação numérica podem trazer resultados importantes em termos de planejamento, fornecendo informações relevantes para auxiliar as decisões de gestão do corpo hídrico. Neste contexto, este trabalho visa estudar, por meio de modelagem bidimensional, a temperatura da água e as concentrações de fósforo, nitrogênio e oxigênio dissolvido do Lago do Descoberto, utilizando o modelo matemático bidimensional CE-QUAL-W2, com o intuito de analisar o comportamento dinâmico das concentrações dos referidos parâmetros e a obtenção de dados de apoio a tomadas de decisões. O foco deste estudo é a análise das características limnológicas do lago do Descoberto, como temperatura da água, fósforo, nitrogênio e oxigênio dissolvido e avaliar a aplicabilidade do software CE-QUAL-W2 às condições do Lago do Descoberto, possibilitando a criação de cenários prognósticos.

No capítulo 2 é feita uma descrição dos trabalhos realizados com o modelo referido. O seguinte (capítulo 3) expõe os principais temas teóricos importantes para a realização desta pesquisa. No próximo capítulo é apresentada a metodologia empregada durante a execução deste trabalho. Já no capítulo 5 são mostrados os resultados obtidos pelas simulações e discutem-se cada um deles. Por fim, o capítulo 6 apresenta tópicos conclusivos sobre o processo de realização da pesquisa e respectivos resultados, além disso, são feitas recomendações para trabalhos futuros.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A modelagem matemática permite a análise do corpo hídrico para se definir locais de estações de monitoramento e de descarga de afluentes, escolher técnicas de manejo, produzir cenários prognósticos e estabelecer as relações entre qualidade de água e seres aquáticos (Silva, 2006). Assim o conhecimento das cargas poluidoras que entram no corpo de água é importante para se tomar decisões sustentáveis. Deste modo, citam-se alguns dos trabalhos realizados durante os últimos anos, que utilizaram o modelo CE-QUAL-W2.

Berger *et al.* (2001), estudaram a calibração da hidrodinâmica, temperatura e parâmetros ligados à eutrofização de corpos d'água como: nutrientes, algas, oxigênio dissolvido (OD), matéria orgânica e coliformes. Os autores concluíram que o modelo se mostrou capaz de prever impactos do aumento da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) com cargas de fontes pontuais, reproduzindo de forma satisfatória a qualidade da água.

O Instituto de Pesquisa Aplicada ao Meio Ambiental do Texas (TIAER) realizou avaliações das alternativas de modelagem de estratégias de controle de fósforo (P) para o lago Waco (Flowers *et al.*, 2001). Este relatório documentou os resultados da calibração do modelo onde foi avaliada a qualidade do lago, através de simulações de longo prazo (32 anos), definindo estratégias alternativas para o controle de fósforo.

O trabalho de Bowen *et al.* (2003) estudou a qualidade da água do estuário de Neuse, situado na Califórnia do Norte. O autor definiu como parâmetro a máxima carga poluidora total diária para estudar a qualidade da água. A simulação foi de 43 meses tendo início em 1996. De acordo com os resultados seria necessária uma redução de carga de cerca de 5% para reduzir em 10% a frequência de infrações de despejo de poluentes. Os autores concluíram que apesar do modelo poder ser uma interessante ferramenta para análises de carga poluente, existem algumas limitações e a necessidade de grande quantidade de dados.

Os mesmo autores (Bowen e Hieronymus, 2004) aplicaram o CE-QUAL-W2 para prognosticar a qualidade da água a 80 km a jusante do estuário do rio Neuse. Realizaram predições para a salinidade, oxigênio dissolvido, nutrientes e clorofila-a. Com base nos

resultados foi concluído que seria possível a realização da modelagem da dinâmica da eutrofização do estuário do rio Neuse para análises posteriores.

Kuo *et al.* (2006) estudaram dois reservatórios localizados em Taiwan com o objetivo de simular a hidrodinâmica e qualidade da água na coluna de água. As simulações reproduziram adequadamente a distribuição espacial e temporal da temperatura na coluna de água dos dois reservatórios. Os autores modelaram as concentrações dos principais parâmetros da qualidade da água, tais como nutrientes, OD, biomassa e algas. Além da análise destes parâmetros, o mais importante nessa pesquisa foi o estudo da estratificação vertical de temperatura e do OD no Reservatório Tseng-We, em que durante os dois anos de simulação os dados observados concordaram com os resultados simulados. Após a calibração do modelo, os autores simularam cenários da qualidade da água, procedendo a redução de nutrientes inseridos nos corpos d'água. Os resultados dos cenários revelaram que um decréscimo de 30 e 55% de cargas de fósforo poderá conduzir o estado eutrófico / mesotrófico do reservatório Te-Chi para um estado oligotrófico.

Xu *et al.* (2007) usaram a associação dos modelos HSPF (modelo para escoamento no solo) e CE-QUAL-W2 (modelo para reservatório) a fim de estudar a qualidade da água nas bacias hidrográficas. O objetivo deste estudo foi de utilizar a associação dos dois modelos para avaliar o impacto da utilização do solo, alterações na hidrodinâmica e qualidade da água em corpos d'água, especialmente do reservatório Occoquan, localizado na Virgínia do Norte, EUA. Resultados de cenários criados por essa associação de modelos podem auxiliar os gestores desses mananciais a tomar decisões em relação às bacias hidrográficas. Dessa maneira, o êxito da calibração de hidrologia forneceu uma base sólida para maiores aplicações e desenvolvimento do modelo.

Barlow e Obregon (2007) analisaram as possíveis causas de poluição das barragens ao longo do rio Santiago, México. Como também Diogo *et al.* (2008) estudaram a barragem do Alqueva, localizada em Portugal, com a finalidade de avaliar adequadamente estratégias de controle de nutrientes ao longo desta bacia hidrográfica em território Português. Os autores quantificaram o fósforo total originado de fontes urbanas, industriais e difusas e realizaram simulações de cenários prognósticos.

É interessante acrescentar que o modelo CE-QUAL-W2 fornece informações relevantes para diversos estudos respeitantes à vida aquática como destaca o trabalho de Sullivan *et al.* (2003), no qual foi desenvolvido um estudo da distribuição e sobrevivência do peixe esturjão branco (*Acipenser transmontanus*) em um reservatório sujeito a grande variação espacial e temporal do OD e temperatura. Já, o estudo de Boegman *et al.* (2008) no Lago Erie, localizado entre o Canadá e os EUA, determinou os efeitos do Mexilhão zebra (*Dreissena polymorpha*) por ser uma espécie invasora que reduz a quantidade de algas existentes nas proximidades da costa ocidental do lago. Ainda analisando o Lago Erie, Zhang *et al.* (2008), também realizaram estudos referente ao mexilhão quagga (*D. bugensis*) e sua influência na quantidade de fitoplânctons no local.

Bartholow *et al.* (2001) estimaram os efeitos de um dispositivo de temperatura controlada (TCD) em relação a parâmetros termodinâmicos e limnológicos para um grande reservatório de armazenamento, chamado Shasta Lake, localizado no norte da Califórnia. O TCD foi instalado em 1997 a fim de melhorar as temperaturas à jusante para salmonídeos ameaçados através da libertação epilimnica de águas no inverno/primavera e hipolimnica de águas no verão/outono. Os pesquisadores calibraram o modelo CE-QUAL-W2 e aplicaram um processo estruturado de simulação para prever os principais efeitos limnológicos do TCD sob uma variedade de cenários ambientais.

Ma *et al.* (2008) avaliaram o processo de transporte do pesticida atrazina ao longo do reservatório Kouris, localizado no Chipre, e os efeitos dos processos de retirada de água do fundo e da superfície. Como parte deste estudo os autores buscaram compreender a dinâmica da qualidade da água, impactos e possíveis decisões para estratégias de gestão do corpo d'água. O modelo possibilitou a verificação da dinâmica do transporte da atrazina no corpo d'água.

Como foi visto pelos trabalhos citados, foram realizados diversos estudos que se preocuparam com hidrodinâmica e a qualidade da água. Neste sentido foram obtidas investigações na região da bacia do Descoberto, que são citadas a seguir.

No trabalho de Carmo e Boaventura (2005) o objetivo foi investigar a qualidade físico-química da água do rio Descoberto durante os períodos de seca e chuva pela medição do

pH, temperatura, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, turbidez, cor, alcalinidade e NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NH_4^+ , Cl^- e HCO_3^- , E os elementos Sr, Mo, Cd, Y, Ti, Ca, V, Mg, Fe, Si, Ni, Zr, Cu, Al, Cr, Mn, Ba, Co, Zn, P, Na e K. Os resultados obtidos pela pesquisa mostraram altas concentrações de alguns parâmetros físico-químicos e elementos-traço durante ambas as estações, ocorrendo diluição ao longo da extensão do rio, a qual acaba por minimizar os problemas que comprometem a qualidade da água deste reservatório. Porém, foi concluído que uma degradação progressiva da qualidade da água pode ocorrer devido a um aumento do lançamento de cargas poluentes, originadas pelo crescimento da população, pelas atividades agrícolas e por outros fatores.

Ribeiro (2001) mostra em sua pesquisa o grau de poluição e alteração dos rios Melchior e Descoberto, avaliando a capacidade de autodepuração destes, utilizando os modelos matemáticos WQRRS e QUAL2E-UNCAS de simulação da qualidade da água. O autor obteve dados hidrológicos e de qualidade da água (OD, DBO, Demanda Química de Oxigênio (DQO), ciclo do nitrogênio, ciclo do fósforo e coliformes) em pontos ao longo dos rios, relativo ao período de estiagem do ano de 2000. As simulações foram realizadas utilizando dados obtidos durante a pesquisa de campo e dados cedidos pela Companhia de Água e Esgoto de Brasília (CAESB). Realizaram-se simulações de cenários futuros, observando a influências dos níveis de tratamento de esgoto e localização dos pontos de lançamento desses efluentes. De acordo com os resultados, o autor concluiu que o sistema Melchior-Descoberto possui alta capacidade de autodepuração, confirmado pelos altos coeficientes de reaeração. Apesar disto, foi observado que era necessário monitorar pontos específicos de lançamento de afluentes devido á preocupante carga de nutrientes que eram lançadas no último ponto de coleta, onde a água dirige-se ao futuro reservatório do AHE Corumbá IV que abastecerá o DF e entorno.

Ávila, V. B. (2005) trabalhou em sua dissertação de mestrado a relação entre uso e manejo do solo da bacia do córrego Capão Comprido, quantificando as cargas de nitrogênio, fósforo e sedimentos para o lago Descoberto. A autora observou que o escoamento superficial, após adubação do solo, influencia na quantidade de nitrogênio (N) transportada por este. Quanto à concentração de fósforo (P) e sólidos suspensos (SS), que estão ligados à intensidade de precipitação na região e o transporte de SS diminui enormemente com o aumento da cobertura do solo.

Para a realização de trabalhos como os descritos acima, são necessários conhecimentos básicos sobre modelagem da qualidade da água e demais temas correlacionados, os quais serão discutidos no capítulo que se segue.

3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo traz informações e/ou conceitos básicos sobre os temas: Limnologia, Caracterização do Lago Descoberto, Qualidade da Água, Oxigênio Dissolvido, Eutrofização, Nutriente Limitante e, especialmente, Modelagem de Qualidade da Água, os quais foram úteis para a realização deste trabalho.

Quanto ao item 3.7 de “Modelagem de Qualidade da Água” abordou-se a evolução dos modelos matemáticos de simulação de qualidade da água (item 3.7.1). Após a explanação deste breve histórico são relatadas, no item 3.7.2, as características gerais sobre os modelos numéricos de simulação. Acrescentam-se ainda informações sobre algumas das atuais ferramentas computacionais de modelagem, principalmente sobre o modelo utilizado neste trabalho, o CE-QUAL-W2. Finalmente, o item 3.7.3, apresenta as equações governantes usadas e os termos fonte do fósforo, nitrogênio e oxigênio dissolvido.

3.1- ASPECTOS GERAIS SOBRE LIMNOLOGIA

Para melhor entendimento do termo Limnologia, cabe aqui demonstrar a etimologia da palavra, sendo do grego, *limne* - lago, e *logos* – estudo. Com o passar do tempo e os avanços nas pesquisas, a Limnologia foi afinando seu conceito e ampliando seu campo de atuação, incluindo outros ecossistemas aquáticos continentais.

Desta forma, pode-se “definir a Limnologia como o estudo ecológico de todas as massas d’água continentais, independentemente de suas origens, dimensões e concentrações salinas.” (Esteves, 1988, p. 5)

Em detrimento da ampliação do objeto de estudo da Limnologia, inúmeros outros corpos d’água passaram a ser também estudados por esta ciência. Como exemplos citam-se: lagunas, açudes, lagoas, represas, rios, riachos, reservatórios, brejos, áreas inundáveis, águas subterrâneas, coleções de água temporárias, nascentes e fitotelmos (sendo este último águas acumuladas nas bainhas de plantas, como nas bromélias). Além destes, incluem-se os estuários (região de entrada dos rios no mar) que são objeto de estudo tanto dos limnólogos como dos oceanógrafos.

De modo geral, em Esteves (1998), a sequência de acontecimentos percebidos pela Limnologia desde sua origem até os dias atuais, fez desta ciência uma importante ferramenta de estudos, e sua universalização foi fator primordial para seu reconhecimento. Com isto, viu-se a necessidade de definir um idioma que alcançasse a todos os cientistas, tendo sido definido então como idioma oficial o inglês.

O desenvolvimento desta ciência no Brasil foi similar ao vivido na Europa e nos EUA, porém seus maiores avanços ocorreram nas últimas décadas, quando o país passou a utilizar demais experimentos em suas pesquisas. Esteves (1998), descreve, na tabela 3.1, o desenvolvimento da Limnologia no Brasil em quatro períodos: “anterior a 1900, 1900-1950, 1950-1970 e posterior a 1970.

Tabela 3.1- Breve histórico da Limnologia no Brasil.
(Fonte: Esteves, F. A., 1998, p. 22)

Até 1900
<p>No Brasil as pesquisas sobre lagos começaram com as primeiras expedições exploratórias, especificamente no Estado do Amazonas. Até este momento, ainda não se falava em Limnologia, mas muitos dados eram coletados para posterior análise.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Oswaldo Cruz (1893), que estudou parte do sudeste brasileiro, foi um grande sanitarista brasileiro do início do século XX, pois com suas pesquisas experimentais desenvolveu um aparelho para coleta de água com fins microbiológicos, e teve bastante destaque com suas pesquisas, em especial porque apresentou resultados significativos sobre a distribuição de bactérias em diferentes corpos d’água no Rio de Janeiro. • O. Nordstedt (1883-89), A. Löfgren (1906) e O. Borge (1918) contribuíram com diversos estudos, em especial com uma vasta publicação de materiais sobre algas continentais dos arredores de Pirassununga, São Paulo (SP). • Já no sul do país, Rio Grande do Sul, destacou-se Hermann Von Ihering (1885), que pesquisou sobre a fauna de peixes e aves da lagoa dos Patos.
De 1900 a 1950
<p>O enfoque auto-ecológico e hidrobiológico foi o marco desta fase. Dentre muitos, vale citar o americano Stillman Wright, considerado pioneiro da Limnologia no Brasil. Wright efetuou</p>

importantes pesquisas em açudes do Nordeste, uma delas está “relacionada com os padrões de estratificação térmica e química da coluna d’água dos açudes daquela região. Wright foi um dos primeiros cientistas a abordar a questão dos fenômenos de estratificação e desestratificação dos ecossistemas aquáticos do local.

De 1950 a 1970

Este foi um período marcado por pesquisas mais intensas (com visão holística), época em que a Limnologia se consolida como ciência. Dentre os biólogos mais importantes aparecem:

- Harold Sioli, que estudou a região nordeste e norte do Brasil e efetuou pesquisas ecológicas de rios e lagos, além disso, fez importantes considerações entre os ecossistemas aquáticos e terrestres. Abordou também, “aspectos sobre a fragilidade do ecossistema amazônico e sobre os perigos de sua ocupação e utilização em grande escala”.
- Samuel Murgel Branco, quando da resolução de problemas de poluição dos corpos d’água, e os níveis de eutrofização de diversos rios e represas do Estado de São Paulo.

Posterior a 1970

Com a evolução da Limnologia no Brasil, viu-se a necessidade de promover mais capacitação para os cientistas. Em virtude disso, a partir de 1970 criam-se cursos de pós-graduação para várias áreas no campo da Ecologia. Após o surgimento destes cursos foi possível unir pesquisadores de muitas áreas afins à Limnologia, como botânicos, zoólogos, químicos, etc., e que juntos produziram trabalhos integrados.

Os cientistas especializados com pós-graduação fundaram núcleos de pesquisas limnológicas em diversas universidades e institutos brasileiros e muitos tiveram apoio do INPA, que tornou possível a troca de informações com pesquisadores alemães.

De maneira geral, a Limnologia no Brasil trilhou um caminho longo e de muito estudo. Verifica-se a contribuição de vários pesquisadores em muitos Estados brasileiros, do norte ao sul do país. Estes cientistas trouxeram resultados bastante significativos, os quais proporcionaram à ciência da Limnologia suas maiores descobertas e avanços, tornado possível hoje, estudos de melhorias na qualidade dos lagos e represas de água potável.

Desta forma, pode-se afirmar que a limnologia brasileira, em grande parte, se desenvolveu expressivamente a partir da década de 70 por meio de estudos em reservatórios, com destaque no Estado de São Paulo. Estes estudos foram reunidos em uma obra por Henry

(1999) o qual cita os trabalhos publicados por Arcifa (1972), Rocha (1975), Shimizu (1981) e Tundisi *et al.* (1988). (Pompêo e Carlos, 2004)

3.2- CARACTERIZAÇÃO DO LAGO DESCOBERTO

Nesse item são apresentadas informações sobre a área em estudo, a sua localização geográfica, características naturais e populacionais, as atividades realizadas na área e as formas de utilização dos recursos hídricos na região.

3.2.1- Localização

O Lago Descoberto está inserido em duas unidades da federação. Parte dele encontra-se no estado de Goiás e a outra no Distrito Federal (DF). Sua localização geográfica corresponde a 15,44° de latitude e 54,12° de longitude (Figura 3.1 e apêndice A).



Figura 3.1- Lago do Descoberto GO/DF. Fonte: Google Maps. Disponível em: <http://maps.google.com.br/>. Acesso dia 28 abril de 2008.

O lago faz parte da bacia do rio Descoberto, onde na região norte desta bacia tem-se a Barragem do Descoberto que forma o principal reservatório de abastecimento público de água do DF, fornecendo aproximadamente 65% da água para esta finalidade. As cidades beneficiadas são: Ceilândia, Taguatinga, Gama, Guará, Samambaia, Riacho Fundo, Recanto das Emas, Águas Claras, Santa Maria, Núcleo Bandeirante e Candangolândia (Figuras 3.2a e 3.2b). Este reservatório também reforça o abastecimento das cidades do Plano Piloto, Cruzeiro, Sudoeste e Lago Sul. (CAESB, 2006)

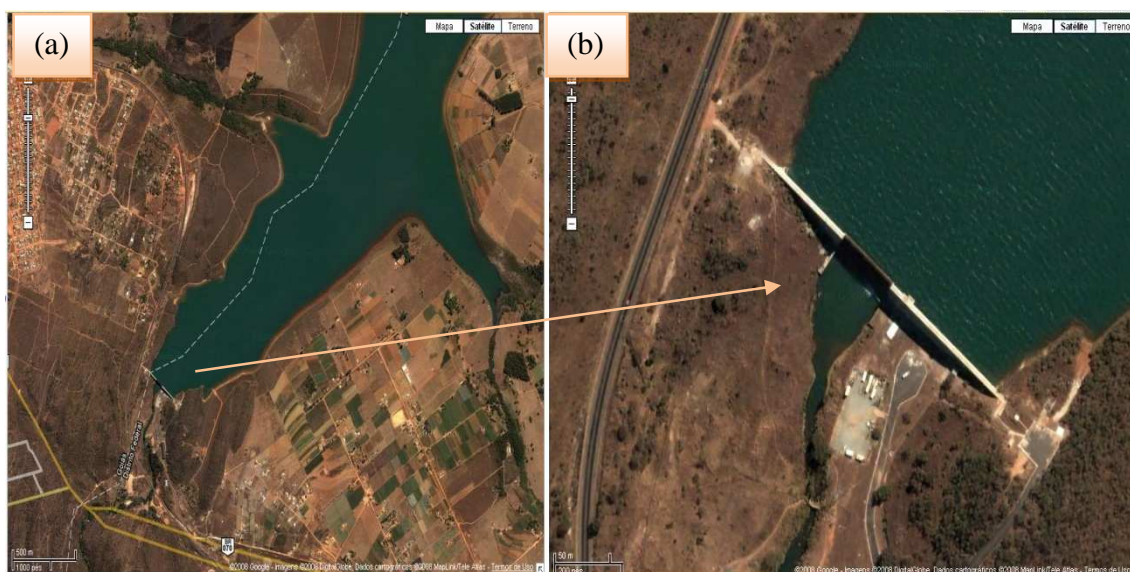


Figura 3.2- Lago do Descoberto – (a)Proximidades da Barragem do Descoberto. (b)Barragem do Descoberto. Fonte: Google Maps. Disponível em: <http://maps.google.com.br/>. Acesso dia 28 abril de 2008.

Os principais usos da água na região além do abastecimento público são: diluição de efluentes de esgoto sanitário, ocupação urbana na bacia, com lançamento de águas pluviais, além de atividades agropecuárias (MMA *et al.* 1998), motivando assim, a escolha deste reservatório como objeto de estudo.

3.2.2- Características gerais do uso do solo e da água

O rio Descoberto estende-se pela divisa do estado de Goiás e DF e deságua no rio Corumbá IV. A Bacia do Descoberto encontra-se na denominada Área de Proteção Ambiental (APA) do Descoberto. Conforme o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), a APA

“... é uma área em geral extensa, com um certo grau de ocupação humana, dotada de atributos abióticos, bióticos, estéticos ou culturais especialmente importantes para a qualidade de vida e o bem-estar das populações humanas, e tem como objetivos básicos proteger a diversidade biológica, disciplinar o processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais.”

(SNUC - Lei 9.985/2000)

O relatório C1-GB-158/69 produzido pela empresa Geotécnica S.A. (CAESB, 2003) descreve as características da paisagem vegetal desta região como sendo constituída principalmente por Cerrado, com árvores tortuosas ou arbustos, entre as quais desenvolvem gramíneas. Ferreira (2003) define o Cerrado como formação tropical composta por vegetações rasteiras, de arbustos e árvores formadas, sobretudo, por gramíneas entre árvores e arbustos espalhados. Caracteriza o solo como ácido e de relevo suave ondulado, cortado por uma ampla malha hídrica.

De acordo com o plano de gestão ambiental realizado pelo Ministério do Meio Ambiente e Instituto Brasileiro do meio Ambiente/IBAMA (1998), a APA do Descoberto é uma região de grande valor ecológico abrigando ecossistemas representativos do bioma cerrado. Acrescenta ainda, que se trata de uma área com importantes nascentes, cujas águas fluem para o lago Descoberto e posteriormente são drenadas para o rio Corumbá, da bacia do Paraná. Tal fato conduz a uma troca constante de espécies terrestres e aquáticas, entre estas bacias. Dessa maneira, alterações nas características da APA do Descoberto, podem afetar diretamente a fauna e flora das áreas a jusante desta.

Outra informação a se destacada é a característica da APA do Descoberto por fazer parte da Reserva da Biofera do Cerrado, ter sido eleita como Unidade de Conservação e Patrimônio Ambiental da Humanidade, conforme a UNESCO em 27 de novembro de 1992. Conseqüentemente, verifica-se mais um fator que induz à busca de ferramentas e estudos que possam auxiliar nos planos de conservação ambiental da região, incluindo assim, o lago Descoberto.

Como descrito em Koide (2006), o solo próximo a nascente do rio Descoberto é utilizado para atividades rurais e também reflorestamento com Pinus e Eucaliptos. Tais atividades não resultam em impactos expressivos no ambiente. Já a montante do lago Descoberto nota-se certa degradação da região, conseqüente de uso intensivo do solo sem as necessárias práticas de conservação, dentre estes usos citam-se loteamentos rurais ligados a agricultura intensiva, suinocultura em escala comercial e criações extensivas de gado bovino.

Tratando-se da fauna encontrada na APA, notam-se espécies endêmicas, isto é, próprias do local e também raras e/ou ameaçadas de extinção. Bem como, há a possibilidade de se encontrar espécies que migram das proximidades como do Parque Nacional de Brasília e a APA do Cafuringa. (MMA *et al.*, 1998; Rocha *et al.*, 1994; Sematec, 1994. Terracap, 1991).

Nesta área existe um importante pólo agrícola de hortifrutigranjeiros. Em 1998 era responsável por 60% da produção no DF e durante esse período as instituições governamentais identificaram um significativo adensamento populacional estimando ainda um potencial de aumento de assentamentos urbanos (MMA *et al.* 1998), neste caso, acreditavam em um crescimento ordenado acompanhado por uma excelente qualidade da água. Mas não aconteceu como esperado. Observando dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2008), o município de Águas lindas de Goiás continha 105.746 habitantes em 2000 e em 2007 já estava com 178.461. Dessa forma, verifica-se que esta região possui uma das maiores taxas de crescimento populacional, incluindo outras cidades próximas como Brazlândia.

Segundo a Companhia de Saneamento do Distrito Federal (CAESB) a Barragem do Descoberto, desde sua construção, perdeu 17% do volume total de água. Uma das causas foi a rápida e desordenada ocupação urbana, que vem depositando grande quantidade de resíduos de material orgânico e terra no fundo da barragem. O Índice de Qualidade da Água (IQA) (Tabela 3.2) vem diminuindo nos últimos anos de acordo com documentos da CAESB.

Tabela 3.2 - Classes de qualidade estabelecidas e seus respectivos intervalos
(CAESB, 2008)

Classes	Intervalos
Excelente (1)	$90 < IQA \leq 100$
Bom (2)	$70 < IQA \leq 90$
Médio (3)	$50 < IQA \leq 70$
Ruim (4)	$25 < IQA \leq 50$
Muito ruim (5)	$00 < IQA \leq 25$

A tabela 3.2 mostra a classificação da água com intervalos de valores que indicam sua qualidade, a partir de uma metodologia específica em que se obtêm valores considerados excelentes de 90 a 100, e muito ruim de 0 a 25. Em 2000, o valor do IQA estimado pela CAESB foi de 81,2, considerado bom. Já em 2006, a mesma Companhia aferiu um valor de 72,2 e em 2007 de 71,8, que foi bastante inferior e continua diminuindo. Constata-se então, com base nesses dados que a água sofreu um impacto negativo significativo, mostrando mais uma vez a importância e necessidade de se estudar os mananciais de abastecimento público do Distrito Federal (DF). (CAESB, 2008)

Uma das conseqüências da redução do IQA de um manancial é o possível aumento na conta que chega ao cidadão, em função do custo de tratamento da água, porque a Companhia terá que utilizar mais processos e reagentes para tornar a água apropriada ao consumo humano, resultando no encarecimento do produto final, a água potável.

A redução do IQA traduz-se como sendo o aumento da poluição do corpo d'água. Os fatores que mais influenciam na poluição são os impactos negativos gerados por atividades antrópicas, como o desmatamento, lançamento de esgotos e substâncias tóxicas em locais desapropriados, entre outras. Citam-se como conseqüências das atividades antrópicas a inserção de coliformes fecais e substâncias tóxicas, o assoreamento, a salinização e a eutrofização, a qual é considerada um dos mais sérios problemas vivenciados em ambientes lacustres ao redor do mundo. Para redução da poluição por essas ações é imprescindível planejamento do manejo da bacia hidrográfica com vistas ao desenvolvimento sustentável.

Nesse sentido, buscam-se instrumentos de gestão para contribuir ao processo de decisão sobre tais atividades antrópicas. Citam-se, entre outros instrumentos, os modelos matemáticos de simulação de qualidade de água, opção bastante procurada para análise de cenários prognósticos da reação provável do corpo hídrico, frente aos impactos sofridos.

3.3- CONSIDERAÇÕES SOBRE QUALIDADE DA ÁGUA

Araújo (2005) coloca que a qualidade da água possui uma dimensão que cumpre uma função de informação, servindo de indicador para o estágio de conservação ou de degradação de um recurso hídrico. Segundo a autora a qualidade da água é resultado das interações dos parâmetros com os fenômenos naturais e as atividades antrópicas. As características da água variam com o seu trajeto (superficial ou subterrâneo), com a sazonalidade (estações seca e chuvosa), com a geologia, e com as ações antrópicas (por exemplo: descarga de poluente), entre outros. Araújo acrescenta que os poluentes podem ser lançados nos corpos d'água de duas formas: pontual ou difusa.

Assim, torna-se necessário realizar análises de certas características da água para se compreender os efeitos que os poluentes operam no recurso hídrico. Von Sperling (1996) classifica a qualidade da água de acordo com os seguintes parâmetros:

1. Parâmetros físicos: São aqueles envolvidos com a percepção (sentidos humanos) do observador e estão relacionados com aspectos estéticos da água. Citam-se: odor, sabor, temperatura e cor.
2. Parâmetros químicos: Geralmente são avaliados por metodologias analíticas, correspondendo à presença de substâncias químicas dissolvidas na água. Como há uma diversidade de substâncias miscíveis em água, o pesquisador deve selecionar os parâmetros químicos recomendados para cada tipo de água, seu respectivo uso e os prováveis contaminantes presentes. Citam-se como exemplos: fósforo, ferro, nitrogênio, pH, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), oxigênio dissolvido (OD), demanda química de oxigênio (DQO), entre outros.
3. Parâmetros biológicos: Correspondem aos microorganismos presentes na água. Nos corpos d'água podem-se encontrar: bactérias, vírus, protozoários, algas, crustáceos, etc. Analisam-se assim, as espécies presentes e a quantidade de organismos para cada espécie. Em relação à potabilidade da água, o resultado das análises de uma água, após tratamento em Estações de Tratamento de água (ETA), deve ser nulo para presença de microorganismos, como: comunidade planctônica, bactérias, coliformes totais, entre outros.

De acordo com o uso que a água de um respectivo corpo hídrico se destina, os padrões de qualidade da água são utilizados para regulamentar e controlar os níveis de qualidade que devem ser obedecidos (Porto, 1991). Desta forma, o monitoramento da qualidade do recurso hídrico conduz a resultados quantitativos e qualitativos sobre os fatores biológicos, físico-químicos, ecológicos, importantes para se manter os padrões exigidos contribuindo entre outras coisas para a prevenção de doenças aos seres humanos e à manutenção de um ambiente ideal para a vida aquática existente (Carvalho *et al.*, 2009).

Em seu trabalho, Araújo (2005) reconhece o oxigênio dissolvido como sendo o mais importante parâmetro a ser analisado, pois está intimamente ligado à vida existente no manancial. O OD é freqüentemente utilizado para gerenciamento dos impactos de lançamento de cargas poluentes nos corpos d'água e é considerado um indicador crucial da ocorrência de processo de eutrofização.

3.4- OXIGÊNIO DISSOLVIDO

Dentro de um corpo d'água pode-se verificar a presença de vários tipos de gases, porém sabe-se que o mais importante deles é o oxigênio (O₂), fonte de vida para o ecossistema aquático, e que é obtido da atmosfera e via fotossíntese, mas que é consumido com a decomposição de matéria orgânica de um lago, isto é, por meio da oxidação de íons metálicos seja de ferro ou de manganês. (Esteves, 1998)

O Oxigênio Dissolvido (OD) na água é essencial para o metabolismo de todos os organismos aquático aeróbicos. As taxas de contribuição de OD da atmosfera, fotossíntese e a distribuição hidro-mecânica do oxigênio, são contrabalançadas pelo consumo dos processos metabólicos e não-metabólicos da biota e das reações químicas não-bióticas. (Wetzel, 2001)

Segundo Esteves (1998), os fatores que favorecem a solubilidade do oxigênio na água são a temperatura e a pressão, o que implica dizer que havendo um aumento na temperatura e uma diminuição da pressão ocorrerá redução da solubilidade do oxigênio na água.

Ao longo de muitos anos cientistas vêm estudando a questão do oxigênio dissolvido, entendido por muitos como um problema, pois o nível de concentração de oxigênio dissolvido tem impactado de forma significativa, provocando a qualidade dos corpos hídricos um desnível no

ecossistema, como morte elevada de peixes, odores desagradáveis e até alteração na cor da água e turbidez, reduzindo de maneira geral a qualidade da água. (Thomann, 1987)

O problema do OD pode ser sintetizado da seguinte forma: “a descarga de resíduos orgânicos e inorgânicos oxidáveis nos corpos d’água, prejudicam a vida de animais e de plantas aquáticas devido à redução da concentração de OD na água”. (Thomann, 1987, p. 262)

Nesse sentido, respostas populacionais podem ser temporárias e transientes. Se, porém, essas mudanças na regulação da distribuição do oxigênio, se prolongar demasiadamente a disponibilidade de nutrientes serão mantidas, a produtividade em todo o lago poderá ser alterada radicalmente. (Wetzel, 2001)

3.4.1- Distribuição e difusão de oxigênio dentro do ecossistema

O processo de saturação de oxigênio é a quantidade máxima de oxigênio que pode ser dissolvido na água em determinada temperatura e pressão. Com esse processo, a solubilidade de oxigênio na água se torna maior e esse fato propicia a difusão deste dentro de um corpo d’água. (Esteves, 1998)

A difusão molecular do oxigênio ocorre principalmente pelo seu transporte no corpo d’água, sendo, no entanto, insignificante. A distribuição padrão do oxigênio é normalmente inversa ao do gás carbônico (Figura 3.3). Tal fato é evidenciado na zona eufótica¹, em um dia de sol, pois para que um corpo d’água sofra fotossíntese ele precisa de um pouco de luz solar, intensificando assim o consumo de gás carbônico e a produção de oxigênio. Já na zona afótica², devido à decomposição da matéria orgânica pela atividade microbiana, há uma elevada produção de gás carbônico e correspondente consumo de oxigênio. Este é um processo que ocorre em lagos rasos ou mais fundos, porém a zona eufótica varia com a turbidez da água. (Esteves, 1998; Wetzel, 2001)

¹ Zona Eufótica: Parte de um corpo d’água que se encontra exposto à luz solar o suficiente para que ocorra a fotossíntese. Fonte: Esteves, 1998.

² Zona Afótica: Camada mais profunda do corpo d’água onde a luz do sol não consegue penetrar. Local em que as algas encontram-se ausentes. Fonte: Esteves, 1998.

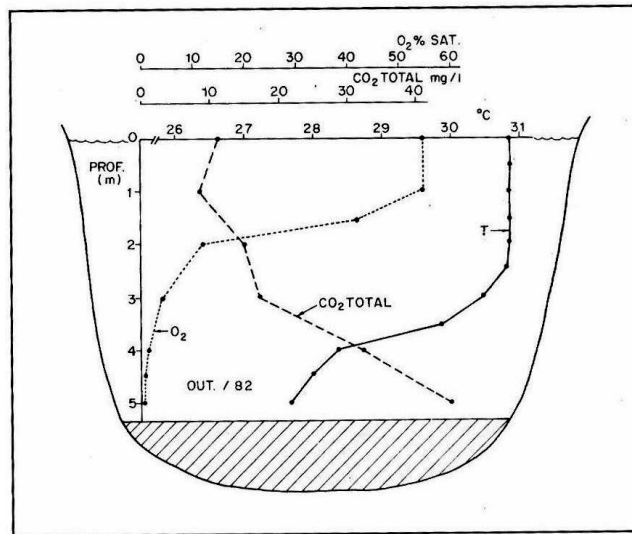


Figura 3.3- Distribuição vertical de oxigênio e CO₂ total no lago Curuçá (lago de várzea do Rio Trombetas, Pará). Fonte: Esteves, 1998.

Na maior parte dos lagos ocorre estratificação térmica e química, ou seja, gases e substâncias orgânicas e inorgânicas podem trazer uma distribuição não homogênea na coluna d'água. Em geral, a estratificação química é induzida pela estratificação térmica, comum em regiões temperadas. Já em lagos de regiões tropicais verifica-se a estratificação química, que não está ligada diretamente à estratificação térmica. Um exemplo deste fenômeno é visto de maneira mais nítida em represas construídas em áreas com densas coberturas florestais, não sendo o caso do Lago Descoberto em estudo.

3.4.2- Dinâmica do oxigênio em lago tropical

De acordo com a regra de Van T'Hoff, cientista que recebeu o primeiro Prêmio Nobel de Química (Chagas, 2001): a alta temperatura em ambientes lacustres interfere diretamente na vida dos organismos e demais processos oxidativos, ou seja, “a elevação da temperatura em 10°C pode duplicar ou triplicar a velocidade das reações”. (Esteves, 1998)

Nesse sentido, utilizando tal regra, Ruttner (1931) visualizou que seria impossível o uso vertical do oxigênio, uma vez que a temperatura do hipolímnio³ de lagos tropicais é 20°C mais

³ Hipolímnio: Segundo Esteves (1998), lagos estratificados possuem, geralmente, divididas em três camadas: a superior chamada epilímnio, com temperatura uniforme em média de 20°C; a imediatamente abaixo é denominada de metalímnio; e por fim a última, e mais profunda camada é o hipolímnio, mais fria e mais densa.

elevada do que a de lagos temperados, isto implica dizer que “a decomposição de material orgânico nos lagos tropicais é 4 a 9 vezes mais rápida do que em lagos temperados, conduzindo, portanto a um consumo de oxigênio de quatro a nove vezes maior nos lagos tropicais”. (Ruttner, 1931, *apud* Esteves, 1998)

Em regiões temperadas, a temperatura no hipolímnio de lagos é muito baixa e desfavorável às reações químicas, como a decomposição da matéria orgânica que se torna muito lenta e boa parte desta não é decomposta sendo acumulada no sedimento. Entretanto, nas regiões tropicais, onde a temperatura no hipolímnio é elevada, observam-se altas taxas de decomposição da matéria orgânica, processo no qual se liberam CO₂ e energia na forma de calor para o ambiente aquático. (Esteves, 1998)

Dessa forma, o perfil vertical de oxigênio em lagos tropicais é influenciado, especialmente, pela alta temperatura e pelas características morfométricas do lago. As características em questão favorecem ou dificultam a atividade do vento que atua significativamente na distribuição do oxigênio, elevando sua concentração (de forma acentuada nas camadas superiores), contribuindo também para a distribuição no interior do ecossistema. Ademais, estes fenômenos convergem para “fortes déficits de oxigênio na coluna d’água, principalmente em suas camadas inferiores”. (Esteves, 1998, p. 153; Filho, 2006)

Esteves cita com base em pesquisas feitas em lagos do Brasil, que a magnitude dos déficits de OD na coluna d’água é originada indiretamente por dois fatores em especial: “a extensão do período de estratificação térmica e a concentração de matéria orgânica (dissolvida e particulada) da água”.

3.4.2.1- Extensão do período de estratificação térmica

Trata-se de um fator aplicado a todos os lagos, com destaque aos mais profundos, onde a variação do nível da água é baixa, e atua de forma importante na determinação do déficit de oxigênio, especialmente no hipolímnio. (Esteves, 1998)

Segundo Naval *et al.* (2002) o período de estratificação térmica possui uma distribuição que caracteriza-se pela existência de diferentes camadas como expostas abaixo:

- **Epilimnion:** referente à camada superior, distinguida por uma temperatura uniforme e quente.
- **Hipolimnion:** relativa à camada inferior, com uma característica mais fria e densa.
- **Metalimnion:** esta camada localiza-se entre o epilimnion e o hipolimnion. É dita como uma camada de transição entre a superfície e o fundo do lago, onde se encontra uma grande descontinuidade de temperatura, o qual é chamado de termoclina.

Com a desestratificação da coluna d'água, a mistura do epilimnion e o hipolimnion levam a um aumento na concentração de oxigênio em toda a massa d'água. Posteriormente, o lago restabelece a estratificação térmica causando variações bruscas nas concentrações de OD nas referidas camadas.

Esteves (1998) afirma que é por meio da fotossíntese ou pela difusão na atmosfera que, no epilimnion, as perdas do oxigênio são compensadas pela sua própria produção. Em geral, este fenômeno ocorre em regiões de lagos tropicais, onde constantemente é detectado déficit de oxigênio. Já no hipolimnion, devido às altas temperaturas, perde-se bastante oxigênio, mas este é processado rapidamente na mesma proporção.

A partir de tal afirmação vê-se que quando é iniciada uma fase de estratificação, as maiores perdas de oxigênio são vistas em torno dos processos de decomposição aeróbia e de respiração dos organismos. Nessa situação, quando a concentração de oxigênio atinge níveis baixos, passam a ser mais importantes os fenômenos anaeróbios, que produzem uma quantidade de compostos redutores bastante significativos, e que para sua oxidação consomem muito oxigênio. (Esteves, 1998)

No caso de lagos tropicais mais profundos, cerca de 20 m, que não sofrem muito com o vento, permanecem estratificados durante a maior parte do ano, vindo a desestratificar-se apenas no inverno por aproximadamente uns dois meses. Na fase de estratificação térmica, em épocas de inverno, o oxigênio não chega ao hipolimnion, a não ser quando fortes rajadas de vento injetam certa quantidade de oxigênio para esta camada inferior. Tal fenômeno é resultado das chamadas “ondas internas” (conhecido como efeito de “seiches” internos),

que dependendo do nível passa pelo metalímnio podendo chegar até o hipolímnio. (Esteves, 1998)

3.4.2.2- Concentração de matéria orgânica

Grande parte dos lagos no Brasil, lagos rasos e polimínicos, possuem o grau de desoxigenação da água ligado diretamente à concentração de matéria orgânica e a altas temperaturas, consideradas, de fato, superiores ao efeito da permanência do período de estratificação térmica. (Esteves, 1998)

Ainda nesse contexto, a dinâmica do oxigênio em lagos rasos é notada pela influência da concentração de matéria orgânica. Tal fato ocorre periodicamente durante as épocas de chuva e de forma esporádica pela ocorrência de fortes ventos e/ou chuvas frias, fortes e duradouras.

Para melhor entendimento faz-se necessário explicar a composição da matéria orgânica, ou seja, ela é constituída por inúmeros compostos, dentre eles: carboidratos, proteínas, lípidios, compostos húmicos, etc., em variados níveis de decomposição.

Fontes consideráveis de matéria orgânica durante o período de cheia são: o solo presente nas margens do lago, e também os brejos ao redor do mesmo, onde as comunidades de macrófitas⁴ emersas, dos tipos Typha, gramíneas entre outras, consomem grande parte do OD para decomposição microbiana. Neste período, há uma contribuição para a redução da concentração de oxigênio, que se dá pela baixa taxa de fotossíntese dos fitoplânctons.

Ainda no período das cheias, notam-se conseqüências desfavoráveis como a baixa concentração de oxigênio na coluna d'água, criando alterações na fauna bentônica⁵, zooplanctônica e algas. Também sofrem implicações os ciclos biogeoquímicos como o do fósforo e nitrogênio.

⁴ Macrófitas: Plantas aquáticas. Fonte: Gomes, 2007.

⁵ Fauna bentônica: fauna pertencente à camada bentônica do corpo d'água.

O outro período existente, o qual merece destaque, trata-se da estação da estiagem, em que nos lagos rasos, normalmente, encontram-se maiores concentrações de oxigênio na coluna d'água, embora possa ocorrer baixas concentrações do mesmo nas suas camadas inferiores. Como resultado da elevação da concentração de OD no epilímnio, a taxa fotossintética do fitoplâncton eleva-se e a concentração de matéria orgânica reduz-se, tendo sido esta última, na sua maior parte, já sedimentada e/ou precipitada ou mesmo decomposta.

Ocasionalmente, a estratificação térmica do lago pode ser desfeita pela ação de fortes ventos, levando a altas taxas de déficits de oxigênio em toda a coluna d'água. Isto ocorre uma vez que a água do hipolímnio enriquece a água epilimínica com substâncias e materiais redutores, como matéria orgânica em “diferentes níveis de decomposição, amônio, gás sulfídrico e metano que, ao se oxidarem”, utilizam quase que, por completo, o OD da coluna d'água. Tal fato ocorre, com mais frequência, na região amazônica em épocas do inverno, dando uma característica anaeróbica à coluna d'água durante algumas horas ou dias. (Junk et al. 1983, *apud* Esteves, 1998)

A distribuição do oxigênio na água afeta enormemente a solubilidade de muitos nutrientes inorgânicos. As mudanças na disponibilidade de nutrientes são governadas por alterações do ambiente aeróbico para anaeróbico em regiões lacustres. Tais mudanças resultam num rápido crescimento de vários organismos capazes de angariar vantagens e aproveitar-se desse processo. (Wetzel, 2001)

3.5- EUTROFIZAÇÃO

O processo de eutrofização ocorre principalmente em lagos e represas, por eles apresentarem características favoráveis para o crescimento de algas e outras plantas, como turbidez e velocidades baixas, mas também pode ocorrer em rios, embora com menor frequência. (Von Sperling, 1996a)

A eutrofização pode ser um processo natural ou artificial. O processo natural dá-se principalmente pela contribuição de nutrientes levados pelas águas superficiais que erodem e lavam a superfície dos centros rurais e/ou urbanos. A eutrofização natural caracteriza a idade do lago. (Esteves, 1988). Tem-se como exemplo o lago chamado oligotrófico que é

comumente um manancial jovem contendo poucos nutrientes. À medida que o vento, erosão e chuvas atuam, o lago vai se tornando mesotrófico. Como possui mais nutrientes em suas águas, aumenta a biomassa de plantas e animais, decorrente do metabolismo. Lançando mais nutrientes o lago passa-se à fase eutrófica, característica de lagos mais antigos. (Henderson-sellers e Markland, 1987, *apud* Silva, 2006, p. 4).

O processo artificial de eutrofização é um processo dinâmico e está ligado freqüentemente ao aumento populacional, à industrialização, ao uso de fertilizantes químicos na agricultura e à presença de produtos de limpeza. Essas fontes de nutrientes, como fósforo (P) e nitrogênio (N), estimulam a eutrofização e em determinadas condições podem ser fatores limitantes na produção primária nos ecossistemas aquáticos. (Esteves, 1988)

A ocupação de uma bacia pela agricultura acarreta a retirada de sua flora natural, podendo conduzir ao processo de deterioração dos corpos d'água daquela bacia. O plantio e sua coleta para consumo humano extraem os nutrientes do solo gradativamente. Como os nutrientes não são repostos naturalmente os agricultores adicionam artificialmente os fertilizantes. Esses produtos possuem altos teores dos nutrientes N e P, e os agricultores, visando uma produção elevada, adicionam grandes quantidades que são freqüentemente superiores à capacidade de assimilação desses vegetais (Von Sperling, 1996) utilizando também técnicas agrícolas de baixa eficiência.

O grande problema para a qualidade de água no processo de eutrofização tem sua origem no aumento quantitativo do fitoplâncton, incluindo o número de espécies. Em seguida, ocorre uma diminuição no número de espécies e um aumento no número de fitoplânctons de uma mesma espécie, aumentando proporcionalmente o consumo de oxigênio dissolvido (OD). (Von Sperling, 1996)

O crescimento descontrolado do fitoplâncton causa alterações na turbidez da água, reduzindo sua transparência, limitando dessa forma a penetração da luz nas camadas inferiores e a produção primária (Silva, 2006). A produção primária é fundamental, pois é nela que o ser vivo - por exemplo, cianobactérias, plantas e algas - produz seu próprio alimento pela fixação de dióxido de carbono CO₂, mediante fotossíntese ou quimiossíntese e liberando oxigênio O₂.

Alterações nos níveis de OD ao longo da coluna de água podem conduzir a um processo de semi-anaerobiose no hipolímnio, ocasionando grande mortandade de peixes (por asfixia) e a liberação de gases como o ácido sulfídrico (H₂S), que é fétido e tóxico, e o metano (CH₄). Conjuntamente, alterações nos níveis de CO₂ influenciam o valor do pH da água. (Silva, 2006)

Especificamente sobre as florações das algas e bactérias, é interessante citar que algumas espécies, como as algas cianofícias, liberam substâncias tóxicas. Essas substâncias, chamadas de cianotoxinas, possuem propriedades tóxicas que podem afetar a saúde de muitos animais, até mesmo do homem. As florações de cianobactérias tóxicas afetam os mananciais para os usos mais nobres como abastecimento público, dessedentação animal, recreação de contato primário e irrigação de hortaliças. (Henderson-sellers e Markland, 1987; Esteves, 1988).

Diversos parâmetros são avaliados para se classificar o estado trófico de um lago. Citando as principais tem-se: radiação solar incidente na superfície e ao longo da coluna de água; geometria do lago (profundidade, volume, área superficial e do fundo); dados hidrodinâmicos (velocidade, fluxo e dispersão); temperatura; concentração de nutrientes (fósforo, nitrogênio e sílica); e fitoplâncton. (Thomann e Mueller, 1987)

De acordo com Toledo et al. (1990) um dos parâmetros avaliados é o fósforo total presente no lago, como mostrada na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Valores de fósforo e seus respectivos estados tróficos associados

(Fonte: Toledo et al., 1990, apud Silva, 2006, p. 4)

Critério	Fósforo Total (mg/L)	Estado Trófico
IET* ≤ 44	<0,028	Oligotrófico
44 < IET ≤ 54	0,028 - <0,055	Mesotrófico
54 < IET ≤ 74	0,055 – 0,129	Eutrófico
IET > 74	>0,129	Hipereutrófico

*IET = Índice de Eutrofização

Algumas conseqüências indesejáveis da eutrofização de mananciais citadas por Von Sperling (1996) são:

1. Problemas com a estética do corpo d'água, para abastecimento e lazer;
2. Anaerobiose no fundo do lago ou como um todo;
3. Mortandade de peixes;
4. Aumento de custos e dificuldade no tratamento da água;
5. Toxicidade das algas transmitida à água;
6. Desaparecimento gradual do corpo d'água como um todo, entre outras.

3.6- NUTRIENTE LIMITANTE

O componente essencial para uma dada população aquática, que limita seu crescimento, é chamado de nutriente limitante, e os principais são o fósforo e o nitrogênio. Segundo Salas e Martino (1991), os lagos tropicais da América Latina são predominantemente limitados por fósforo. As atenções são assim voltadas para o controle da carga de fósforo que entra em um corpo hídrico, pois, mesmo que se controle a quantidade de nitrogênio que é inserida, existem algas que são capazes de fixar o nitrogênio atmosférico, não reduzindo assim a carga afluyente de nitrogênio no corpo hídrico em questão.

Thomann e Mueller (1987) expõem sobre os critérios adotados para se estimar se o crescimento de algas em um lago é limitado pelo fósforo ou nitrogênio, por meio da análise da relação entre as concentrações de nitrogênio e fósforo (N/P):

1. Para grandes lagos, predominando fontes não pontuais: $N/P \gg 10$: o nutriente limitante será o fósforo;
2. Para pequenos lagos, predominando fontes pontuais: $N/P \ll 10$: o nutriente limitante será o nitrogênio.

Tanto o fósforo como o nitrogênio estão presentes nos esgotos, nas fezes e urina, nos resíduos de alimentos, nos detergentes entre outros. A drenagem urbana, comparando-se com lançamentos de esgotos, não contribue significativamente para o aumento das cargas de P e N nos corpos d'água. (Von Sperling, 1996)

3.6.1- Fósforo

O fósforo é dito como um nutriente essencial para os organismos, pois intervêm em funções vitais para os seres vivos participando dos processos fundamentais do metabolismo dos seres vivos como, por exemplo: na síntese da membrana celular (fosfolipídios); no ácido desoxirribonucléico (ADN) e ácido ribonucléico (ARN); no transporte e armazenamento de energia na forma de fosfato de adenosina (ATP); ou como íon tampão, impedindo que o protoplasma se torne ácido ou básico.

As possíveis fontes de fósforo são, algumas vezes, rochas, águas de drenagem pluvial de áreas, agrícolas, urbanas e com matas e florestas; esgoto urbano e rural. (Von Sperlling, 1996) A Figura 3.2 apresenta o Ciclo do Fósforo nos corpos d'água:

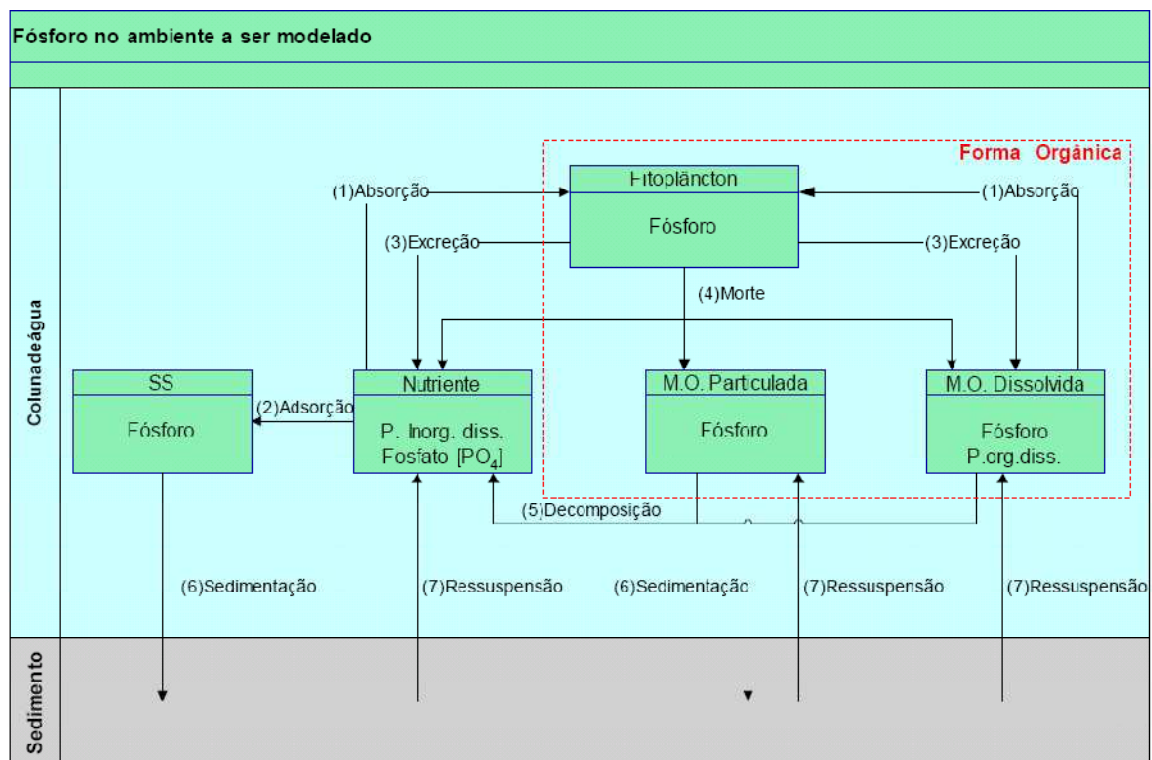


Figura 3.4- Ciclo do Fósforo em Corpos Hídricos . Fonte: SILVA, 2006.

Em que,

SS – sólidos suspensos;

M.O. – Matéria Orgânica;

P – Fósforo

De acordo com Silva (2006), o fósforo (P) pode ser encontrado nos mananciais na forma de:

- Fósforo inorgânico dissolvido (ortofosfato ou fósforo reativo dissolvido): representado por $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} e PO_4^{3-} , podendo estar sob essas diferentes espécies iônicas em função do pH do meio;
- Fósforo inorgânico particulado: presente em minerais e complexados a materiais sólidos, como por exemplo, em rochas e podendo ser encontrados nos sedimentos de fundo e em lodos, precipitados e/ou incorporados à matéria orgânica (Apha, 1995)
- Fósforo inorgânico não particulado: fosfatos condensados (“não-isolados”), como por exemplo: nos detergentes.
- Fósforo orgânico particulado: disponível na cadeia orgânica, presente nos seres vivos e detritos orgânicos;
- Fósforo orgânico não particulado: disponível em compostos orgânicos dissolvidos ou em colóides de compostos orgânicos que contenham fósforo, a partir da decomposição do fósforo orgânico particulado;

Normalmente mede-se o Fósforo Total (P) ou Fósforo na forma de Fosfato (P- PO_4) nas soluções analisadas. (Silva, 2006)

O fósforo inorgânico dissolvido ou ortofosfato é encontrado no solo e mananciais principalmente pela aplicação de fertilizantes em lavouras, alcançando assim os mananciais próximos, ao serem carregados sob o solo pelas chuvas. O fosfato orgânico origina-se a partir de processos biológicos ou de ortofosfatos. As cargas de fósforo ocorrem devido a lançamento de esgotos sanitários nos corpos hídricos, devido à presença de material orgânico e detergente (Apha, 1995).

3.6.2- Nitrogênio

De acordo com Rocha *et al.* (2004) o nitrogênio é um macroelemento de extrema importância para a vida, pois trata-se de um dos principais componentes dos aminoácidos formadores das proteínas. Esse elemento é um dos mais abundantes na Terra, com a sua maior parte agregada a rochas ou na forma de nitrogênio molecular (N_2), entretanto, somente está disponível às plantas 0,02% desse total.

O nitrogênio pode ser encontrado nas seguintes formas: (Martins e Porto, 2005)

- Nitrogênio livre: N_2
- Amônia:
 - Íon NH_4^+
 - NH_3
- Nitrito: NO_2^-
- Nitrato: NO_3^-
- Nitrogênio orgânico
- Nitrogênio Kjeldahl: amônia + nitrogênio orgânico

Comumente medido como nitrogênio total (N), como nitrito ou nitrato (N-NOx), ou pelo método de Kjeldahl (técnica analítica).

Rocha et al. (2004) informam que o N_2 é considerado uma substância inerte, não podendo ser utilizada nos processos químicos dos seres vivos, com exceção de algumas bactérias e algas que fixam o N_2 atmosférico. O nitrogênio reativo é aquele que se encontra ligado a hidrogênio (H), carbono (C) ou oxigênio (O).

Rocha et al. (2004) acrescentam que o ciclo do nitrogênio, (Figura 3.3), tem sido alterado por atividades antrópicas pela introdução de grande quantidade de nitrogênio reativo, como por exemplo, na agricultura. Na agricultura os principais componentes dos adubos (NPK) utilizados contêm nitrogênio, fósforo e potássio. Os autores citam que a produção de nitrogênio para uso como fertilizante é de aproximadamente 80 Tg/ano, a amônia (NH_3) lançada naturalmente pelos continentes terrestres é na ordem de 8 Tg/ano, e pelos oceanos de 15 Tg/ano.

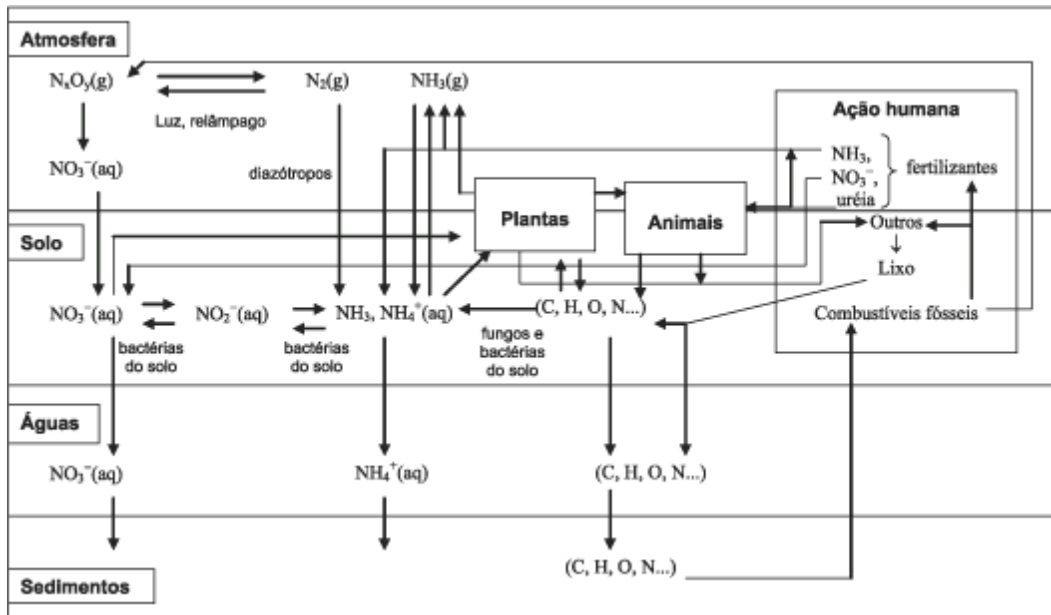


Figura 3.5 - Parte do Ciclo do Nitrogênio destacando-se as atividades agrícolas. (C,H,O,N) corresponde à matéria orgânica. Fonte: Chagas (2007)

3.7- MODELAGEM DA QUALIDADE DE ÁGUA

3.7.1- Evolução dos Modelos

A avaliação dos recursos hídricos do ponto de vista qualitativo possui um elemento fundamental que trata essencialmente do conhecimento das cargas poluentes geradas nas bacias hidrográficas, e que revelam as pressões que se exercem sobre as massas de água em decorrência das diferentes atividades socioeconômicas que agem no território. As ditas pressões determinam o estado da qualidade das massas de água, e o possível impacto que esse estado pode causar na saúde pública ou nos ecossistemas. (Pádua, 2006)

Modelos matemáticos de simulação de qualidade de água são bastante procurados por possibilitar a análise do recurso hídrico perante cenários prognósticos e alternativos. As equações que governam esses modelos de qualidade de água são a equação do balanço e da conservação da massa, resultando numa equação diferencial parcial. Descreve-se, por exemplo, a hidrodinâmica de um rio pelas equações da continuidade e da quantidade de movimento, também conhecida como equação de Navier-Stokes ou Reynolds. Os modelos

de simulação de qualidade de água utilizam equações de advecção e dispersão/difusão turbulenta para calcular o transporte de substâncias dissolvidas na água. (Silva, 2006)

O modelo matemático precursor foi o modelo de Streeter & Phelps (1925), o qual considera o transporte advectivo e os ganhos e as perdas de oxigênio em função da reaeração e da decomposição da matéria orgânica carbonácea. Modelos posteriores incorporaram os ciclos do nitrogênio e fósforo. Tratando-se das variáveis bióticas e abióticas do ecossistema aquático e seus processos físicos, químicos e biológicos envolvidos, os modelos podem trabalhar com processos de respiração de algas, interação entre sedimento-água, ressuspensão, dados meteorológicos, interações entre as cadeias alimentares, reações cinéticas não lineares, contribuições por cargas difusas, e assim por diante. Devido aos avanços tecnológicos, os modelos utilizam um maior número de constituintes de qualidade de água, com módulos hidrodinâmicos capazes de realizar simulações multidimensionais, incluindo o transporte físico (advecção e difusão/dispersão). (Silva, 2006)

3.7.2- Modelos de Qualidade de Água

De acordo com Silva (2006) os modelos matemáticos de qualidade de água têm evoluído em função do desenvolvimento dos métodos numéricos e computacionais, do aparecimento de novos problemas ambientais, e da inclusão de novos processos físicos, químicos e biológicos do meio aquático.

Estes modelos podem ser classificados em estocásticos ou determinísticos, unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais. Os determinísticos geram uma única resposta, para uma determinada situação, e são recomendados para estudos de mecanismos de causa-efeito ligados às observações de dados de campo. Já os modelos estocásticos, também chamados de probabilísticos, dependerão de uma distribuição de probabilidade para as respostas aceitáveis. Como os modelos possuem vantagens e desvantagens entre si, o pesquisador deve escolher o mais adequado para sua pesquisa de forma a atender aos objetivos e as características do corpo hídrico simulado. (Jorgensen, 1988; Thomann e Mueller, 1987; Chapra, 1997).

Observa-se na literatura a existência de programas para modelagem determinística de qualidade de água como: CE-QUAL-W2, RMA-11, QUAL2K, DELFT3D, DYRESM-WQ, MIKE11, WASP5, CAEDYM, entre outros. Estes modelos variam na representação espacial, no método numérico para resolução das equações diferenciais, nos processos considerados para descrever as variáveis de estado, bem como na formulação das mesmas, entre outros fatores. (Silva, 2006)

A Tabela 3.2 mostra uma comparação entre alguns programas para modelagem de qualidade de água em relação a alguns parâmetros como: dimensão, temperatura, OD entre outros.

Tabela 3.2 - Comparação entre os Modelos de Qualidade de Água
(Silva, 2006)

Parâmetros	HEC	CE-QUAL-W2	DELFT3D	CAEDYM	DYRESM-WQ	MIKE 11	RMA-11	QUAL2K	WASP5
dimensões	1D	2D	1D/2D/3D	1D/2D/3D	1D	1D	1D/2D/ 3D	1D	1D
temperatura	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
OD	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
DBO	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
nitrogênio	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
fósforo	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
fitoplâncton	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
SS - coesivos	Não	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Não
SS - não coesivos	Não	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Não

NOTA: DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; SS – Sólidos Suspensos.

3.7.2.1- Modelo CE-QUAL-W2 versão 3.6

Como já foi dito, a literatura é repleta de modelos de simulação de qualidade da água, com um grande número de características e variáveis passíveis de simulação, para simular a qualidade da água de lagos e reservatórios. O modelo utilizado nesta pesquisa é o CE-QUAL-W2 versão 3.6. Trata-se de um modelo bi-dimensional, longitudinal/vertical, para análise da hidrodinâmica e da qualidade da água. Foi elaborado pelo US Army Engineering and Research Development Center, Vicksburg, MS, EUA.

O CE-QUAL-W2, desde a versão 3.2, permite a simulação de um sistema com qualquer número de corpos d'água que contenham qualquer número de ramificações. Esse modelo tem sido extensivamente usado como uma ferramenta de gestão e de pesquisa, com mais de 400 aplicações a diversos sistemas hídricos. (Cole & Wells, 2002).

O modelo tem sido aplicado a estuários, rios ou porções de corpos d'água, bastando especificar quais as condições hidrodinâmicas predominantes. Corpos d'água complexos com vários tramos ou reservatórios dendríticos também podem ser simulados. A espessura das camadas na linha vertical e o comprimento dos segmentos, para acomodar entradas de formadores, podem ser variados. (Cole & Wells, 2002).

O modelo não só permite a simulação integrada de sistemas com várias massas de água interligadas como também admite a simulação de diferentes estruturas hidráulicas, como descarregadores de superfície, descarregadores de fundo, tomadas de água, descargas pontuais e circuitos hidráulicos equipados com bombas e turbinas (Cole & Wells, 2002).

Pode-se empregar múltiplas entradas de cargas de contaminantes como, por exemplo, fontes não pontuais, cargas de formadores, cargas devido à precipitação atmosférica e cargas variáveis devido à limpeza de reservatórios por técnicas ecológicas de manejo. (Prates, 2000)

O modelo citado possibilita a simulação da concentração de até 21 constituintes além da temperatura. Alguns dos parâmetros são: sólidos orgânicos em suspensão, coliformes, sólidos dissolvidos totais, DBO carbonácea, pH, alcalinidade, CO₂, ferro, OD, amônia, nitrato, fósforo, cloretos, algas e matéria orgânica dissolvida (Cole & Wells, 2002).

A capacidade de um modelo matemático apresentar, com maior ou menor rigor, a variação de qualidade numa massa de água é necessariamente dependente dos dados disponíveis para o sistema estudado. (Silva, 2006)

O software CE-QUAL-W2 foi utilizado por Soares (1999) em simulações de barragens no Brasil, como por exemplo, a Usina Hidrelétrica Funil - UHE Funil, pertencente ao complexo FURNAS, na bacia do rio Paraíba do Sul, nos municípios de Perdões e Lavras, Minas Gerais. Esse trabalho teve o objetivo de avaliar os impactos ambientais na bacia hidrográfica provocados por obras de grande porte, podendo prever, com considerável precisão, as influências que as atividades antrópicas poderiam causar às variáveis de qualidade de água do corpo hídrico.

Os dois componentes principais do modelo CE-QUAL-W2 incluem a hidrodinâmica e a cinética da qualidade de água. Os componentes são acoplados, isto é, a saída (resposta) hidrodinâmica é usada para simular a qualidade de água na etapa. Isso o torna muito eficiente ao se executar a simulação. A componente hidrodinâmica do modelo prevê elevações da superfície das águas, velocidades e temperatura. O modelo utiliza o esquema numérico ULTIMATE - QUICKEST para o cálculo da dispersão - advecção. O ULTIMATE - QUICKEST é um esquema de diferenças finitas de terceira ordem. Este método reduz a difusão numérica no sentido vertical. (Steg, 2007)

O modelo necessita da seguinte preparação de dados para realizar as simulações (Cole & Wells, 2002):

1. Dados da geometria e topobatimetria;
2. Condições Iniciais;
3. Condições de Contorno;
4. Parâmetros Hidráulicos;
5. Parâmetros Cinéticos;
6. Dados para Calibração.

Na Figura 3.6 é mostrada a interface visual do modelo CE-QUAL-W2. Estudos iniciais da pesquisa foram realizados utilizando-se a versão 3.5 do programa. Trabalhando-se posteriormente com as versões 3.6 alfa e 3.6.

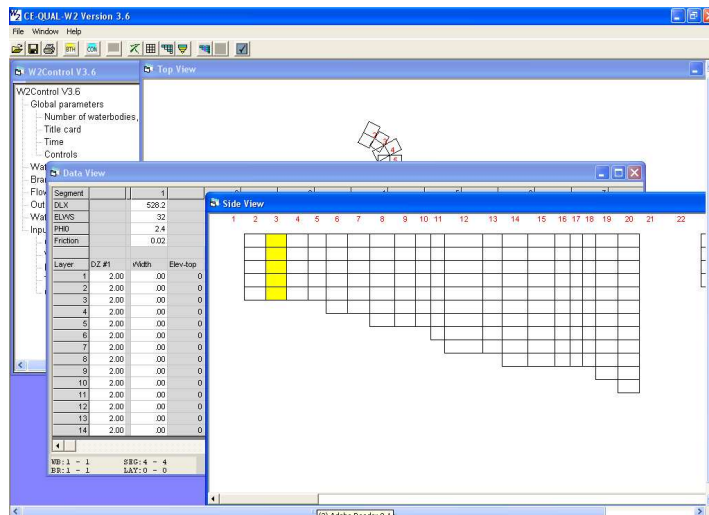


Figura 3.6 - Interface visual do programa CE-QUAL-W2 versão 3.6 .

Na Figura 3.7 é mostrada a interface do CE-QUAL-W2 e a pasta de controle dos dados de entrada e saída.

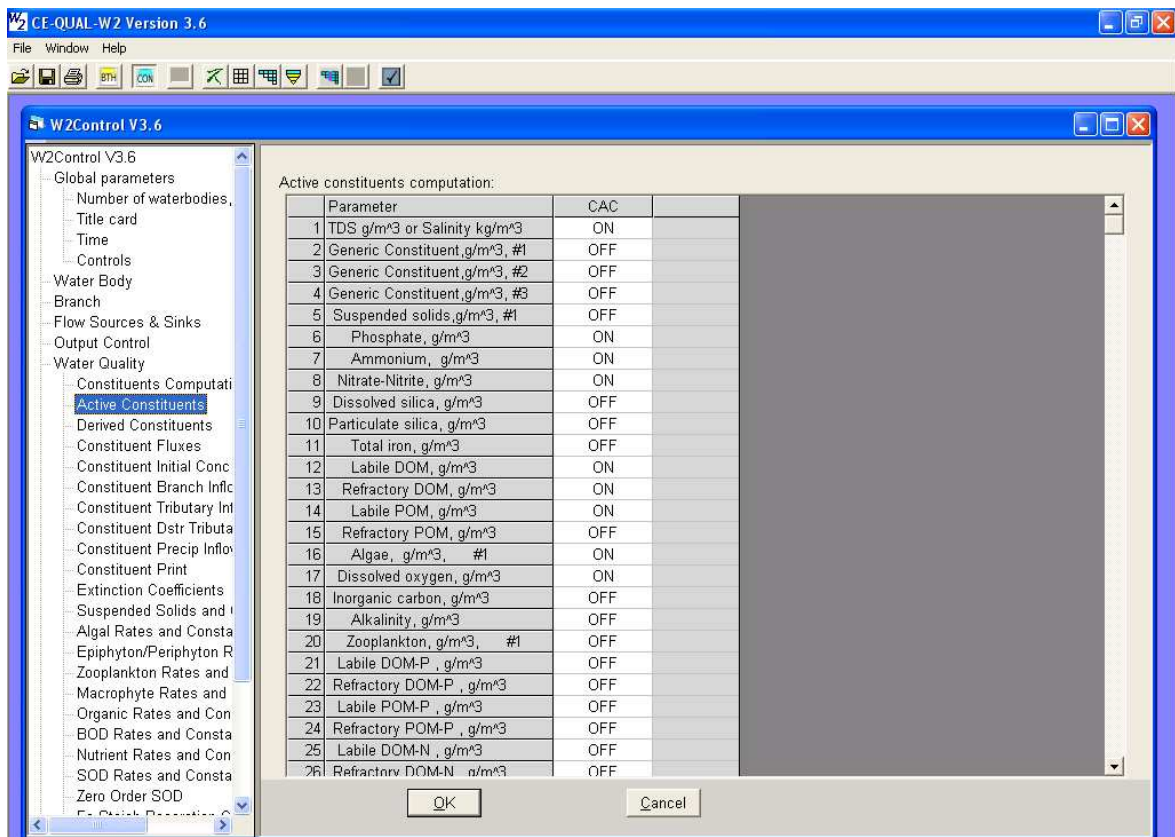


Figura 3.7 - Interface visual do arquivo de controle de dados do programa CE-QUAL-W2 versão 3.6.

Na figura 3.8 é mostrada a interface visual de um exemplo de simulação disponível nos arquivos do modelo. A versão 3.6, comparando-se com a versão 3.5, tem um tempo de processamento otimizado. Isso facilita a realização das simulações, bem como reduz custos computacionais. (Cole, T.M. and S.A. Wells, 2002)

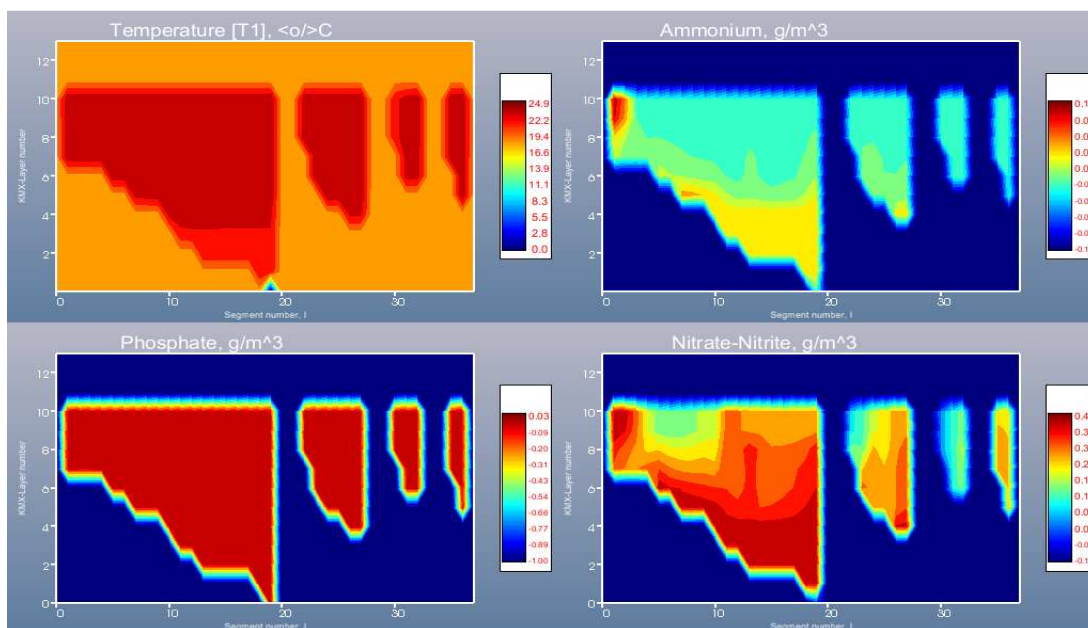
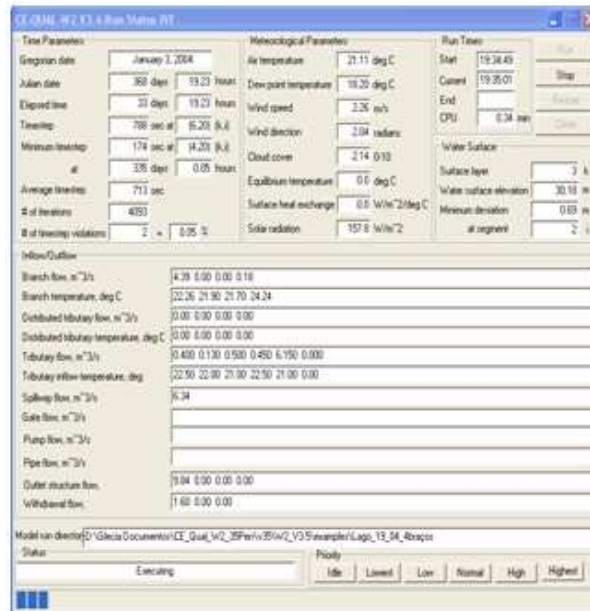


Figura 3.8 - Exemplo de simulação do modelo CE-QUAL-W2 versão 3.6.

3.7.3- Modelos Matemáticos – Equações Governantes

O modelo matemático faz uso das equações descritas a seguir que estudam as grandezas físicas do fluido no decorrer do tempo, em um determinado volume de controle. Assume-se que o estudo é feito para o escoamento de fluido incompressível, isto é, que a variação da densidade do fluido será desprezível. (Cole & Wells, 2002)

Cole & Wells (2002) relatam que o programa CE-QUAL-W2 utiliza equações de média lateral para o movimento de fluido derivadas de equações tridimensionais. As equações governantes após simplificações, redefinindo o sistema de coordenadas, eliminando o efeito de Coriolis, e desprezando a tensão de cisalhamento viscoso, tornam-se:

- Equação da conservação de massa

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

Onde:

u= velocidade na direção x

v=velocidade na direção y

w=velocidade na direção z

- Equação da quantidade de movimento em x

$$\underbrace{\frac{\partial \bar{u}}{\partial t}}_{\text{Aceleração Transiente}} + \underbrace{u \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}}_{\text{Aceleração Convectiva}} = \underbrace{g \sin \alpha}_{\text{Gravidade}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}}_{\text{Pressão Transiente}} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right)}_{\text{Tensor-de-cisalhamento turbulento}} \quad (3.2)$$

Onde,

g= aceleração gravitacional $\rightarrow 9,8 \text{ m/s}^2$.

p=pressão

τ_{xx} = tensor de cisalhamento turbulento na direção x com face em x no volume de controle

τ_{xy} = tensor de cisalhamento turbulento na direção x com face em y no volume de controle

τ_{xz} = tensor de cisalhamento turbulento na direção x com face em z no volume de controle

α =corresponde ao ângulo de declividade do canal

- Equação da quantidade de movimento em y

(3.3)

$$\underbrace{\frac{\partial \bar{v}}{\partial t}}_{\text{Aceleração Transiente}} + \underbrace{u \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{v}}{\partial z}}_{\text{Aceleração Convectiva}} = - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y}}_{\text{Pressão Transiente}} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right)}_{\text{Tensor de cisalhamento turbulento}}$$

Onde,

τ_{yx} = tensor de cisalhamento turbulento na direção y com face em x no volume de controle

τ_{yy} = tensor de cisalhamento turbulento na direção y com face em y no volume de controle

τ_{yz} = tensor de cisalhamento turbulento na direção y com face em z no volume de controle

- Equação da quantidade de movimento em z

(3.4)

$$\underbrace{\frac{\partial \bar{w}}{\partial t}}_{\text{Aceleração Transiente}} + \underbrace{u \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{w}}{\partial z}}_{\text{Aceleração Convectiva}} = \underbrace{g \cos \alpha}_{\text{Gravidade}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z}}_{\text{Pressão Transiente}} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right)}_{\text{Tensor de cisalhamento turbulento}}$$

Onde,

τ_{zx} = tensor de cisalhamento turbulento na direção z com face em x no volume de controle

τ_{zy} = tensor de cisalhamento turbulento na direção z com face em y no volume de controle

τ_{zz} = tensor de cisalhamento turbulento na direção z com face em z no volume de controle

Como a escala do comprimento longitudinal é muito maior do que a escala do comprimento vertical, assume-se velocidades verticais \ll velocidades horizontais. Um resultado deste pressuposto é que as velocidades verticais são muito pequenas, tais que a equação de quantidade de movimento em z torna-se a equação hidrostática:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} = g \cos \alpha \quad (3.5)$$

3.7.3.1- Médias Laterais

i) Equação da conservação de massa

Utilizando-se a equação da conservação de massa descrita abaixo:

$$\frac{\partial (\bar{u} + u'')}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v} + v'')}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{w} + w'')}{\partial x} = 0 \quad (3.6)$$

(3.6)

A média lateral da variável é por definição igual a zero:

É verificado que a média da flutuação é nula. Assim sendo,

$$\overline{u''} = \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} u'' dy = 0 \quad (3.7)$$

No qual, B corresponde a largura no volume de controle, utilizado neste estudo em metros.

Veja que:

$$\begin{aligned} \overline{\frac{\partial(\overline{v} + v'')}{\partial y}} &= \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial(\overline{v} + v'')}{\partial y} dy \\ &= \frac{(\overline{v} + v'')}{B} \Big|_{y_1}^{y_2} \\ &= \frac{v''}{B} \Big|_{y_1}^{y_2} \\ &= q \end{aligned} \quad (3.8)$$

Onde “q” é definido como vazão de entrada lateral líquida por unidade de volume da célula [T⁻¹], e:

$$\begin{aligned} \overline{\frac{\partial(\overline{u} + u'')}{\partial x}} &= \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial(\overline{u} + u'')}{\partial x} dy \\ &= \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} dy + \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial u''}{\partial x} dy \\ &= \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \int_{y_1}^{y_2} \overline{u} dy \\ &= \frac{1}{B} \frac{\partial B \overline{u}}{\partial x} \end{aligned} \quad (3.9)$$

E também,

$$\begin{aligned}
\frac{\overline{\partial(\overline{w} + w'')}}{\partial z} &= \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial(\overline{w} + w'')}{\partial z} dy \\
&= \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial \overline{w}}{\partial z} dy + \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial w''}{\partial z} dy \\
&= \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial z} \int_{y_1}^{y_2} \overline{w} dy \\
&= \frac{1}{B} \frac{\partial B \overline{w}}{\partial z}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Combinando termos, a equação da continuidade torna-se:

$$\frac{\partial B \overline{u}}{\partial x} + \frac{\partial B \overline{w}}{\partial z} = qB \tag{3.11}$$

ii) Equação da quantidade de movimento

A média lateral da equação da quantidade de movimento é expressa de maneira mais fácil se escrita na forma conservativa (esta pode ser verificada usando a equação de conservação de massa com a equação da quantidade de movimento em x)

$$\begin{aligned}
\frac{\overline{\partial(\overline{u} + u'')}}{\partial t} + \frac{\overline{\partial(\overline{u} + u'')(\overline{u} + u'')}}{\partial x} + \frac{\overline{\partial(\overline{v} + v'')(\overline{u} + u'')}}{\partial y} + \frac{\overline{\partial(\overline{w} + w'')(\overline{u} + u'')}}{\partial z} \\
= \overline{g \sin \alpha} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\overline{p} + p'')}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right)
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Cada termo desta equação pode ser simplificado, pois a média espacial de qualquer variável dupla tende a zero por definição. Assim, o termo da aceleração transiente torna-se:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \overline{\overline{(\bar{u} + u'')}}}{\partial t} &= \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial \overline{\overline{(\bar{u} + u'')}}}{\partial t} dy \\
 &= \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} dy + \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial u''}{\partial t} dy \\
 &= \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial t} \int_{y_1}^{y_2} \bar{u} dy + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial t} \int_{y_1}^{y_2} u'' dy \\
 &= \frac{1}{B} \frac{\partial B \bar{u}}{\partial t}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Termos da aceleração convectiva:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \overline{\overline{(\bar{u} + u'')(\bar{u} + u'')}}}{\partial x} &= \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial \overline{\overline{(\bar{u} + u'')(\bar{u} + u'')}}}{\partial x} dy \\
 &= \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial \bar{u}\bar{u}}{\partial x} dy + \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial 2\bar{u}u''}{\partial x} dy + \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial u''u'}{\partial x} dy \\
 &= \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \int_{y_1}^{y_2} \bar{u}\bar{u} dy + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \int_{y_1}^{y_2} u''u' dy \\
 &= \frac{1}{B} \frac{\partial B \bar{u}\bar{u}}{\partial x} + \underbrace{\frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \int_{y_1}^{y_2} u''u' dy}_{\text{Termo de Dispersão}}
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Similarmente para os outros dois termos:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \overline{\overline{(\bar{u} + u'')(\bar{w} + w'')}}}{\partial z} &= \frac{1}{B} \frac{\partial B \bar{u}\bar{w}}{\partial z} + \underbrace{\frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial z} \int_{y_1}^{y_2} u''w'' dy}_{\text{Termo de Dispersão}} \\
 \frac{\partial \overline{\overline{(\bar{u} + u'')(\bar{v} + v'')}}}{\partial y} &= u''v'|_{y_2} - u''v''|_{y_1} = 0
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Termo de gravidade:

$$\overline{\overline{g \sin \alpha}} = \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} g \sin \alpha dy = \frac{1}{B} (g \sin \alpha) \int_{y_1}^{y_2} dy = g \sin \alpha \quad (3.16)$$

Termo de pressão gradiente:

$$\begin{aligned} \overline{\overline{\frac{\partial (\bar{p} + p'')}{\partial x}}} &= \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial (\bar{p} + p'')}{\partial x} dy \\ &= \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} dy + \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial p''}{\partial x} dy \\ &= \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \int_{y_1}^{y_2} \bar{p} dy + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \int_{y_1}^{y_2} p'' dy \\ &= \frac{1}{B} \frac{\partial B \bar{p}}{\partial x} \end{aligned} \quad (3.17)$$

ou a equação acima pode ser escrita, supondo que a derivada do gradiente de pressão média lateral na direção de x não é uma função de y:

$$\begin{aligned} \overline{\overline{\frac{\partial (\bar{p} + p'')}{\partial x}}} &= \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial (\bar{p} + p'')}{\partial x} dy \\ &= \frac{1}{B} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} B + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \int_{y_1}^{y_2} p'' dy \\ &= \frac{1}{B} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} B + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \int_{y_1}^{y_2} p'' dy \\ &= \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \end{aligned} \quad (3.18)$$

iii) “Shear Stresses” – Tensão De Cisalhamento

$$\begin{aligned} \overline{\overline{\left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right)}} &= \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dy + \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy + \frac{1}{B} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} dy \\ &= \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \int_{y_1}^{y_2} \tau_{xx} dy + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \int_{y_1}^{y_2} \tau_{xy} dy + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \int_{y_1}^{y_2} \tau_{xz} dy \\ &= \frac{1}{B} \left(\frac{\partial B \overline{\tau_{xx}}}{\partial x} + \frac{\partial B \overline{\tau_{xy}}}{\partial y} + \frac{\partial B \overline{\tau_{xz}}}{\partial z} \right) = \frac{1}{B} \left(\frac{\partial B \overline{\tau_{xx}}}{\partial x} + \frac{\partial B \overline{\tau_{xz}}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Coletando todos os termos e desprezando todos os termos de dispersão, a equação final da quantidade de movimento será:

$$\frac{\partial \overline{Bu}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{Bu\overline{u}}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{Bu\overline{w}}}{\partial z} = Bg \sin \alpha - \frac{B}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} + \left(\frac{\partial B\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial B\tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (3.20)$$

3.7.3.2- Sumário das equações de médias laterais

No desenvolvimento do CE-QUAL-W2 em Cole e Buchak (1995), os termos médios laterais foram representados por caracteres maiúsculos, tais como $\overline{u} = U$, $\overline{w} = W$, e $\overline{p} = P$. Os termos de tensão de cisalhamento serão assumidos como médias laterais e os termos médios (barras duplas) serão deixados por conveniência. Fazendo essas simplificações as equações governantes se tornarão:

Equação de conservação de massa:

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB \quad (3.21)$$

Equação da quantidade de movimento em x:

$$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = gB \sin \alpha - \frac{B}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B\tau_{xz}}{\partial z} \quad (3.22)$$

Equação da quantidade de movimento em z:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = g \cos \alpha \quad (3.23)$$

Existindo agora, três equações e três incógnitas - U, W, e P.

3.7.3.3- Simplificação do termo de pressão

A equação da quantidade de movimento em z reduz-se a:

$$P = P_a + g \cos \alpha \int_{\eta}^z \rho dz \quad (3.24)$$

após a integração da profundidade z da superfície da água definido como $z = \eta$. A variável P_a é a pressão atmosférica na superfície da água, conforme mostra a figura abaixo:

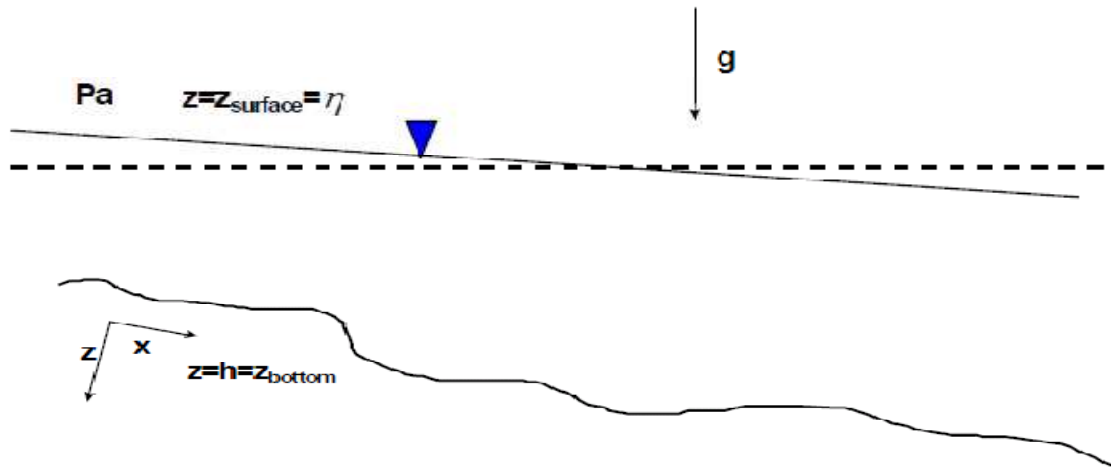


Figura 3.9- Esquematização para a simplificação do termo de pressão. Fonte: Cole & Wells, 2008.

Esta equação de pressão é atualmente substituída pela equação da quantidade de movimento em x , e simplificada usando a regra de Leibnitz. O termo gradiente de pressão na equação da quantidade de movimento em x torna-se:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} + g \cos \alpha \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g \cos \alpha}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (3.25)$$

O primeiro termo do RHS é o da pressão atmosférica (acelerações devido às mudanças na pressão atmosférica sobre a superfície da água), o outro se refere ao termo de pressão barotrópico (acelerações devido às variações da superfície das águas), e por fim, o terceiro é o termo de pressão baroclínico (devido às acelerações na densidade, impulsionando correntes).

No CE-QUAL-W2, o termo de pressão atmosférica é assumido como zero, então é desprezado. Nesse sentido, por longos períodos tempestuosos nos sistemas, o modelo não será capaz de atender às acelerações por causa de mudanças atmosféricas. Em um contexto de grande domínio físico, variações meteorológicas forçadas podem ser significativas. O termo de pressão torna-se então:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = g \cos \alpha \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g \cos \alpha}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad (3.26)$$

A então forma revisada da equação da quantidade de movimento em x é:

$$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = gB \sin \alpha + g \cos \alpha B \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g \cos \alpha B}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (3.27)$$

$$+ \frac{1}{\rho} \frac{\partial B\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B\tau_{xz}}{\partial z}$$

De fato, a pressão foi removida das incógnitas pela combinação das equações da quantidade de movimentos em z e x, mas η foi acrescentado como fator desconhecido.

3.7.3.4- Superfície de água livre

Esta equação é uma simplificação da equação da conservação de massa, também denominada como de continuidade. A conservação de massa integrada desta equação sobre a profundidade a partir da superfície da água para a parte inferior é chamada de equação de superfície de água livre. Conforme as figuras 3.8 e 3.9, que são esboços da definição para a grade computacional sem e com um canal de declividade, respectivamente:

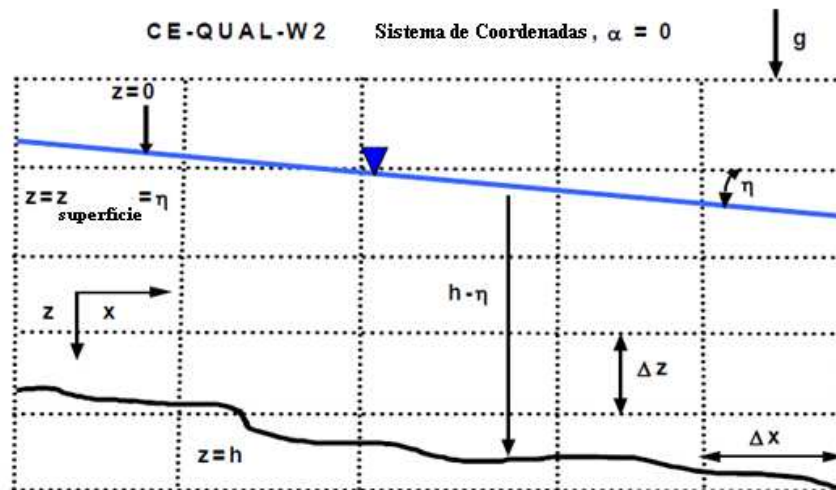


Figura 3.10- Sistema de coordenadas, sem declive no canal.
Fonte: Cole & Wells, 2008, modificado.

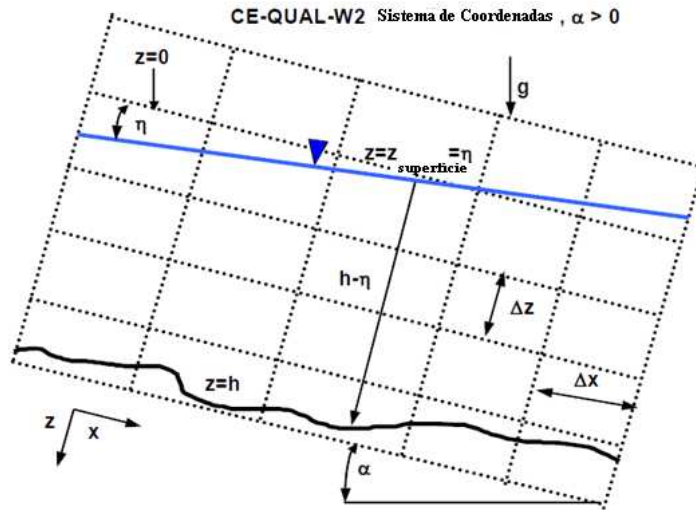


Figura 3.11- Sistema de coordenadas, com declive no canal.
 Fonte: Cole & Wells, 2008, modificado.

A equação da continuidade é integrada ao longo da profundidade, e expressa do seguinte modo:

$$\int_{\eta}^h \frac{\partial UB}{\partial x} dz + \int_{\eta}^h \frac{\partial WB}{\partial z} dz = \int_{\eta}^h qB dz \quad (3.28)$$

O primeiro termo pode ser ampliado conforme explica a regra de Leibnitz:

$$\int_{\eta}^h \frac{\partial UB}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h UB dz - \frac{\partial h}{\partial x} UB \Big|_h + \frac{\partial \eta}{\partial x} UB \Big|_{\eta} \quad (3.29)$$

A integrante vertical ao longo de z descreve as mudanças na superfície da água como é apresentada a elevação abaixo:

$$\int_{\eta}^h \frac{\partial WB}{\partial z} dz = WB \Big|_h - WB \Big|_{\eta} \quad (3.30)$$

Onde,

$$\begin{aligned} W_h &= \frac{\partial h}{\partial t} + U_h \frac{\partial h}{\partial x} \\ W_{\eta} &= \frac{\partial \eta}{\partial t} + U_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \end{aligned} \quad (3.31)$$

Combinando todos estes termos juntos, a equação é a superfície livre:

$$\int_{\eta}^h qBdz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h UBdz - \frac{\partial h}{\partial x} UB|_h + \frac{\partial \eta}{\partial x} UB|_{\eta} + U_h B_h \frac{\partial h}{\partial x} - B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} - B_{\eta} U_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (3.32)$$

Cancelando alguns termos e não aplicando deslize nas extremidades, superará a condição de limite que é zero:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h UBdz - B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \int_{\eta}^h qBdz \quad (3.33)$$

Onde B_{η} é a largura da superfície.

$$B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h UBdz - \int_{\eta}^h qBdz \quad (3.34)$$

3.7.3.5- Equação De Estado

Para a solução das equações da quantidade de movimento, a densidade deve ser bem conhecida. A equação de estado relaciona a temperatura, densidade e concentração de substâncias dissolvidas. Esta equação é dada por:

$$\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{ISS}) \quad (3.35)$$

Onde, $f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{ISS})$ é uma função de densidade que depende da temperatura, dos sólidos totais dissolvidos ou salinidade, e ainda dos sólidos suspensos e inorgânicos.

A Tabela 3.3 apresenta as equações comentadas acima, utilizadas pelo CE-QUAL-W2:

Tabela 3.3- Equações governantes com e sem declive no canal.
(Cole & Wells, 2002)

Equação	Equação governante assumindo a não existência de declividade no canal e sem conservação do momento nas intersecções da ramificação.	Equação governante assumindo uma declividade arbitraria no canal e conservação do momento nas intersecções da ramificação.
Equação da quantidade de movimento em x	$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} =$ $gB \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gB}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz +$ $\frac{1}{\rho} \frac{\partial B\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B\tau_{xz}}{\partial z}$	$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = gB \sin \alpha$ $g \cos \alpha B \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g \cos \alpha B}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz +$ $\frac{1}{\rho} \frac{\partial B\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B\tau_{xz}}{\partial z} + qBU_x$
Equação da quantidade de movimento em z	$0 = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}$	$0 = g \cos \alpha - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}$
Equação da Conservação de massa ou Continuidade	$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB$	$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB$
Estado ou Complementar	$\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{SS})$	$\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{SS})$
Superfície Livre	$B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_n^h UB dz - \int_{\eta}^h qB dz$	$B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_n^h UB dz - \int_{\eta}^h qB dz$
<p>U = velocidade horizontal, ms^{-1} W = velocidade vertical, ms^{-1} B = largura do canal P = pressão τ_x = média lateral da tensão de cisalhamento na direção x τ_y = média lateral da tensão de cisalhamento na direção y ρ = densidade η = superfície da água</p>		

3.7.3.6- Comportamento da Concentração do Fósforo

O modelo considera em seus cálculos o ortofosfato (figura 3.10) como sendo a forma mais importante de fósforo disponível e assimilado para o crescimento da vegetação fitoplânctônica, e considera a concentração de ferro na coluna d'água pela sua influência no processo de sedimentação do fósforo. (Cole e Wells, 2000; Silva, 2006) Dessa forma, o software inclui em suas avaliações:

- Taxa de adsorção do fósforo ao sedimento;
- Taxa de sedimentação;
- Concentração de sólidos inorgânicos em suspensão;
- Taxa de liberação devido a atividades anaeróbicas no sedimento.

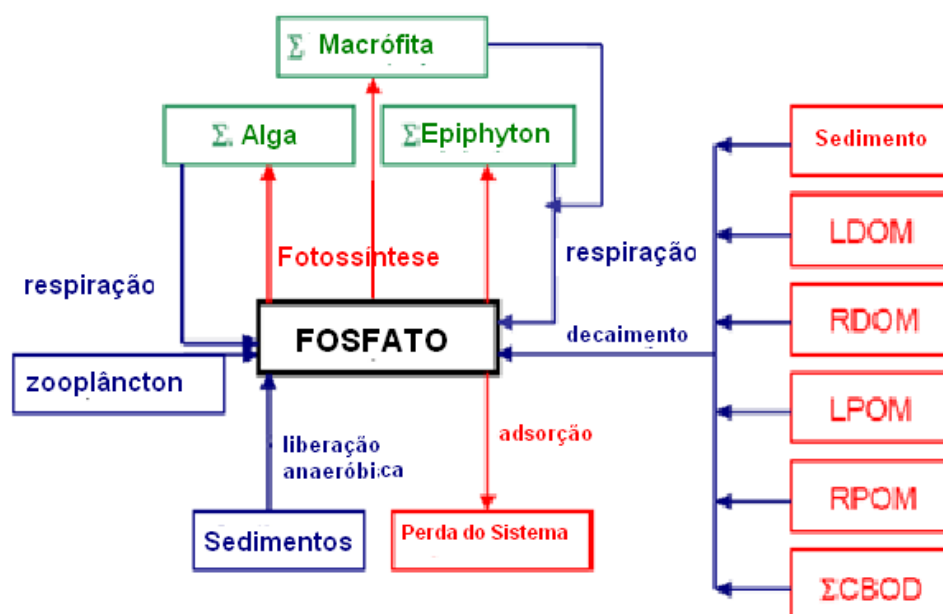


Figura 3.12 - Fluxo interno de fósforo do modelo CE-QUAL-W2. Fonte: Cole & Wells, 2002.

Observa-se abaixo, a equação da taxa de fósforo utilizada pelo modelo:

$$\begin{aligned}
S_p = & \underbrace{\sum (K_{ar} - K_{ag}) \delta_{pa} \Phi_a}_{\text{crescimento líquido algal}} + \underbrace{\sum (K_{er} - K_{eg}) \delta_{pe} \Phi_e}_{\text{crescimento líquido epiphyton}} + \underbrace{K_{LDOM} \delta_{POM} \gamma_{OM} \Phi_{LDOM}}_{\text{decaimento DOM lábil}} \\
& + \underbrace{K_{RDOM} \delta_{POM} \gamma_{OM} \Phi_{RDOM}}_{\text{decaimento DOM refratário}} + \underbrace{K_{LPOM} \delta_{POM} \gamma_{OM} \Phi_{LPOM}}_{\text{decaimento POM lábil}} + \underbrace{K_{RPOM} \delta_{POM} \gamma_{OM} \Phi_{RPOM}}_{\text{decaimento POM refratário}} \\
& + \underbrace{\sum K_{CBOD} R_{CBOD} \delta_{P-CBOD} \Theta^{T-20} \Phi_{CBOD}}_{\text{decaimento CBOD}} + \underbrace{K_{sed} \delta_{POM} \gamma_{OM} \Phi_{sed}}_{\text{liberação de sedimento de 1ª ordem}} + \underbrace{SOD \gamma_{OM} \frac{A_{sed}}{V}}_{\text{liberação de sedimento de ordem zero}} \\
& + \underbrace{\left(\sum \bar{\omega}_{ISS} \Phi_{ISS} + \bar{\omega}_{FE} \Phi_{FE} \right) P_p}_{\Delta z} \Phi_p + \underbrace{\left(\sum (K_m (1 - f_{psed}) - K_m) \delta_{pm} \Phi_{macro} \right)}_{\text{crescimento líquido de macrófitas}} + \underbrace{\sum K_{zr} \delta_{Pz} \Phi_{zoo}}_{\text{respiração zooplantônica}}
\end{aligned} \tag{3.36}$$

Onde,

Δz = espessura da célula modelo, m

A_{sed} = área superficial do sedimento, m²

V = volume da célula, m³

P_p = coeficiente de adsorção, m³g⁻¹

f_{psed} = fração de fósforo de macrófitas recebida pelos sedimentos

δ_{pe} = coeficiente estequiométrico de epiphyton para fósforo

δ_{pa} = coeficiente estequiométrico algal para fósforo

δ_{pm} = coeficiente estequiométrico de macrófita

δ_{Pz} = coeficiente estequiométrico zooplantônico para fósforo

δ_{Pa} = coeficiente estequiométrico de macrófita

K_{mr} = taxa de respiração de macrófita, s⁻¹

K_{zr} = taxa de respiração de zooplâncton, s⁻¹

K_{LDOM} = taxa de decaimento de DOM lábil, s⁻¹

K_{RDOM} = taxa de decaimento de DOM refratário, s⁻¹

K_{LPOM} = taxa de decaimento de POM lábil, s⁻¹

K_{RPOM} = taxa de decaimento de POM refratário, s⁻¹

K_{CBOD} = taxa de decaimento de CBOD, s⁻¹

K_{sed} = taxa de decaimento de sedimento, s⁻¹

SOD = taxa de liberação de sedimento anaeróbica, $g.m^{-2}.s^{-1}$

Φ_p = concentração de fósforo, $g.m^{-3}$

Φ_{Fe} = concentração total de ferro, $g.m^{-3}$

Φ_{ISS} = concentração de sólidos inorgânicos suspensos, $g.m^{-3}$

Φ_a = concentração algal, $g.m^{-3}$

Φ_e = concentração de epiphyton, $g.m^{-3}$

Φ_{LDOM} = concentração de DOM lábil, $g.m^{-3}$

Φ_{LPOM} = concentração de POM lábil, $g.m^{-3}$

Φ_{RDOM} = concentração de DOM refratário, $g.m^{-3}$

Φ_{RPOM} = concentração de POM refratário, $g.m^{-3}$

Φ_{CBOD} = concentração de CBOD, $g.m^{-3}$

Φ_{sed} = concentração de sedimento orgânico, $g.m^{-3}$

Φ_{macro} = concentração de macrófitas, $g.m^{-3}$

Φ_{ZOO} = concentração de zooplâncton, $g.m^{-3}$

3.7.3.7- Comportamento da Concentração do Nitrogênio

O N-amoniaco é analisado da seguinte maneira, Figura 3.11:

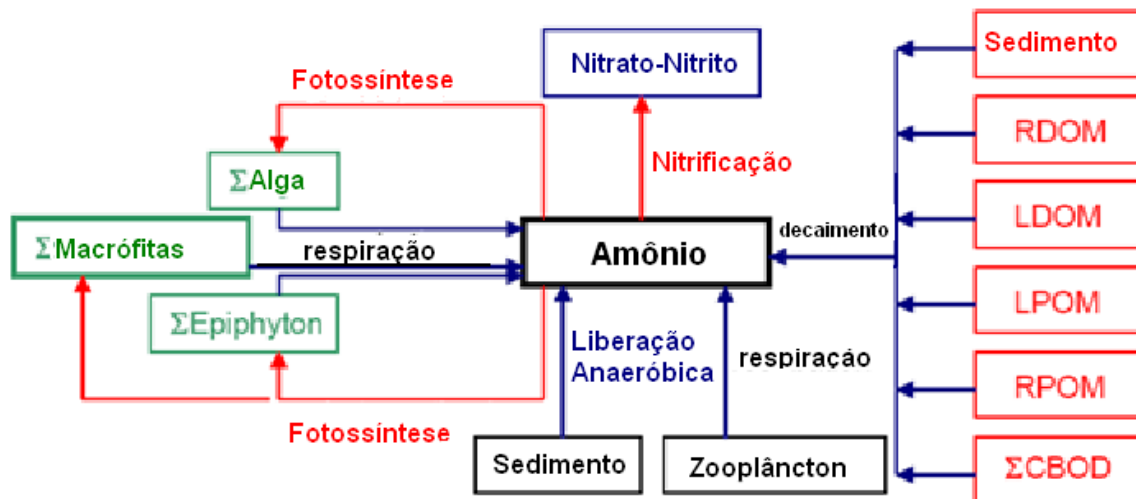


Figura 3.13 - Fluxo interno de amônio. Fonte: Cole & Wells, 2002.

A taxa de amônio é calculada com:

$$\begin{aligned}
S_{NH_4} = & \underbrace{\sum K_{ar} \delta_{Na} \Phi_s}_{\text{respiração algal}} - \underbrace{\sum K_{ag} \delta_{Na} \Phi_a P_{NH_4}}_{\text{crescimento algal}} + \underbrace{\sum K_{er} \delta_{Ne} \Phi_e}_{\text{respiração epiphyton}} - \underbrace{\sum K_{eg} \delta_{Ne} \Phi_{NH_4} P_{NH_4}}_{\text{crescimento epiphyton}} \\
& + \underbrace{\sum K_{LDOM} \delta_{NOM} \gamma_{OM} \Phi_{LDOM}}_{\text{decaimento DOM lábil}} + \underbrace{K_{RDOM} \delta_{NOM} \gamma_{OM} \Phi_{RDOM}}_{\text{decaimento DOM refratário}} + \underbrace{K_{LPOM} \delta_{NOM} \gamma_{OM} \Phi_{LPOM}}_{\text{decaimento POM lábil}} \\
& + \underbrace{K_{RPOM} \delta_{NOM} \gamma_{OM} \Phi_{RPOM}}_{\text{decaimento POM refratário}} + \underbrace{K_s \delta_{NOM} \gamma_{OM} \Phi_s}_{\text{liberação de sedimento de 1ª ordem}} + \underbrace{SOD_{NH_4} \gamma_{OM} \frac{A_{sed}}{V}}_{\text{liberação de sedimento de ordem zero}} \quad (3.37) \\
& + \underbrace{\sum K_{CBOD} R_{CBOD} \delta_{N-CBOD} \Theta^{T-20} \Phi_{CBOD}}_{\text{decaimento CBOD}} + \underbrace{K_{NO_x} \gamma_{NO_x} \Phi_{NO_x}}_{\text{desnitrificação}} - \underbrace{K_{NH_4} \gamma_{NH_4} \Phi_{NH_4}}_{\text{nitrificação}} \\
& + \underbrace{\left(\sum (K_{mr} - (1 - f_{nsed}) K_{mg}) \delta_{Nm} \Phi_{macro} \right)}_{\text{crescimento líquido de macrófitas}} + \underbrace{\sum K_{zr} \delta_{Nz} \Phi_{zoo}}_{\text{respiração zooplancônica}}
\end{aligned}$$

Onde,

A_{sed} = área do sedimento, m²

V = volume da célula, m³

f_{nsed} = fração de absorção de nitrogênio de macrófitas recebida pelos sedimentos

δ_{Ne} = coeficiente estequiométrico de epiphyton para nitrogênio

δ_{Na} = coeficiente estequiométrico algal para nitrogênio

δ_{Nm} = coeficiente estequiométrico de macrófita para nitrogênio

δ_{Nz} = coeficiente estequiométrico zooplancônico para nitrogênio

δ_{NOM} = coeficiente estequiométrico de matéria orgânica para nitrogênio

γ_{NH_4} = taxa multiplicadora de temperatura para nitrificação

γ_{NO_x} = taxa multiplicadora de temperatura para desnitrificação

γ_{OM} = taxa multiplicadora de temperatura para decaimento de matéria orgânica

Θ = taxa multiplicadora de temperatura para decaimento de CBOD

R_{CBOD} = taxa de CBOD-5 para CBOD-último

P_{NH_4} = fator preferencial de amônio

K_{NO_x} = taxa de decaimento de nitrato-nitrogênio, s^{-1}
 K_{NH_4} = taxa de decaimento de amônio, s^{-1}
 K_{ar} = taxa de respiração algal com ausência de luminosidade, s^{-1}
 K_{ag} = taxa de crescimento algal, s^{-1}
 K_{mg} = taxa de crescimento de macrófita, s^{-1}
 K_{mr} = taxa de respiração de macrófita, s^{-1}
 K_{zr} = taxa de respiração de zooplâncton, s^{-1}
 K_{LDOM} = taxa de decaimento de DOM lábil, s^{-1}
 K_{RDOM} = taxa de decaimento de DOM refratário, s^{-1}
 K_{LPOM} = taxa de decaimento de POM lábil, s^{-1}
 K_{RPOM} = taxa de decaimento de POM refratário, s^{-1}
 K_{CBOD} = taxa de decaimento de CBOD, s^{-1}
 K_{sed} = taxa de decaimento de sedimento, s^{-1}
 SOD_{NH_4} = taxa de liberação de amônio do sedimento, $g.m^{-2}.s^{-1}$
 Φ_{ISS} = concentração de sólidos inorgânicos suspensos, $g.m^{-3}$
 Φ_a = concentração algal, $g.m^{-3}$
 Φ_e = concentração de epiphyton, $g.m^{-3}$
 Φ_{LDOM} = concentração de DOM lábil, $g.m^{-3}$
 Φ_{LPOM} = concentração de POM lábil, $g.m^{-3}$
 Φ_{RDOM} = concentração de DOM refratário, $g.m^{-3}$
 Φ_{RPOM} = concentração de POM refratário, $g.m^{-3}$
 Φ_{CBOD} = concentração de CBOD, $g.m^{-3}$
 Φ_{sed} = concentração de sedimento orgânico, $g.m^{-3}$
 Φ_{macro} = concentração de macrófitas, $g.m^{-3}$
 Φ_{ZOO} = concentração de zooplâncton, $g.m^{-3}$

Já o Nitrito e Nitrato são analisados de acordo com o esquema abaixo, Figura 3.12:

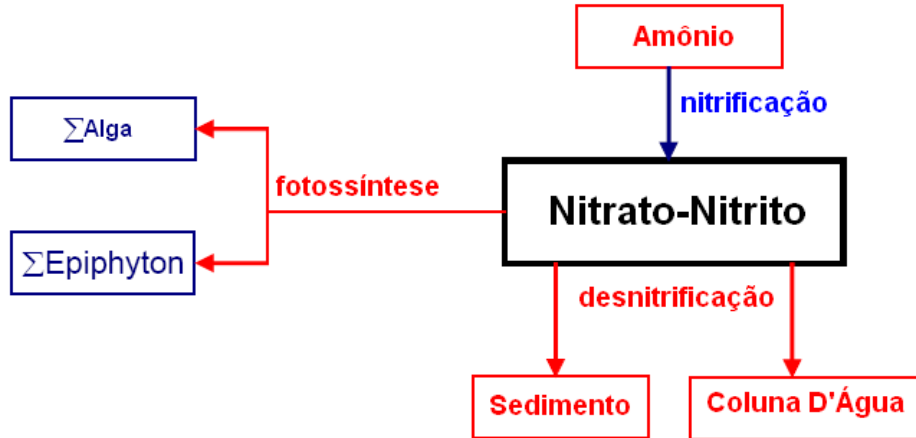


Figura 3.14 - Fluxo interno de Nitrito e Nitrato. Fonte: Cole & Wells, 2002.

Calculando-se a taxa com a seguinte equação:

$$S_{NO_x} = \underbrace{K_{NH_4} \gamma_{NH_4} \Phi_{NH_4}}_{\text{nitrificação}} - \underbrace{K_{NO_x} \gamma_{NO_x} \Phi_{NO_x}}_{\text{desnitrificação da coluna de água}} - \underbrace{\omega_{NO_x} \frac{\partial \Phi_{NO_x}}{\partial z}}_{\text{desnitrificação de sedimento}} \quad (3.38)$$

$$- \underbrace{\sum K_{ag} \delta_{Na} \Phi_a (1 - P_{NH_4})}_{\text{absorção algal}} - \underbrace{\sum K_{eg} \delta_{Ne} \Phi_e (1 - P_{NH_4})}_{\text{absorção de epiphyton}}$$

Onde:

δ_{Ne} = coeficiente estequiométrico de epiphyton para nitrogênio

δ_{Na} = coeficiente estequiométrico algal para nitrogênio

P_{NH_4} = fator preferencial de amônio

K_{NH_4} = taxa de nitrificação, s^{-1}

K_{NO_x} = taxa de desnitrificação, s^{-1}

K_{ag} = taxa de crescimento algal, s^{-1}

ω_{NO_x} = velocidade de transferência de sedimento, $m.s^{-1}$

Φ_{NH_4} = concentração de amônio-nitrogênio, $g.m^{-3}$

Φ_{NO_x} = concentração de nitrato-nitrogênio, $g.m^{-3}$

Φ_a = concentração algal, $g.m^{-3}$

3.7.3.8- Comportamento da Concentração do Oxigênio Dissolvido (OD)

O OD é calculado da seguinte forma, Figura 3.13:

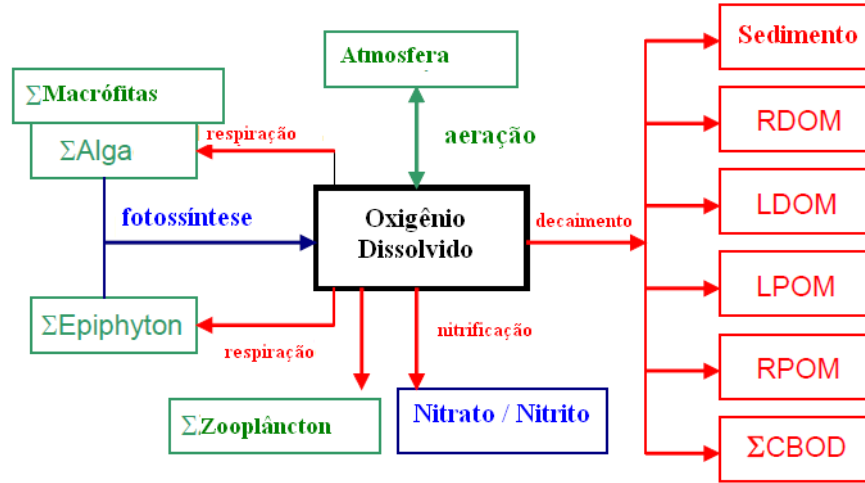


Figura 3.15 - Fluxo interno de OD. Fonte: Cole & Wells, 2002.

Dentre outras equações utilizadas pelo modelo para o cálculo de oxigênio, a equação da taxa de OD corresponde a:

$$\begin{aligned}
 S_{DO} = & \underbrace{\sum (K_{ag} - K_{ar}) \delta_{OMa} \Phi_a}_{\text{produção líquida algal}} + \underbrace{\sum (K_{eg} - K_{er}) \delta_{OMe} \Phi_e}_{\text{produção líquida epiphyton}} + \underbrace{A_{sur} K_L (\Phi'_{DO} - \Phi'_{DO})}_{\text{aeração}} \\
 & + \underbrace{K_{RPOM} \delta_{OM} \gamma_{OM} \Phi_{RPOM}}_{\text{decaimento POM refratário}} - \underbrace{K_{LPOM} \delta_{OM} \gamma_{OM} \Phi_{LPOM}}_{\text{decaimento POM lábil}} - \underbrace{K_{LDOM} \delta_{OM} \gamma_{OM} \Phi_{LDOM}}_{\text{decaimento DOM lábil}} - \underbrace{K_{RDOM} \delta_{OM} \gamma_{OM} \Phi_{RDOM}}_{\text{decaimento DOM refratário}} \\
 & - \underbrace{K_s \delta_{OM} \gamma_{OM} \Phi_{sed}}_{\text{liberação de sedimento de 1ª ordem}} - \underbrace{SOD \gamma_{OM} \frac{A_{sed}}{V}}_{\text{liberação de sedimento de ordem zero}} - \underbrace{\sum K_{CBOD} R_{CBOD} \Theta^{T-20} \Phi_{CBOD}}_{\text{decaimento CBOD}} \\
 & - \underbrace{K_{NH_4} \gamma_{NH_4} \Phi_{NH_4}}_{\text{nitrificação}} + \underbrace{\left(\sum (K_{mg} - K_{mr}) \delta_{OMmac} \Phi_{macro} \right)}_{\text{crescimento líquido de macrófitas}} - \underbrace{\sum \gamma_{zoo} K_{zr} \delta_{OMzoo} \Phi_{zoo}}_{\text{respiração zooplantônica}}
 \end{aligned} \quad (3.39)$$

Onde,

δ_{OMa} = coeficiente estequiométrico para matéria orgânica algal
 δ_{OMe} = coeficiente estequiométrico para matéria orgânica de epiphyton
 δ_{OMmac} = coeficiente estequiométrico para matéria orgânica de macrófitas
 δ_{OM} = coeficiente estequiométrico para matéria orgânica
 δ_{NH_4} = coeficiente estequiométrico para nitrificação
 δ_{OMzoo} = coeficiente estequiométrico de matéria orgânica para zooplâncton
 γ_{NH_4} = taxa multiplicadora para nitrificação
 γ_{OM} = taxa multiplicadora para decaimento de matéria orgânica
 γ_{zoo} = taxa multiplicadora para zooplâncton
 R_{BOD} = conversão de CBOD para CBOD-ultima
 Θ = taxa multiplicadora para BOD
 V = volume da célula computacional, m³
 T = temperatura, °C
 A_{sed} = área superficial do sedimento, m²
 A_{sur} = área da superfície de água, m²
 K_{ag} = taxa de crescimento algal, s⁻¹
 K_{ar} = taxa de respiração algal sem luminosidade, s⁻¹
 K_{eg} = taxa de crescimento de epiphyton, s⁻¹
 K_{er} = taxa de respiração de epiphyton sem luminosidade, s⁻¹
 K_{mg} = taxa de crescimento de macrófita, s⁻¹
 K_{mr} = taxa de respiração de macrófita sem luminosidade, s⁻¹
 K_{zr} = taxa de respiração de zooplâncton, s⁻¹
 K_{NH_4} = taxa de decaimento de amônio(nitrificação), s⁻¹
 K_{LDOM} = taxa de decaimento de DOM lábil, s⁻¹
 K_{RDOM} = taxa de decaimento de DOM refratário, s⁻¹
 K_{LPOM} = taxa de decaimento de POM lábil, s⁻¹
 K_{RPOM} = taxa de decaimento de POM refratário, s⁻¹
 K_{BOD} = taxa de decaimento de CBOD (DBO carbonácea), s⁻¹
 K_{sed} = taxa de decaimento de sedimento, s⁻¹
 K_L = taxa de troca interfacial do oxigênio, s⁻¹

Φ_{NH_4} = concentração amônio-nitrogênio, $g.m^{-3}$
 Φ_a = concentração algal, $g.m^{-3}$
 Φ_e = concentração de epiphyton, $g.m^{-3}$
 Φ_{ZOO} = concentração de zooplâncton, $g.m^{-3}$
 Φ_{macro} = concentração de macrófitas, $g.m^{-3}$
 Φ_{LDOM} = concentração de DOM lábil, $g.m^{-3}$
 Φ_{LPOM} = concentração de POM lábil, $g.m^{-3}$
 Φ_{RDOM} = concentração de DOM refratário, $g.m^{-3}$
 Φ_{RPOM} = concentração de POM refratário, $g.m^{-3}$
 Φ_{BOD} = concentração de CBOD, $g.m^{-3}$
 Φ_{sed} = concentração de sedimento orgânico, $g.m^{-3}$
 Φ_{DO} = concentração de oxigênio dissolvido, $g.m^{-3}$
 Φ'_{DO} = saturação de oxigênio dissolvido, $g.m^{-3}$
 SOD = demanda de oxigênio do sedimento, $g.m^{-2}.s^{-1}$

4 - METODOLOGIA

Além da importância do Lago do Descoberto e da legislação existente para a sua proteção, este reservatório ainda é alvo de cargas poluentes oriundas dos mais variados impactos ambientais. Esta afirmação será analisada pela presente pesquisa levando em considerando os parâmetros: temperatura, nitrogênio, fósforo e oxigênio dissolvido.

Para o presente trabalho será possível dispor de dados de campo relativos à qualidade da água, coletados pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Recursos Hídricos (PTARH) (Koide, 2006).

Algumas vantagens de se escolher o modelo para o reservatório Lago do Descoberto são as seguintes:

1. pode analisar os poluentes de interesse no reservatório (por exemplo, o fósforo, nitrogênio, OD, e a clorofila “a”).
2. pode fornecer a saída de montante a jusante no reservatório e na profundidade.
3. é capaz de simular a relação de causa e efeito entre o carregamento e a resposta do reservatório.
4. permite a adição ou a subtração das camadas e dos segmentos.

A utilização de um modelo de simulação requer a definição de uma representação conceitual do sistema que se pretende simular. Devem-se levar em consideração as características do modelo, os dados experimentais disponíveis e os objetivos que se pretende atingir. (Miranda et al, 2000)

Em geral, as etapas realizadas durante a pesquisa foram:

1. Tabulação de dados de campo obtidos pelo Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/UnB, fornecidas pelo Professor Dr. Sérgio Koide (2006), e de dados existentes nos relatórios cedidos pela CAESB (2003).
2. Modelação matemática utilizando o software CE-QUAL-W2;
3. Análise dos parâmetros: temperatura da água, fósforo, nitrogênio amoniacal, nitrato+nitrato e oxigênio dissolvido.

Para a realização das etapas descritas acima, procedeu-se as atividades que serão citadas com maiores detalhes nos subcapítulos que se seguem.

4.1- GEOMETRIA DO RESERVATÓRIO

Obtiveram-se as imagens georeferenciadas por sensoriamento remoto (figuras 4.1 e 4.2) do Lago do Descoberto, com a utilização do programa SPRING. Trata-se de um programa do Sistema de Informações Geográficas (SIG) com funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais. (INPE, 2008)



Figura 4.1 - Imagens georeferenciadas da região do Lago do Descoberto.

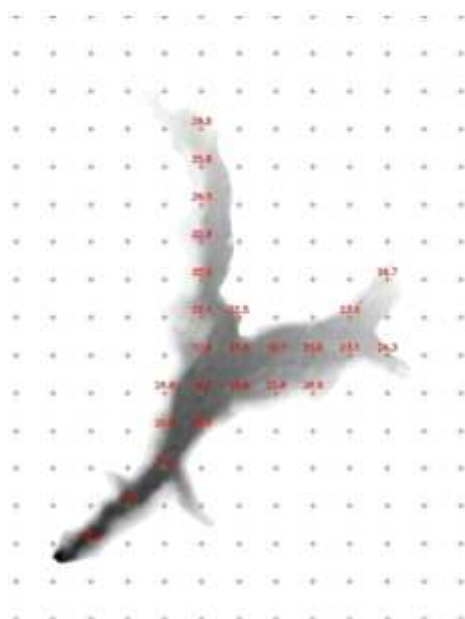


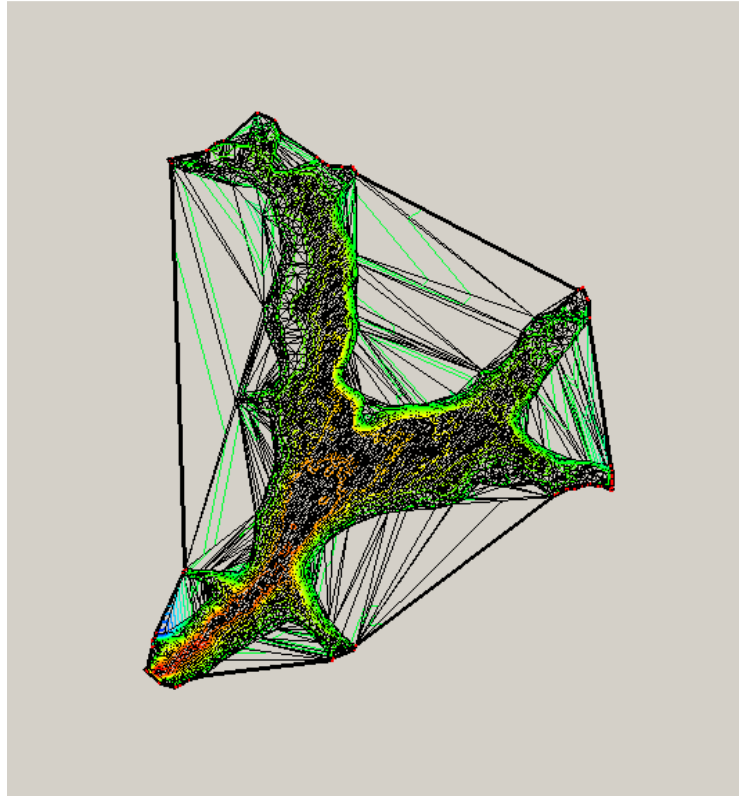
Figura 4.2 - Grade Retangular do Lago do Descoberto.

A figura 4.1 foi obtida em banco de dados do ano de 2001, data próxima aos trabalhos realizados pelo PTARH e dos estudos hidrológicos da CAESB. Essa imagem georeferenciada da região do Lago do Descoberto apresenta bandas espectrais que evidenciam a vegetação do entorno e a área superficial coberta por água. É interessante citar que a água possui uma assinatura na qual a refletância no visível depende da natureza e da qualidade das partículas em suspensão na água, e possui uma forte absorvância nas faixas do infravermelho próximo e médio, e microondas. A figura 4.2 mostra as variações de profundidade do lago. Quanto mais forte a cor do local, mais profundo será, e respectivamente quanto mais clara a cor do local, menos profundo será o lago.

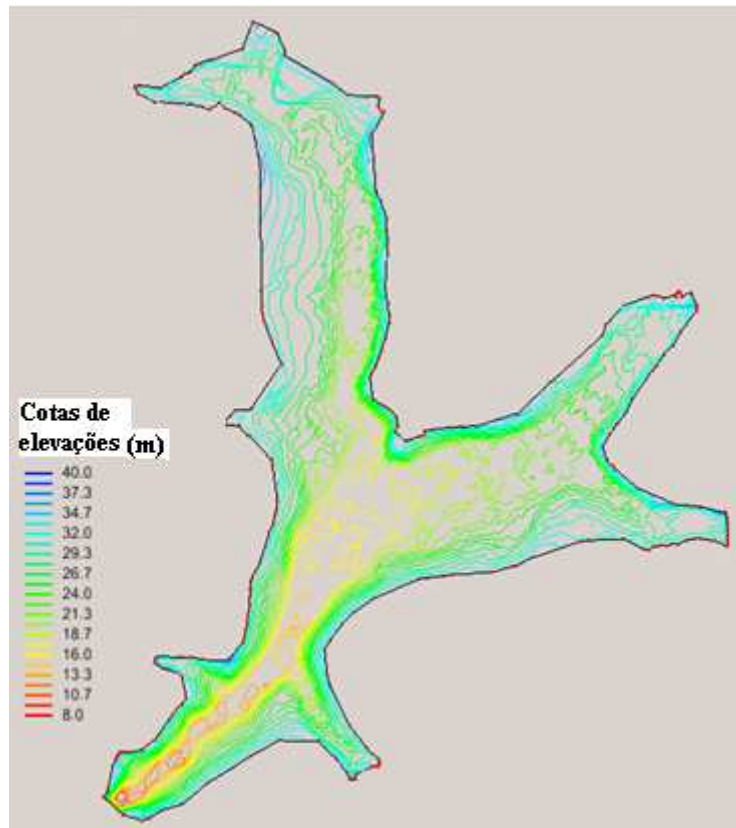
A área superficial do Lago do Descoberto obtida pelo programa Spring, referente à área do lago, figura 4.1, foi de 12,18 km², compatível com os dados da CAESB (2003), que obteve uma área superficial (espelho d'água) de 12,55 Km².

Assim, de posse das imagens georeferenciadas partiu-se para a obtenção da geometria do lago e inserção dos dados ao CE-QUAL-W2.

Para a realização da simulação, primeiramente compõem-se os arquivos de controle e de batimetria, para posteriormente compor-se os arquivos da variação da temperatura de acordo com a data juliana. Inicialmente obtém-se o arquivo de extensão “.tin”, figura 4.3, para posteriormente calcular os valores de elevações da superfície de água, figura 4.4 e suas respectivas cotas.



4.3- Grade Triangular – Arquivo de extensão “.TIN”.



4.4- Valores de elevações da superfície do lago. Metros acima do nível do mar.

De posse das cotas de elevações, sucede-se a divisão da região do lago em braços, segmentos e camadas. Seguindo instruções cedidos pelo manual do modelo, a geometria do Lago do Descoberto foi definida para uma distância de aproximadamente 500,00 m de comprimento, dividindo o corpo d'água em quatro braços, totalizando 38 segmentos longitudinais, com 14 camadas de 2 m de altura cada. É importante dizer que o modelo não considera a primeira e última camada, bem como os primeiros e últimos segmentos de cada braço.

A figura 4.5 mostra a discretização longitudinal do Lago do Descoberto, seus braços e respectivos segmentos, gerada pelo modelo. Utilizaram-se declividades padrão, e as orientações foram obtidas por imagens cedidas pela CAESB. Verificam-se posições duvidosas de alguns segmentos, mas de acordo com os resultados não existem influências.

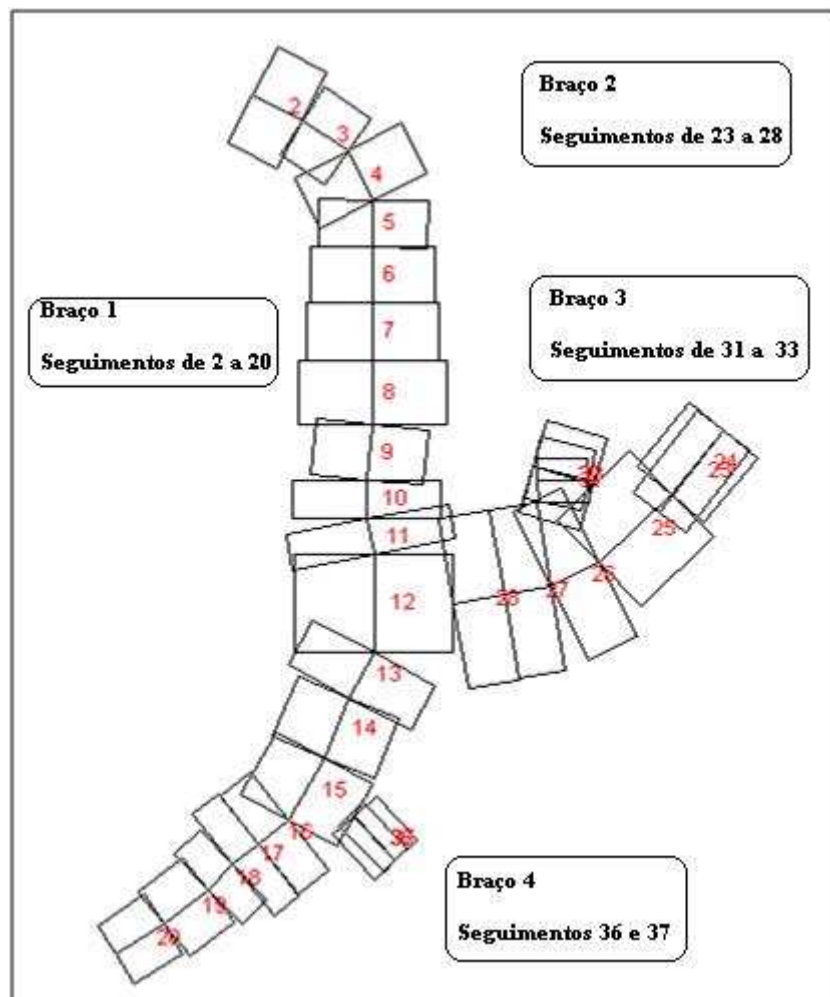


Figura 4.5 - Discretização longitudinal do Lago do Descoberto evidenciando seus braços e respectivos segmentos, gerada pelo modelo.

Para composição do arquivo de batimetria, exigido pelo modelo, utilizaram-se imagens fornecidas pela CAESB. Estas, foram trabalhadas em programas, como Autocad e Spring. As camadas ficaram dispostas de acordo com a figura 4.6, mostrando seus braços 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

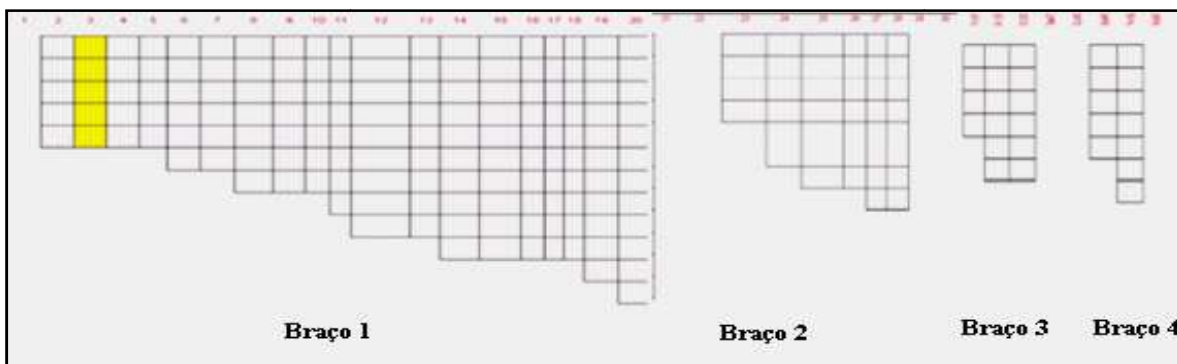


Figura 4.6 - Perfil vertical do Lago Descoberto, gerada pelo modelo e seus braços com os respectivos segmentos que os compõem .

4.2- CONDIÇÕES DE CONTORNO

Inicialmente, a simulação abrangeu os anos de 2003 e 2004, especificamente de outubro de 2003 a outubro de 2004. Segundo documentos da CAESB (2003), a região do DF possui basicamente duas estações anuais, o período chuvoso, que vai de outubro a abril (verão) e o período da seca, que vai de junho a agosto (inverno), o qual possui baixa taxa de precipitação. Os meses de maio e setembro são definidos como meses de transição para essas estações. Em detrimento de os solstícios de verão e inverno serem bastante acentuados, os equinócios de primavera e outono não são vistos facilmente.

Dessa forma, o período estudado para análise de sensibilidade, verificação e confirmação dos dados de entrada, compreendeu informações observadas entre 01/10/2003 a 14/12/2004. Começa, assim, no período chuvoso de 2003 e finaliza no mesmo período em 2004.

É importante informar que o modelo utiliza o calendário juliano para a realização das simulações, no qual, estabeleceu-se para o primeiro dia juliano, como o dia 1/1/2003, ou seja, o dia gregoriano 1/10/2003 corresponde ao dia juliano 274.

Tratando-se da escolha dos tributários para inserção de dados no modelo, verificou-se a existência dos cinco tributários que mais influem nas características gerais do lago. A figura 4.7 mostra a localização dos mesmos na discretização do modelo.

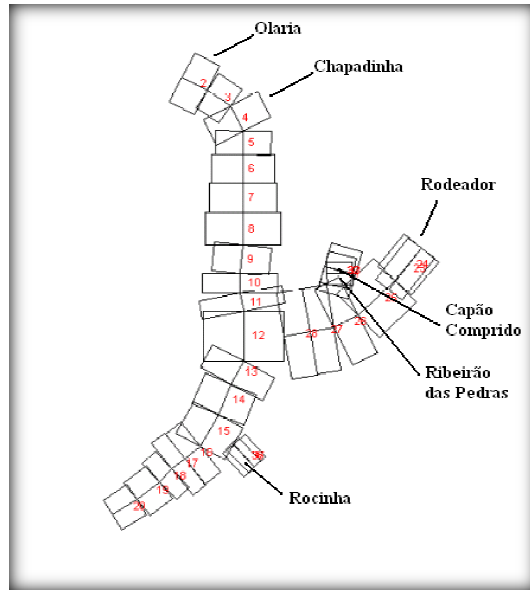


Figura 4.7 - Localização da entrada de dados dos tributários inseridos no modelo.

4.2.1 - Vazão

Os dados hidráulicos utilizados foram os cedidos pela CAESB. A Gerência de Acervo Técnico e Geoprocessamento da CAESB disponibilizou para a pesquisa os relatórios da reavaliação dos estudos hidrológicos da Barragem do Descoberto publicados em 2003, parte do projeto “Estudos de Concepção e de Viabilidade Técnica e Econômica para Elevação da Crista do Vertedouro da Barragem do Rio Descoberto, do Distrito Federal” (CAESB, 2003). Outra fonte de dados foi o relatório do projeto “Definição De Requerimentos De Resolução Espacial E Temporal Para Monitoramento Da Quantidade E Qualidade Da Água Em Bacias Hidrográficas” (Koide, 2006). Tais documentos cederam informações sobre: vazão, temperatura, parâmetros de qualidade da água, entre outros. Os valores utilizados serão descritos a seguir.

No apêndice B são apresentados os gráficos referentes às vazões dos tributários, e do rio do Descoberto, o qual também serviu como entrada de dados para o braço 1.

Um parâmetro importante para o ajuste do modelo é o coeficiente de rugosidade. Implementou-se no modelo o valor padrão do coeficiente de rugosidade de Manning, sugerido pelo manual, 0,04 para este coeficiente.

4.2.2 - Temperatura da água

Os valores de temperatura da água utilizados foram obtidos pelo relatório apresentado por Koide (2006), e estão representados nas figuras localizados no apêndice C desta pesquisa. Na ausência de pontos suficientes para a simulação, realizaram-se correlações com dados obtidos próximos ao ponto de interesse. A temperatura da água é o parâmetro que obrigatoriamente necessita de dados iniciais para sua simulação. Os dados devem ser inseridos de acordo com a quantidade de camadas que o modelo irá trabalhar. Assim, segundo fontes bibliográficas e observações da geometria do lago, as temperaturas de água iniciais foram as ilustradas na Figura 4.8:

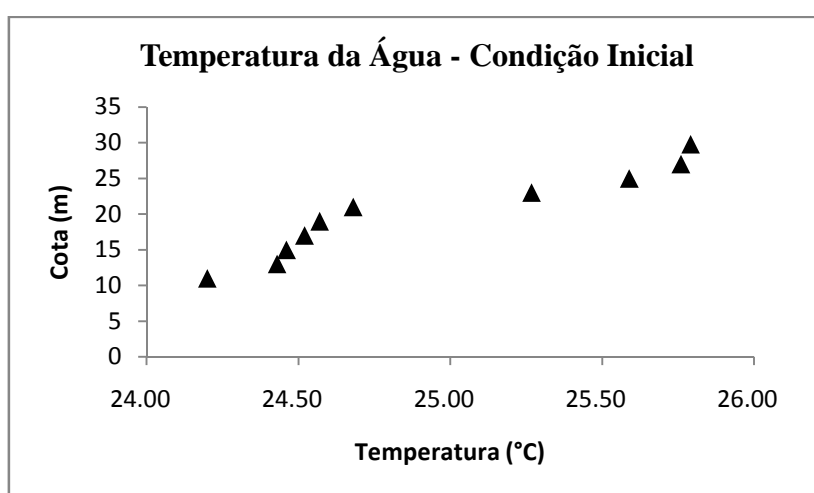


Figura 4.8- Condição inicial para temperatura de água, por camada.

4.2.3 - Qualidade da Água

Segundo Souza (2006), para se estimar cargas de entrada dos parâmetros de qualidade da água em modelos matemáticos de simulação, tem-se principalmente duas metodologias: uma em que se calcula a carga de entrada dos parâmetros pelo coeficiente de produção per capita do parâmetro em estudo, e outra, pelo uso direto de dados coletados em campo durante um período de tempo.

Essa pesquisa fez uso da segunda metodologia: obtenção dos dados experimentais fornecidos pelos dois documentos citados anteriormente, em que os dados fornecidos por Koide (2006) equivalem a coletas realizadas na superfície do lago e, de 4 em 4 metros quando o intervalo de amostragem se refere à profundidade. As localizações exatas dos sensores estão demonstradas

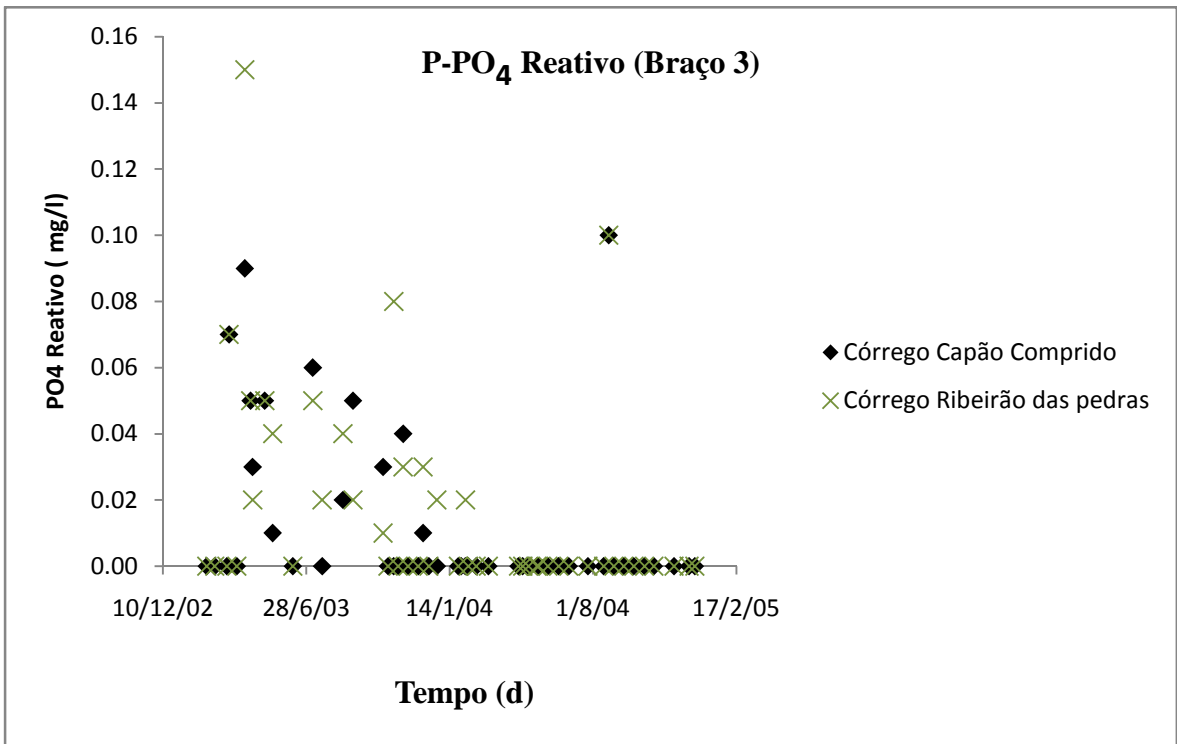


Figura 4.11 – Valores de cargas de fosfato para entrada no modelo, referente ao braço 3.

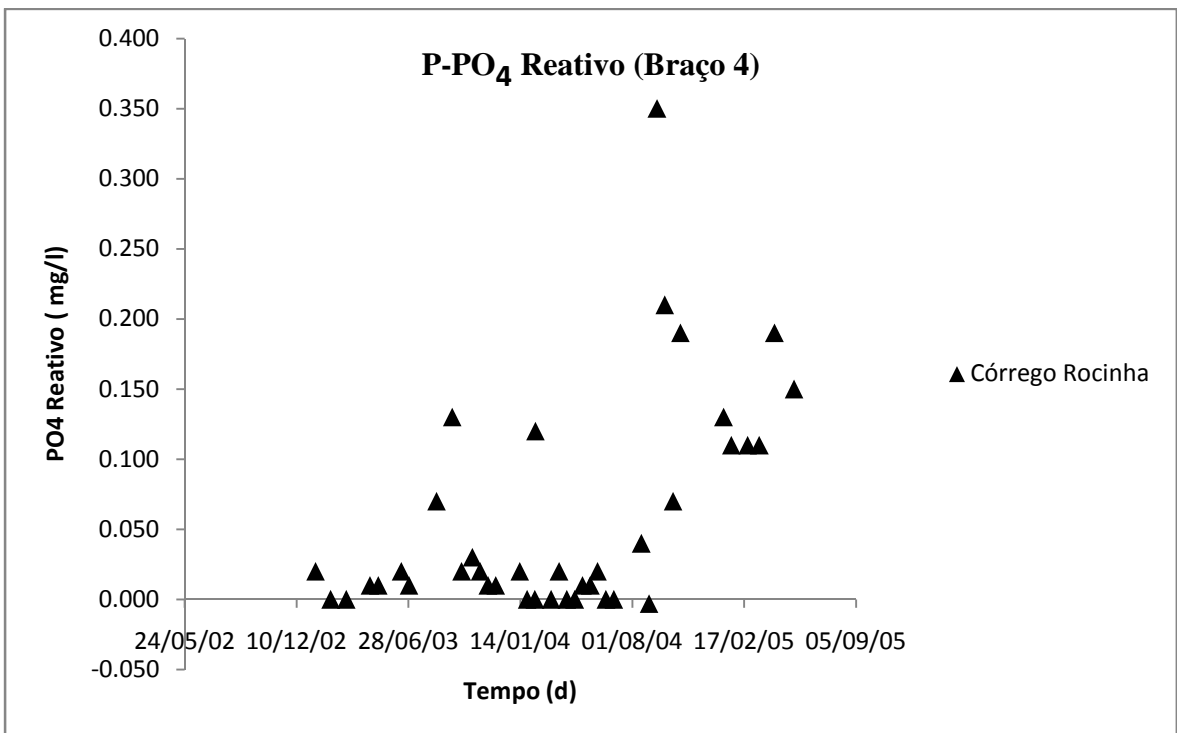


Figura 4.12 – Valores de cargas de fosfato para entrada no modelo, referente ao braço 4.

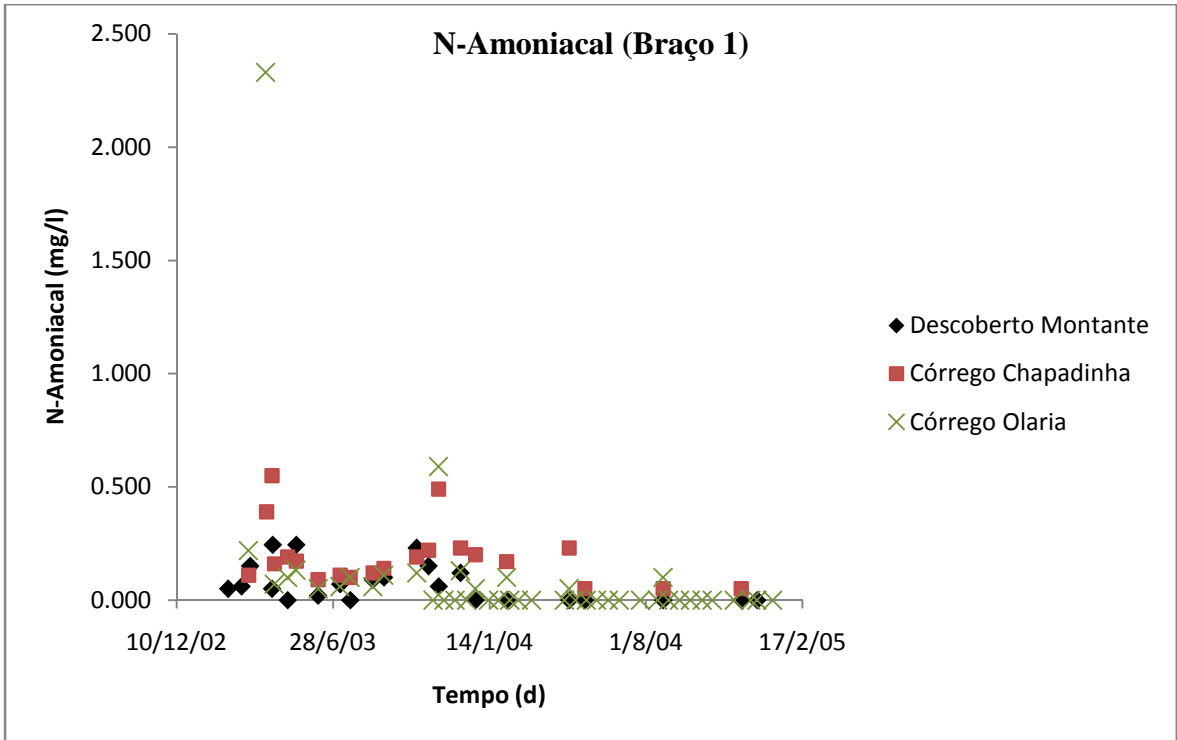


Figura 4.13 – Valores de cargas de N-amoniaco para entrada no modelo, referente ao braço 1.

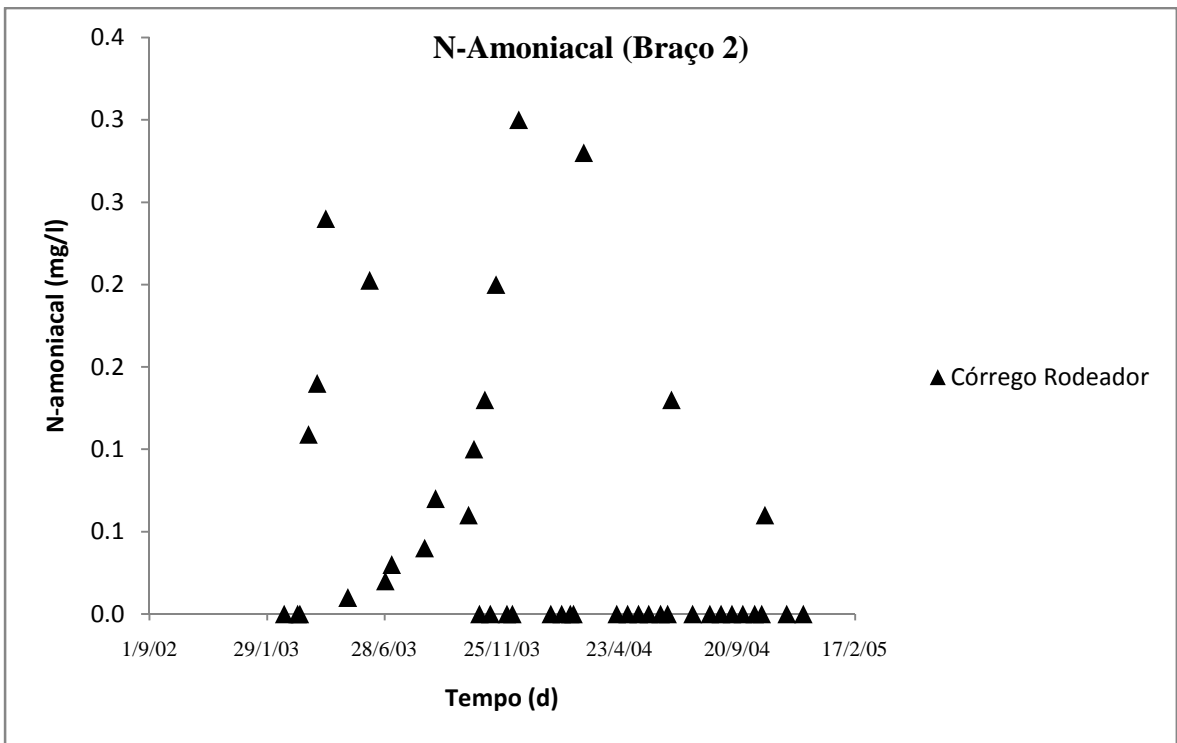


Figura 4.14 – Valores de cargas de N-amoniaco para entrada no modelo, referente ao braço 2.

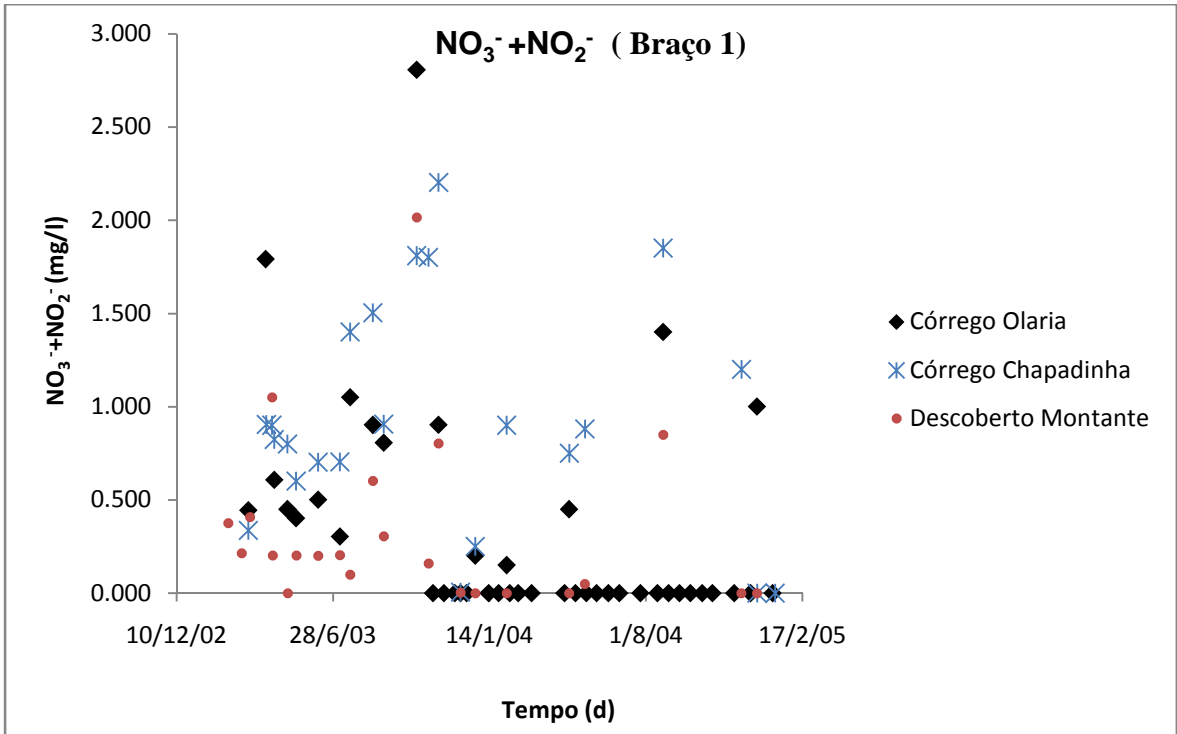


Figura 4.17 - Valores de cargas de NO₃⁻+NO₂⁻ para entrada no modelo, referente ao braço 1.

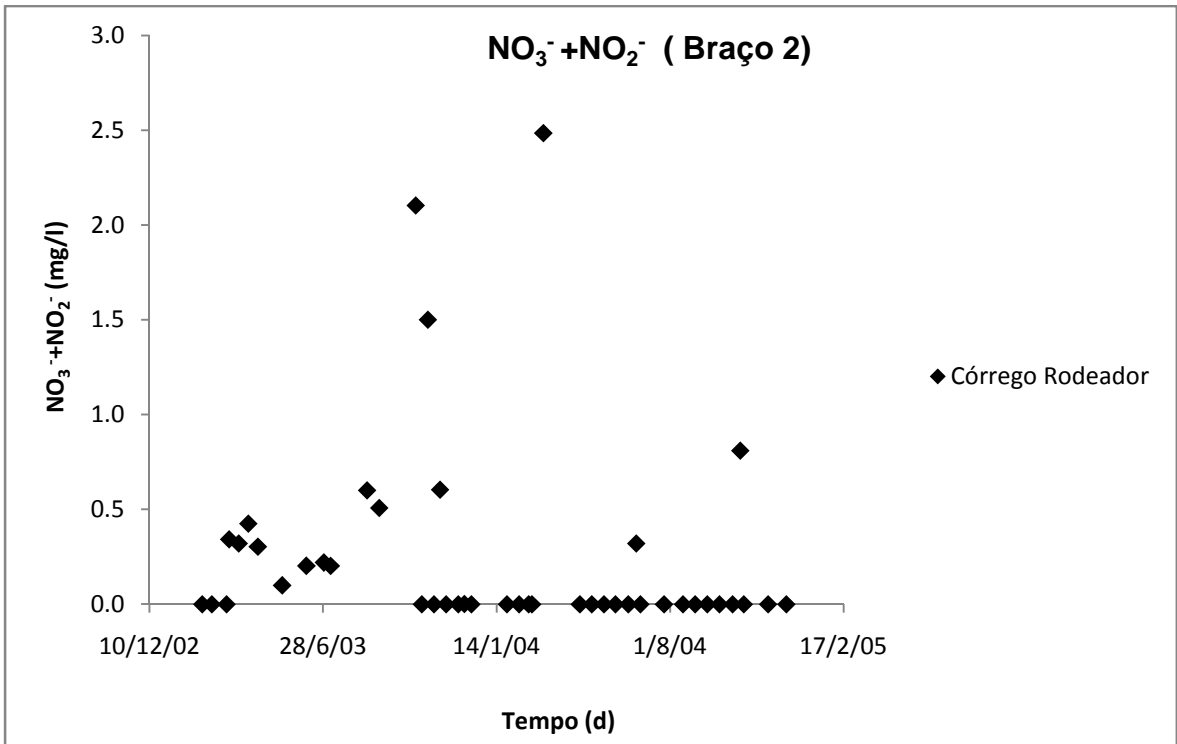


Figura 4.18 - Valores de cargas de NO₃⁻+NO₂⁻ para entrada no modelo, referente ao braço 2.

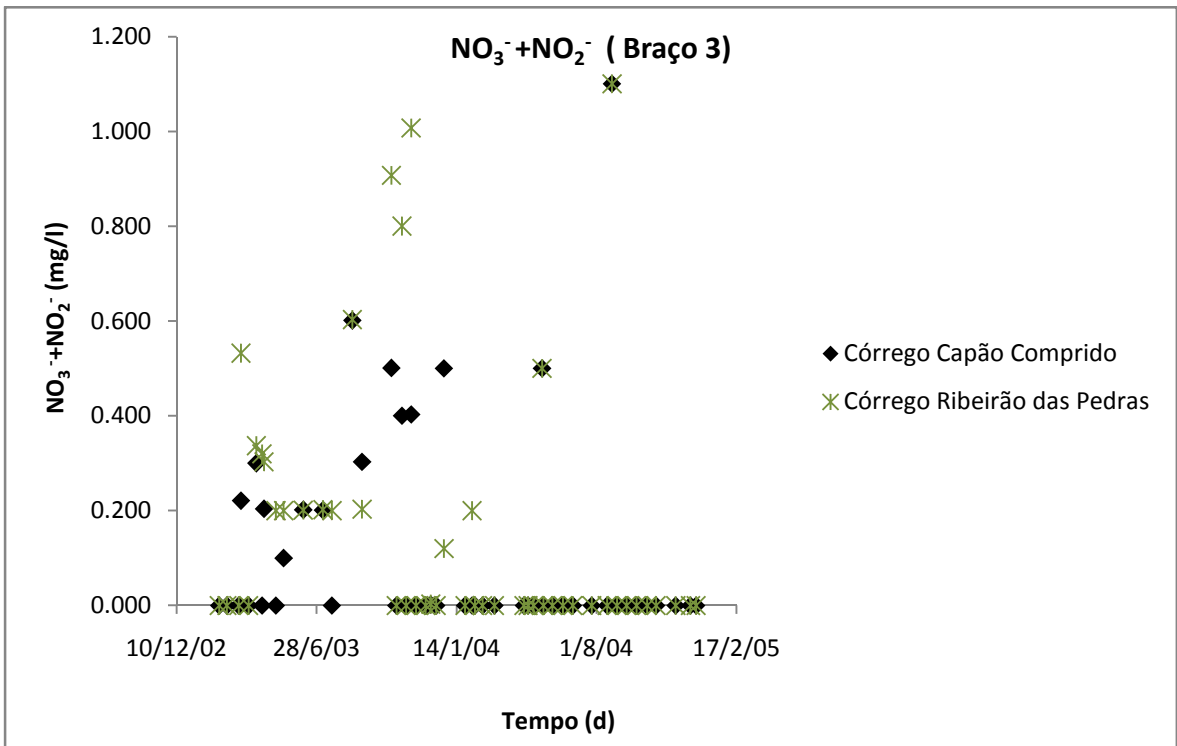


Figura 4.19 - Valores de cargas de NO₃⁻+NO₂⁻ para entrada no modelo, referente ao braço 3.

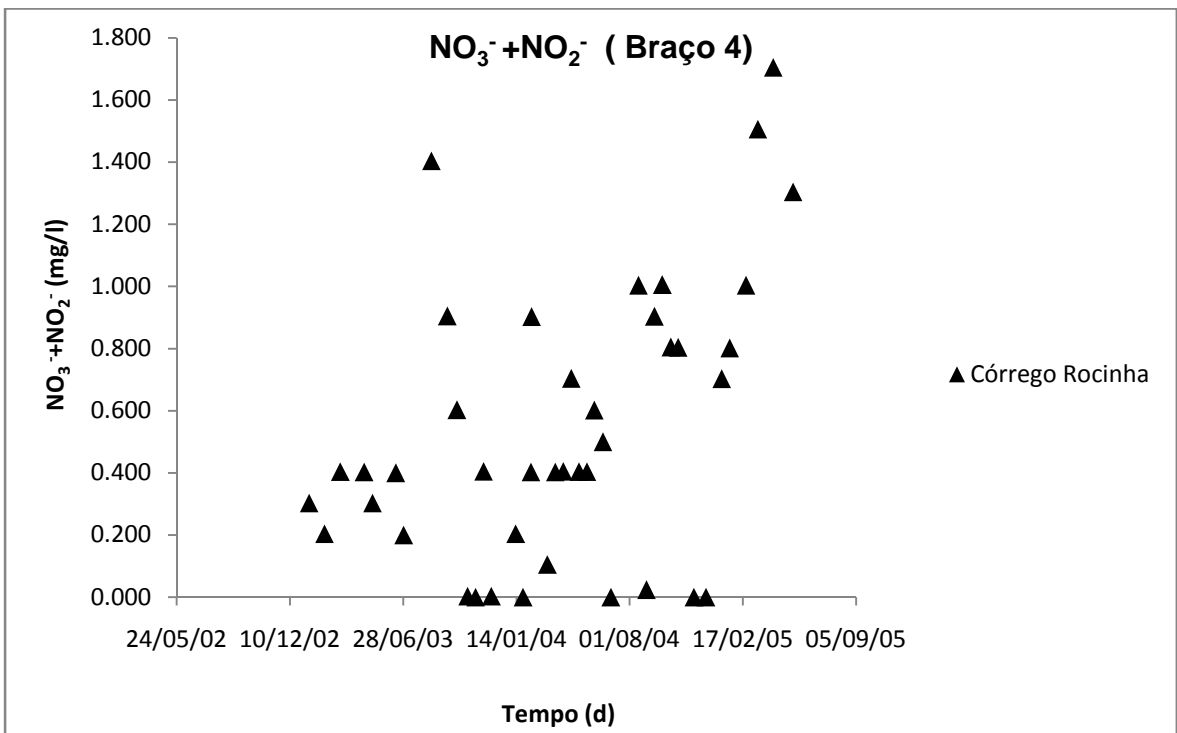


Figura 4.20 - Valores de cargas de NO₃⁻+NO₂⁻ para entrada no modelo, referente ao braço 4.

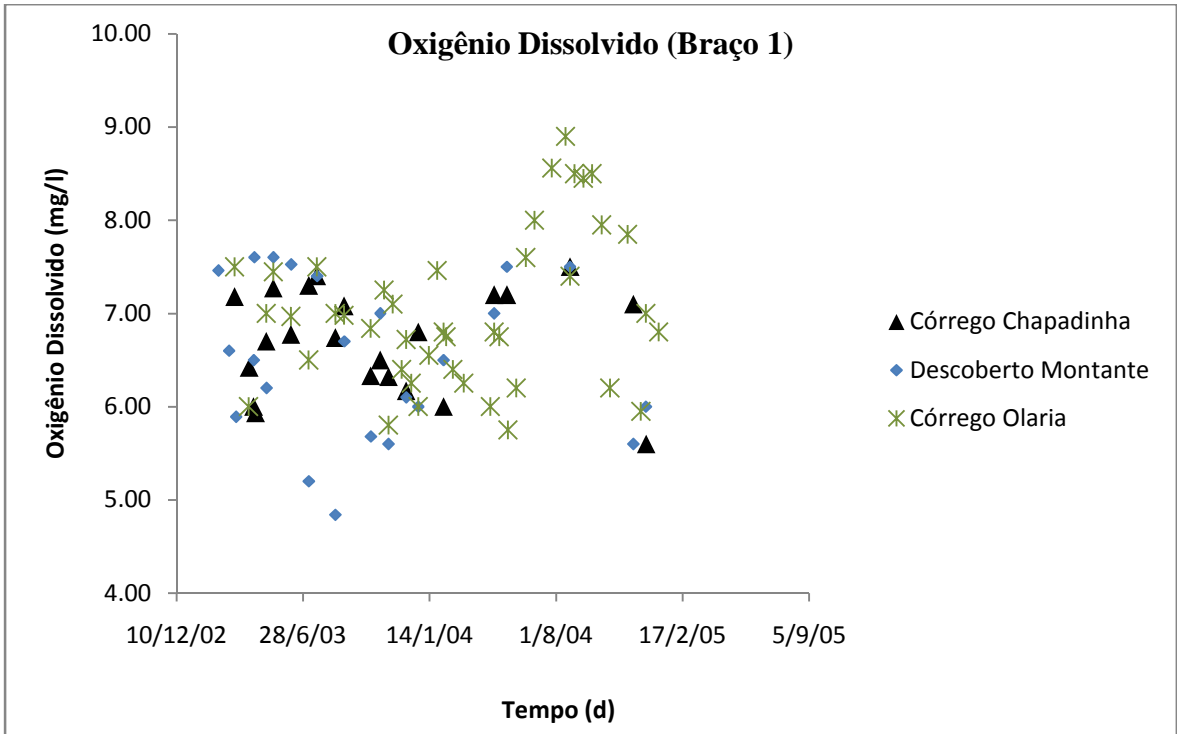


Figura 4.21 – Valores de cargas de OD para entrada no modelo, referente ao braço 1.

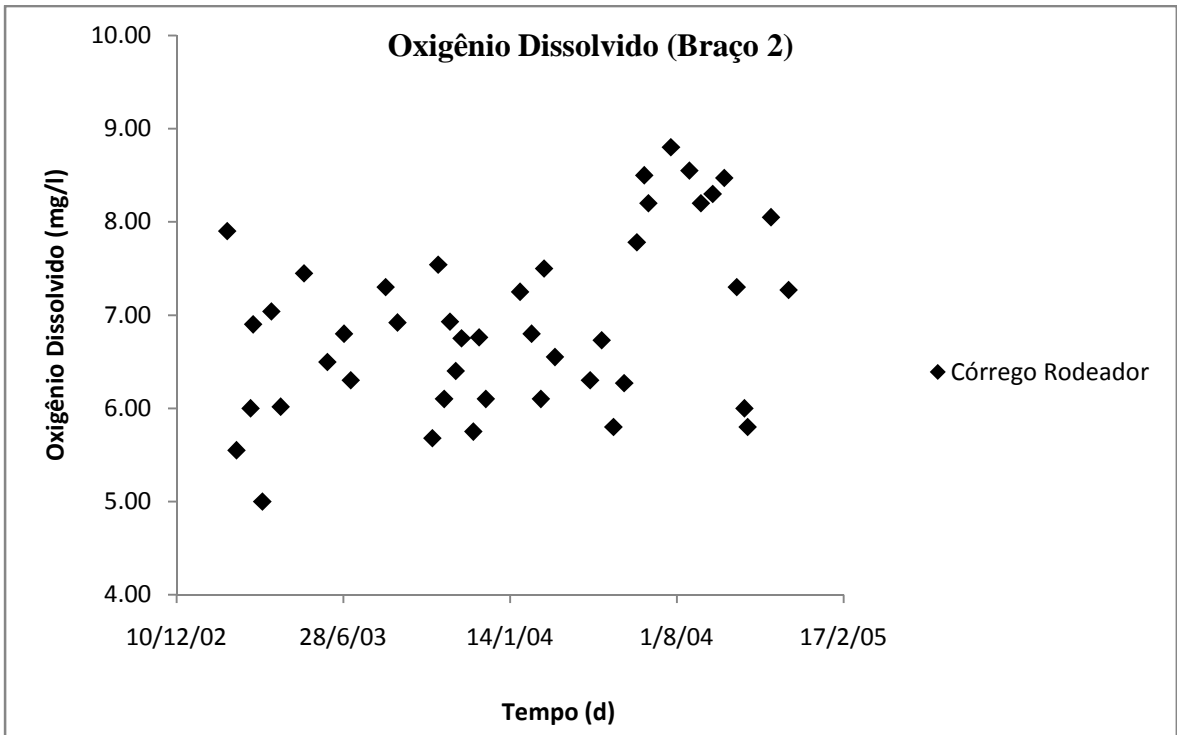


Figura 4.22 – Valores de cargas de OD para entrada no modelo, referente ao braço 2.

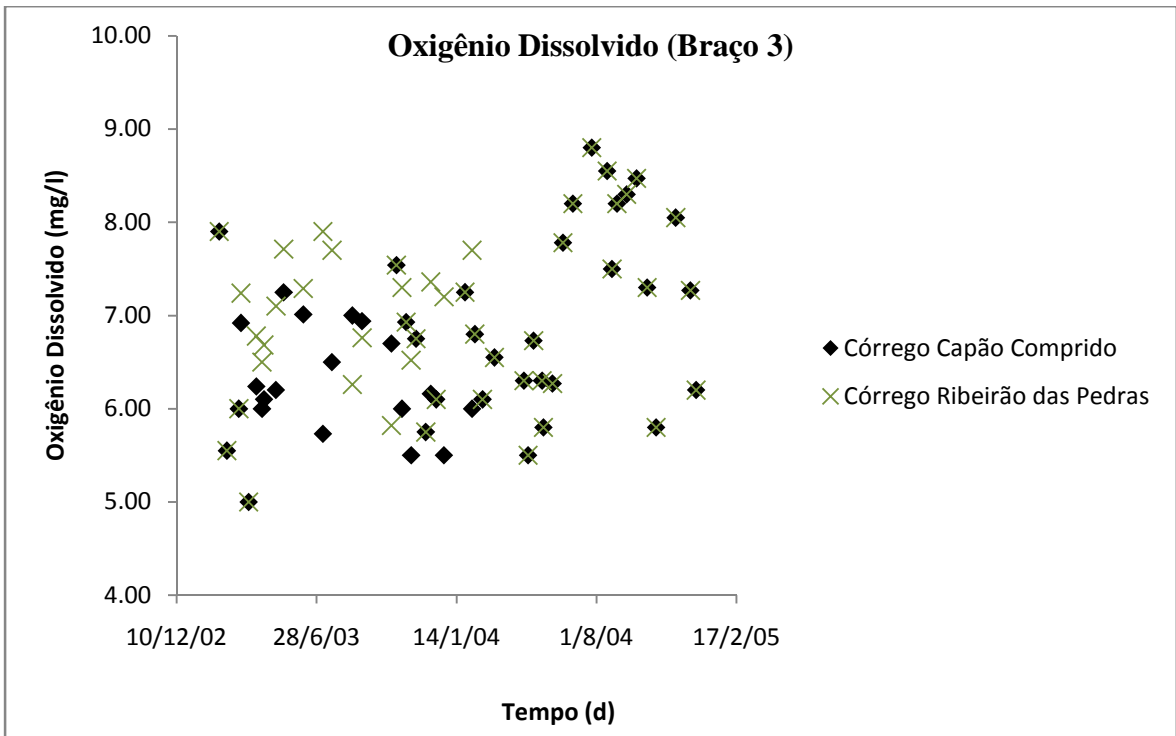


Figura 4.23 – Valores de cargas de OD para entrada no modelo, referente ao braço 3.

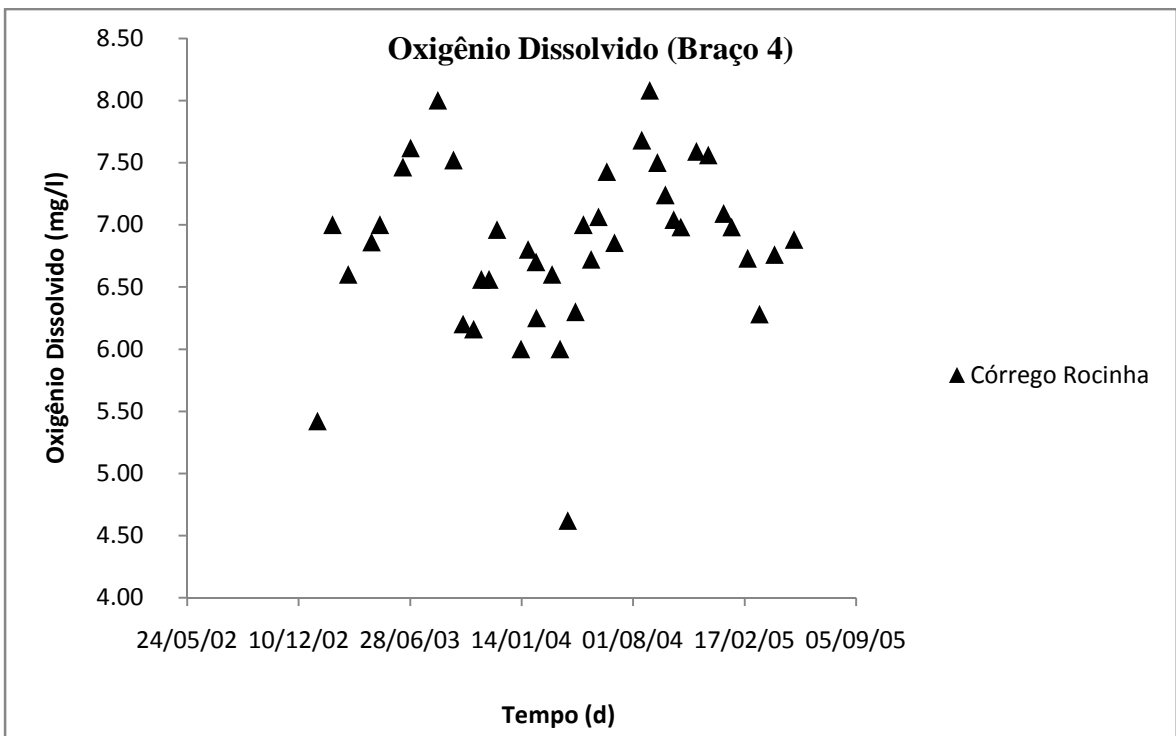


Figura 4.24 – Valores de cargas de OD para entrada no modelo, referente ao braço 4.

4.2.4 - Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). As informações meteorológicas disponíveis podem ser determinantes na qualidade dos resultados da simulação pretendida neste trabalho, principalmente nas camadas mais superficiais do lago que, por exemplo, podem sofrer influências do vento para as trocas gasosas e de energia na interface ar-água. (Miranda *et al.*, 2000)

Foram consideradas nesta pesquisa as estações meteorológicas mais próximas do objeto de estudo, isto é, do Lago do Descoberto. Tais valores utilizados para o período simulado encontram-se dispostos nas figuras 4.25 a 4.30.

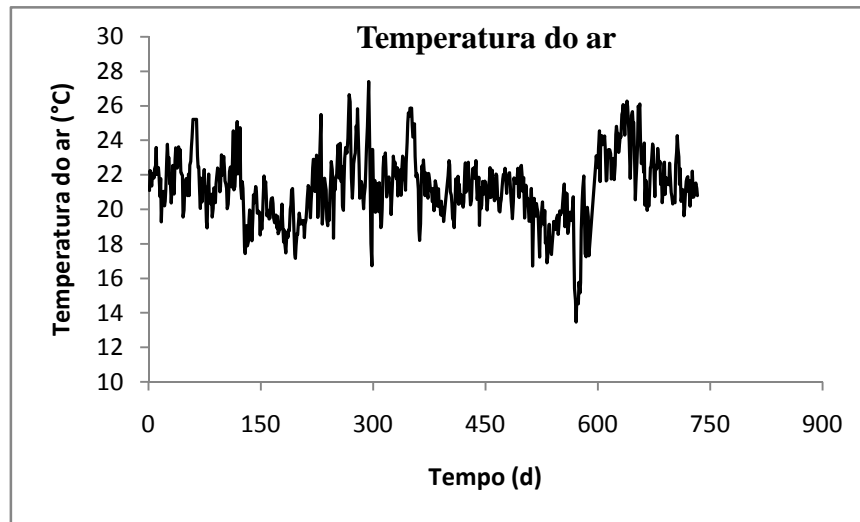


Figura 4.25 - Temperatura do ar. Fonte: INMET (2009).

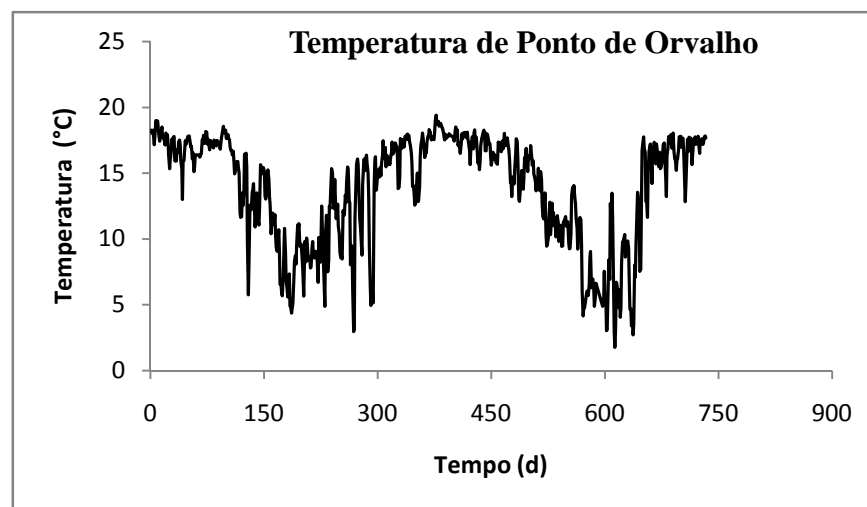


Figura 4.26 - Temperatura do ponto de orvalho. Fonte: INMET (2009).

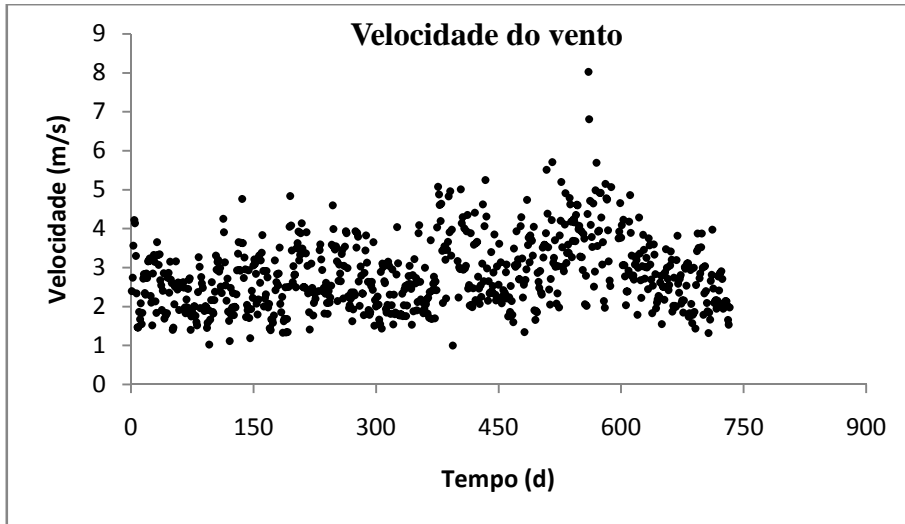


Figura 4.27 - Valores de velocidade do vento. Fonte: INMET (2009).

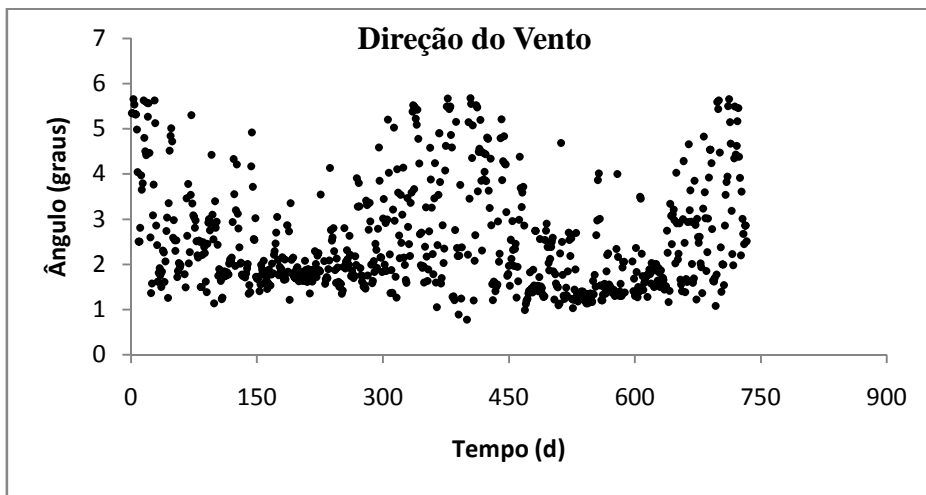


Figura 4.28 - Ângulos de direção do vento. Fonte: INMET (2009).

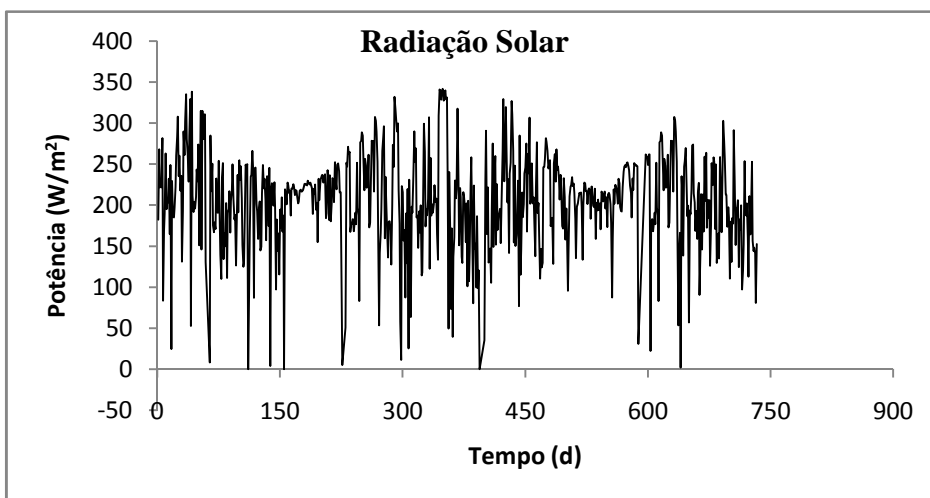


Figura 4.29 - Potência da radiação solar incidente no lago do Descoberto. Fonte: INMET (2009).

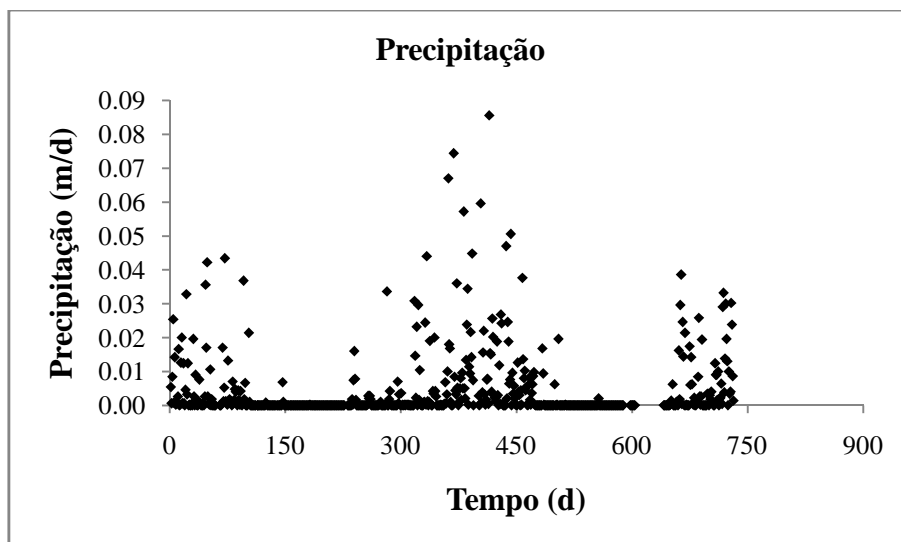


Figura 4.30 – Precipitação verificada sob a região do lago do Descoberto no período de 2003 a 2005. Fonte: INMET (2009).

4.2.5 - Parâmetros cinéticos

Os valores dos parâmetros cinéticos, importantes à pesquisa e utilizados foram os recomendados por Cole & Wells (2008), os quais são mostrados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1- Parâmetros Cinéticos
(Fonte: Cole & Wells (2008) *apud* Souza (2006))

Parâmetro	Cole & Well. (2008)	Unidade	Descrição
KBOD	0,10	dia ⁻¹	Taxa de decaimento de DBO ₅ .
RBOD	1,85	dia ⁻¹	Relação entre DBO ₅ e DBO _u .
CBODP	0,004	-	Relação estequiométrica do fósforo e decaimento de DBO.
CBODN	0,06	-	Relação estequiométrica do nitrogênio e decaimento de DBO.
CBODC	0,32	-	Relação estequiométrica de carbono e decaimento de DBO.
PO4R	0,001-0,050	-	Taxa de liberação do fósforo pelo sedimento, fração de SOD.
NH4REL	0,001-0,015	-	Taxa de liberação de N-amoniaco pelo sedimento, fração de SOD.
NH4DK	0,001-1,30	dia ⁻¹	Taxa de decaimento de N-

			amoniacal.
NO3DK	0,05-0,15	dia ⁻¹	Taxa de decaimento de nitrato.
NO3S	0,001-1,0	m/dia	Taxa de denitrificação pelo sedimento.
CO2REL	1,0-1,4	-	Taxa de liberação de CO ₂ pelo sedimento, fração de SOD.
O2NH4	4,57	-	Relação estequiométrica do oxigênio e N-amoniacal durante a nitrificação.
O2LIM	0,1	mg/l	Concentração de OD na qual inicia o processo anaeróbico.
SOD	0,1-5,8	g O ₂ /m ² .dia	Demanda de oxigênio pelo sedimento por segmento.

Ajustaram-se os parâmetros com base em análise visual e estatístico, observando-se gráficos do segmento 20 - segmento de saída de dados - de temperatura da água, elevações do nível d'água; valores de OD, NH₄, NO₃⁻+NO₂⁻ e P-PO₄.

O erro percentual (EM%) relacionado aos dados experimentais (observado) e simulado (predito) é definido como (Souza, 2006):

$$EM(\%) = \frac{\sum \left(\frac{|Predito - Observado|}{Observado} \right)}{n^{\circ} \text{ observações}} \times 100 \quad (3.40)$$

Já o Erro médio absoluto (EMA) demonstra o quanto os valores simulados divergem, em média, dos experimentais. (Souza, 2006)

$$EMA = \frac{\sum |predito - observado|}{n^{\circ} \text{ observações}} \quad (3.37)$$

O Erro Padrão (EP) demonstra o quanto os valores preditos (simulados) variam dos observados (experimentais):

$$EP = \sqrt{\frac{\sum (predito - observado)^2}{n^{\circ} \text{ observações}}} \quad (3.38)$$

4.2.6 - Análise de sensibilidade

Como recomendado por Cole & Wells (2008), realizou-se o ajuste inicial da temperatura da água e a seguir, da concentração de OD, no segmento 20, partindo seqüencialmente para os outros parâmetros, e determina-se a sensibilidade dos resultados do estudo quando suas premissas são alteradas.

4.2.7 - Calibração

São três as técnicas de calibração recomendadas por Chapra (2003):

- Calibração Manual;
- Calibração por medição direta de taxas;
- Autocalibração.

A técnica de calibração utilizada foi a de calibração manual, onde se analisa a sensibilidade dos parâmetros no modelo e ajustam-se manualmente os dados de interesse.

4.2.8 - Confirmação

Segundo Chapra (2003) a confirmação assegura que as previsões geradas sejam suficientemente confiantes para utilizá-las em tomadas de decisão. De acordo com o autor, a confirmação consta de três etapas: 1ª) Simula-se um caso semelhante, para avaliar se o modelo está influenciado demasiadamente pelas condições iniciais; 2ª) Simula-se com a inserção de dados meteorológicos diferentes, para se averiguar a calibração correta do modelo hidrodinâmico; e 3ª) Simula-se aplicando cargas de entrada diferentes das utilizadas inicialmente, verificando a resposta do modelo às mudanças e sua coerência.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Idealmente, um modelo deve ser usado como um ponto de partida para investigações limnológicas de um corpo d'água, refinando-se continuamente os dados para uma melhor compreensão do sistema e dos processos estudados. Esse foi o caminho realizado pela presente pesquisa. Inicialmente, ajustaram-se os parâmetros hidrodinâmicos, para posteriormente habilitar o modelo para simular os parâmetros de qualidade da água. Dessa maneira, dispuseram-se os resultados em escala de tempo para comparação de dados observados e simulados.

5.1- RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA VAZÃO E NÍVEL D'ÁGUA

A correta inserção de dados de vazão auxilia na redução de prováveis erros gerados durante a simulação, pois o nível de água, isto é, seu volume, está diretamente relacionado com o transporte de massa e, conseqüente com a variação na concentração do parâmetro em estudo e com suas reações físicas e químicas. (Souza, 2006)

Na figura 5.1 ilustra-se a variação da elevação de água no segmento 20, incluindo também os valores de elevações observadas.

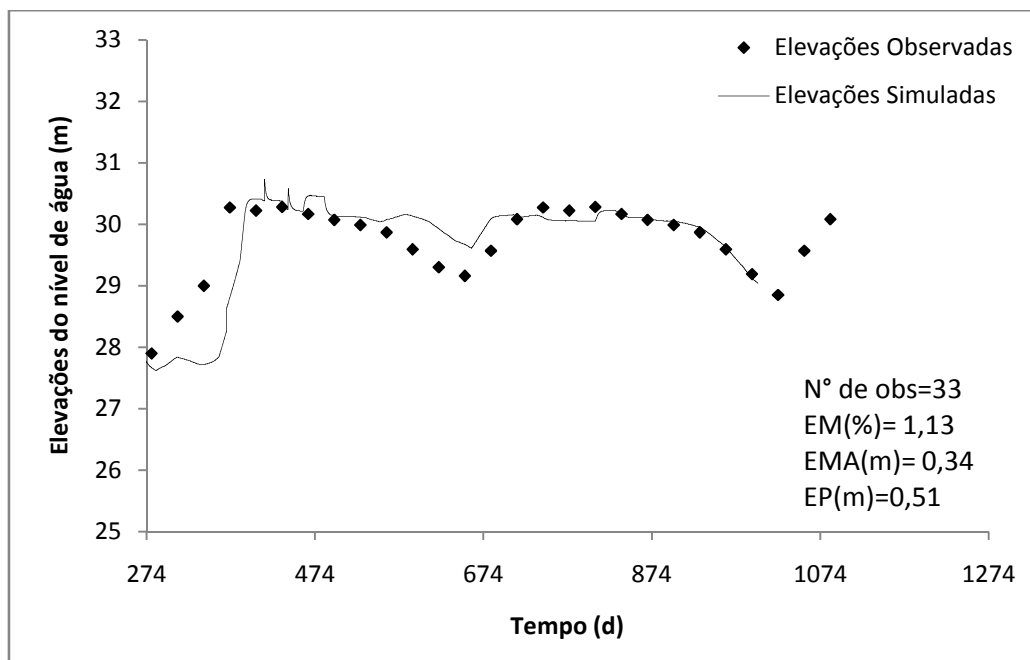


Figura 5.1- Elevações observadas e simuladas do lago do Descoberto.

Verifica-se que os resultados são satisfatórios, apesar das divergências notadas nas análises baseadas nos erros estatísticos no início da simulação. As incoerências podem ser explicadas pela ausência de dados comparativos dos anos em estudo, pois se utilizou médias anuais de elevações disponíveis em documentos da CAESB (2003). É importante citar que a simulação foi configurada com o vertedouro da barragem do Descoberto na cota 30,00 m. Dessa maneira, o fluxo de saída de água do lago, além da tomada d'água e descarga de fundo, será vertida se o nível de água for maior que 30 metros acima do nível do mar. De posse dessas análises, ajustaram-se os dados das vazões do rio principal (Descoberto montante) e seus tributários.

5.2- RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA

Como recomendado pelo manual do modelo, procedeu-se a avaliação dos resultados simulados de temperatura da água no último segmento do lago, como pode ser visto na figura 5.2.

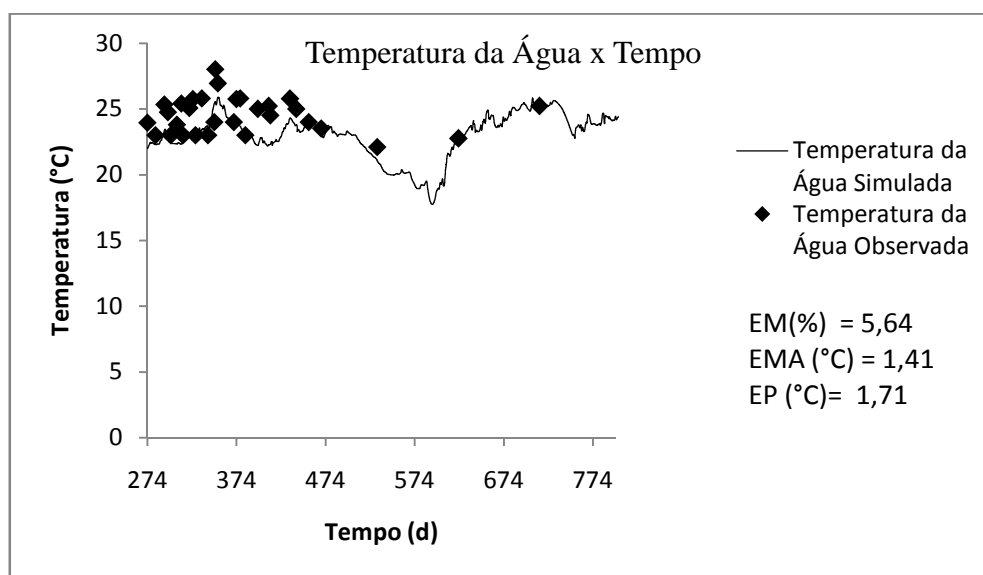
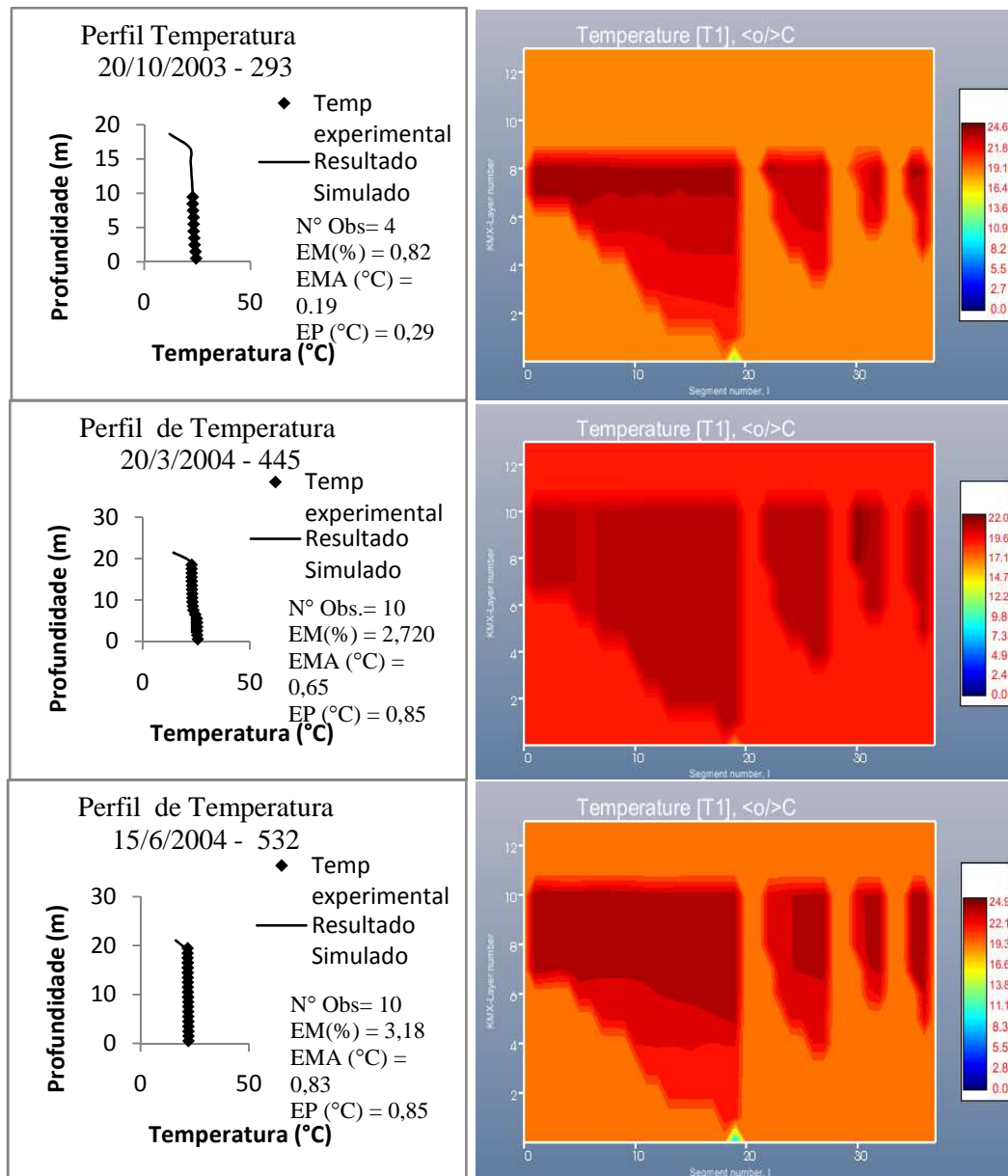


Figura 5.2- Comparação de dados de temperatura da água simulado e predito, do último segmento do lago (segmento 20).

Evidenciou-se por análise estatística, a influência significativa da vazão na temperatura da água. Isto é, facilmente explicado por fenômenos de transferência de calor na massa d'água. Observa-se uma ligeira discrepância entre os valores de temperatura da água

simulada e experimental, isto pode ter ocorrido por problemas na vazão do lago, como foi verificado anteriormente, principalmente, no início do período simulado.

Analisaram-se também os perfis verticais de temperatura da água no decorrer do período simulado, com as respectivas datas gregorianas e juliana e suas imagens geradas pelo modelo. Seleccionaram-se datas características de cada estação: primavera, verão, outono, e inverno, incluindo o perfil do início do período avaliado (outubro).



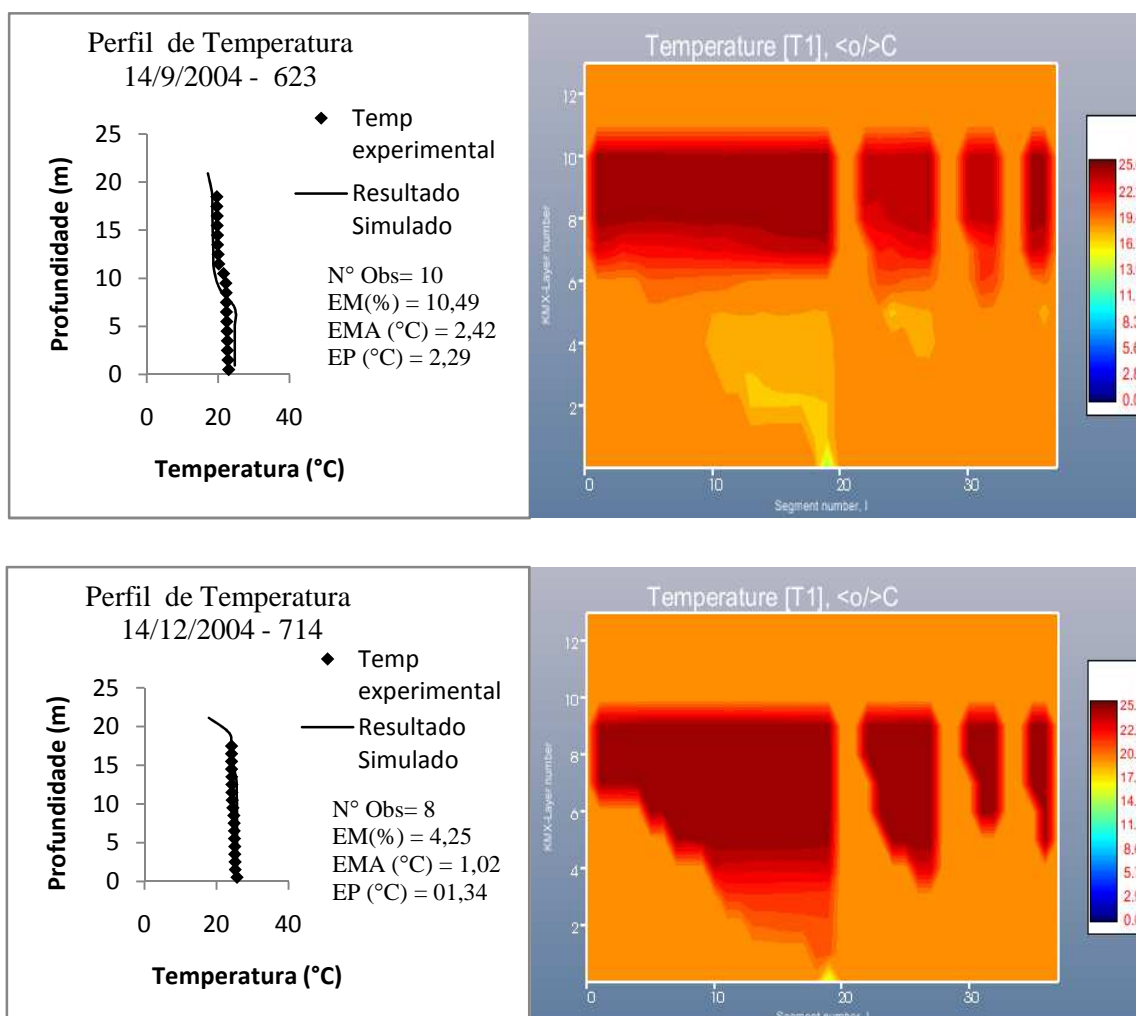


Figura 5.3 – Perfis verticais de temperatura da água, gerados pelo modelo.

De acordo com os gráficos acima, pode-se perceber a coerência dos perfis verticais no período analisado. O perfil com maior erro associado corresponde ao mês de setembro e pode ser comparado com o mesmo período na figura 5.3 de elevações do nível de água, onde ocorre um maior erro aparente e o número de observações também afetam os resultados. Esse mês é caracterizado pela transição do período da seca para o período chuvoso da região do DF, variando os níveis de radiação solar.

Pode-se verificar que nos meses de outubro de 2003, março, setembro e dezembro de 2004 ocorre estratificação térmica da coluna d'água (figura 5.1). Estes meses são característicos

do período chuvoso (verão), onde as camadas superficiais do reservatório se aquecem e tornam-se menos densas do que as camadas mais profundas, dificultando a mistura das camadas inferior e superior. Esse fenômeno não ocorre durante os meses mais frios, como observado no mês de junho.

5.3- RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

De acordo com as imagens georreferenciadas obtidas por sensoriamento remoto notou-se que as partículas em suspensão são capazes de alterar a turbidez da água ocasionando um espalhamento da radiação incidente, tendo como resultado a radiação emergente do corpo d'água. A turbidez característica da água dependerá do tipo, da quantidade e da qualidade do particulado em suspensão. O particulado pode ser do tipo mineral (silte e argila) ou plâncton (zooplâncton e fitoplâncton). (USP, 2008)

Dessa forma, quanto menor for o valor da reflectância maior será a qualidade da água; e quanto maior for o valor de reflectância, menor será a qualidade da água pela presença de material em suspensão. Ao analisar a imagem verifica-se que as regiões centrais ao lago possuem uma menor reflectância, evidenciando baixa existência de particulado. Já nas regiões próximas as margens, a reflectância aumenta significativamente, mostrando assim, grande quantidade de material em suspensão, diminuindo sua qualidade. (USP, 2008)

Assim, complementando os resultados, mostra-se a seguir, nas figuras 5.4 a 5.9, os valores obtidos pelas simulações no modelo CE-QUAL-W2 dos parâmetros de qualidade da água: fósforo reativo, nitrogênio amoniacal, nitrato+nitrito e OD. Os resultados da simulação foram comparados com os dados experimentais obtidos pelo projeto de Koide (2003). Estes foram dispostos em gráficos com variações temporais e em perfis verticais durante o ano simulado. Todos os resultados são equivalentes ao segmento 20 do modelo, isto é, ao último segmento do lago do Descoberto. É de se esperar alguns erros associados aos resultados como: erros acidentais, aleatórios e sistemáticos referente aos dados experimentais, erros relacionados à calibração da ferramenta computacional, e finalmente aos erros intrínsecos ao modelo. É interessante citar que, normalmente, se dispunha apenas de um dado medido por mês simulado, podendo assim gerar erros significativos durante todo o período em estudo, isto é, o número de observações influenciam os resultados.

5.3.1 - Fósforo Dissolvido (P-PO₄)

O modelo simulou o fósforo dissolvido relativo à adsorção de fósforo para os sólidos suspensos inorgânicos e ressuspensão pelo sedimento, incluindo seu transporte no corpo d'água e seu decaimento percentual da matéria orgânica, o qual é relacionado à demanda bioquímica de oxigênio. As figuras 5.4 e 5.5 mostram os resultados obtidos.

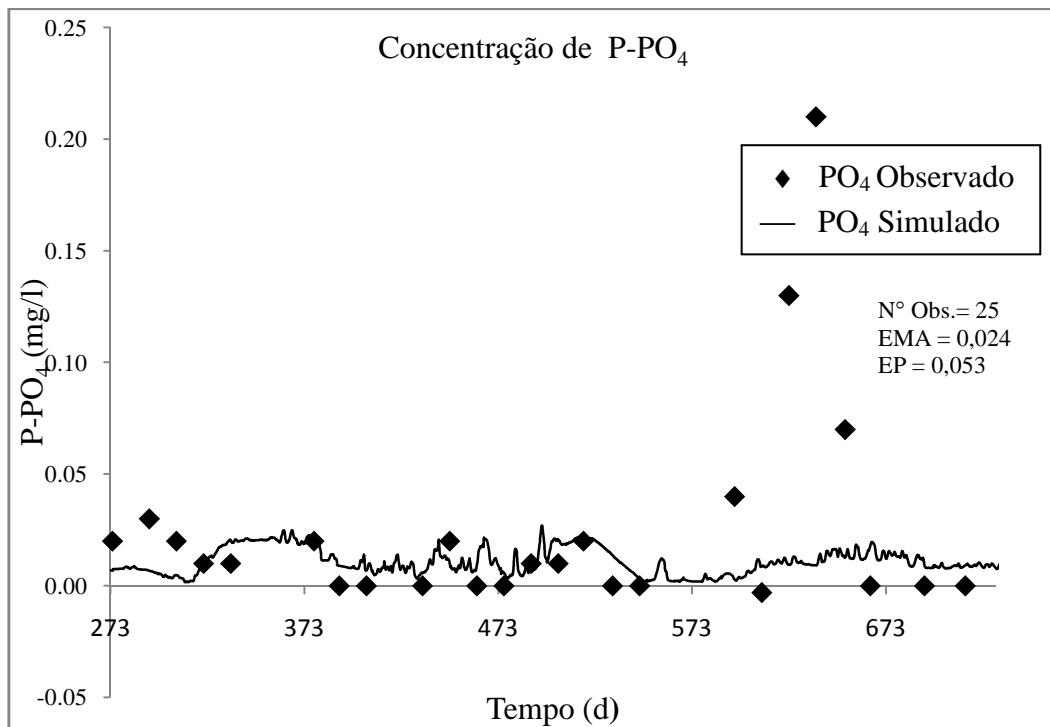
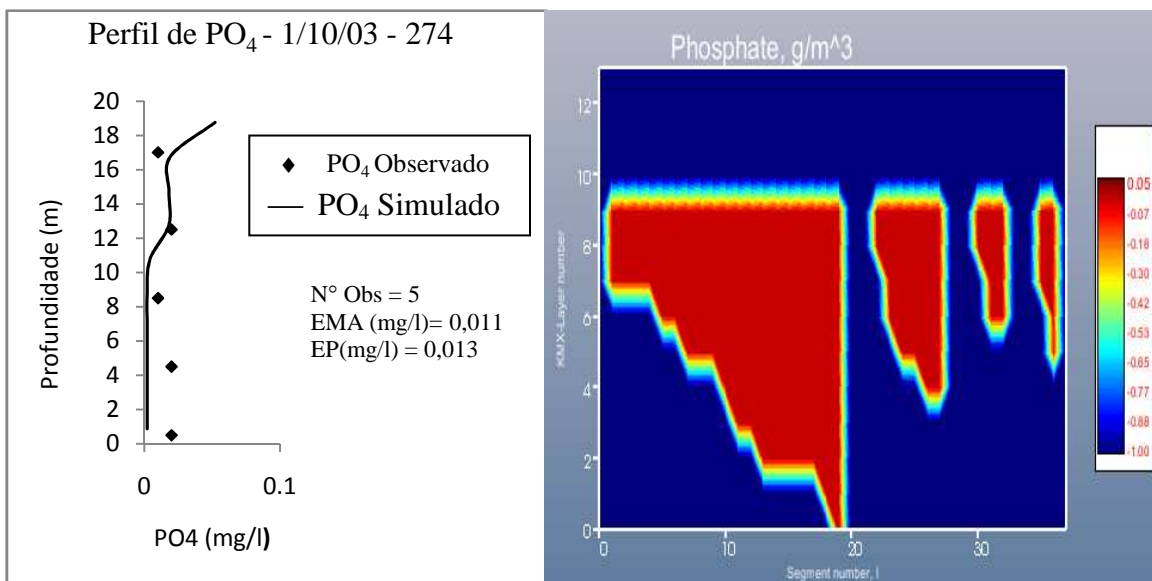
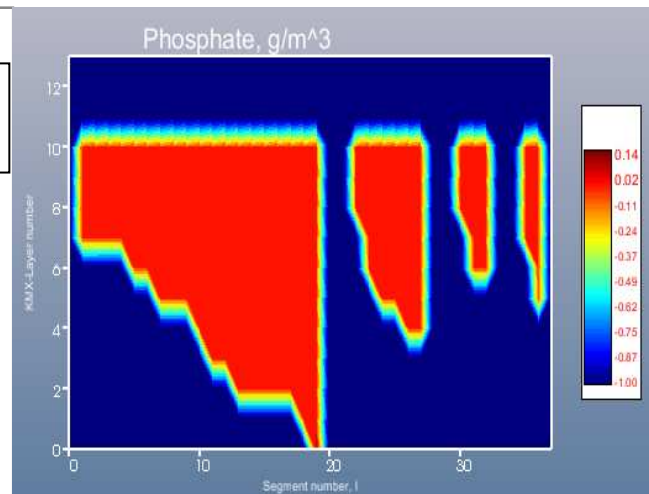
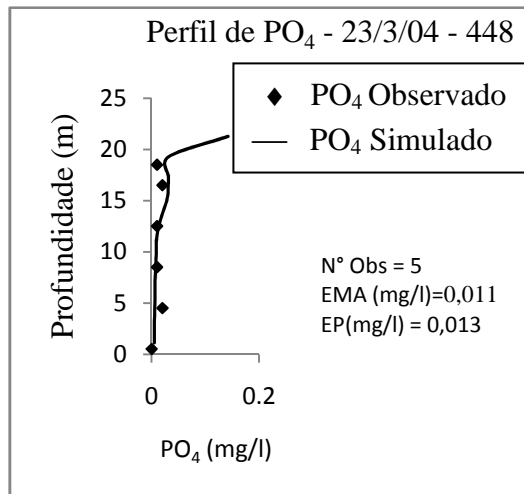
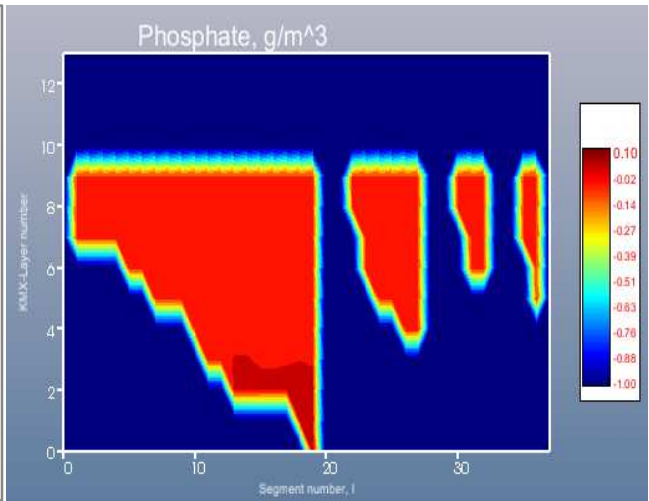
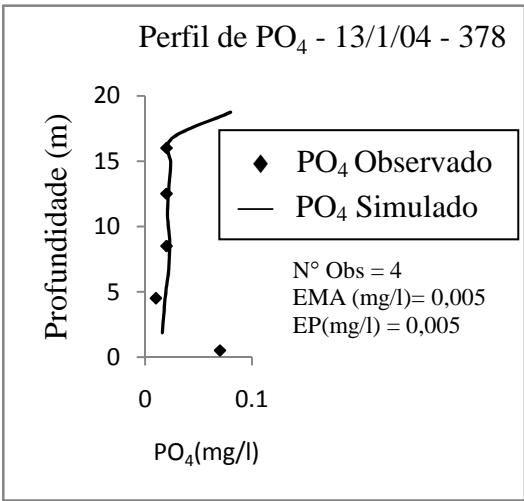
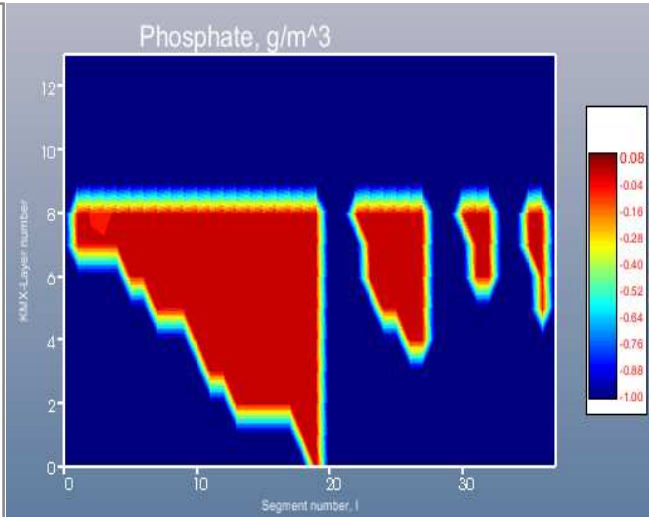
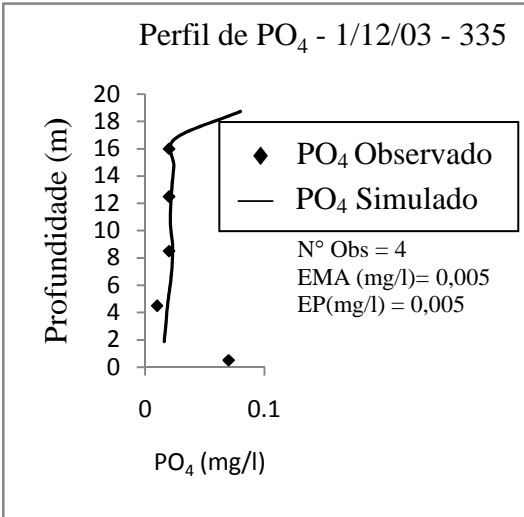


Figura 5.4 – Concentrações de fosfato próximo à barragem, simulados com o modelo CE-QUAL-W2.





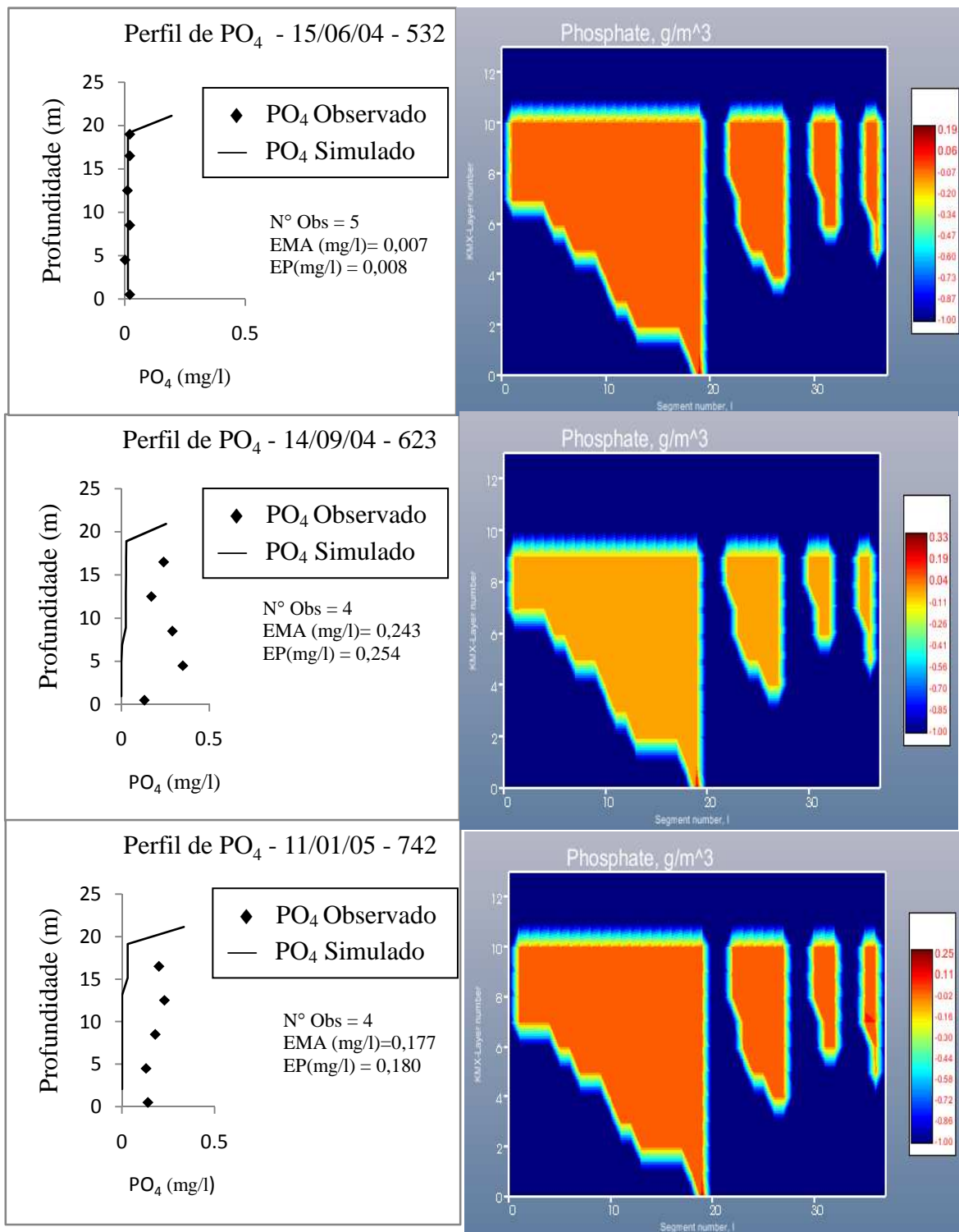


Figura 5.5-Perfis de concentração de fosfato próximos á barragem, simulados pelo modelo CE-QUAL-W2 versão 3.6.

As figuras (5.4 a 5.5) mostram que a concentração de P-PO₄ variou de 0,00mg/l a 0,21 mg/l, na camada logo abaixo do superfície d'água . A Resolução CONAMA 357/05 “dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e de outras providências”. Considera-se o lago do Descoberto como um corpo d'água pertencente à classe 2 de águas doce, o qual pode destinar-se:

“ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA n.º. 274, de 2000; à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e a aquicultura e a atividade de pesca.”
(Res. CONAMA 357/05)

De acordo com essa resolução, apenas os valores de fósforo total de ambientes lóticos são disponíveis. Nota-se que as concentrações de fósforo reativo observadas por Koide (2006) no perfil do corpo d'água chegam a uma concentração de 0,35 mg/l, principalmente no mês de setembro, as quais são superiores ao limite de fósforo total permissível para corpos d'água de classe 2. Isso pode ser atribuído principalmente à transição do período da seca para o período chuvoso, em que ocorre diminuição do nível d'água concentrando as cargas no reservatório.

Comparando-se os valores simulados com os observados, verificam-se erros expressivos nas concentrações de P-PO₄, de maneira especial no período chuvoso. A provável justificativa de tal resultado, além dos erros experimentais e do modelo, encontra-se na possibilidade da existência de cargas difusas originadas de escoamentos pluviais do município de Águas Lindas - Goiás e entorno, e à fontes domiciliares, agrícolas e industriais de esgoto, não estimados pelo modelo.

As cargas de fósforo são consideravelmente altas pela característica do município em possuir uma taxa de crescimento populacional elevada, especialmente durante os últimos anos. Dessa forma, as fontes domiciliares não tratadas lançam detergentes sintéticos no reservatório, bem como as atividades agrícolas marginais ao lago que lançam suas cargas

difusas. Em relação aos perfis verticais, o EMA variou entre 0,005mg/l a 0,243mg/l, enquanto que o erro padrão esteve entre 0,005mg/l a 0.254mg/l.

5.3.2 - N-Amoniacal

De acordo com estudos de sensibilidade, utilizou-se a taxa de nitrificação (NH4DK) de 0,005 dia⁻¹. Já no caso da existência de condições anóxicas durante o ano simulado, utilizou-se o valor de 0,005 dia⁻¹ para o coeficiente relacionado à liberação de nitrogênio amoniacal pelo sedimento (NH4REL). As figuras 5.6 e 5.7 demonstram os resultados simulados da concentração de N-amoniacoal durante o período pesquisado, e os perfis verticais na coluna d'água, respectivamente.

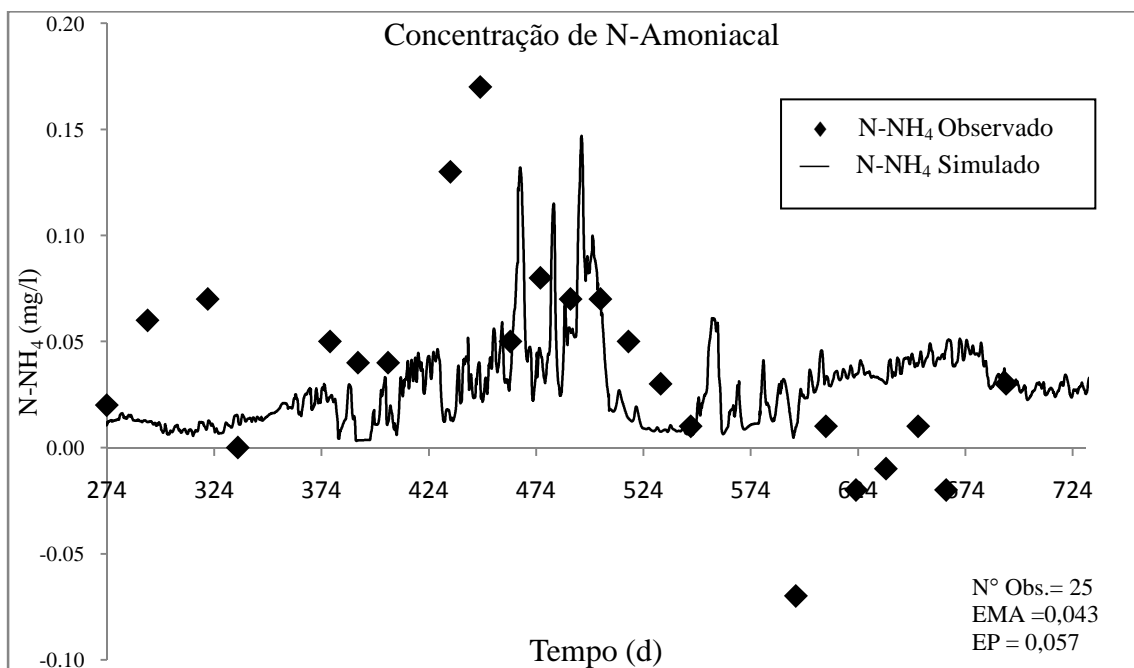
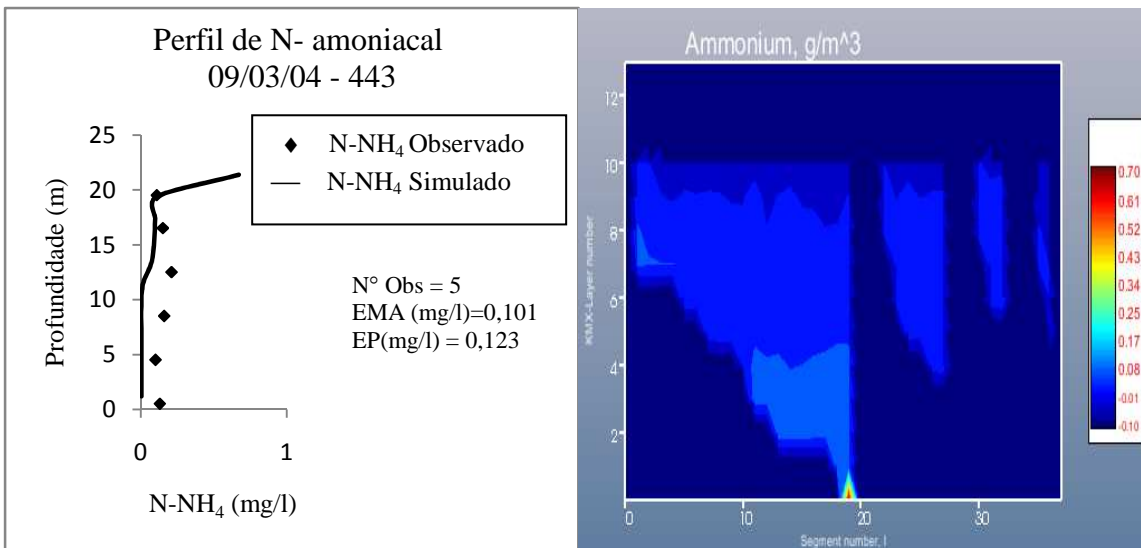
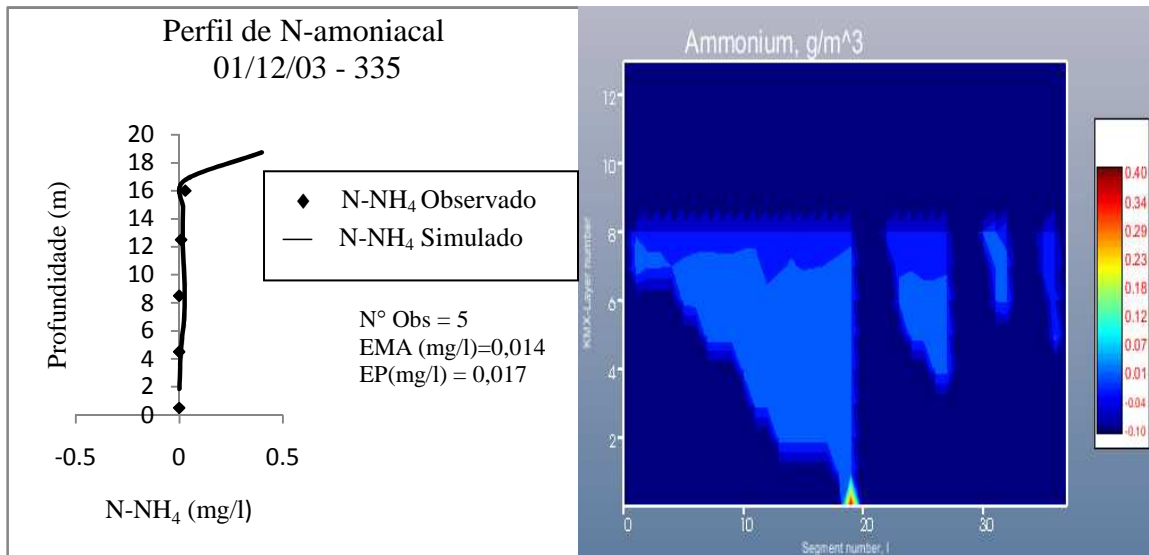
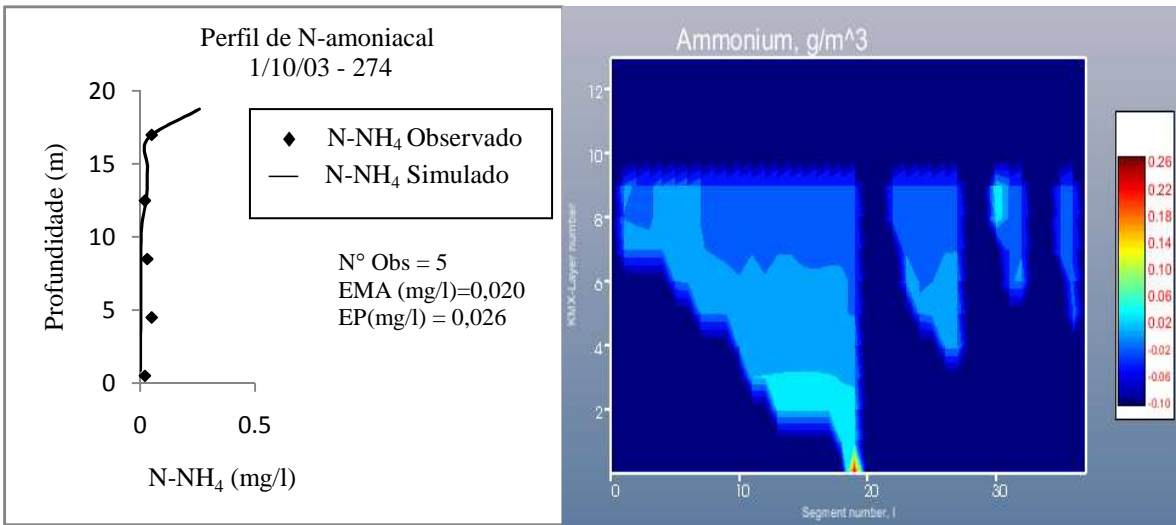


Figura 5.6 - Concentrações de N-amoniacoal, próximo à barragem, simulados com o modelo CE-QUAL-W2.



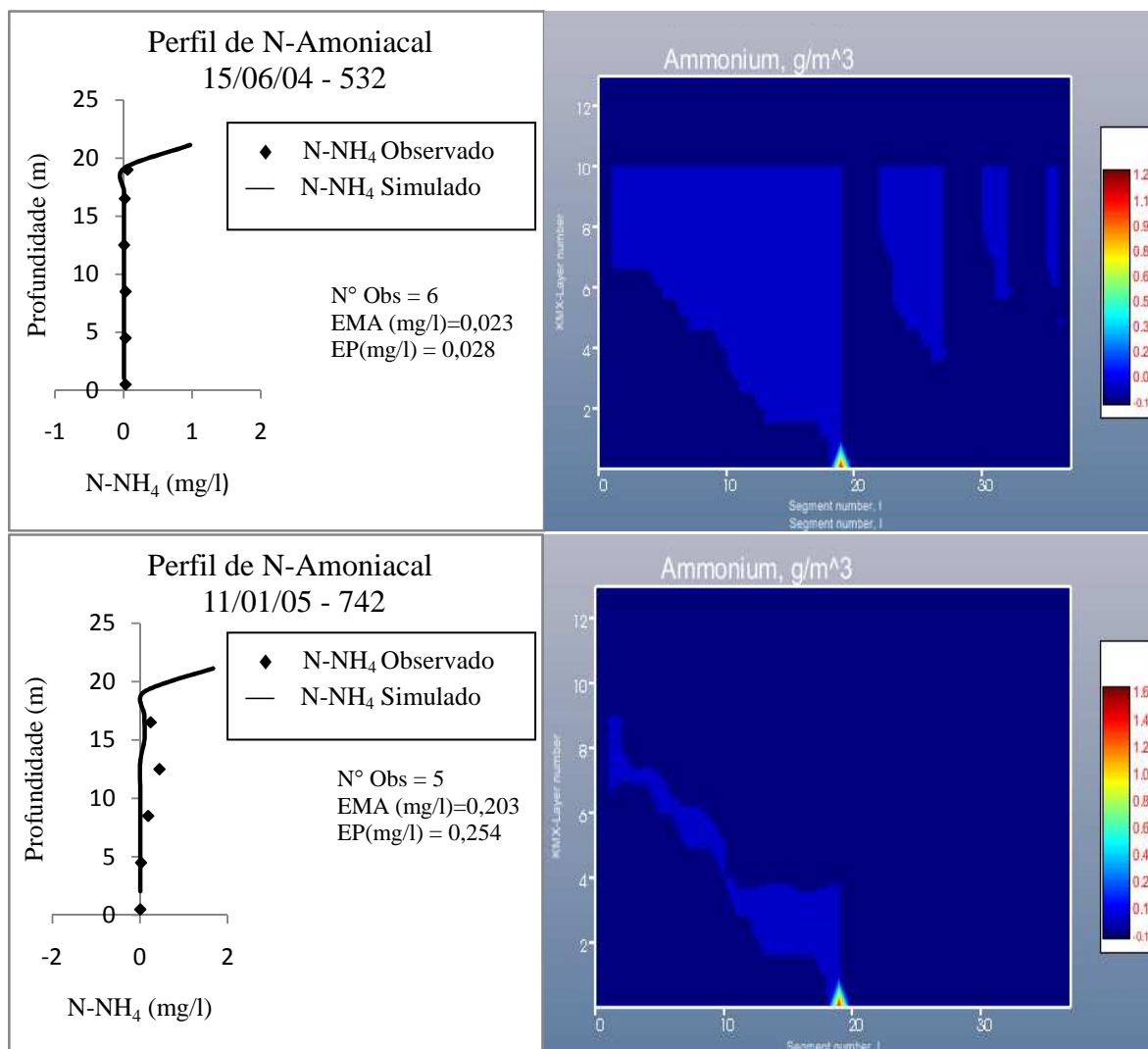


Figura 5.7 - Perfis de concentração de N-amoniaco, próximos à barragem, simulados pelo modelo CE-QUAL-W2 versão 3.6.

Os valores de N-amoniaco medidos se apresentaram entre $-0,07\text{mg/l}$ e $0,17\text{mg/l}$. Entretanto, os resultados da modelagem compreenderam o intervalo entre $0,004\text{mg/l}$ e $0,15\text{mg/l}$ para a variação temporal da concentração próximo à barragem do Descoberto. Quanto aos perfis verticais, as variações das concentrações medidas ficaram entre $-0,03\text{mg/l}$ e $0,45\text{mg/l}$, porém os resultados da simulação tiveram seus valores entre $0,00\text{mg/l}$ e $1,27\text{mg/l}$.

Para se avaliar os índices de qualificação dos resultados de acordo com a Resolução CONAMA 357/05, analisa-se em paralelo o pH do meio lacustre, devido à dissociação do

constituente na sua forma livre, possuindo nesse contexto, uma característica tóxica e prejudicial ao copo d'água e sua biota (Souza,2006). Segundo Koide (2006), os valores do pH durante o período simulado permaneceram abaixo de 7,5 e as concentrações de nitrogênio amoniacal, tanto medido quanto simulado, continuaram abaixo do limite para a classe 2 que é de 3,7 mg/l.

Verifica-se que durante todo o período simulado, a concentração simulada de N-amoniacoal encontra-se abaixo dos valores medidos, exceto nas regiões mais profundas do lago, que possivelmente são envolvidas com ressuspensão de sedimentos, aumentando assim a concentração do fundo. A justificativa para tal fato deve-se possivelmente aos erros associados à pouca quantidade de dados experimentais disponíveis, aos erros experimentais e do modelo. A respeito dos perfis verticais, o EMA variou entre 0,01mg/l a 0,20mg/l, enquanto que o erro padrão esteve entre 0,02mg/l a 0.25mg/l.

Outra fonte de erro encontra-se nas cargas provenientes dos efluentes urbanos e rurais. Observa-se, claramente, nas figuras referentes aos perfis verticais, o aumento das concentrações medidas durante o período chuvoso de outubro a abril, quando provavelmente os nutrientes, urbano e rural, são carregados ao lago e aos seus tributários, principalmente nas proximidades à barragem.

5.3.3 - Nitrato + Nitrito ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$)

Como já foi dito anteriormente, os íons nitrato e nitrito são estimados conjuntamente em uma única variável. Verificou-se que $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ sofrem grande influência do parâmetro de nitrificação, como era de se esperar. Em seguida, foram estabelecidos, após análises e ajustes, os valores de NO3DK de 0,03 dia⁻¹, e no caso da presença de condições anóxicas no sistema, o valor de NO3S de 0,01 m/dia.

As figuras 5.8 e 5.9 apresentam os resultados simulados e os valores medidos, obtidos próximos à barragem do descoberto, destacando sua variação temporal na superfície e em perfis verticais, respectivamente.

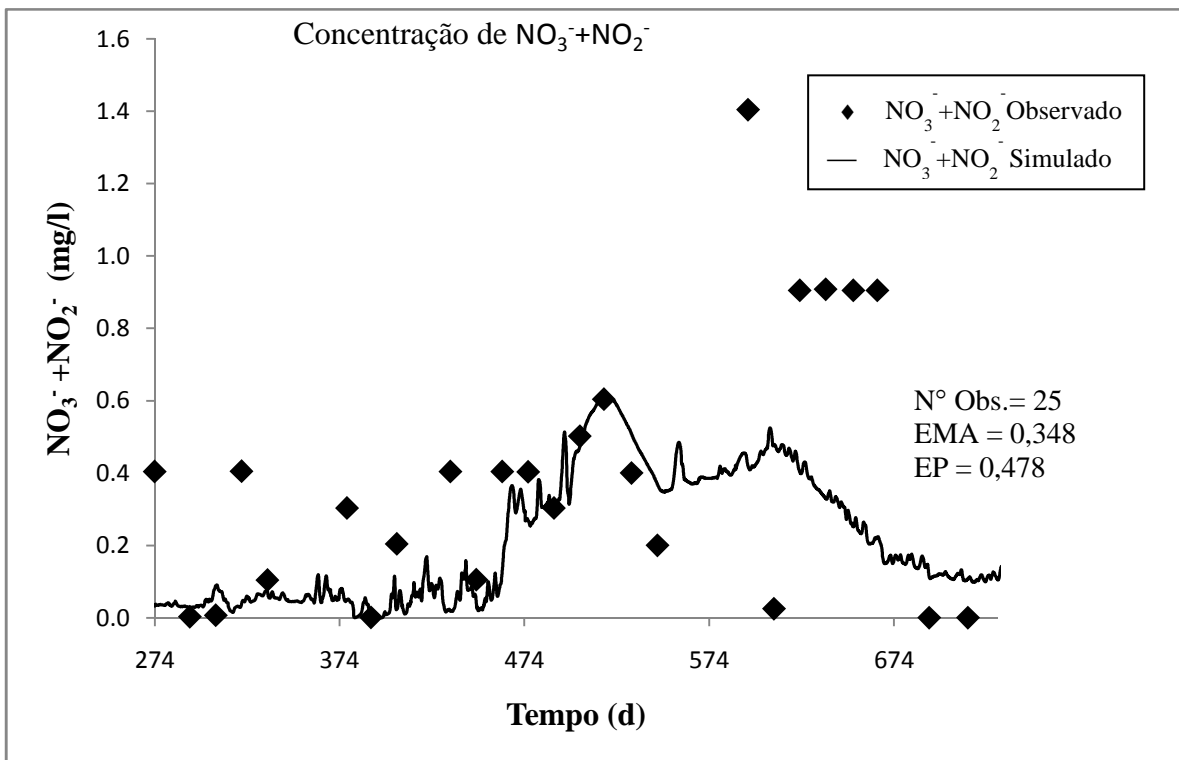
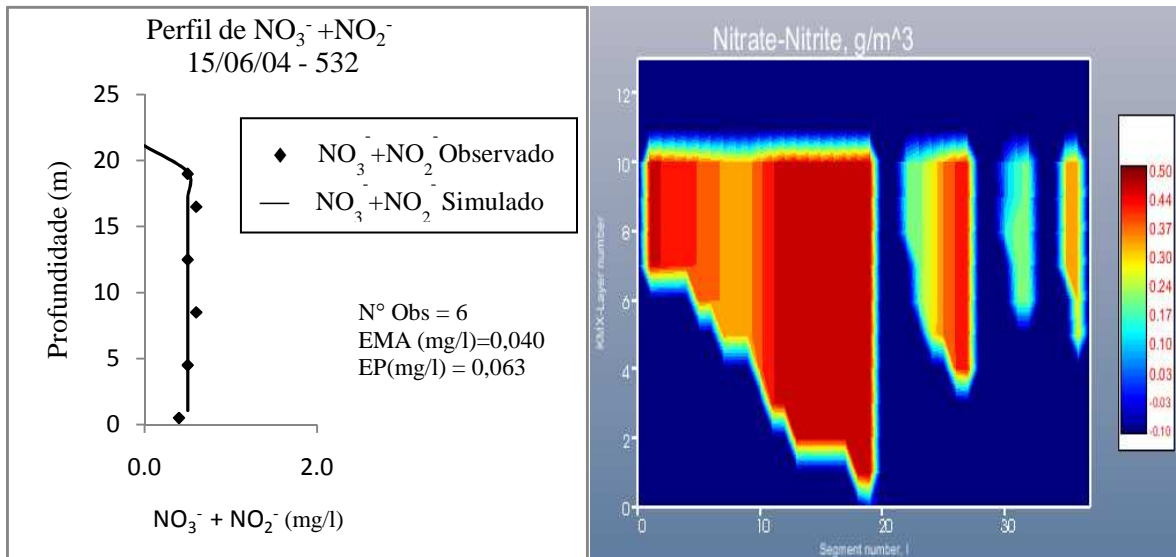
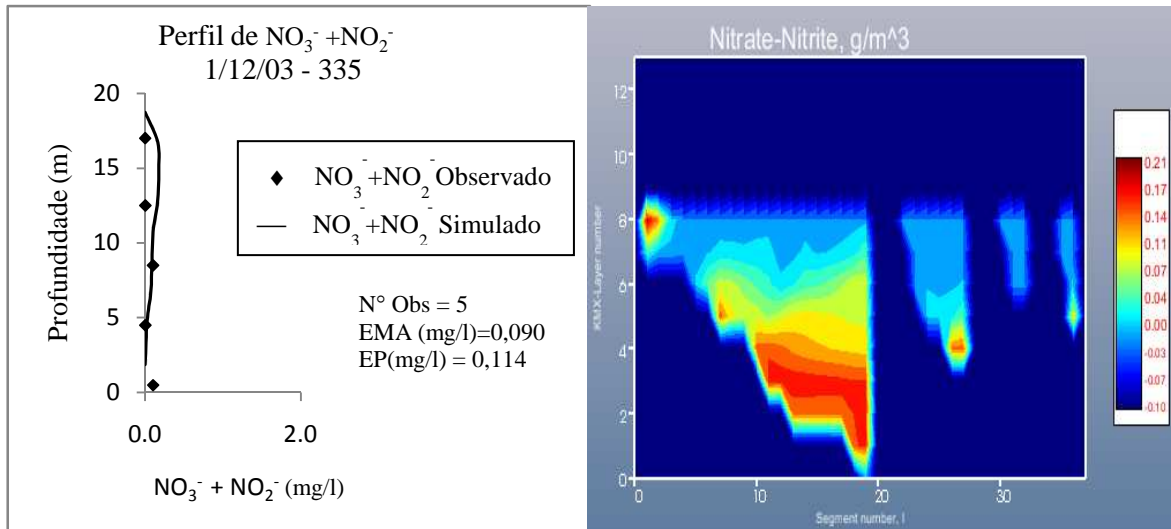
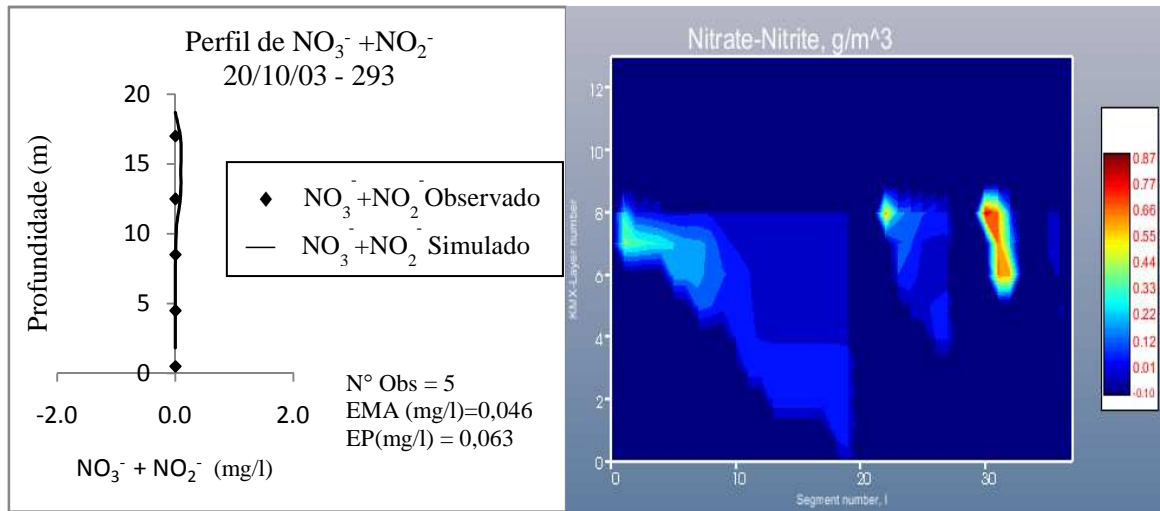


Figura 5.8 - Concentrações de nitrato+nitrito da superfície, próximo à barragem, simulados com o modelo CE-QUAL-W2.



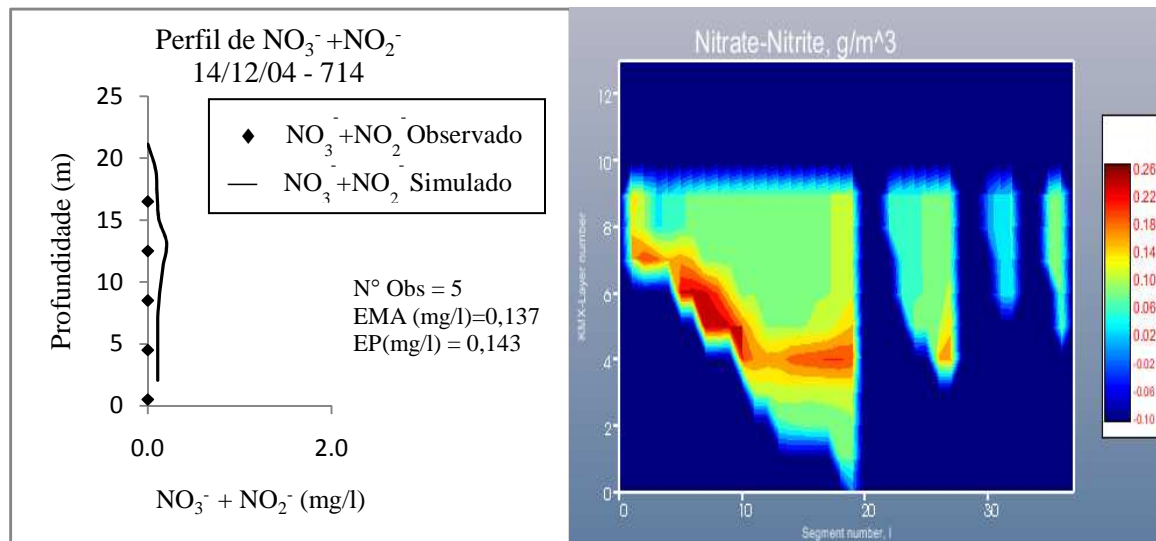
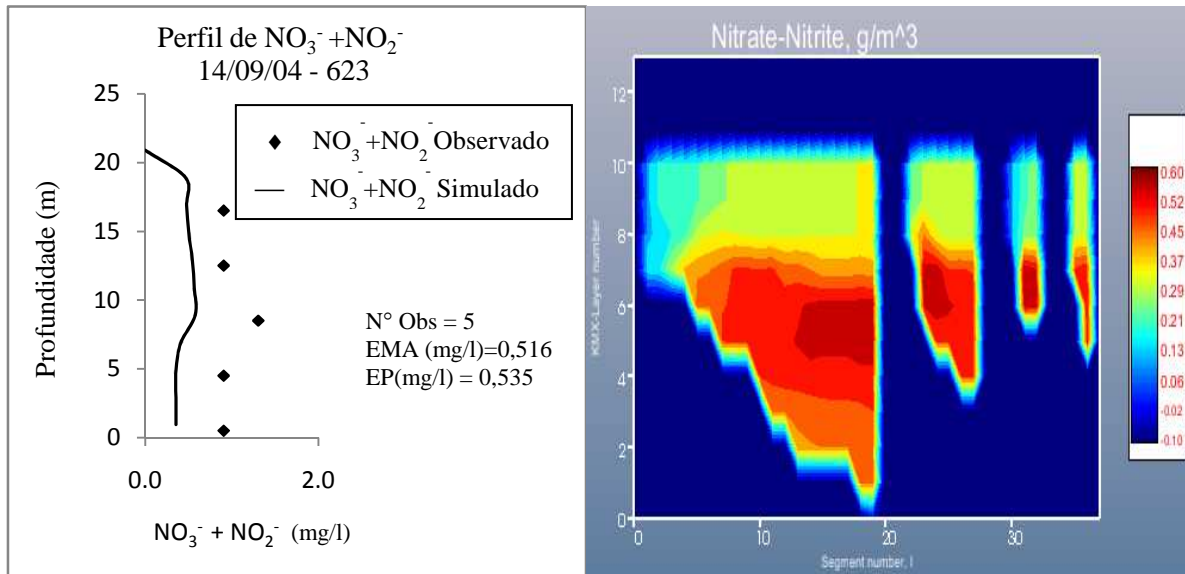


Figura 5.9 – Perfis de concentração de Nitrato+Nitrito, próximos à barragem, simulados pelo modelo CE-QUAL-W2 versão 3.6.

Observa-se que a concentração mínima de nitrato+nitrito medida é de 0,000mg/l e a máxima é de 1,404mg/l. Já os valores simulados variam entre 0,000mg/l e 0,577mg/l. Segundo a resolução do CONAMA 357/05, para a classe 2 de corpos d'água, ambos os valores medidos e simulados, encontraram-se dentro dos padrões exigidos, isto é, abaixo de 10mg/l. As análises estatísticas evidenciaram que o EMA variou de 0,040mg/l a 0,516mg/l, enquanto que o EP variou de 0,063mg/l a 0,535mg/l.

Segundo discussões anteriores nos resultados obtidos para temperatura da água, foi observada a estratificação da coluna d'água do lago nos meses caracterizados como verão. Nas figuras dos perfis verticais (figura 5.9) nota-se nos meses de outubro e dezembro a estratificação decorrente das mudanças de temperatura da região. As camadas superiores tornam-se mais quentes, conseqüentemente menos densas, e as camadas inferiores mais frias e mais densas. Tal fenômeno dificulta a mistura da coluna d'água, estratificando também a concentração dos constituintes, como o de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$, diferentemente do que acontece no mês de junho.

Verifica-se uma discrepância comparando-se os dados experimentais com os simulados, principalmente no mês de setembro, quando ocorre a transição da estação seca para a chuvosa. O aumento da concentração de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ocorre provavelmente pela diminuição do nível de água, contribuindo para uma maior concentração de poluentes na coluna d'água.

Quanto ao período chuvoso, os erros além dos experimentais, intrínsecos ao modelo e à quantidade de dados inseridos na simulação, podem estar associados a cargas de afluentes de escoamentos urbanos e rurais. Basicamente, é correto afirmar que a presença de cargas de nutrientes originados de áreas marginais, em especial, do lado direito do reservatório, onde há conhecimento da existência de produtores rurais no local. Dessa forma, no período da chuva, uma grande quantidade de cargas de nutrientes é lançada no lago pelas águas pluviais.

5.3.4 - Oxigênio Dissolvido (OD)

Segundo análises estatísticas, utilizou-se para as simulações o coeficiente de desoxigenação (KBOD) com valor de $0,25 \text{ dia}^{-1}$; o coeficiente de temperatura de Arrhenius (TBOD) de 1,0147; a relação DBO_5 com a demanda bioquímica de oxigênio última (RBOD) de 1,85 ; e a demanda de oxigênio pelo sedimento (SOD) foi entre 0,5 a $1,7 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dia}$ para os segmentos.

De acordo com as recomendações de Cole & Wells (2003), e análises estatísticas, como sensibilidade, utilizou-se as seguintes relações estequiométricas para a degradação de matéria orgânica: CBODC igual a 32%, CBON igual a 6% e CBODP igual a 0,4%.

É importante citar que a concentração de OD sofre influências de interações químicas, físicas e biológicas características do ambiente, como temperatura do ar e da água, nitrificação, decomposição de matéria orgânica, velocidade da água e do vento, entre outras. Dessa forma, o erro oriundo de um desses parâmetros, afetará o resultado final do OD.

Os resultados obtidos pela simulação de oxigênio dissolvido e os respectivos dados experimentais, são apresentados nas figuras 5.10 e 5.11.

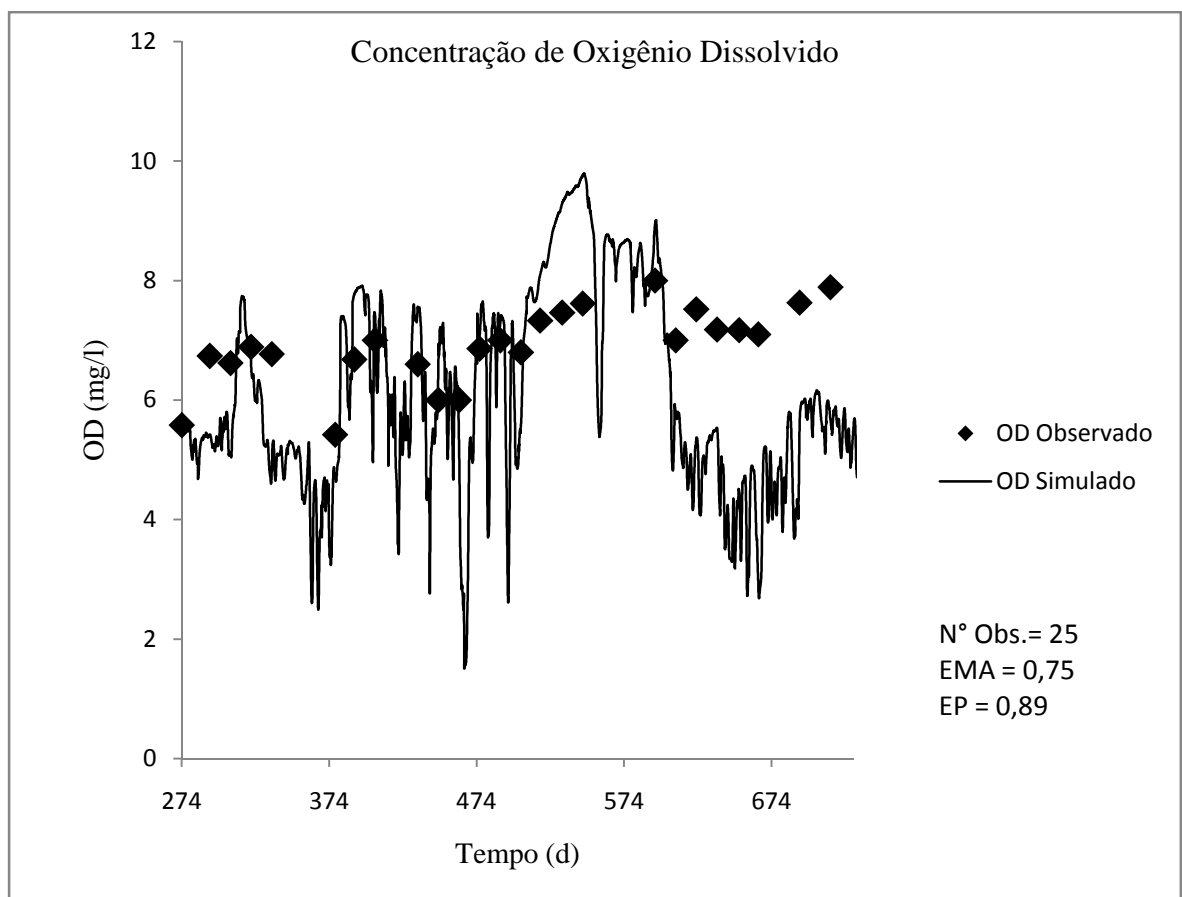
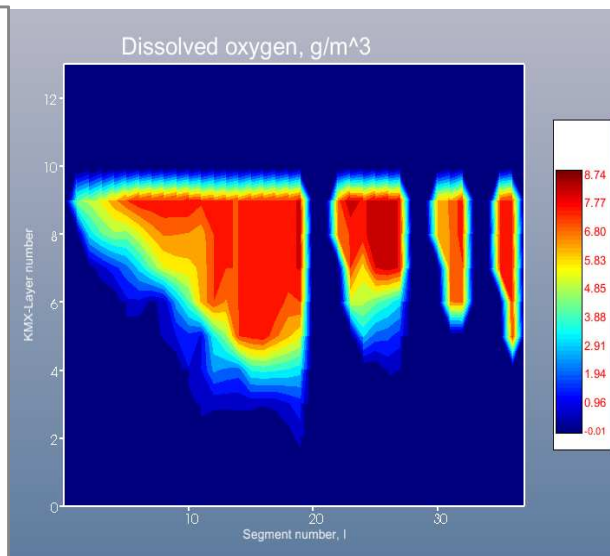
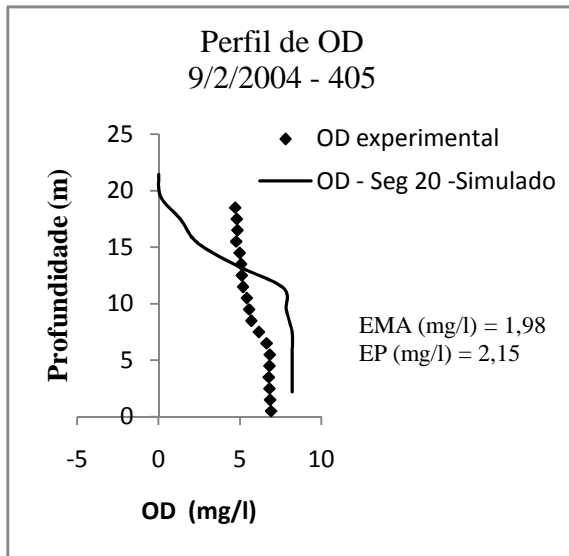
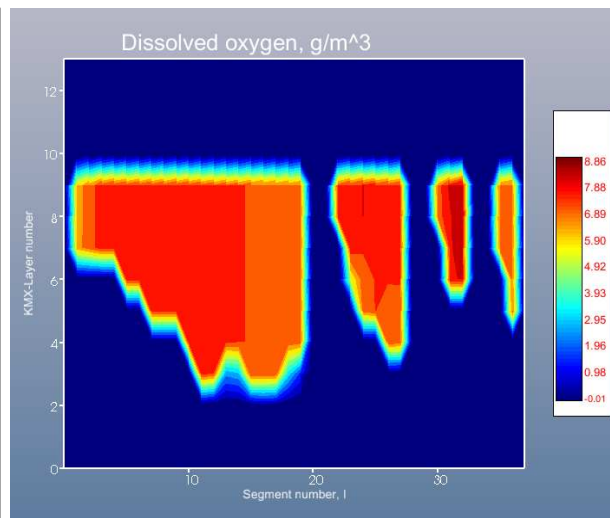
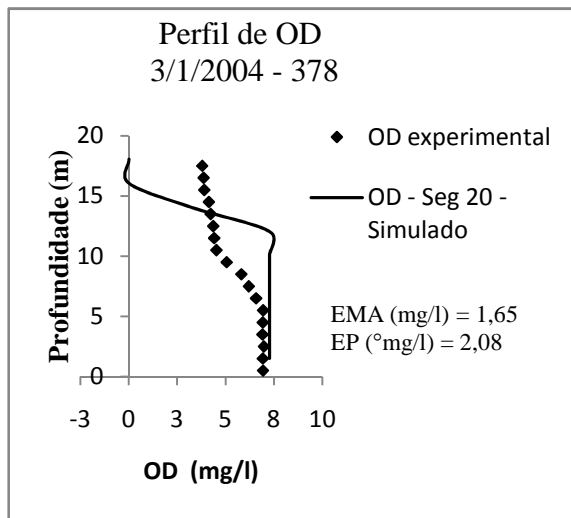
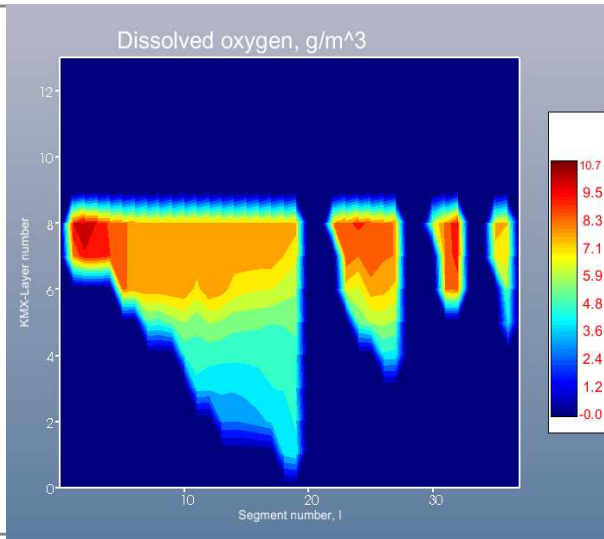
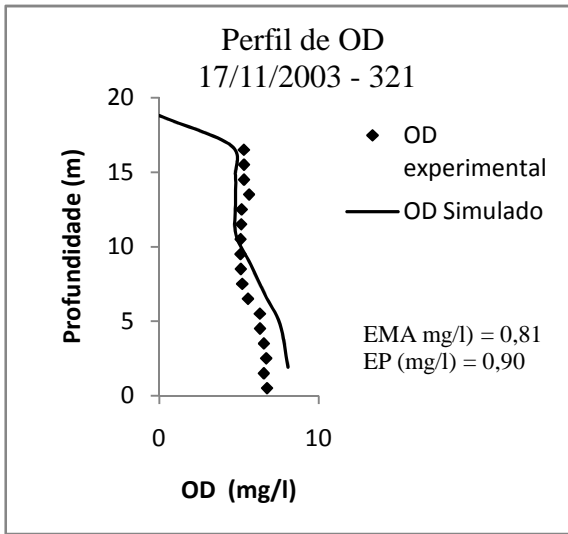


Figura 5.10 -Concentrações de oxigênio dissolvido, na superfície da água e próximo à barragem, simulados com o modelo CE-QUAL-W2 .



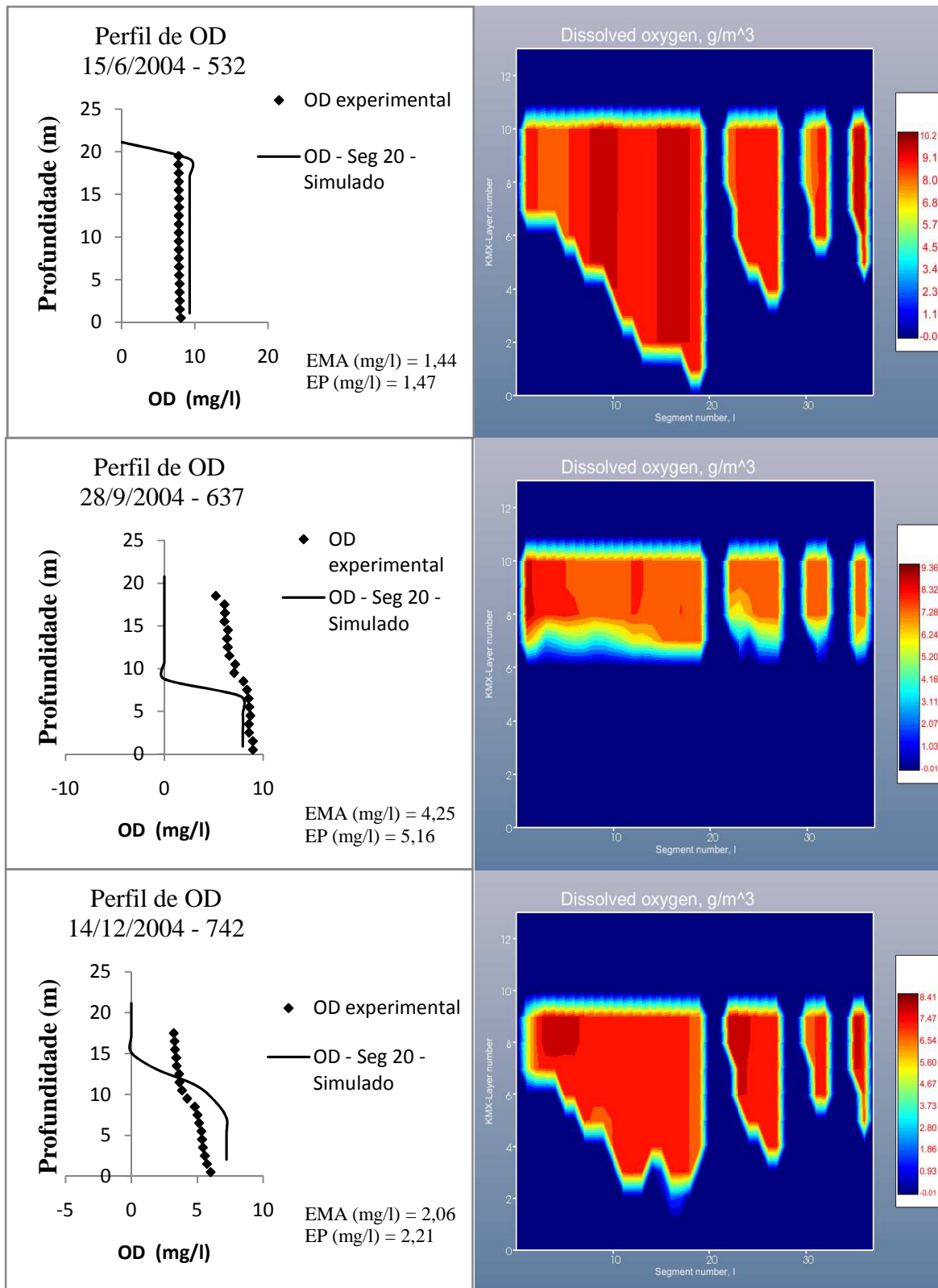


Figura 5.11 - Perfis de concentração de OD, próximos á barragem, simulados pelo modelo CE-QUAL-W2 versão 3.6.

Observa-se na figura 5.10 a variação das concentrações de OD, próxima á superfície da água, no decorrer do período em análise. Os dados experimentais abrangeram o intervalo de 5,58mg/l a 7,89mg/l. De acordo com a resolução do CONAMA 357/05, o padrão de OD para corpos d'água classe 2, deve ser $\geq 5\text{mg/l O}_2$, isto é, o reservatório preenche o requisito exigido.

O EMA entre a simulação e os dados medidos foi de 0,75 mg/L e o EP de 0,89mg/l, para a quantidade de dados experimentais disponíveis. Constata-se no caso, que as maiores divergências encontram-se nos períodos de chuva, entre os meses de outubro a abril. A queda brusca de OD no final do período simulado pode ser explicada por uma entrada errônea de matéria orgânica, provocada provavelmente por erros em entradas de dados de vazão no ambiente lacustre, causando o consumo do OD presente.

Os valores experimentais de OD referentes aos perfis verticais, foram de 3,31mg/l a 7,95mg/l. Já os resultados simulados, abrangeram valores entre 0,00mg/l e 9,31mg/l. Dessa maneira, o EMA variou de 0,81mg/l a 4,25mg/l, conquanto o EP variou de 0,90mg/l a 5,16 mg/l. Nota-se que os menores valores encontram-se nas camadas inferiores da coluna d'água. Existe uma grande probabilidade que o OD disponível nessas camadas seja consumido pela demanda bentônica e ressuspensão de nutrientes desta, além da matéria orgânica do fundo.

Ademais, constata-se que nos meses de janeiro, outubro, novembro e dezembro ocorreu estratificação térmica com separação de camada(s) na coluna d'água, o que poderia explicar as diferenças encontradas nas concentrações de OD nas respectivas profundidades obtidas pela simulação.

6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa apresentou o problema da eutrofização dos corpos d'água, fenômeno que consiste na perda da qualidade do corpo d'água com o aumento dos nutrientes disponíveis no ambiente aquático, podendo ocasionar floração de algas seguida pela diminuição da taxa de OD, mortandade de peixes, mau cheiro, entre outros. Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi modelar bidimensionalmente a temperatura e a qualidade da água do Lago do Descoberto, com ênfase nos parâmetros fósforo, nitrogênio e OD, visando à criação de dados de apoio à tomada de decisões relativa à contenção do processo de eutrofização desse corpo d'água, possibilitando futuras simulações de cenários desse reservatório.

O Lago Descoberto, localizado na divisa entre DF e GO, foi selecionado para a presente pesquisa por apresentar, nos últimos anos, mudanças na qualidade de água que podem levar à eutrofização da água, e também por ser um importante reservatório de abastecimento de água do DF, possuindo uma área superficial de 12,55 Km².

Mediante pesquisa bibliográfica, foram identificados: os parâmetros que definem a qualidade de água; as possíveis fontes de poluentes que os corpos d'água podem receber; a relação dos nutrientes limitantes com o ambiente aquático; a origem e histórico da limnologia no Brasil e no mundo; a modelagem da qualidade de água, exemplos de modelos e evolução destes. Discutiu-se também, mais detalhadamente, o modelo CE-QUAL-W2 que foi utilizado nas simulações realizadas, incluindo algumas de suas equações, como por exemplo, as da área de conhecimento de Mecânica dos Fluidos, suas equações de conservação de massa e quantidade de movimento entre outras.

Para a realização das simulações, verificação, calibração e confirmação do modelo foram empregados dados experimentais obtidos pelos relatórios dos respectivos projetos: “Definição De Requerimentos De Resolução Espacial E Temporal Para Monitoramento Da Quantidade E Qualidade Da Água Em Bacias Hidrográficas” (Koide, 2006) e “Estudos de Concepção e de Viabilidade Técnica e Econômica para Elevação da Crista do Vertedouro da Barragem do Rio Descoberto, do Distrito Federal” (CAESB, 2003).

Quanto às características hidrodinâmicas do reservatório, foi constatado:

- a dificuldade na montagem do arquivo batimétrico sem conhecimentos necessários para tal, como por exemplo, conceitos topobatimétricos e programas para geoprocessamento de imagens;
- a dificuldade em se obter a estabilidade hidrodinâmica do modelo, quando da existência de segmentos com o número reduzido de camadas em comparação com os demais. Tal fato exige, por exemplo, a diminuição do passo de tempo ou a correção da batimetria, vazão e declividade do corpo d'água.
- resultados satisfatórios das vazões e elevações do nível de água, após alcance da estabilidade hidrodinâmica. As elevações do nível de água obtiveram um erro médio absoluto de aproximadamente 1% no segmento próximo a barragem do reservatório.

De acordo com a modelagem dos parâmetros de qualidade da água, destacam-se as seguintes conclusões:

- Apesar do número limitado de dados experimentais, o modelo simulou satisfatoriamente os parâmetros de interesse. Os melhores resultados alcançados foram para a temperatura da água, OD e P-PO₄.
- A temperatura da água, primeiro parâmetro a ser simulado, teve um erro de 5,64%. Confirmou-se a grande influência da radiação solar na temperatura da água, bem como a vazão dos tributários e seus valores de contorno. Foi verificada a utilidade favorável dos perfis verticais gerados pelo modelo, tanto seus dados de saída numéricos, quanto da visualização gráfica. As estratificações térmicas ocorridas durante o período simulado foram facilmente analisadas graficamente, incluindo também os resultados dos demais parâmetros.
- Sabe-se que distribuição do oxigênio na água afeta de maneira expressiva a solubilidade de muitos nutrientes inorgânicos. As mudanças na disponibilidade de nutrientes possivelmente geraram um ambiente anaeróbico, influenciando também nos resultados de outros parâmetros, principalmente nos últimos meses simulados. O erro médio da concentração de OD foi de 0,75mg/l, para os resultados da camada

superior do lago. Os erros médios referentes aos seus perfis verticais variaram entre 0,81mg/l e 4,25mg/l.

- O PO_4 , N-amoniacoal e $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-)$ tiveram influências e erros possivelmente associados a dados de contorno, à escassez de dados experimentais e a cargas difusas, estas originadas por efluentes domiciliares, industriais e de mineração não computadas no modelo. Os EMA's de concentração obtidos foram respectivamente 0,024mg/l, 0,043mg/l e 0,348mg/l, correspondente à camada superficial do segmento relacionado à barragem do lago.
- Como esperado, as maiores concentrações de nutrientes foram observadas, em geral, nos meses que abrangem o período chuvoso. Confirmando que quanto maior a vazão dos seus afluentes, maior será a entrada de cargas poluentes. Constatou-se ainda a possível existência de cargas difusas não incluídas no modelo, as quais geraram erros entre dados experimentais e simulados.

Apesar das dificuldades encontradas durante o processo da implementação dos dados no modelo e dos erros gerados, julga-se que a aplicação do modelo CE-QUAL-W2 versão 3.6 ao Lago do Descoberto, obteve êxito com a metodologia utilizada e com os resultados alcançados no processo.

Recomendações:

Recomenda-se, para trabalhos futuros sobre o Lago do Descoberto, uma redução de erros nas etapas de calibração e confirmação, e com a obtenção de mais dados experimentais. É interessante a inclusão de variáveis de estado como algas e matéria orgânica dissolvida e particulada. Sugere-se também a inclusão de cargas difusas, como as cargas oriundas do município de Águas Lindas de Goiás, pela sua alta taxa de crescimento populacional observada durante esses últimos anos. Através das simulações é possível obter resultados referentes à qualidade da água do Lago, permitindo conclusões relevantes à dinâmica do mesmo, e cenários prognósticos que poderão contribuir para estudos da UnB, CAESB e demais interessados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, S. C. S. (2005). *Modelos De Simulação Baseados Em Raciocínio Qualitativo Para Avaliação Da Qualidade Da Água Em Bacias Hidrográfica*, Tese de Doutorado, Instituto de Biologia - Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, 218 f.
- APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association), WEF (Water Environment Federation) (1995). "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". 19. Ed. Washington, EUA.
- Arcifa, M.S. (1972). "*Cladoceros planctônicos e aspectos de eutrofização da Represa de Americana no Estado de São Paulo*", Dissertação de Mestrado, Instituto de Biologia, Universidade de São Paulo, 65f.
- Avila, V. B. (2005). *Relação Entre O Uso E Manejo Do Solo Em Uma Bacia Rural E A Contribuição De Nitrogênio, Fósforo E Sedimentos A Corpos Hídricos*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental-Programa de pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 114f.
- Banco Mundial (2005). *P089440-Projeto Brasília Sustentável-7326*. Disponível em: <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/HOMEPORTUGUESE/EXTPAIS/ES/EXTLACINPOR/BRAZILINPOREXTN/0,,contentMDK:21403336~pagePK:141137~piPK:141127~theSitePK:3817167,00.html>. Acesso em 25 de março de 2009.
- Barlow, C., Obregon, O. (2007). "Ce-Qual-W2 Water Quantity And Quality Model For El Cajon Reservoir". Departamento de Engenharia Civil e do Meio Ambiente. Brigham Young University. Disponível em <http://www.et.byu.edu/groups/cemexico/2007/LagoCajon/FinalPaper.pdf>. Acesso em 3 de junho de 2008.
- Bartholow, J., Hanna, R. B., Saito, L., Lieberman, D. Horn, M., (2001) "Simulated Limnological Effects of the Shasta Lake Temperature Control Device" In: *Environmental Management*, 27 (4), 609–626.
- Berger, C., Annear Jr., R. L., Wells, S. A.(2001). "Lower Willamette River Model-Model Calibration-Technical Report EWR-2-01." Escola de Engenharia e Ciências Aplicada. Universidade do Estado de Portland. Portland. Disponível em http://www.ce.pdx.edu/w2/projects_willamette_river.html. Acesso em 25 de março de 2008.

- Boegman, L., Loewen, M. R., Hamblin, P. F., Culver, D. A. (2008). “Vertical mixing and weak stratification over zebra mussel colonies in western Lake Erie” In: *Limnol. Oceanogr.*, 53(3), 2008, 1093–1110.
- Bowen, J. D. e Hirinymus, J. W. (2003). “A CE-QUAL-W2 Model of Neuse Estuary for Total Maximum Daily Load Development.” In: *Journal of Water Resources Planning and Management* Julho/Agosto. Disponível em <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?0302317>. Acesso em 14 de janeiro de 2008.
- ____ (2004). “Calibration And Verification Of A Two-Dimensional, Laterally Averaged Mechanistic Model Of The Neuse River Estuary.” Departamento de Engenharia Civil - Escola de William States. Universidade da Carolina do Norte e Charlotte. Disponível em <http://www.ncsu.edu/wrri/grants/guidelines/TitlePage.pdf>. Acesso em 14 de janeiro de 2008.
- Brasil, CONAMA (2005). Conselho Nacional de meio Ambiente, resolução nº357.
- Carmo, M. S., Boaventura, G. R., Oliveira, E. C. (2005). “Geoquímica Das Águas Da Bacia Hidrográfica Do Rio Descoberto, Brasília/Df – Brasil” In: *Quim. Nova*, 28 (4), 565-574, Brasil.
- Carvalho, A. P., Lima, V. L. A., Silva, D. G. K., Carvalho Filho, A. M. (2009). “Determinação do índice de balneabilidade do açude de Bodocongó em Campina Grande, PB, Brasil, a partir de indicadores biológicos” In: *Revista Educação Ambiental em Ação*, Ano VIII(28), junho-agosto. Disponível em <http://www.revistaea.org/artigo.php?idartigo=699&class=21>. Acesso em 14 de maio de 2009.
- Chagas, A. P. (2001). “100 anos de Nobel – Jacobus Henricus van’t Hoff.” In: *Química Nova na Escola*, nº 14, novembro, 2001. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc14/v14a05.pdf>. Acesso em 20 de fevereiro de 2009.
- Chapra, S.C., (1997). *Surface Water-Quality Modeling*. (Ed.) McGraw-Hill, Nova Iorque, EUA.
- Companhia de Saneamento do Distrito Federal – CAESB (2003). “Relatório de Reavaliação dos Estudos Hidrológicos”, vol. 1, Tomo I e II, Magna Engenharia Ltda (ed). In: *Estudos de Concepção e de Viabilidade Técnica e Econômica para*

Elevação da Crista do Vertedouro da Barragem do Rio Descoberto, do Distrito Federal, Brasília, Brasil.

- _____. (2008). “Relatório da Qualidade da Água Distribuída pela Caesb”. Março, Brasília. <http://www.caesb.df.gov.br/conteudo/meioAmbiente/sistemaDistribuicaoV2Out2008.pdf>. Acesso em 2 de abril de 2008.
- Cole, T.M. e Wells, S.A. (2002). “CE-QUAL-W2: A Two Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.5.” User’s manual. Instruction Report EL-02-1, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station (ed), Vicksburg, MS, E.U.A.
- _____. (2008). “CE-QUAL-W2: A Two Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.6.” User’s manual. Instruction Report EL-02-1, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station (ed), Vicksburg, MS, E.U.A.
- Diogo, P. A., Fonseca, M., Coelho, P. S., Mateus, N. S., Almeida, M. C., Rodrigues, A. C. (2008). “Reservoir phosphorous sources evaluation and water quality modeling in a transboundary watershed.” In: *Desalination*, 226, 200–214.
- Esteves, F. A. (1988). *Fundamentos de Limnologia*. 1. edição, Interciência (Ed.) , Rio de Janeiro.
- _____. (1998). *Fundamentos de Limnologia*. 2. edição, Interciência (Ed.) , Rio de Janeiro.
- Ferreira V. A. P., Borges, M. N., Anjos, E. F. S. (1992). “Determinação dos Aportes Totais e Carga por Unidade de área de Nitrogênio e Fósforo com Base na Caracterização do Uso do Solo nas Bacias dos Lagos Descoberto e Santa Maria-Brasília-DF.” In: *Acta Limnológica Brasiliensis Sociedade Brasileira de Limnologia*, IV, 163-174. Disponível em http://www.sblimno.org.br/acta/my_web_sites/acta_limnologica_contents4E_files/artigo%2011_vol%204.pdf. Acesso em 10 de abril de 2008.
- Ferreira, I. M. (2003). *Bioma Cerrado - Um Estudo das Paisagens do Cerrado*, tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geografia - Organização do Espaço – UNESP – Campus de Rio Claro. São Paulo, 81 p. Disponível em: [http://simposio.cpac.embrapa.br/simposio%20em%20pc210%20\(Pc210\)/trabalhos_pdf/00610_trab2_ap.pdf](http://simposio.cpac.embrapa.br/simposio%20em%20pc210%20(Pc210)/trabalhos_pdf/00610_trab2_ap.pdf). Acesso em 10 de maio de 2009.
- Filho, S. E. N. C. (2006). “Limnologia - Eventos térmicos em corpos d’água afetam organismos que ali vivem – O Clima e a Vida no ambiente aquático.” In: *Ciência*

- Hoje, vol. 38, nº 224. Brasil, 2006. Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/controlPanel/materia/resource/download/43468>. Acesso em 21 de maio de 2009.
- Flowers, J. D., Hauck, L. M.; Kiesling, R. L. (2001). “Water Quality Modeling of LakeWaco Using CE-QUAL-W2 for Assessment of Phosphorus Control Strategies.” Instituto de Pesquisas Aplicadas do Meio Ambiente do Texas. Universidade do Estado de Tarleton, EUA. Disponível em: <http://tiaer.tarleton.edu/pdf/TR0114.pdf>. Acesso em 21 de maio de 2008.
- Gomes, A. A. G (2006). Modelagem de Sistemas Naturais. In: *Revista da CBPF- Na vanguarda da Pesquisa*, 18-20. Brasil. Disponível em: <http://portal.cbpf.br/index.php?page=divulgacao.revista>. Acesso em 20 de outubro de 2007.
- Henderson-Sellers, B.; Markland, H. R. (1987). *Decaying lakes: The origins and control of cultural eutrophication*. John Wiley & Sons (ed), Nova Iorque, E.U.A.
- Henry, R. (1999). Apresentação. In: Henry, R. (ed.) *Ecologia de reservatórios: estrutura, função e aspectos sociais*. Botucatu: Fapesp, FUNDIBIO, p. 7-17. Brasil.
- IBGE (2008), Instituto Nacional de Geografia e Estatística, Brasil. Disponível em http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/taxas_anuais.shtm. Acesso em 14 de abril de 2008.
- INMET (2009). Instituto Nacional de Meteorologia, Brasil. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/>. Acesso em 14 de janeiro de 2009.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), *Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas – SPRING*. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/index.html>. Acesso em 12 de maio de 2008.
- Koide, Sérgio (coord.) (2006). “Projeto: Definição De Requerimentos De Resolução Espacial E Temporal Para Monitoramento Da Quantidade E Qualidade Da Água Em Bacias Hidrográficas” – Relatório Técnico Final, FNDCT/CT-Hidro, FINEP-FINATEC, Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos-Universidade de Brasília/UnB, outubro, Brasília, Brasil.
- Kuo, J., Lung, W., Yang, C., Liu, W., Yang, M. (2006). “Eutrophication modelling of reservoirs in Taiwan.” In: *Environmental Modelling & Software*, 21, 829-844. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VHC-4GBD81B-

[1&_user=687355&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_view=c&_acct=C000037918&_version=1&_urlVersion=0&_userid=687355&md5=5c1216d3c1871dd5e103324ed76c1c97](http://www.scribd.com/doc/13324ed76c1c97). Acesso em 6 de março de 2009.

Kuo, J.T., Yang, M.D., (2002). “Water quality modeling in reservoirs.” In: Shen, H.H., Cheng, A.H.D., Wang, K.H., Tang, M.H., (Ed.) *Environmental Fluid Mechanics-Theories and Applications*. Divisão de Engenharia Mecânica. ASCE, 377 – 420, EUA.

Laboratório da Paisagem e Conservação (2008). “Sensoriamento Remoto.”, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo. Disponível em <http://eco.ib.usp.br/lepac/bie426/AulasTodas.pdf>. Acesso em 12 de maio de 2008.

Ma, S., Kassinos, S. C., Kassinos, D. F., Akylas, E. (2008) “Modeling The Impact Of Water Withdrawal Schemes On The Transport Of Pesticides In The Kouris Dam (Cyprus)” In: *Global NEST Journal*, 10 (3), 350-358, Grécia.

Martins, Rodolfo e Porto, Mônica (2005). “Lagos Estratificação Térmica – Eutrofização” In: *Decaimento e Mistura de Poluentes no Meio Ambiente*, Universidade De São Paulo Escola Politécnica Departamento De Engenharia Hidráulica E Sanitária, maio, São Paulo. Disponível em: <http://www.fcth.br/phd/phd2460/Aulas/>. Acesso em 16 de maio de 2008.

Ministério do Meio Ambiente (MMA) e IBAMA (1998), *Plano de Gestão Ambiental – Área de Proteção Ambiental Federal da Bacia do Rio Descoberto DF/GO*. Brasília, Brasil.

Miranda, Pedro M. A. (coord.) et al. (2000). “*Ciclus - Climate Impact of Changes in Land Use - Final Report*.” Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa- FCUL. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. Disponível em: <http://www.cgul.ul.pt/projects/ciclus%20final%20report.pdf>. Acesso em: 12 de maio de 2008.

Naval, L. P., Queiroz, S. C. B., Silva, V. M.(2002). “Estratificação Térmica Em Lagoas De Estabilização: Influência Da Sazonalidade No Fenômeno” In: VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (VI SIBESA). Vitória, Espírito Santo, Brasil.

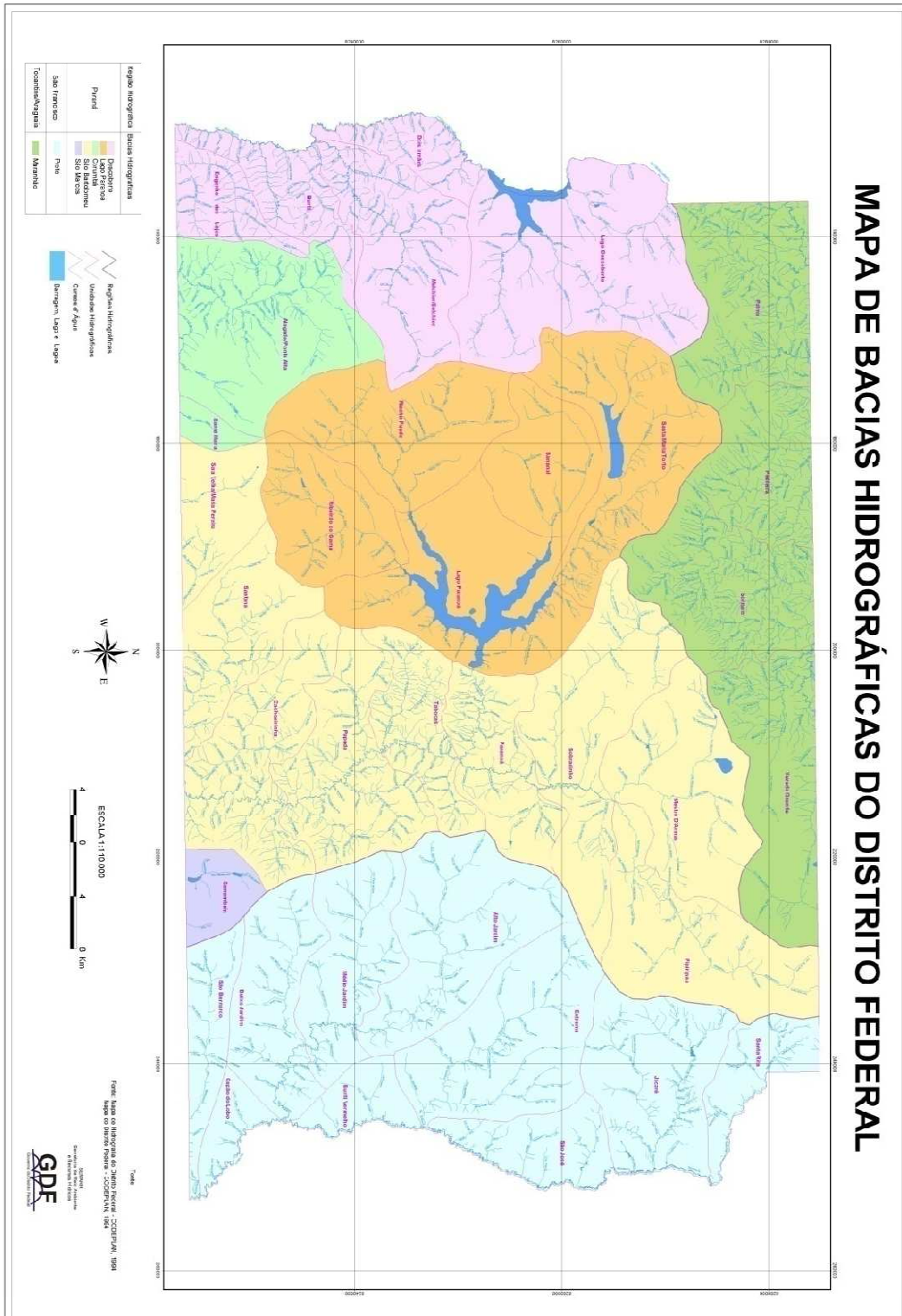
Organização Mundial Da Saúde e Organização Pan-Americana Da Saúde (1999). *Água e Saúde*, Coleção: Autoridades locais, saúde e ambiente – Água, Brasil.

- Orlob, G. T. (1983). "One-dimensional models for simulation of water quality in lakes and reservoirs." In: G.T. Orlob, *Mathematical Modeling of Water Quality: Streams, Lakes, and Reservoirs*, Wiley (Ed.), Nova York, p. 227–273.
- Pompêo, M., Carlos, V. M. (2004) "A Ecologia e Limnologia no Brasil", Universidade de São Paulo/USP, Instituto de Biologia/IB, Departamento de Ecologia. São Paulo, Brasil. Disponível em http://www.ib.usp.br/limnologia/Limnologia_no_Brasil/. Acesso dia 4 de fevereiro de 2009.
- Prates, S. H. (2000). "Contribuição À Gestão Ambiental Da UHE Dona Francisca Através De Modelo De Simulação De Qualidade De Água." In: XXVII *Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental- ABES*. Porto Alegre, Brasil. Disponível em: www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliagua/v-017.pdf. Acesso em: 8 abr. 2008.
- Ribeiro, M. O. (2001). *Estudo da Poluição e Autodepuração nos Rios Melchior e Descoberto, na Bacia do Descoberto – DF/GO, com auxílio de modelos matemáticos de simulação de qualidade da água, para estudos de seu comportamento atual e futuro*, Dissertação de Mestrado, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Universidade de Brasília, 177 p.
- Rocha, J. C., Rosa, A. H., Cardoso, A. A. (2004), *Introdução a Química Ambiental*, Bookman (ed), Porto Alegre.
- Rocha, A. A. (1975) *Estudo sobre a fauna bentônica da Represa de Americana no Estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Biologia, Universidade de São Paulo/USP. São Paulo, 65 f.
- Shimizu, G.Y. (1981). *Represa de Americana: um estudo da distribuição batimétrica da fauna bentônica*, Tese de doutorado, Instituto de Biologia, Universidade de São Paulo. 117 f. São Paulo, Brasil.
- Silva, H. L. G. (2006). *Modelagem bidimensional do fósforo com vistas a gestão de bacias hidrográficas – estudo de caso: reservatório de Fiú*, Tese de Doutorado, Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 124 p.
- Soares, C.B.P. (1999). *Simulação da Qualidade da Água da UHE Funil com o Modelo CE-QUALW2: Comparação entre Duas Formas de Representação Espacial*. XV SNPTEE, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu, GIA / 18.

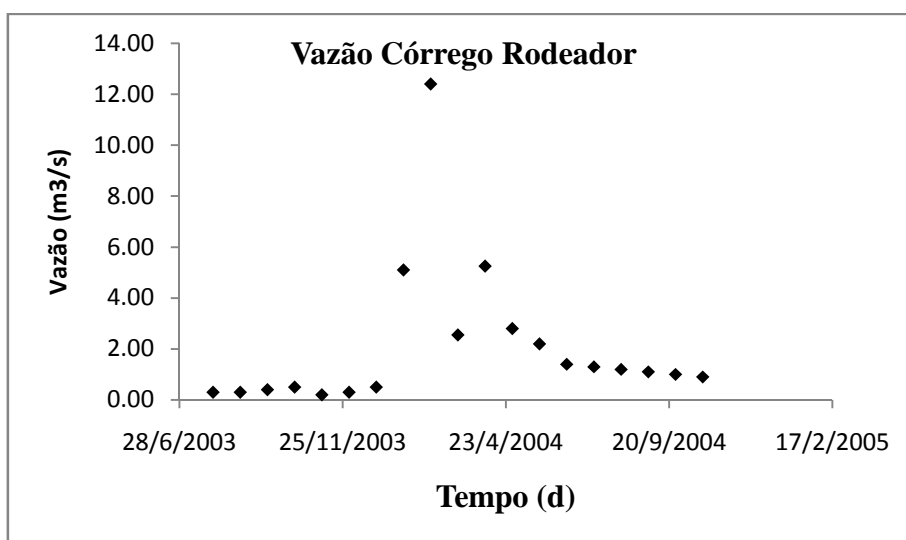
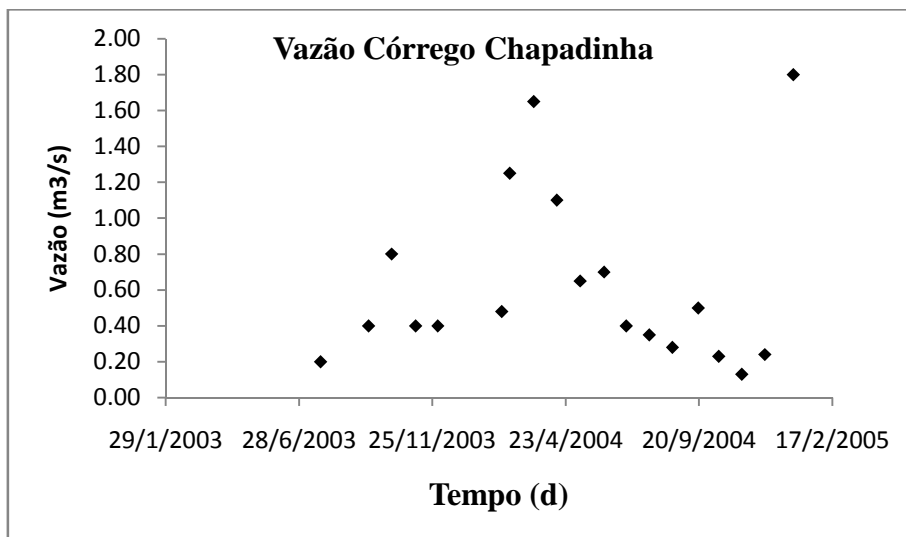
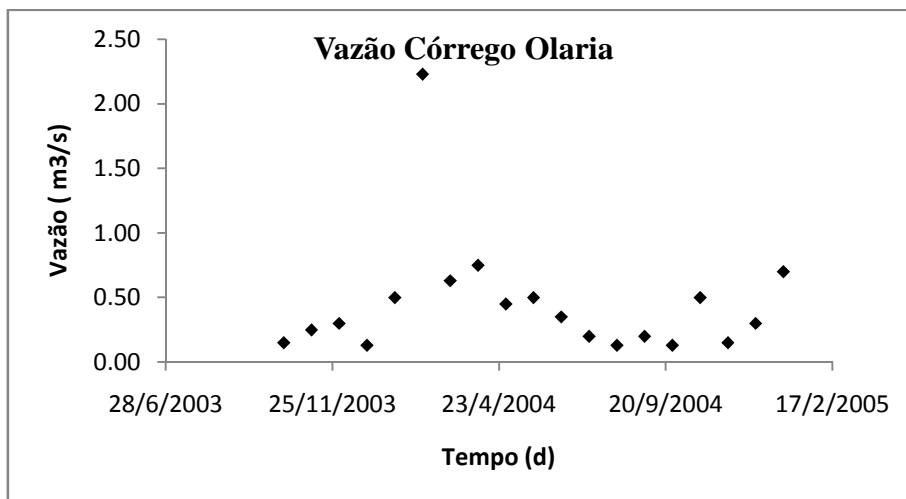
- Souza, R. S. (2006). *Simulação hidrodinâmica da qualidade da água. Estudo de caso: Ajuste do modelo CE-QUAL-W2 à sub-bacia do Arroio Demétrio, bacia hidrográfica do rio Gravataí/RS*, Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental –Programa de Pós-Graduação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 156 p.
- Steg, R. (dir) (2007). *Modeling the Tongue River Watershed with LSPC and CEQUAL-W2 - Final Draft*, U.S. Environmental Protection Agency Montana Operations Office and Tetra Tech, Inc. (ed), Estado Unidos. Disponível em: www.epa.gov/region8/water/monitoring/Modeling%20Report%20Appendices%20FINAL%20DRAFT.pdf. Acesso em: 8 abr. 2008.
- Sullivan, A. B., Jager, H. I., Myers, R. (2003). “Modeling white sturgeon movement in a reservoir: the effect of water quality and sturgeon density” In: *Ecological Modeling*, 167, 97–114. Disponível em http://www.esd.ornl.gov/~zj/mypubs/sturgeon/Sullivan_Jager_Myers.pdf. Acesso em 5 fevereiro de 2009.
- Thomann, V.R. e Mueller, J. A. (1987). *Principles of surface Water Quality Modeling and Control*. Harper & Row Publishers (ed), EUA.
- Tundisi, J.G. (1988) *Limnologia e manejo de represas*. Série Monografias em Limnologia. Vol. I, Universidade de São Paulo (ed.), Escola de Engenharia de São Carlos, Tomo I, 506 p., Tomo II, 1988. 432 p. Brasil.
- Wetzel, Robert G. (2001). *Limnology – Lake and River Ecosystems*. Harcourt Brace College Publishers (ed), 3ª ed., EUA.
- Xu, Z., Godrej, A. N., Grizzard, T. J. (2007). “The hydrological calibration and validation of a complexly-linked watershed–reservoir model for the Occoquan watershed, Virginia”. In: *Journal of Hydrology*, 345, 167-183.
- Zhang, H., Culvera, D., Boegman, L. (2008) “A two-dimensional ecological model of Lake Erie: Application to estimate dreissenid impacts on large lake plankton populations” In: *Ecological Modelling*, 214, 219–241.

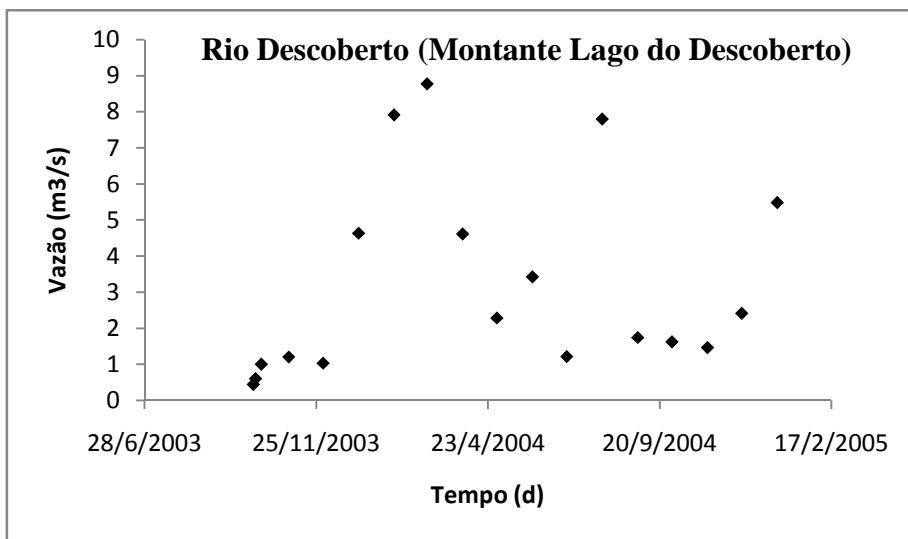
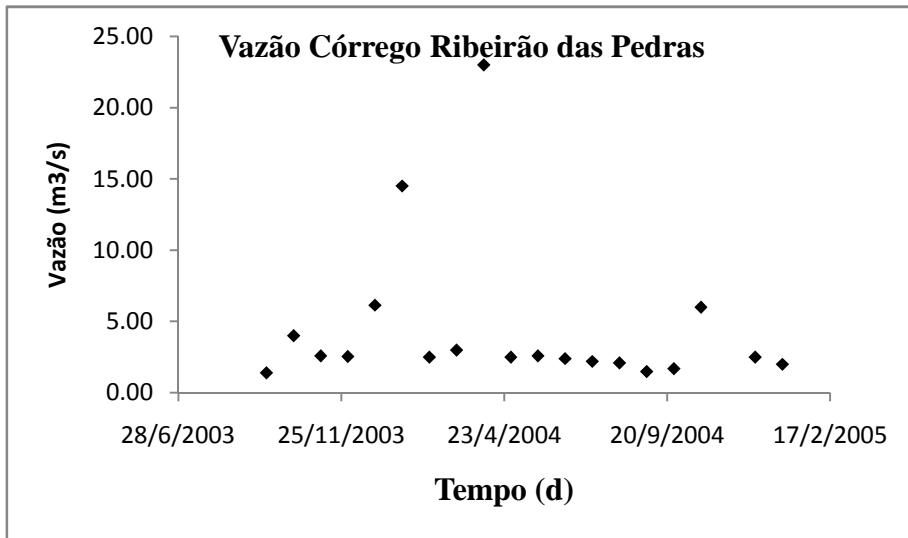
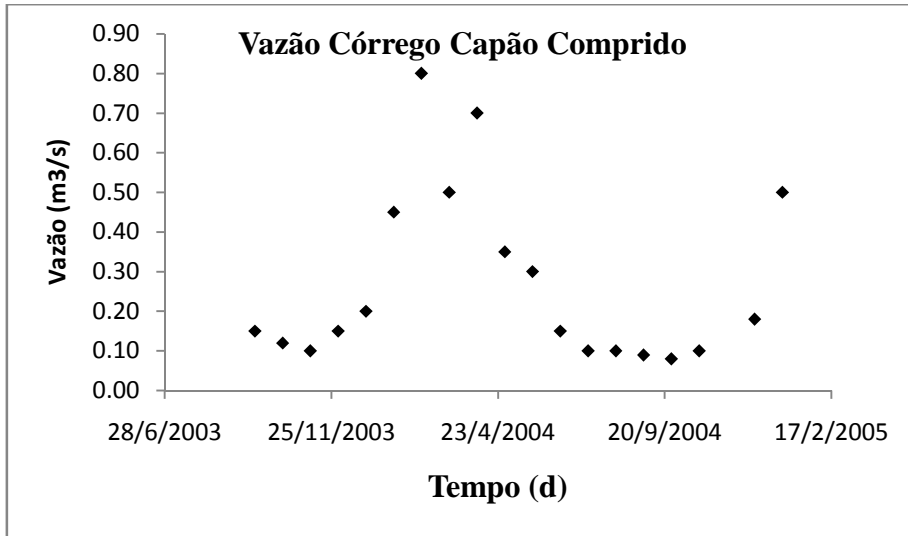
APÊNDICES

APÊNDICE A - BACIAS HIDROGRÁFICAS DO DISTRITO FEDERAL



APÊNDICE B - VAZÕES DE ENTRADA





APÊNDICE C - TEMPERATURA DA ÁGUA

