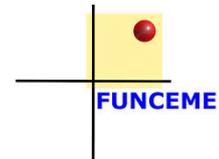




GOVERNO DO
ESTADO DO CEARÁ



Banco Mundial



DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE MODELAGEM DE QUALIDADE DE ÁGUA PARA OS RESERVATÓRIOS DO ESTADO DO CEARÁ



RELATÓRIO 4

AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA/ESTRATÉGIA PROPOSTA

NOVEMBRO 2016



**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA
DE MODELAGEM DE QUALIDADE DE ÁGUA PARA OS
RESERVATÓRIOS DO ESTADO DO CEARÁ**

RELATÓRIO 4

AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA/ESTRATÉGIA PROPOSTA

ÍNDICES

TEXTO	Pág.
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES.....	1
1.2 ESTRUTURA DO RELATÓRIO 4.....	2
2 ANTECEDENTES	3
2.1 PRODUTOS E RELATÓRIOS ELABORADOS	3
2.2 TRABALHOS DE CAMPO REALIZADOS	5
3 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS EM ESTUDO	7
4 AÇUDE OLHO D'ÁGUA.....	9
4.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	9
4.1.1 Considerações.....	9
4.1.2 Dados de Entrada.....	9
4.1.3 Calibração e validação do modelo.....	11
4.1.4 Resultados e cenários.....	17
4.2 MODELAGEM DO RESERVATÓRIO	19
4.2.1 Considerações.....	19
4.2.2 Dados de Entrada.....	19
4.2.3 Calibração e validação do modelo.....	26
4.2.4 Resultados e cenários.....	35
5 AÇUDE ARARAS	44
5.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	44
5.1.1 Considerações.....	44
5.1.2 Dados de Entrada.....	44
5.1.3 Calibração e validação do modelo.....	46
5.1.4 Resultados e cenários.....	56

5.2	MODELAGEM DO RESERVATÓRIO	58
5.2.1	Considerações	58
5.2.2	Dados de Entrada	58
5.2.3	Calibração e validação do modelo	66
5.2.4	Resultados e cenários	76
6	AÇUDE ACARAPE DO MEIO.....	85
6.1	ANTECEDENTES	85
6.2	MELHORIAS A SEREM IMPLEMENTADAS	85
7	ANÁLISE DA METODOLOGIA/ESTRATÉGIA PROPOSTA	87
7.1	CONSIDERAÇÕES	87
7.2	ASPECTOS REGIONAIS.....	87
7.3	LIGAÇÃO A SISTEMAS DE MONITORAMENTO	88
7.4	ESTADO DA ARTE	88
7.5	MODELAGEM DE PROCESSOS	89
7.6	AVALIAÇÃO GERAL.....	90
8	PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS PRODUTOS	91
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92

QUADROS DO TEXTO

Pág.

Tabela 4.1 - Tipos de dados de entrada no modelo, sua escala/resolução, fonte e período disponível.	10
Tabela 4.2 – Parâmetros alterados no modelo durante o processo de calibração.	13
Tabela 4.3 Testes de sensibilidade dos parâmetros alterados no modelo SWAT.....	14
Tabela 4.4 – Características da malha computacional para o Açude Olho d’Água.....	23
Tabela 4.5 - Tipos de dados de entrada no modelo, sua escala/resolução, fonte e período disponível.	26
Tabela 5.1 - Tipos de dados de entrada no modelo, sua escala/resolução, fonte e período disponível.	45
Tabela 5.2 - Localização das estações fluviométricas existentes na bacia do Açude Araras.	47
Tabela 5.3 – Parâmetros alterados no modelo durante o processo de calibração.	48
Tabela 5.4 - Testes de sensibilidade dos parâmetros alterados no modelo SWAT.	50
Tabela 5.5 – Características da malha computacional para o Açude Araras.	64
Tabela 5.6 - Tipos de dados de entrada no modelo, sua escala/resolução, fonte e período disponível.	66
Tabela 6.1 - Taxas de cobertura dos serviços de água e esgoto, por situação do domicílio, dos municípios integrantes da bacia do Açude Acarape do Meio para os anos de 2012 e 2013.....	86

FIGURAS DO TEXTO

Pág.

Figura 3.1 - Localização administrativa dos sistemas em estudo: açudes Olho d'Água e Araras.....	7
Figura 4.1 - Distribuição espacial dos dados de entrada, considerados no modelo SWAT na bacia do Açude Olho d'Água.	11
Figura 4.2 - Comparação das vazões diárias medidas e modeladas com o SWAT, e respectivos períodos de calibração e validação, na bacia do Açude Olho d'Água.....	15
Figura 4.3 – Comparação dos escoamentos anuais medidos e modelados (em mm), na bacia do Açude Olho d'Água.	16
Figura 4.4 – Comparação dos escoamentos mensais medidos e modelados (em mm), na bacia do Açude Olho d'Água.	17
Figura 4.5 – Balanço hídrico mensal obtido com o modelo SWAT (em mm), na bacia do Açude Olho d'Água.	18
Figura 4.6 – Carga de nitrogênio de origem difusa: 1. Ano úmido; 2. Ano seco (tonN/ha/ano), na bacia do Açude Olho d'Água.....	19
Figura 4.7 – Batimetria do Açude Olho d'Água, elaborada a partir de levantamento realizado em 2015.	20
Figura 4.8 – Definição dos segmentos do Açude Olho d'Água (a) e geometria do açude no modelo CE-QUAL-W2 (b), no qual se pode visualizar a representação da área superficial, um exemplo de seção do trecho principal e perfil longitudinal.	22
Figura 4.9 – Comparação entre curvas cota-volume para o Açude Olho d'Água geradas com dados de campo e com modelo CE-QUAL-W2.	23
Figura 4.10 – Temperatura do ar nas estações Várzea Alegre e Barbalha (convencional) e respectivas médias móveis entre 26 de abril e 29 de novembro de 2007.....	25
Figura 4.11 – Localização dos pontos de monitoramento do Açude Olho d'Água.....	27
Figura 4.12 – Comparação das cotas simuladas pelo CE-QUAL-W2 e registradas no açude Olho d'Água.	28
Figura 4.13 – Comparação da evaporação simulada pelo CE-QUAL-W2 no reservatório Olho d'Água e registradas na estação meteorológica Barbalha.	29
Figura 4.14 – Perfis de temperatura no Açude Olho d'Água no ponto de monitoramento OLH-01 no ano de 2006 e 2007.	30
Figura 4.15 – Perfis de oxigênio dissolvido no Açude Olho d'Água no ponto de monitoramento OLH-01 nos anos de 2006 e 2007.....	32
Figura 4.16 – Série temporal de clorofila-a à superfície da coluna d'água no Açude Olho d'Água no ponto de monitoramento OLH-01.	33
Figura 4.17 – Perfis de clorofila-a no Açude Olho d'Água no ponto de monitoramento OLH-01 no ano de 2006.....	33
Figura 4.18 – Série temporal de nitrato à superfície da coluna d'água no Açude Olho d'Água no ponto de monitoramento OLH-01.	34

Figura 4.19 – Série temporal de amônia à superfície da coluna d’água no Açude Olho d’Água no ponto de monitoramento OLH-01.....	35
Figura 4.20 – Perfil longitudinal de temperatura no Açude Olho d’Água no dia 26 de março de 2007 às 12:00h (período úmido).	36
Figura 4.21 – Perfil longitudinal de temperatura no Açude Olho d’Água no dia 6 de agosto de 2007 às 12:00h (período seco).	36
Figura 4.22 – Perfil longitudinal de concentração de produtores primários fitoplanctônicos no Açude Olho d’Água no dia 26 de março de 2007 às 12:00h (período úmido). ...	38
Figura 4.23 – Perfil longitudinal de concentração de produtores primários fitoplanctônicos no Açude Olho d’Água no dia 6 de agosto de 2007 às 12:00h (período seco).	38
Figura 4.24 – Perfil longitudinal de concentração de fosfato no Açude Olho d’Água no dia 26 de março de 2007 às 12:00h (período úmido).....	39
Figura 4.25 – Perfil longitudinal de concentração de fosfato no Açude Olho d’Água no dia 6 de agosto de 2007 às 12:00h (período seco).	40
Figura 4.26 – Perfil longitudinal de concentração de nitrato no Açude Olho d’Água no dia 26 de março de 2007 às 12:00h (período úmido).....	40
Figura 4.27 – Perfil longitudinal de concentração de nitrato no Açude Olho d’Água no dia 6 de agosto de 2007 às 12:00h.	41
Figura 4.28 – Perfil longitudinal da concentração de oxigênio dissolvido no Açude Olho d’Água a 26 de março de 2007 às 12:00h (período úmido).....	42
Figura 4.29 – Perfil longitudinal da concentração de oxigênio dissolvido no Açude Olho d’Água a 6 de agosto de 2007 às 12:00h (período seco).....	43
Figura 5.1 - Distribuição espacial dos dados de entrada, considerados no modelo SWAT na Bacia do Açude Araras.....	46
Figura 5.2 - Comparação das vazões médias diárias nas estações fluviométricas Flores e Fazenda Cajazeiras.....	48
Figura 5.2 - Comparação das vazões diárias medidas em Fazenda Cajazeiras e modeladas com o SWAT.....	51
Figura 5.3 - Comparação das vazões diárias medidas em Flores e modeladas com o SWAT.....	52
Figura 5.4 – Comparação dos escoamentos anuais medidos e modelados (em mm), no ponto Fazenda Cajazeiras.....	53
Figura 5.5 – Comparação dos escoamentos mensais medidos e modelados (em mm), no ponto Fazenda Cajazeiras.....	54
Figura 5.6 - Comparação do oxigênio dissolvido do resultado do modelo SWAT e das medidas encontradas em ANA (2016), em Flores.	55
Figura 5.7 - Comparação da temperatura do resultado do modelo SWAT e das medidas encontradas em ANA (2016), em Flores.....	55
Figura 5.8 - Comparação do oxigênio dissolvido do resultado do modelo SWAT e das medidas encontradas em ANA (2016), em Fazenda Cajazeiras.	55
Figura 5.9 - Comparação da temperatura do resultado do modelo SWAT e das medidas encontradas em ANA (2016), em Fazenda Cajazeiras.....	56
Figura 5.10 – Balanço hídrico mensal da Bacia do Açude Araras obtido com o modelo SWAT (em mm).....	57

Figura 5.11 – Carga de nitrogênio de origem difusa: 1. Ano úmido; 2. Ano seco (tonN/ha/ano).	58
Figura 5.12 – Batimetria do Açude Araras, elaborada a partir de levantamento novembro em 2014.	59
Figura 5.13 – Representação de duas imagens de satélite do Açude Araras: a 29 de agosto de 2011 e curva de nível na cota 153,00 (a) e a 5 de outubro de 2013 e curva de nível na cota 143,50 (b).	60
Figura 5.14 – Modelo digital do terreno da batimetria gerada para o Açude Araras.	61
Figura 5.15 – Comparação entre curvas cota-volume para o Açude Araras elaboradas a partir de diferentes fontes de dados.	62
Figura 5.16 – Definição dos segmentos do Açude Araras (a) e geometria do açude no modelo CE-QUAL-W2 (b), onde se pode visualizar a representação da área superficial, um exemplo de seção do trecho principal e perfil longitudinal.	63
Figura 5.17 – Comparação entre curvas cota-volume para o Açude Araras geradas com dados de campo e com modelo CE-QUAL-W2.	64
Figura 5.18 – Localização dos pontos de monitoramento do Açude Araras.	67
Figura 5.19 – Comparação das cotas simuladas pelo CE-QUAL-W2 e registradas no Açude Araras.	68
Figura 5.20 – Comparação da evaporação simulada pelo CE-QUAL-W2 no reservatório Araras e registradas na estação meteorológica Sobral.	69
Figura 5.21 – Série temporal de temperatura da água à superfície no Açude Araras (ponto ARA-01).	69
Figura 5.22 – Perfis de temperatura no Açude Araras no ponto de monitoramento ARA-01 nos anos de 2007 e 2008.	70
Figura 5.23 – Medições de clorofila-a (à esquerda) e oxigênio dissolvido (à direita) no Açude Araras no ponto de monitoramento ARA-01 no dia 6 de fevereiro de 2007.	71
Figura 5.24 – Série temporal de oxigênio dissolvido à superfície da coluna d'água no Açude Araras no ponto de monitoramento ARA-01.	72
Figura 5.25 – Perfis verticais de oxigênio dissolvido no Açude Araras no ponto de monitoramento ARA-01 nos anos de 2007 e 2008.	73
Figura 5.26 – Série temporal de clorofila-a à superfície da coluna d'água no Açude Araras no ponto de monitoramento ARA-01.	74
Figura 5.27 – Série temporal de nitrato à superfície da coluna d'água no Açude Araras no ponto de monitoramento ARA-01.	75
Figura 5.28 – Série temporal de amônia à superfície da coluna d'água no Açude Araras no ponto de monitoramento ARA-01.	76
Figura 5.29 – Perfil longitudinal de temperatura no Açude Araras no dia 14 de maio de 2008 (período úmido).	77
Figura 5.30 – Perfil longitudinal de temperatura no Açude Araras no dia 6 de agosto de 2007 (período seco).	78
Figura 5.31 – Perfil longitudinal de concentração de produtores primários fitoplanctônicos no Açude Araras no dia 12 de Maio de 2008 (período úmido).	79

Figura 5.32 – Perfil longitudinal de concentração de produtores primários fitoplanctônicos no Açude Araras no dia 6 de Agosto de 2007 (período seco).....	79
Figura 5.33 – Perfil longitudinal de concentração de fosfato no Açude Araras no dia 12 de maio de 2008 às 12:00h (período úmido).	81
Figura 5.34 – Perfil longitudinal de concentração de fosfato no Açude Araras no dia 6 de agosto de 2007 às 12:00h (período seco).	81
Figura 5.35 – Perfil longitudinal de concentração de nitrato no Açude Araras no dia 12 de maio de 2008 às 12:00h (período úmido).	82
Figura 5.36 – Perfil longitudinal de concentração de nitrato no Açude Araras no dia 6 de agosto de 2007 às 12:00h (período seco).	82
Figura 5.37 – Perfil longitudinal da concentração de oxigênio dissolvido no Açude Araras no dia 12 de maio de 2008 às 12:00h (período úmido).	84
Figura 5.38 – Perfil longitudinal da concentração de oxigênio dissolvido no Açude Araras no dia 6 de agosto de 2007 às 12:00h (período seco).	84

ANEXO

ANEXO 1 – Descritivos Estatísticos

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES

Este documento constitui-se do Relatório 4, intitulado “*Avaliação da metodologia/estratégia proposta*”, referente à **Atividade 3.2 – Avaliação da metodologia e recomendação final da abordagem a ser adotada para a modelagem da qualidade da água**. Este produto e atividade estão previstos no âmbito do estudo “*Desenvolvimento de uma Metodologia de Modelagem de Qualidade de Água para os Reservatórios do Estado do Ceará*”.

O presente documento (**Relatório 4**), avalia a metodologia de modelagem aplicada intensivamente ao longo do **Relatório 3**, o qual refere-se ao primeiro produto de modelagem que foi aplicado ao sistema do Açude Acarape do Meio. A metodologia desenvolvida pode ser replicada a qualquer reservatório do Estado do Ceará.

Neste relatório, é então apresentada a validação da metodologia desenvolvida no **Relatório 3**, considerando para tal os açudes Olho d’Água e Araras.

O presente volume aborda os seguintes tópicos que se referem à validação da metodologia adotada, como:

- Origem e utilização dos dados para condições iniciais e de contorno.
- Relação dos modelos de bacia e de reservatório, para os dois (2) açudes.
- Calibração e validação dos modelos.
- Análise gráfica dos resultados dos modelos.

As melhorias indicadas na **Tabela 8.1** do **Relatório 3** para o Açude Acarape do Meio a serem implementadas neste relatório, serão efetuadas apenas após o término da coleta de dados nos açudes. Assim, e uma vez que no **Produto 5** o objetivo é a apresentação do modelo de qualidade de água para os três (3) açudes objetos de estudo calibrado e validado, igualmente como o banco de dados atualizado, optou-se por apresentar um Produto mais completo e com todos os dados coletados no projeto.

Deste modo, o **Relatório R4** consiste no relatório no qual será explanada a avaliação da metodologia/estratégia proposta. Neste relatório são descritos ainda todos os processos desenvolvidos ao longo da **Atividade 3.2**. São apresentados os resultados prévios da modelagem dos açudes Araras e Olho d’Água e a estratégia final de abordagem à modelagem que no futuro poderá ser aplicada a outros reservatórios do Estado do Ceará.

Este relatório vai ao encontro dos objetivos delineados no Termo de Referência, especificamente quanto a imposição de uma avaliação da capacidade dos modelos se adequarem às características ambientais do Estado do Ceará, assim como às especificidades dos seus reservatórios e características socioambientais das suas bacias de drenagem.

1.2 ESTRUTURA DO RELATÓRIO 4

O presente documento se organiza em nove (9) capítulos, após o item introdutório, nos quais são apresentadas as atividades realizadas até o momento no âmbito do estudo, bem como as atividades previstas para a sua composição. Tais capítulos são indicados a seguir.

- Capítulo 2 – Antecedentes.
- Capítulo 3 – Caracterização dos sistemas em estudo.
- Capítulo 4 – Estratégia de modelagem aplicada ao Açude Olho d'Água.
- Capítulo 5 – Estratégia de modelagem aplicada ao Açude Araras.
- Capítulo 6 – Estratégia de modelagem aplicada ao Açude Acarape do Meio.
- Capítulo 7 – Análise da metodologia/estratégia proposta.
- Capítulo 8 – Perspectivas para os próximos produtos.
- Capítulo 9 – Referências Bibliográficas.

2 ANTECEDENTES

2.1 PRODUTOS E RELATÓRIOS ELABORADOS

No escopo do trabalho de *Desenvolvimento de uma Metodologia de Qualidade de Água para os Reservatórios do Estado do Ceará*, foram elaborados e entregues os documentos listados a seguir.

- Produto 1 – Diagnóstico e caracterização dos reservatórios.
- Produto 2 – Estudo de viabilidade e hierarquia dos modelos identificados e avaliados.
- Relatório 1 – Proposição de um sistema de monitoramento da qualidade da água visando à modelagem.
- Produto 3 – Protocolo de coleta de dados para o monitoramento da qualidade de água.
- Relatório 2 – Documentação da atividade de coleta de dados e dificuldades encontradas.
- Produto 4 – Banco de dados.
- Relatório 3 – Estratégia proposta e análise dos resultados.

No **Produto 1** foi realizada a caracterização de cada um dos três (3) açudes e suas bacias de drenagem, especificamente quanto aos dados necessários ao estudo que será desenvolvido. Para a elaboração deste produto foi realizado um reconhecimento prévio dos açudes a partir de trabalho de campo executado em novembro de 2015. Foram obtidos, ainda, a partir de consultas em *sites* da internet, dados já publicados sobre os açudes Acarape do Meio, Araras e Olho d'Água.

Dados específicos sobre o monitoramento da qualidade das águas foram obtidos por meio de contato com os órgãos ambientais do Estado do Ceará, responsáveis por estes monitoramentos. A partir deste contato, dados históricos dos açudes Acarape do Meio, Araras e Olho d'Água foram disponibilizados, o que permitiu um conhecimento mais aprofundado de cada um dos casos. Isto foi essencial para a elaboração do produto e será, também, na implementação de modelos, uma vez que cria maior sensibilidade para respostas mais reais possíveis.

No **Produto 2** foi apresentado um estudo detalhado dos potenciais modelos a serem utilizados no trabalho. Após várias análises e ponderações foram escolhidos os modelos

de bacia e reservatórios que mais se adequam aos açudes em estudo e que facilmente poderão ser replicados para os demais reservatórios do Estado do Ceará.

É sabido que no exercício de modelagem é fundamental um conhecimento mais detalhado possível do local de estudo. Desta forma, no âmbito deste trabalho foi desenvolvido um sistema de monitoramento da qualidade de água (apresentado detalhadamente no **Relatório 1**), assim como o respectivo protocolo de coleta de dados para o monitoramento (apresentado no **Produto 3**). Foram apresentadas, ainda, a documentação da atividade de coleta de dados e as dificuldades encontradas durante a execução das duas primeiras campanhas para o monitoramento da qualidade da água, bem como para o monitoramento das vazões e cargas poluentes nos açudes Acarape do Meio, Araras e Olho d'Água (conforme **Relatório 2**).

Já o **Produto 4** refere-se ao banco de dados do trabalho e apresenta todos os dados do monitoramento realizado até o momento. Este banco de dados será atualizado durante todo o período de execução do estudo e encontra-se disponível em *website* já informado.

O **Relatório 3** refere-se ao primeiro produto de modelagem aplicado ao Açude Acarape do Meio. Os dados nele apresentados definiram a abordagem que será aplicada posteriormente nos demais açudes em estudo. A metodologia definida poderá, ainda, ser replicada a qualquer reservatório do Estado do Ceará, permitindo que, em casos de estudos semelhantes aos aqui desenvolvidos, os problemas possam ser mais facilmente resolvidos, uma vez que o usuário estará mais sensibilizado à estratégia de modelagem a ser seguida.

Após caracterização dos açudes, foi definida a proposta de modelagem da qualidade de água na **Atividade 1** e descrição da coleta de dados para o monitoramento, necessário ao trabalho na **Atividade 2**. Na **Atividade 3.1** foi descrita e aplicada a metodologia de modelagem ao Açude Acarape do Meio, sendo neste presente documento (**Relatório 4**) avaliada e replicada aos açudes Olho d'Água e Araras (**Atividade 3.2**).

Nesta avaliação da metodologia proposta apontam-se as atividades que foram realizadas, avaliando a sua capacidade para estudar adequadamente os processos que controlam a qualidade da água nos reservatórios do Estado do Ceará. Abordam-se, igualmente, as metodologias recomendadas até ao final do programa de trabalhos, assim como a abordagem padrão a ser adotada em estudos futuros de modelagem de qualidade da água em outros reservatórios do Estado do Ceará.

Conhecendo previamente a diversidade das condições meteorológicas locais, das especificidades dos açudes (dimensão, utilização, fontes poluentes, etc.), das características das suas bacias de drenagem e da variação dos valores de muitos dos parâmetros físico-químicos que as caracterizam, a escolha dos modelos para serem utilizados nos estudos foi então determinada pela necessidade destes serem ou não capazes de simular esta diversidade de fatores e condições. Os modelos utilizados são, por isso, orientados por processos, tendo sido criados com o objetivo principal de simular os processos que controlam a quantidade e qualidade da água nas bacias e açudes. Os modelos utilizados, o modelo SWAT para a bacia e o modelo CE-QUAL-W2 para o açude, são, portanto, genéricos, adaptando-se às características próprias de cada açude e seu entorno, adequando-se também ao estudo dos demais reservatórios do Estado do Ceará. Assim, ainda que cada açude em estudo tenha as suas próprias características, os modelos são capazes de simular a evolução da sua qualidade da água e sua própria dinâmica, assim como a sua dependência dos aportes da bacia de drenagem.

2.2 TRABALHOS DE CAMPO REALIZADOS

De acordo com o cronograma previsto para o estudo, até o momento foram realizados os trabalhos de campo descritos a seguir.

Reconhecimento dos locais de estudo:

Para o reconhecimento dos açudes Acarape do Meio, Araras e Olho d'Água foi realizada uma campanha de campo em novembro de 2015, na qual estiveram presentes integrantes do Consórcio Aqualogus/Azurit, bem como da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH).

Campanhas para o Monitoramento da Qualidade de Água

Com relação à coleta de dados para o monitoramento da qualidade de água, foram realizadas, até o momento, quatro (4) campanhas:

- Campanha 01 (coletas simples): fevereiro de 2016.
- Campanha 02 (coletas simples e nictemerais): abril de 2016.
- Campanha 03 (coletas simples): junho de 2016.
- Campanha 04 (coletas simples e nictemerais): setembro de 2016.

As atividades realizadas nas Campanhas 01 e 02 foram documentadas no [Relatório 2 – “Documentação da Atividade de Coleta de Dados e Dificuldades Encontradas”](#). Os

resultados das Campanhas 01, 02 e 03 foram carregados no banco de dados referente ao **Produto 4** e o mesmo será feito para os dados da Campanha 04, quando disponibilizados pelo Laboratório responsável pelas análises.

Campanhas para o Monitoramento de Vazões e Cargas Poluentes

Para o monitoramento das vazões foi realizada uma campanha, em março de 2016. Durante esta campanha foram realizados, também, contatos com observadores locais para a coleta de nitrogênio e fósforo (cargas poluentes) e leituras dos níveis das réguas dos açudes Acarape do Meio, Araras e Olho d'Água. Tais atividades foram documentadas no **Relatório 2** – “*Documentação da Atividade de Coleta de Dados e Dificuldades Encontradas*”. As coletas de amostras para a análise de nitrogênio e fósforo foram realizadas semanalmente, durante os meses de março, abril e maio de 2016. Já as leituras dos níveis das réguas foram realizadas diariamente, nos meses citados.

3 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS EM ESTUDO

Neste trabalho são considerados dois (2) sistemas de açudes do Estado do Ceará: o Açude Olho d'Água e o Açude Araras. Uma descrição mais detalhada das características destes açudes pode ser encontrada no **Tomo 3** e no **Tomo 4** do **Produto 1**, respectivamente.

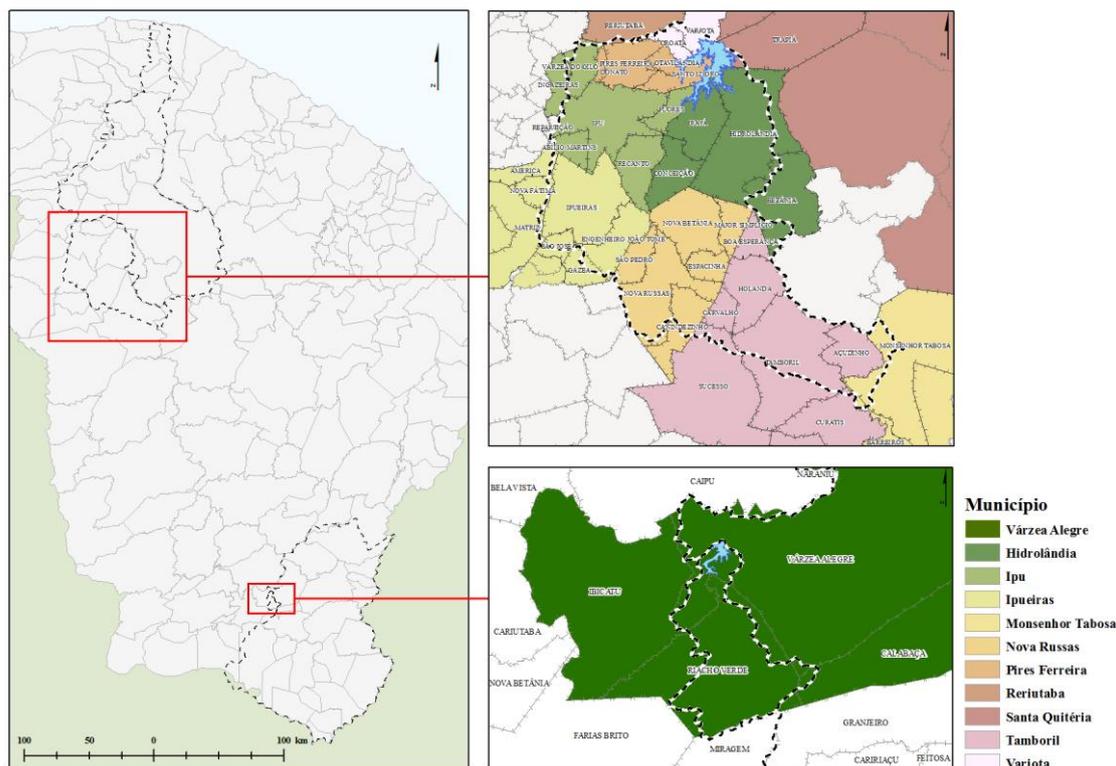


Figura 3.1 - Localização administrativa dos sistemas em estudo: açudes Olho d'Água e Araras.

Fonte: Elaborado a partir de IBGE (2015).

O Açude Araras, também nomeado como barragem Paulo Sarasate, faz parte da bacia hidrográfica do rio Acaraú, integrando o sistema da bacia Acaraú.

A bacia do Açude Araras drena uma área de, aproximadamente, 3.500 km², cerca de 24% da bacia hidrográfica total do rio Acaraú, que, por sua vez, abarca 14.500 km². Sua bacia, conforme **Figura 3.1**, integra os municípios de Varjota, Ipu, Pires Ferreira, Hidrolândia, Tamboril, Ipueiras, Nova Russas, Monsenhor Tabosa e Santa Quitéria, pertencendo à região de Sobral/Ibiapaba, a 229 km em linha reta do Município de Fortaleza.

O Açude Olho d'Água está localizado no Município de Várzea Alegre, pertencendo à região do Cariri Centro-Sul, na porção centro-sul do Estado do Ceará, a 351 km em linha reta do Município de Fortaleza. O Açude Olho d'Água faz parte da bacia hidrográfica do riacho Machado, integrando o sistema da bacia do rio Salgado.

A bacia hidrográfica do Açude Olho d'Água drena, aproximadamente, 74 km², representando uma porcentagem reduzida (inferior a 0,1%) da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe (75.670 km²).

4 AÇUDE OLHO D'ÁGUA

4.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA

4.1.1 Considerações

Neste subcapítulo é apresentada a estratégia de modelagem hidrológica ao Açude Olho d'Água utilizando-se o modelo matemático SWAT. No **Produto 2** e no **Relatório 3**, este modelo já foi detalhadamente descrito, sendo que neste volume é apenas apresentada, genericamente, a abordagem de aplicação a cada caso de estudo. Serão assim descritos os dados de entrada utilizados, os processos de calibração e validação do modelo e, por último, serão apresentados os resultados obtidos e alguns cenários exemplificativos, tal como demonstrado no **Relatório 3**.

4.1.2 Dados de Entrada

Para implementação do modelo de bacia é necessária a preparação de dados de entrada específicos para cada caso de estudo. Tal como desenvolvido na bacia de drenagem do Açude Acarape do Meio no **Relatório 3**, para o processo de modelagem em bacias hidrográficas são necessários dados essenciais, como:

- topografia/declividade;
- usos do solo;
- tipos do solo;
- fontes pontuais e difusas; e,
- clima.

Os dados de entrada no modelo de bacia deverão ter maior detalhe possível. A topografia deverá ser de alta resolução, sendo que no *website* da Missão Topográfica Radar Shuttle (acrônimo em inglês SRTM) da *U.S. Geological Survey* (<http://srtm.usgs.gov/>), já é disponibilizada topografia para todo o mundo com resolução de 30 m, bastante aceitável para trabalhos de modelagem em bacias hidrográficas.

Quanto aos mapas de usos de solo, considerou-se como fonte o *Global Cover 2009*, com resolução espacial de 300 m, cuja reclassificação foi adaptada à base de dados do modelo SWAT de usos de solo.

Para o tipo de solos, considerou-se o mapa disponibilizado por FUNCEME (2005) e estimaram-se os parâmetros hidráulicos necessários ao modelo, com base nas

características físicas e químicas encontradas em Ibraimo *et al.*, (2004) para o tipo de solo “Luvissole Crômico” (TC) e em Carvalho Filho *et al.*, (2010) para o tipo de solo “Neossolo Litólico” (RL). Os parâmetros hidráulicos para o tipo de solo “Argissolo Vermelho-Amarelo” (PV) foram estimados para o **Relatório 3** para a bacia do Açude Acarape do Meio de acordo com as características físicas e químicas encontradas em Baldissera (2005) e Lelis (2011), sendo estes utilizados igualmente neste caso.

As fontes pontuais e difusas serão implementadas adequadamente no **Produto 5**.

Para a climatologia consideraram-se as duas estações climatológicas mais próximas da bacia existentes no *Global Weather Data for SWAT – GWDS* (<http://globalweather.tamu.edu/>), uma vez que para as variáveis climáticas temperatura, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento, a única estação disponível (Barbalha) estava a maior distância e com longos períodos de falhas. Para a precipitação, considerou-se a estação de Várzea Alegre, estando esta mais próxima da bacia, quando comparada às demais opções encontradas no GWDS.

Na **Tabela 4.1** estão descritos os dados utilizados para entrada no modelo e na **Figura 4.1** é indicada a distribuição espacial dos usos de solo, tipos de solo, topografia e localização das estações climatológicas, respectivamente.

Tabela 4.1 - Tipos de dados de entrada no modelo, sua escala/resolução, fonte e período disponível.

Dado	Escala/resolução	Fonte	Período
Topografia	30 m	SRTM	2000
Uso do solo	300 m	ESA	2009
Tipos do solo	ND	FUNCEME	2015
Fontes pontuais e difusas	*	*	*
Clima	Diário	ANA e FUNCEME; GWDS	1979-2014

*A ser elaborado no Produto 5.

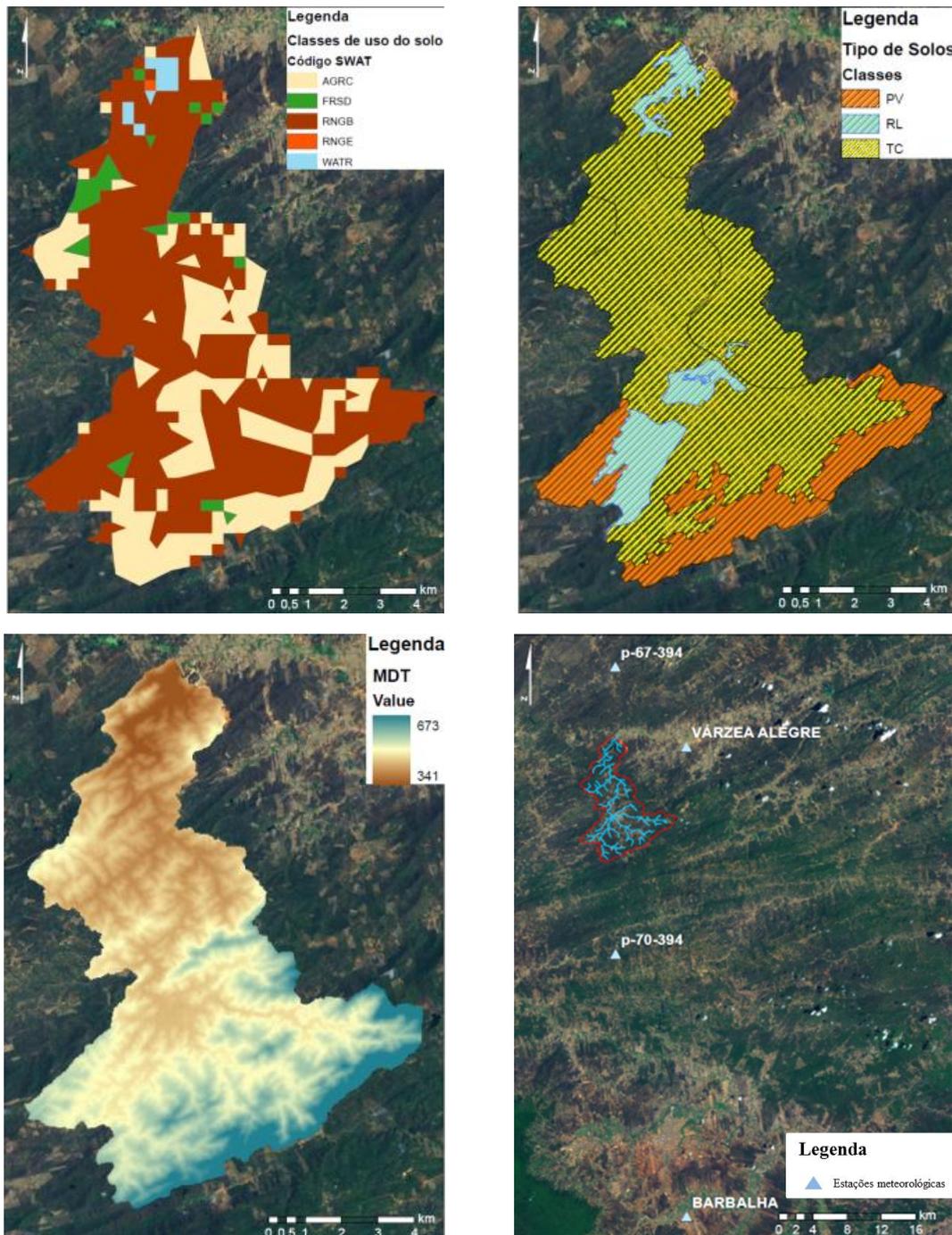


Figura 4.1 - Distribuição espacial dos dados de entrada, considerados no modelo SWAT na bacia do Açude Olho d'Água.

4.1.3 Calibração e validação do modelo

Tal como explicado no [Relatório 3](#), os dados de base para calibração e validação do modelo numérico são essencialmente de quantidade e qualidade de água no rio. A calibração do modelo baseia-se na alteração dos parâmetros que influenciam a

quantidade de água no rio, sendo que o usuário deverá ter como base de comparação pontos de vazões medidos ao longo do rio modelado, que deverão se ajustar o melhor possível. Após a calibração do modelo, este deverá ser validado para o período de tempo seguinte, no qual apenas se observa se o modelo acompanha as medidas sem que nenhum parâmetro seja alterado. Os períodos de calibração e validação não poderão se sobrepor. O modelo SWAT foi aplicado para o período de 36 anos, de 1979 a 2014, considerando-se para calibração o período de 1999 a 2005, e para validação o período de 2005 a 2014.

Face aos objetivos do presente estudo, que correspondem essencialmente ao desenvolvimento de uma estratégia de modelagem de qualidade de água adaptável a reservatórios do Estado do Ceará, foram ainda realizados alguns testes de sensibilidade aos principais parâmetros que influenciam a modelagem dos processos hidrológicos nas bacias hidrográficas dos reservatórios em estudo. Entende-se que esta análise representa uma importância significativa uma vez que as bacias hidrográficas em estudo apresentam características particulares (*e.g.* tipo de solos, cobertura vegetal, topografia) e, conseqüentemente, respostas hidrológicas diferentes, em especial no que diz respeito à infiltração, evapotranspiração, escoamento superficial e sub-superficial.

Deste modo, os testes de sensibilidade realizados têm por objetivo constituir uma orientação para o desenvolvimento futuro de modelos hidrológicos em bacias no Estado do Ceará. Assim, foram previamente identificados os parâmetros mais sensíveis e que integram os seguintes processos: escoamento superficial; umidade do solo; águas subterrâneas; evapotranspiração e fluxo lateral. Salienta-se que, de acordo com o mapa de solos utilizado na modelagem, os solos predominantes das duas bacias (Araras e Olho d'Água) são os mesmos, pelo que o conhecimento do local é de extrema importância para a determinação das características de cada bacia ao nível da água subterrânea.

Face à inexistência de estações fluviométricas a montante do Açude Olho d'Água, e no âmbito do presente estudo, foram estimadas as vazões médias diárias afluentes ao açude tendo por base a planilha: *Memória dos Aportes ao Açude Olho d'Água* - disponibilizada em FUNCEME (2015). Desta forma, a calibração e validação do modelo foi realizada com esta vazão estimada.

Os testes realizados e aqui apresentados foram cumulativos, mostrando as melhorias observadas com os ajustes dos parâmetros escolhidos. Os parâmetros de calibração modificados são apresentados na **Tabela 4.2**, com respectivos valores alterados.

Tabela 4.2 – Parâmetros alterados no modelo durante o processo de calibração.

Parâmetro	Original	Calibrado	Unidades	Descrição
GW_REVAP	0.02	0.08	Adimensional	Coefficiente de ascensão de água à zona de saturação para evapotranspiração
CN2	61 - 92	-20%	Adimensional	Curva Número inicial para condição de umidade do solo II
REVAPMN	750	0	[mm]	Limite de nível de água do aquífero para evaporação ou para infiltração no aquífero profundo
GWQMN	1.000	7.000	[mm]	Profundidade mínima do aquífero superficial para ocorrer escoamento subterrâneo

O parâmetro CN2 (*Curve Number*) provém da equação de escoamento do *Soil Conservation Service* (SCS), já descrito no [Relatório 3](#), que relaciona o escoamento e a precipitação. Este parâmetro foi ajustado diminuindo em 20% o valor inicial em todas as sub-bacias, significando que foi diminuído o escoamento superficial e facilitada a infiltração. Para além deste, como demonstrado na **Tabela 4.3 a)** foi aumentado o parâmetro GW_REVAP, que traduz o incremento no movimento da água da zona do aquífero (zona de saturação) para a zona de raízes (zona de aeração), promovendo a evapotranspiração para valores próximos da potencial. Este parâmetro tem especial importância em solos rasos, onde estes movimentos de água são tipicamente superiores. Com esta alteração é possível observar uma melhoria substancial no que diz respeito aos volumes de água medidos e modelados (como mostrado do valor calculado do desvio percentual relativo - Bias, ou seja, refletido na capacidade das predições do modelo se aproximarem dos valores reais), e da eficiência do modelo mais próxima da unidade (estimada com o coeficiente de Nash-Sutcliffe).

Na **Tabela 4.3 b)** são mostrados os resultados estatísticos, agora com a alteração dos valores de GWQMN e REVAPMN, cumulativos aos alterados anteriormente. Estes parâmetros melhoraram substancialmente os resultados, sendo as vazões médias diminuídas representando melhor as vazões observadas. Este aumento da profundidade mínima do aquífero, permite assim diminuir a contribuição deste para o fluxo de base.

Para esta bacia, não foram alterados os parâmetros GW_DELAY E ALPHA_BF, pois não apresentaram quaisquer diferenças nos resultados dos modelos, ao contrário do observado no Açude Araras (analisado no Capítulo 5). Considerando que as diferenças entre ambas as bacias (consideradas no modelo) são apenas na meteorologia e

declividades, conclui-se que na bacia do Açude Olho d'Água, o tempo no qual a água demora a sair da zona radicular para recarregar o aquífero raso é superior, atrasando o escoamento subterrâneo. Isto deverá estar relacionado com as declividades inferiores.

Para a calibração final, e de acordo os valores mensais, obteve-se assim uma correlação de 63% e raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE- *Root mean Square Error*, ótimo é 0) de 0,38 m³/s. A eficiência do modelo, que varia entre - infinito a 1 – sendo que 1 é o ótimo –, de 0,63 e Bias (ótimo é 0) de 0,01 – sendo os parâmetros estatísticos mais relevantes na comparação entre valores modelados e medidos – mostram que o modelo representa satisfatoriamente os valores medidos.

A análise diária, como previsto, foi mais fraca, uma vez que os valores de vazões foram estimados com base em um balanço de reservatório, sendo, portanto, suscetíveis a maior incerteza (**Figura 4.2**). Ainda assim, as médias diárias de vazões modeladas são bastante semelhantes às medidas, o que vai de encontro ao objetivo principal deste trabalho de modelagem, uma vez que a quantidade de água que entra no reservatório vai ter impacto direto na qualidade da água. Assim, dada esta incerteza nos valores medidos, a calibração do modelo baseou-se fundamentalmente nas médias das vazões, sendo estes os resultados mais relevantes para os objetivos do trabalho.

Resumidamente, **Tabela 4.3** são mostrados alguns testes de sensibilidade no processo de calibração do modelo, baseados em análises estatísticas realizadas ao longo do processo de calibração do modelo. Estes indicadores estatísticos e de diagramas de dispersão foram explicados detalhadamente no **Anexo 1**.

Tabela 4.3 Testes de sensibilidade dos parâmetros alterados no modelo SWAT.

	Sem calibração		a)		b)	
	Diário	Mensal	Diário	Mensal	Diário	Mensal
Média observada [m ³ /s]	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
Média modelada [m ³ /s]	0,88	0,90	0,54	0,55	0,25	0,25
Desvio percentual relativo - Bias	0,64	0,65	0,30	0,31	0,01	0,01
RMSE	3,96	1,23	2,80	0,91	1,52	0,38
R ²	0,08	0,56	0,11	0,63	0,09	0,63
Eficiência do modelo - Nash-Sutcliffe	-7,02	-2,87	-2,98	-1,14	-0,18	0,63

a) CN2 e GWREVAP

b) CN2, GWREVAP, GWQMN e REVAPMN (final)

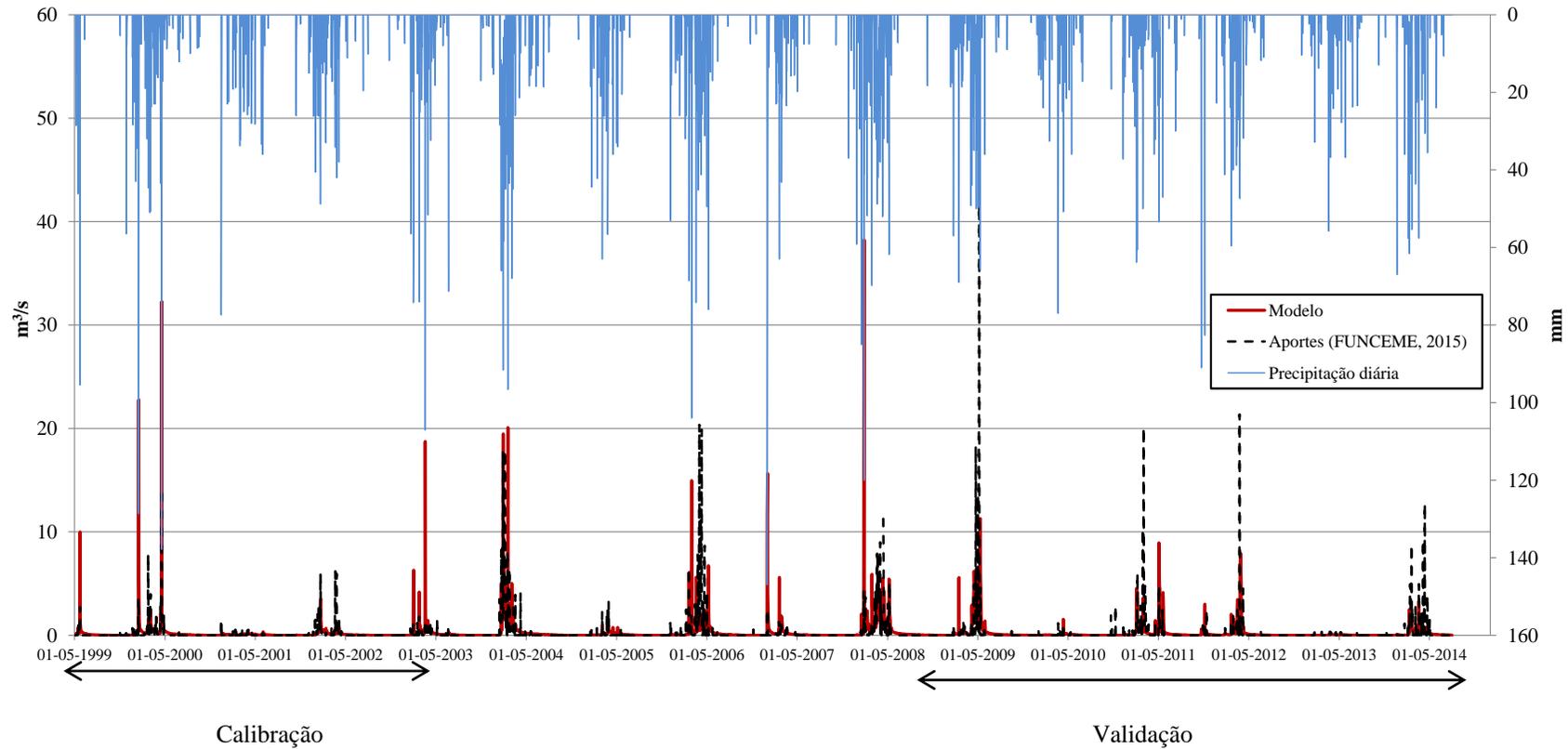


Figura 4.2 - Comparação das vazões diárias medidas e modeladas com o SWAT, e respectivos períodos de calibração e validação, na bacia do Açude Olho d'Água.

Para uma visualização mais abrangente dos resultados, foi realizada a análise estatística do escoamento (em milímetros) ao nível anual e mensal, sendo considerado o período de 1998 a 2013, comparando os escoamentos medidos e modelados. É observada uma proximidade do modelo aos valores reais com elevadas correlações lineares. Ao nível anual (**Figura 4.3**), observa-se que o modelo SWAT reproduz o escoamento medido observado com uma correlação de aproximadamente 68%.

Ao nível mensal, o escoamento da bacia de drenagem foi estimado com base nas médias de cada mês de todos os anos considerados. Quando comparadas os valores medidos e os valores modelados observa-se uma correlação de, aproximadamente, 95% (**Figura 4.4**). A análise mensal difere da análise anterior (**Tabela 4.3**), pois não são consideradas as médias de todos os meses, sendo por isso uma análise mais realista e com menores aproximações.

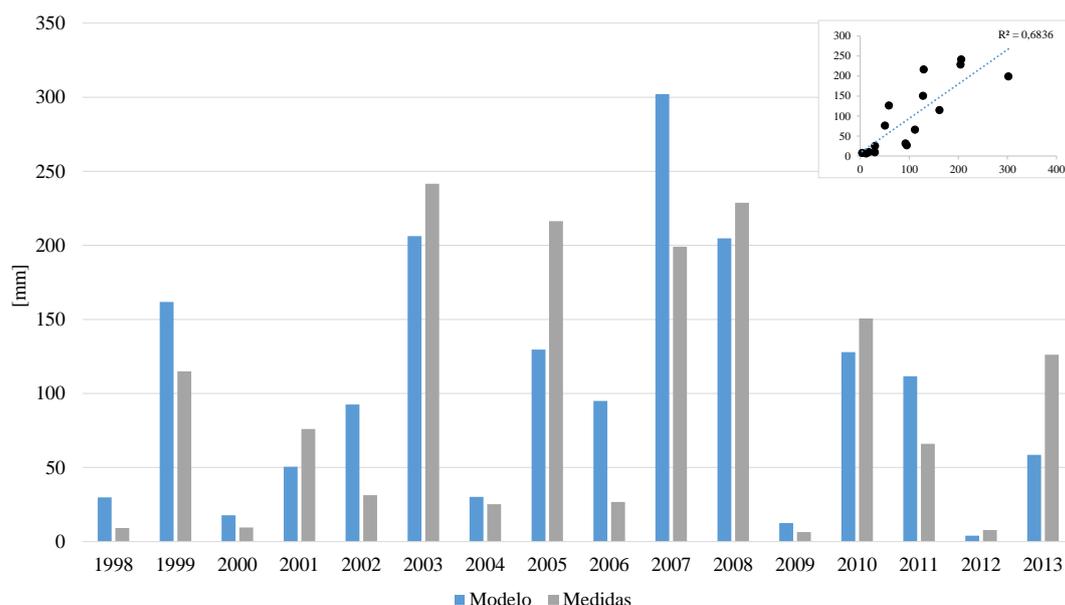


Figura 4.3 – Comparação dos escoamentos anuais medidos e modelados (em mm), na bacia do Açude Olho d'Água.

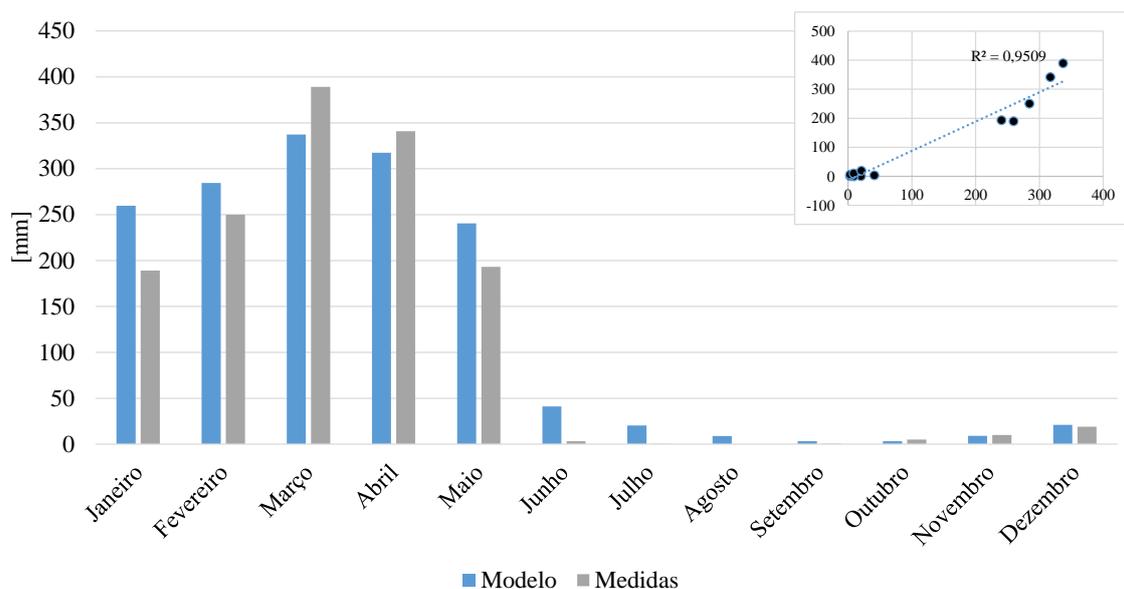


Figura 4.4 – Comparação dos escoamentos mensais medidos e modelados (em mm), na bacia do Açude Olho d’Água.

Uma vez que não existem medidas de nutrientes ou de outras variáveis de qualidade da água ao longo do rio que drena ao Açude Olho d’Água, não foi possível analisar os resultados de qualidade no rio.

4.1.4 Resultados e cenários

Os modelos numéricos são extremamente úteis para analisar balanços de água nas bacias hidrográficas nas quais, geralmente, apenas se conhecem valores de vazão medidos nos cursos d’água e não o comportamento hidrológico global da bacia. No entanto, as medidas de vazão existentes, assim como o conhecimento local, são bastante importantes para que a análise crítica dos resultados da modelagem seja bem sucedida.

Como exemplo, na **Figura 4.5**, é possível observar o balanço hídrico mensal médio dos anos simulados, considerando a precipitação, evapotranspiração real, escoamento, escoamento lateral e o superficial (*runoff*), em mm.

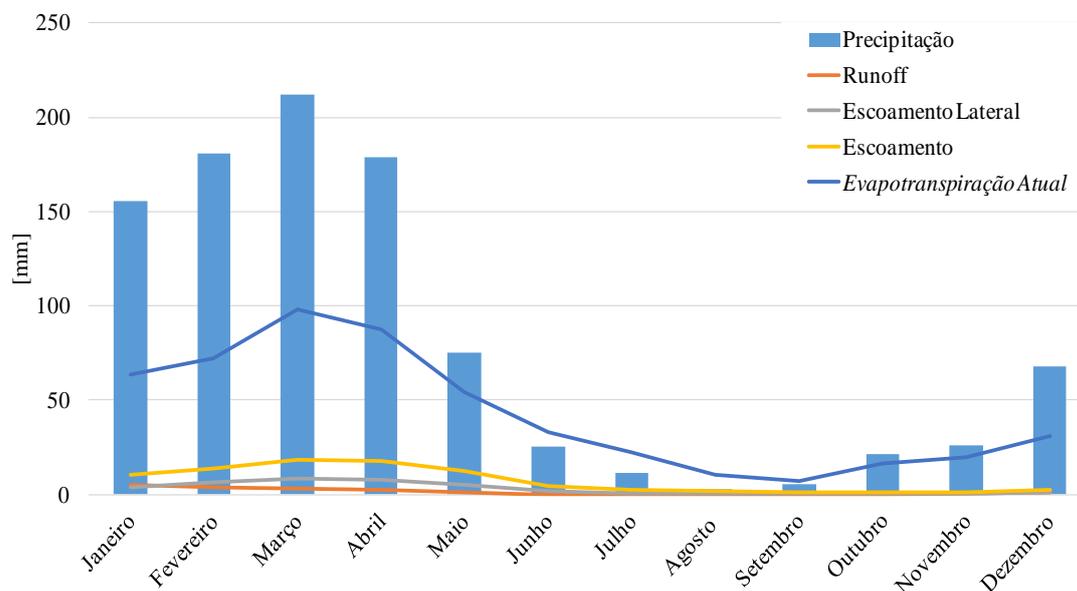


Figura 4.5 – Balanço hídrico mensal obtido com o modelo SWAT (em mm), na bacia do Açude Olho d'Água.

Neste trabalho, a título de exemplo, optou-se pela análise de dois (2) cenários, focados na qualidade da água, sendo a qualidade da água dos rios a maior influência na qualidade de água nos reservatórios.

Primeiramente, foram comparados dois (2) anos hidrológicos extremos no período considerado, sendo:

- ano hidrológico chuvoso (em 2007, onde se observou precipitação de aproximadamente 1600 mm); e,
- ano hidrológico seco (em 2012, onde se observou precipitação de aproximadamente 529 mm).

O escoamento tem influência direta nos nutrientes (nitrogênio e fósforo) que chegam ao rio. O nitrogênio e o fósforo se movem para jusante: o nitrogênio porque é altamente móvel; e o fósforo, não sendo facilmente lixiviado, acaba por ser arrastado adsorvido nos sedimentos, movendo-se no processo de erosão. Como resultado da aplicação do modelo descrito, foram estimadas as cargas de nitrogênio em toneladas por hectare (por ano), conforme **Figura 4.6**, podendo ser estimadas cargas de fósforo e sedimentos, tal como detalhado no **Relatório 3**. As figuras mostram a média dos resultados do modelo para as condições climáticas ocorridas entre o ano hidrológico 2007 e 2012, adicionadas às massas de água de forma difusa, por sub-bacia.

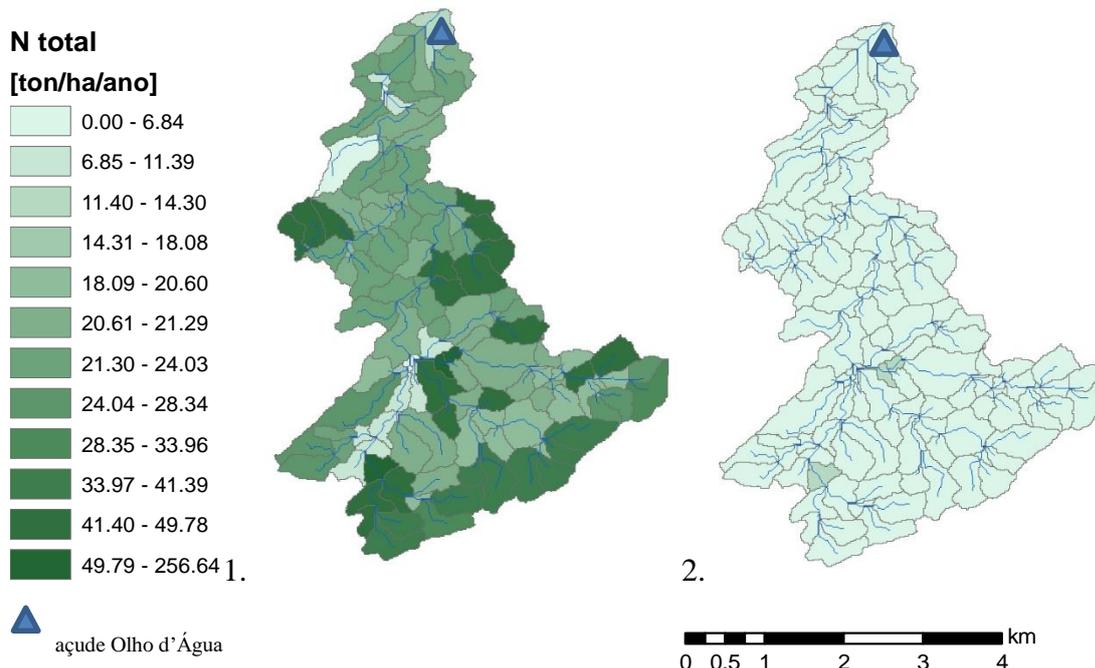


Figura 4.6 – Carga de nitrogênio de origem difusa: 1. Ano úmido; 2. Ano seco (tonN/ha/ano), na bacia do Açude Olho d'Água.

4.2 MODELAGEM DO RESERVATÓRIO

4.2.1 Considerações

Neste subcapítulo é apresentada a estratégia de modelagem do Açude Olho d'Água utilizando-se o modelo matemático CE-QUAL-W2. No **Produto 1** (Atividade 1.1) e **Produto 2** (Atividade 1.2), o modelo em questão já foi detalhadamente descrito, sendo que neste volume é apenas apresentada, genericamente, a abordagem de aplicação ao caso de estudo. Serão assim descritos os dados de entrada utilizados, os processos de calibração e validação do modelo e, por último, serão apresentados os resultados obtidos e alguns cenários exemplificativos, tal como demonstrado no **Relatório 3**.

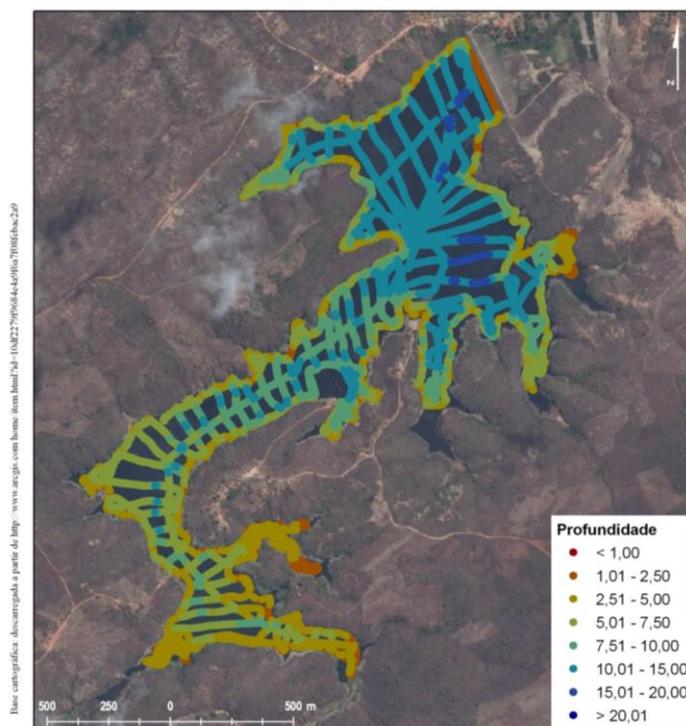
4.2.2 Dados de Entrada

Para implementação do modelo do reservatório é necessária a preparação de dados de entrada específicos para cada caso de estudo. Tal como desenvolvido no Açude Acarape do Meio no **Relatório 3**, para o processo de modelagem em reservatórios são necessários dados essenciais e condições de fronteira, como:

- batimetria;
- condições iniciais;

- condições de fronteira meteorológica; e,
- vazões.

A batimetria do Açude Olho d'Água foi gerada a partir da batimetria fornecida por COGERH (ver **Figura 4.7**). O trabalho de campo do levantamento batimétrico foi realizado em janeiro de 2015, quando o açude apresentava cota 345,2 m (aproximadamente 64 % da capacidade de armazenamento). Deste modo, e uma vez que o sangradouro se encontra à cota 350,0 m, foi complementado o levantamento batimétrico com informação altimétrica para cotas superiores a 345,2 m. Para o efeito recorreu-se ao modelo digital do terreno (MDT) disponibilizado pela NASA (SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de, aproximadamente, 30 m.



Fonte: Elaborado a partir de COGERH (2015).

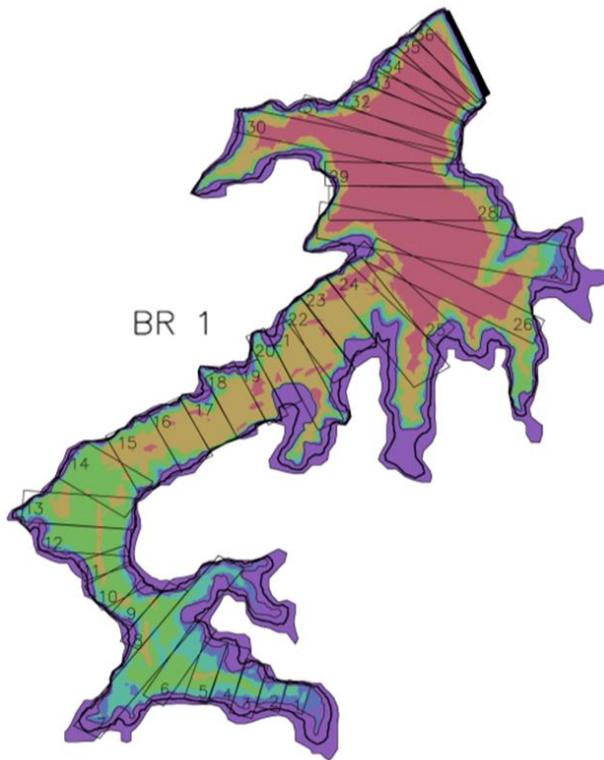
Figura 4.7 – Batimetria do Açude Olho d'Água, elaborada a partir de levantamento realizado em 2015.

Posteriormente, foram geradas curvas de nível por meio do MDT da NASA que foram comparadas e corrigidas utilizando-se imagens de satélite históricas do entorno do açude. Para o efeito, o nível d'água na data de aquisição de cada imagem de satélite analisada foi consultado no histórico do Açude Olho d'Água, disponibilizado pela COGERH. Para a construção da malha computacional, foi assim criado um MDT que integrou o levantamento batimétrico existente e a informação altimétrica obtida por

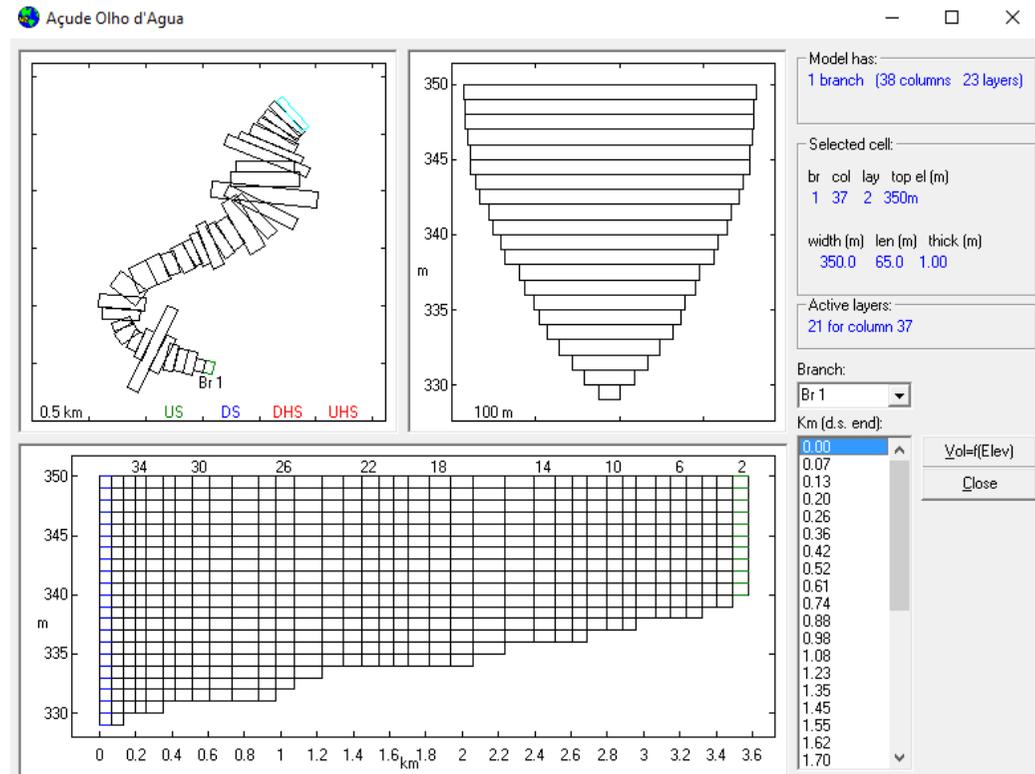
meio do MDT da NASA. As curvas de nível foram determinadas por interpolação dos dados existentes utilizando o *software* AutoCAD Civil 3D.

No mesmo *software* foram definidos os segmentos nos trechos/ramos que serão considerados no modelo CE-QUAL-W2 e que constituem o Açude Olho d'Água, atendendo aos seus perfis longitudinais e transversais (de modo a garantir transições suaves de inclinação entre segmentos). Assim, foi definido um (1) trecho (BR) no modelo CE-QUAL-W2 que representa o principal curso d'água afluente ao açude (riacho do Machado), conforme **Figura 4.8**.

As características da malha estão representadas na **Figura 4.8** e **Tabela 4.4**.



(a)



(b)

Figura 4.8 – Definição dos segmentos do Açude Olho d'Água (a) e geometria do açude no modelo CE-QUAL-W2 (b), no qual se pode visualizar a representação da área superficial, um exemplo de seção do trecho principal e perfil longitudinal.

Tabela 4.4 – Características da malha computacional para o Açude Olho d'Água.

Trecho	Resolução Vertical (m)	Número de Camadas Ativas	Número de Segmentos Ativos	Máximo Δx (m)	Mínimo Δx (m)
BR 1 (riacho do Machado)	1	23	36	180	60

Para validar os volumes da geometria elaborada, foi realizada uma comparação entre a curva de volumes armazenados, anteriormente obtida, na curva de volumes fornecida no relatório de batimetria e na curva de volumes de projeto (fornecida pela COGERH).

Neste contexto, é importante ressaltar que existe uma significativa diferença entre as curvas de volumes armazenados de projeto e do levantamento batimétrico realizado. A título de exemplo, destaca-se que, de acordo com o levantamento batimétrico realizado, para a cota 345,00 o volume armazenamento é, aproximadamente, $10,4 \text{ hm}^3$, ou seja, 14,6 % inferior ao volume de projeto para a mesma cota (ver **Figura 4.9**).

Os resultados representados na **Figura 4.9** indicam que o modelo descreve uma curva de volumes semelhante à dos dados fornecidos, significando que a geometria construída reproduz adequadamente a relação cota-volume do açude.

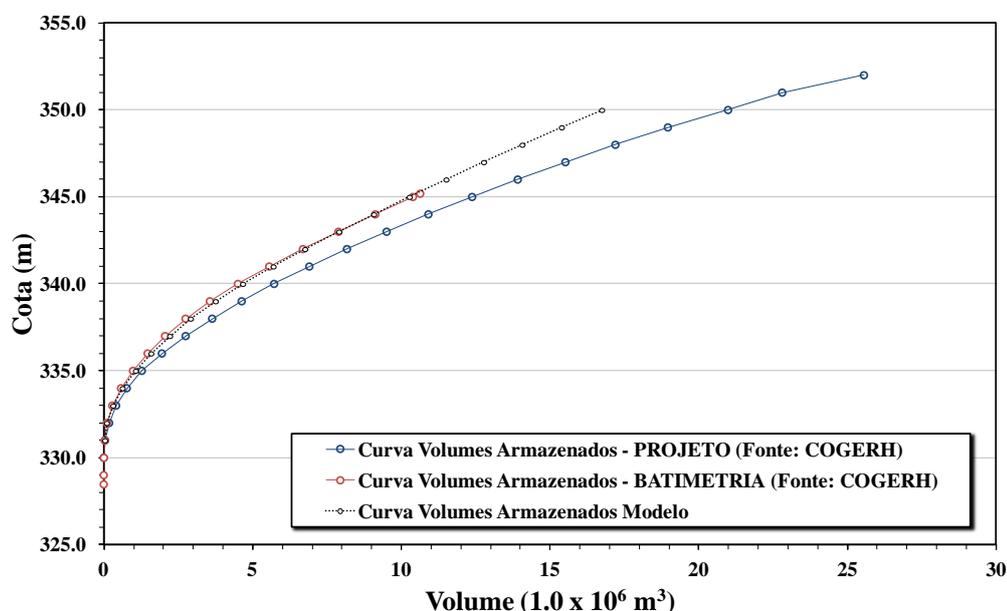


Figura 4.9 – Comparação entre curvas cota-volume para o Açude Olho d'Água geradas com dados de campo e com modelo CE-QUAL-W2.

Relativamente às condições iniciais foi considerado o valor da cota que o açude apresentava no dia correspondente ao dia de início da simulação (01/01/2015). Com relação aos dados de qualidade da água, uma vez que não se dispunha de registros no início do período simulado, considerou-se como condição inicial o perfil de temperatura e oxigênio dissolvido de 31/05/2006 realizado por COGERH. Para a concentração inicial de nutrientes, consideraram-se os registros realizados no ano 2007 por COGERH.

A meteorologia é a condição de fronteira requerida pelo modelo CE-QUAL-W2, sendo necessário: temperatura do ar e do ponto de orvalho, umidade relativa, velocidade, direção do vento e nebulosidade. Foram utilizados os dados da estação Barbalha INMET (BDMEP).

Contudo, foram comparadas as variáveis meteorológicas das estações Várzea Alegre e Barbalha. A título de exemplo, apresentam-se na **Figura 4.10** a temperatura do ar nas estações Várzea Alegre e Barbalha entre 26 de abril e 29 de novembro de 2007, bem como as respectivas médias móveis simples de 15 registros. Conforme **Figura 4.10**, as estações apresentam médias móveis bastante próximas. Contudo, a amplitude diária da temperatura (*i.e.* a diferença entre temperatura máxima e mínima diária) é notoriamente diferente. Além da diferente localização das duas estações, a diferença de amplitude diária de temperatura poderá ser resultante do fato de a estação Barbalha convencional apenas disponibilizar três (3) registros diários (às 0:00h, 12:00h e 18:00h), pelo que poderá não registrar o instante de ocorrência das temperaturas máximas e mínimas diárias. Neste contexto foram solicitados os horários da Estação Barbalha Automática - A315 (Código OMM: 81911) que, à data, ainda não foram recebidos. Estes dados serão tidos em consideração no **Produto 5**.

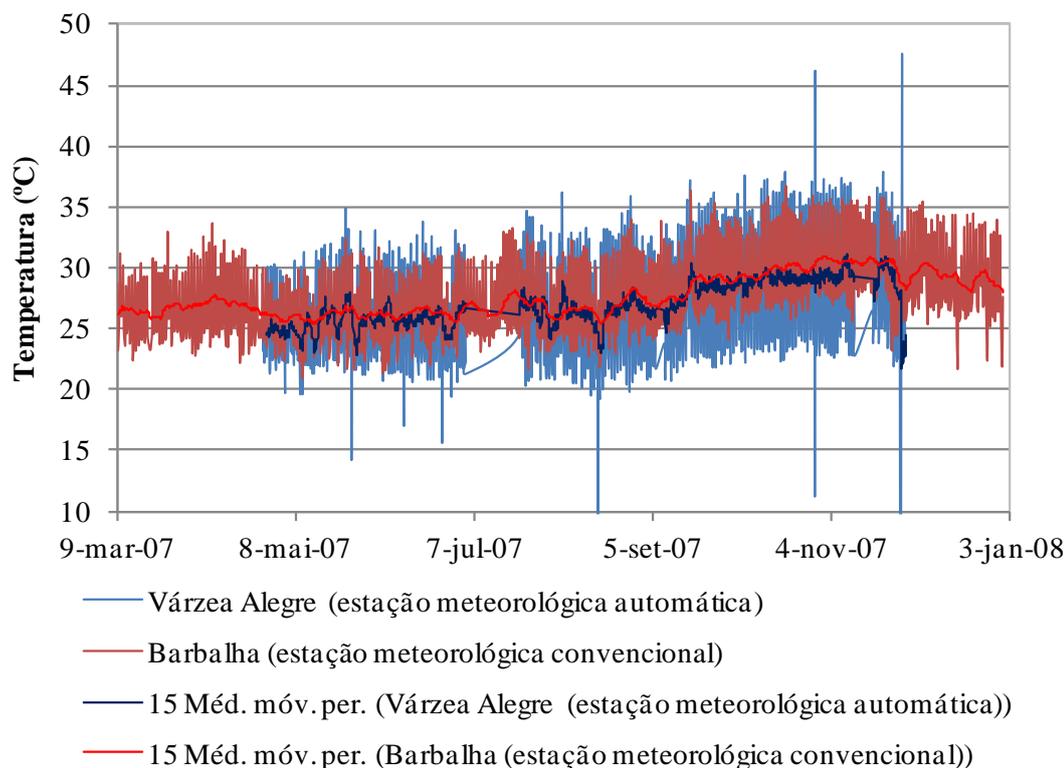


Figura 4.10 – Temperatura do ar nas estações Várzea Alegre e Barbalha (convencional) e respectivas médias móveis entre 26 de abril e 29 de novembro de 2007.

Além da meteorologia, as vazões afluentes são também necessárias como condição de fronteira do modelo de reservatório. Para este trabalho é considerado o modelo de bacia para gerar as vazões que afluem o reservatório. As medidas nos rios, caso existam, são utilizadas para a calibração e validação deste modelo. A utilização de modelos de bacia devidamente validados permite obter vazões para o período necessário, sem falhas, assim como séries temporais de qualidade da água, que serão utilizados também como condições de fronteira. Assim, para a qualidade de água foram considerados o nitrogênio e fósforo total, bem como a concentração de oxigênio dissolvido, proveniente do modelo SWAT (**item 4.1**).

De modo a reproduzir adequadamente as variações de volume de água armazenada no açude ao longo do período de simulação, foi necessário considerar os consumos de água do açude e as vazões liberadas pelo sangradouro. De fato, uma das principais funções do Açude Olho d'água é o abastecimento de água à população da sede municipal de Várzea Alegre e do distrito de Riacho Verde.

Desta forma, foram considerados os dados disponíveis que constam na Memória dos Aportes ao Açude Olho d'Água - disponibilizada por FUNCEME (2015).

Assim, na **Tabela 4.5** encontram-se resumidos os dados necessários à implementação do modelo CE-QUAL-W2 no açude Olho d'Água.

Tabela 4.5 - Tipos de dados de entrada no modelo, sua escala/resolução, fonte e período disponível.

Dado	Escala/resolução	Fontes	Período
Batimetria	Adimensional e 30 m	COGERH e NASA	NA
Meteorologia	Sub-diário	INMET	2005 a 2007
Quantidade e qualidade de água afluente	Diário	SWAT	2005 a 2007

4.2.3 Calibração e validação do modelo

No presente estudo foi efetuada a calibração do modelo no período entre 2005 e 2007. A escolha deste período diz respeito, sobretudo, à disponibilidade de dados primários essenciais para a realização do processo de calibração.

Desta forma, foi consultado o Banco de Dados de Qualidade da Água do Açude Olho d'Água, disponibilizado pela FUNCEME, no qual constam medições (por sonda e em laboratório) de vários parâmetros físicos e químicos da água do açude no período que compreende os anos de 1999 a 2015.

Neste contexto, vale frisar que a fraca aderência dos resultados do modelo aos dados de campo não pode ser utilizada como critério de avaliação do desempenho do modelo, face à (i) reduzida disponibilidade de registros de qualidade de água, (ii) à existência de vários valores “anômalos” / *outliers* e (iii) à impossibilidade de verificar a qualidade e fiabilidade dos dados. De fato, os registros existentes sugerem que os mesmo poderão não representar correctamente o sistema. Além disso, a falta de dados representativos da evolução do sistema não permite qualquer avaliação do modelo.

Assim sendo, durante o processo de calibração e validação pretendeu-se que o modelo reproduzisse adequadamente o padrão de evolução dos perfis térmicos e de propriedades da água (nutrientes, oxigênio, clorofila) típicos de açudes localizados em ambientes semi-áridos.

Para a calibração do modelo foram consideradas as medições realizadas na superfície da coluna d'água (mais precisamente a 0,3 m de profundidade) referentes à temperatura, ao

oxigênio dissolvido, a clorofila-a, nitrato, amônia e ferro no ponto de monitoramento (OLH-01), com localização representada na **Figura 4.11**.

Ademais, foram ainda comparados os perfis de temperatura, oxigênio dissolvido e clorofila-a registrados em 2006 e 2007 nos pontos de monitoramento (OLH-01) e (OLH-02), com localização representada na **Figura 4.11**.

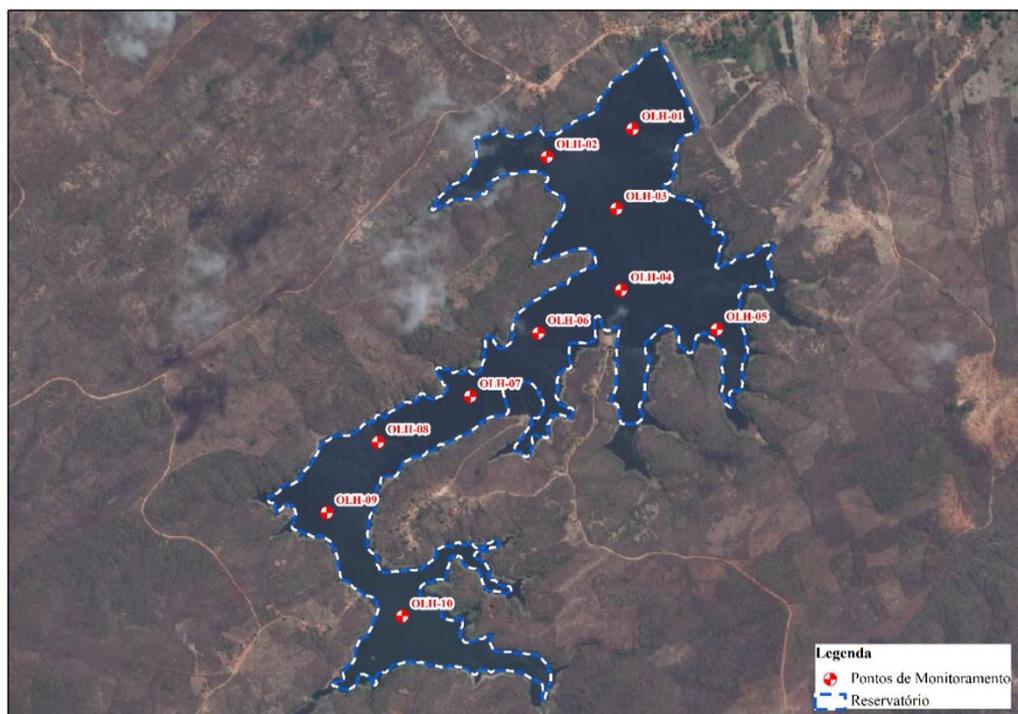


Figura 4.11 – Localização dos pontos de monitoramento do Açude Olho d'Água.

4.2.3.1 Balanço de volumes no reservatório

É essencial que o modelo reproduza corretamente as variações de volume de água armazenada no reservatório ao longo do período de simulação, bem como as correspondentes cotas, em função das entradas e saídas de água.

Para a verificação e calibração do balanço de volumes no reservatório foi estabelecida a comparação entre as cotas de água simuladas pelo modelo com as cotas registradas no açude no período de 2005 a 2007. Essa comparação é apresentada na **Figura 4.12**.



Figura 4.12 – Comparação das cotas simuladas pelo CE-QUAL-W2 e registradas no açude Olho d'Água.

Conforme **Figura 4.12**, pode concluir-se que as cotas de água no reservatório foram corretamente simuladas, obtendo-se uma boa representação da sua evolução ao longo do período simulado (2005 a 2007). As pequenas divergências entre o nível calculado e registrado resultam de diferenças entre a batimetria real e a estimada para uso do modelo.

4.2.3.1 Evaporação no reservatório

Ademais, é igualmente importante que o modelo reproduza adequadamente a evaporação ocorrida no reservatório ao longo do período de simulação de modo a representar os processos de troca de calor e massa ocorridos na interface água-ar. De fato, na região semi-árida, a evaporação é uma das variáveis meteorológicas mais importantes para o gerenciamento de recursos hídricos em reservatórios uma vez que representa uma parte significativa das perdas de água existentes.

Por conseguinte, foi estabelecida a comparação entre a evaporação simulada pelo modelo com os registros da estação meteorológica Barbalha (através de atmômetro de Piché) e com as normais apresentadas na Ficha Técnica do Açude. Conforme **Figura 4.13** verifica-se que o modelo reproduz o padrão de variação sazonal na evaporação, mais elevado nos meses secos (entre agosto e outubro), embora esta variação seja mais expressiva nos dados da estação. No entanto, conforme os estudos realizados para o Nordeste do Brasil - LIMEIRA *et al.*, (2004) e SILVEIRA *et al.*, (2011) - as evaporações estimadas por meio de atmômetro de Piché tendem

a ser sobrestimados durante o período seco, o que sugere serem adequadas as evaporações simuladas pelo modelo.

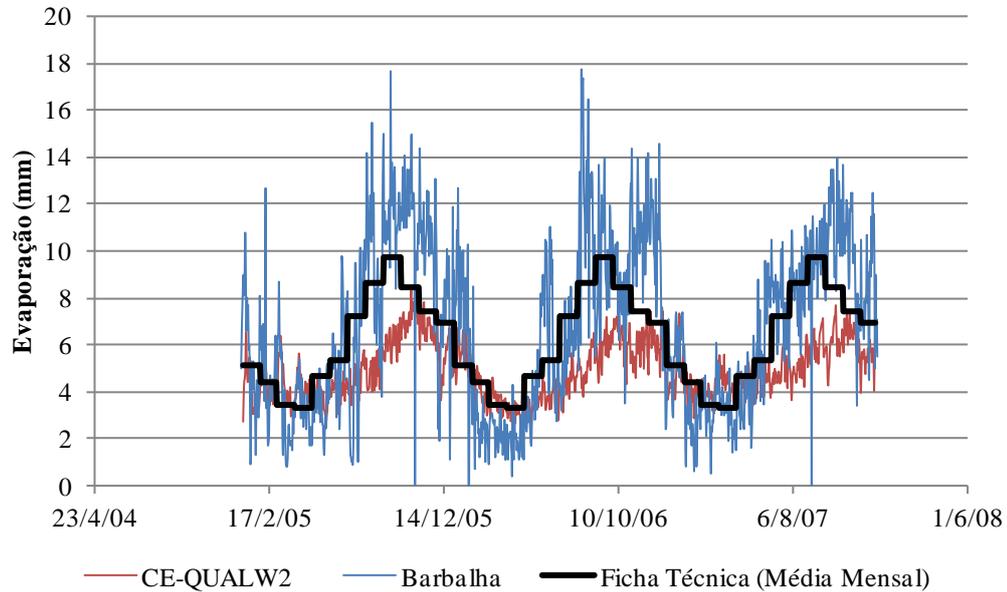


Figura 4.13 – Comparação da evaporação simulada pelo CE-QUAL-W2 no reservatório Olho d’Água e registradas na estação meteorológica Barbalha.

4.2.3.2 Temperatura da água no reservatório

Conforme apresentado na **Figura 4.14**, onde se estabelece a comparação entre os resultados do modelo e perfis de temperatura registrados para o ano de 2006 e 2007, verifica-se que o modelo simula a variação da temperatura em profundidade. A aproximação do modelo aos dados é melhor no perfil medido a 4 de maio de 2006, enquanto nas outras campanhas o ajuste não é tão próximo, ainda que o modelo reproduza as gamas de valores e o gradiente vertical térmico. Vale salientar a impossibilidade de aferir a qualidade dos dados obtidos pela sonda, sendo que estes não foram considerados para a avaliação de desempenho do modelo.

Assim, uma vez que existem poucos registros consistentes para a calibração, o desempenho do modelo será novamente avaliado com base nos resultados das campanhas de monitoramento da qualidade da água realizada no âmbito do presente estudo.

Contudo, os resultados obtidos sugerem que o modelo descreve adequadamente a tendência do comportamento térmico típico de açudes localizados em ambientes semi-áridos, especialmente no que diz respeito à sua estrutura térmica vertical, podendo sugerir que este deverá descrever o seu comportamento hidrodinâmico de uma forma igualmente adequada.

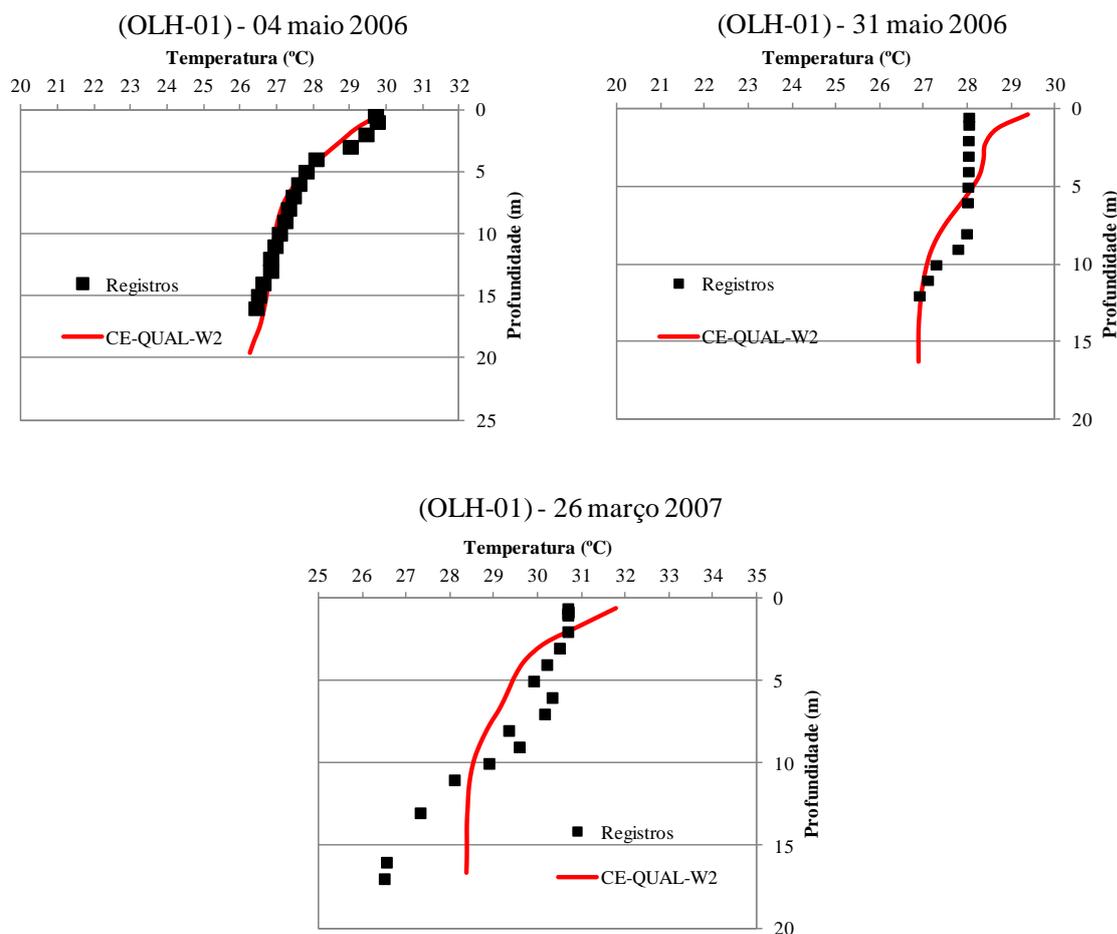


Figura 4.14 – Perfis de temperatura no Açude Olho d’Água no ponto de monitoramento OLH-01 no ano de 2006 e 2007.

4.2.3.3 Qualidade da água

No seguimento da calibração da temperatura no sistema, procedeu-se à calibração do modelo para representar adequadamente os parâmetros de qualidade da água. Para isto, deverão existir dados suficientes de qualidade da água que permitam representar a sua variabilidade sazonal.

Neste contexto e conforme referido anteriormente, vale frisar que foram detectadas várias discrepâncias nas medições existentes no Banco de Dados de Qualidade da Água do Açude Olho d’Água, realizadas em campo (por sonda) e em laboratório (dados disponibilizados pela FUNCEME), sugerindo que os mesmos poderão não representar correctamente o sistema. Deste modo, o desempenho do modelo será novamente avaliado com base nos resultados das campanhas de monitoramento de qualidade da água realizada no âmbito do presente estudo.

No entanto, foi realizada a calibração do modelo do Açude Olho d’Água para os parâmetros de qualidade da água de modo a que o modelo reproduza adequadamente o padrão de

evolução das propriedades da água (nutrientes, oxigênio, clorofila) típicos de açudes localizados em ambientes semi-áridos, sendo que nas descrições a seguir são apresentados os principais resultados e comentários.

a) Oxigênio Dissolvido (OD)

Na **Figura 4.15** apresentam-se as concentrações de OD registradas e modeladas em diferentes profundidades nos anos de 2006 e 2007, respectivamente. Verifica-se que, para o dia 4 de maio de 2006, o modelo representa com relativa aderência aos dados de campo o perfil de OD em profundidade, em particular, o forte gradiente na sua concentração. Na análise da **Figura 4.15** verifica-se que o modelo também representa de modo bastante satisfatório o perfil de OD medido no dia 31 de maio de 2006, especificamente quanto à mistura existente no epilímnio e a forte estratificação existente em profundidade. Relativamente ao perfil medido no dia 26 de março de 2007, verifica-se uma inconsistência dos dados de campo, não sendo possível aferir a respectiva aderência do modelo.

Ainda assim, se ressalva que a falta de dados e, em alguns casos, a sua inconsistência não permite uma avaliação adequada dos resultados do modelo, sugerindo-se, para o futuro, um aumento na intensidade deste tipo de amostragem.

No entanto, face ao comportamento de reservatórios localizados em regiões semi-áridas e aos dados disponíveis que, à partida, parecem mais consistentes, considera-se que o modelo descreveu adequadamente o comportamento do OD no açude, sendo este parâmetro o mais crítico para a fauna no sistema e um dos parâmetros que mais influência tem na sua dinâmica química. Refere-se ainda que o comportamento do oxigênio dissolvido simulado pelo modelo se enquadra nos padrões típicos de açudes com as mesmas características, tanto na distribuição em profundidade, como na evolução temporal deste parâmetro.

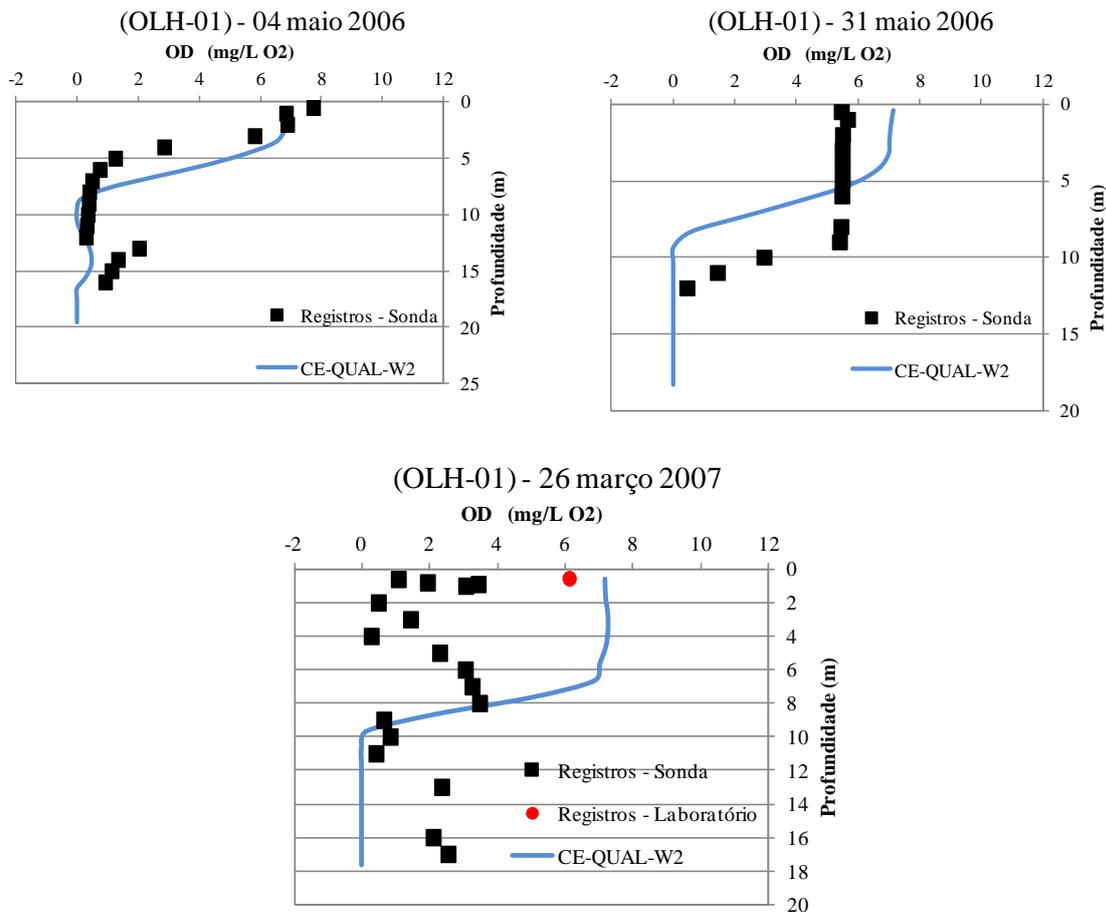


Figura 4.15 – Perfis de oxigênio dissolvido no Açude Olho d'Água no ponto de monitoramento OLH-01 nos anos de 2006 e 2007.

b) Clorofila-a

Atendendo à falta de um conjunto de dados de campo mais extenso de clorofila-a na superfície entre os anos de 2005 a 2007, não foi possível realizar uma avaliação adequada do desempenho do modelo. Esta apenas pode ser realizada de uma forma qualitativa, em que é avaliada a sua capacidade de reproduzir alguns padrões típicos para corpos d'água desta natureza. Neste sentido, e conforme **Figura 4.16** os resultados do modelo mostram valores que frequentemente se verificam em sistemas eutrofizados e com elevado tempo de retenção, tal como o açude em questão.

Ademais, conforme indica a **Figura 4.17**, o ajustamento dos resultados do modelo ao perfil de clorofila-a medido em 4 de maio de 2006 é bastante próximo, representando adequadamente o forte gradiente existente entre os 5 e 10 m de profundidade. Por outro lado, o perfil medido no dia 31 de maio de 2006 não permite aferir o desempenho do modelo face à nítida inconsistência dos resultados.

Desta forma, admitiu-se que o modelo reproduz adequadamente a dinâmica da biomassa algal em profundidade típica de açudes com as mesmas características. No entanto, vale frisar que o desempenho do modelo será novamente avaliado com base nos resultados das campanhas de medição de qualidade da água realizadas no âmbito do presente estudo.

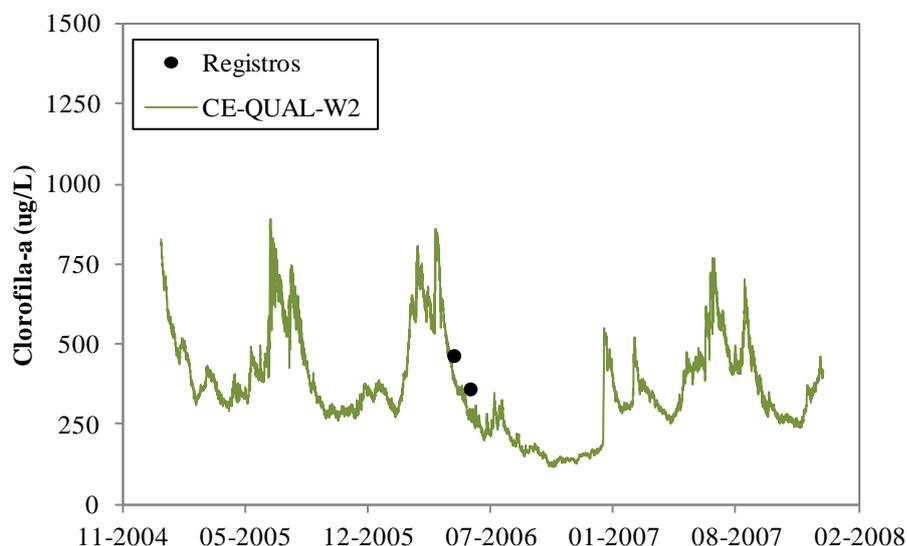


Figura 4.16 – Série temporal de clorofila-a à superfície da coluna d'água no Açude Olho d'Água no ponto de monitoramento OLH-01.

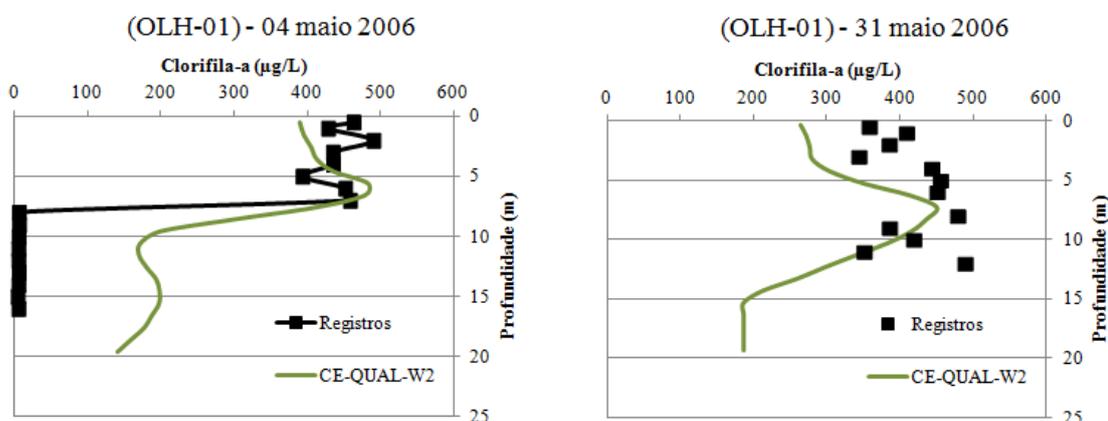


Figura 4.17 – Perfis de clorofila-a no Açude Olho d'Água no ponto de monitoramento OLH-01 no ano de 2006.

c) Nutrientes

Apesar de relevante para o exercício de calibração do modelo, a comparação dos resultados das simulações com valores de campo para os nutrientes não pode ser devidamente efetuada. Uma vez mais, a ausência de dados não permite caracterizar o sistema em estudo na sua dinâmica anual, nem estimar qualquer variabilidade interanual. Ainda assim, apresentam-se os

resultados do modelo juntamente com os dados disponíveis, unicamente a título ilustrativo de alguma variação nos valores medidos. Na **Figura 4.18** apresenta-se a série temporal de nitrato medido na superfície da coluna d'água do Açude Olho d'Água, no ponto de monitoramento OLH-01. A série foi estimada pelo modelo entre os anos de 2005 e 2007. Na mesma figura apresentam-se, ainda, os registros de nitrato disponíveis para o período em análise. Conforme **Figura 4.18**, os registros disponíveis para os anos de 2005 e 2007 não permitem identificar um padrão ou relação com outros indicadores. Assim sendo, não foi possível avaliar a qualidade do ajustamento entre o conjunto de resultados do modelo e os registros no período.

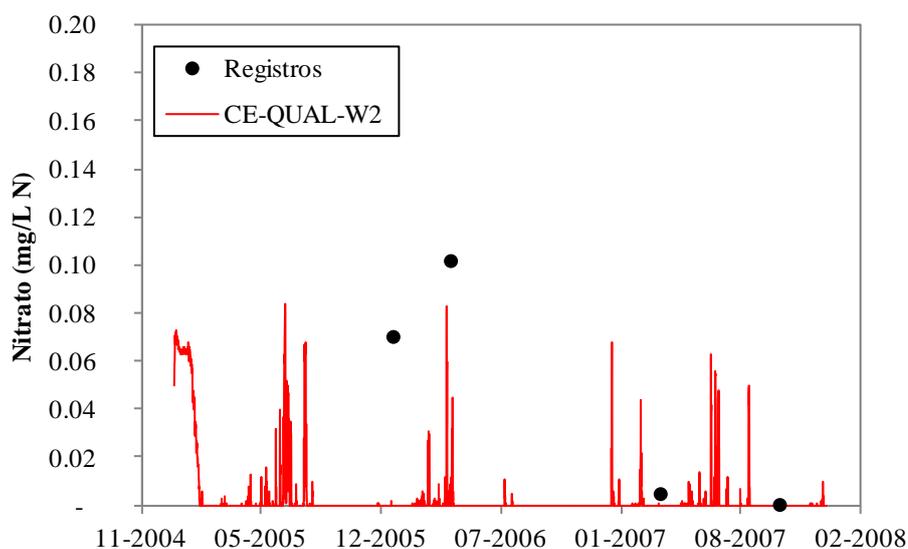


Figura 4.18 – Série temporal de nitrato à superfície da coluna d'água no Açude Olho d'Água no ponto de monitoramento OLH-01.

De igual forma, apresenta-se na **Figura 4.19** a série temporal de amônia à superfície da coluna d'água do Açude Olho d'Água no ponto de monitoramento OLH-01, estimada pelo modelo entre os anos de 2005 e 2007. A mesma figura apresenta, ainda, os registros de amônia disponíveis para o período em análise.

Conforme **Figura 4.19**, os registros disponíveis para os anos de 2005 e 2007 não permitem identificar um padrão ou relação com outros indicadores. Assim sendo, não foi possível avaliar a qualidade do ajustamento entre o conjunto de resultados do modelo e os registros no período.

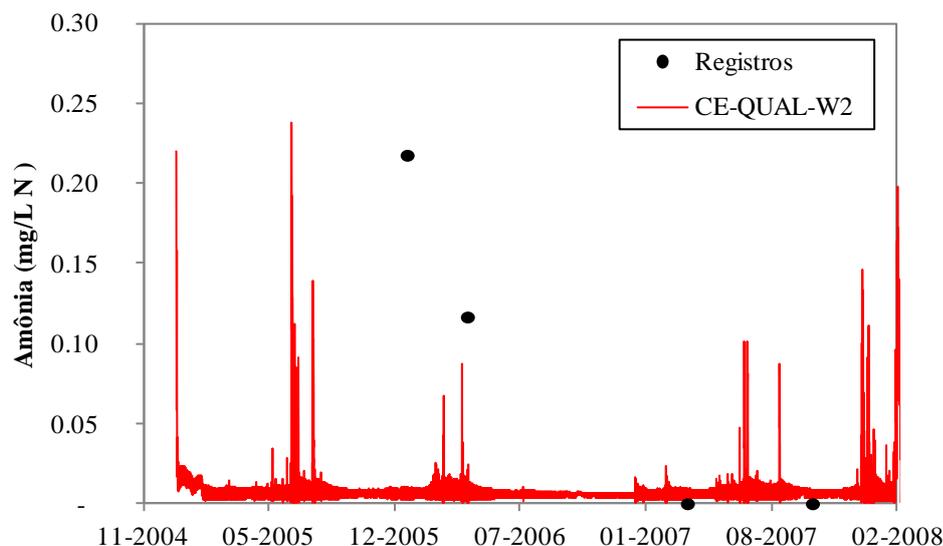


Figura 4.19 – Série temporal de amônia à superfície da coluna d'água no Açude Olho d'Água no ponto de monitoramento OLH-01.

4.2.4 Resultados e cenários

4.2.4.1 Temperatura da água

A evolução temporal da estrutura térmica do Açude Olho d'Água (**Figura 4.20** e **Figura 4.21**) revela a existência de uma termoclina permanente ao longo de todo o ano, ainda que o gradiente térmico entre a superfície e o fundo não varie mais do que alguns graus (entre 28° e 31°C). Esta, aliás, é uma característica típica de lagos e reservatórios em climas tropicais e subtropicais, devido à transferência térmica por meio da interface água-ar. A temperatura do ar é, por norma, elevada e varia pouco ao longo do ano, implicando igualmente valores constantes e elevados da temperatura da água.

É durante o período úmido que a estratificação no açude é mais marcada, devido ao sobreaquecimento das camadas mais superficiais, atingindo a água valores que se aproximam de 31° C. A água do hipolímnio apresenta a mesma temperatura nos dois (2) períodos, o que pode significar não haver mistura vertical persistente, apenas em alguns episódios de vento mais intenso. Esta característica do açude intensifica os sintomas de eutrofização, como por exemplo, a depleção de oxigênio nas camadas mais profundas.

Conforme **Figura 4.14 c)** e **Figura 4.20**, no dia 26 de março de 2007 a temperatura da água próximo do Açude varia sensivelmente entre os 31 °C à superfície e os 28 °C junto ao fundo (a uma profundidade de aproximadamente 17 m).

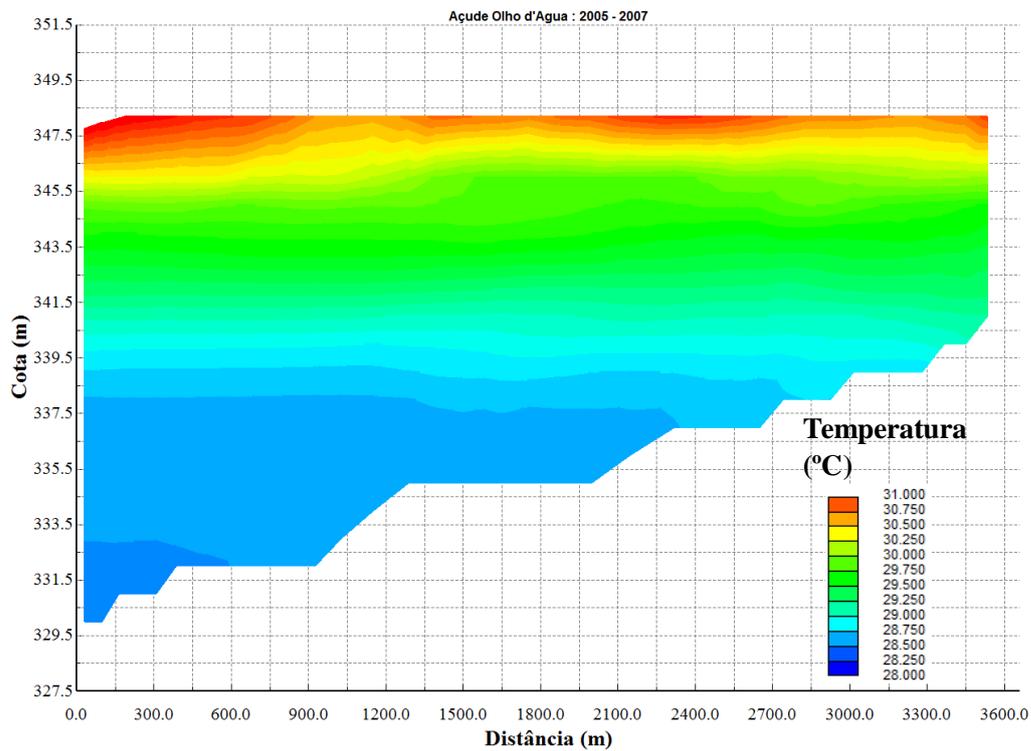


Figura 4.20 – Perfil longitudinal de temperatura no Açude Olho d'Água no dia 26 de março de 2007 às 12:00h (período úmido).

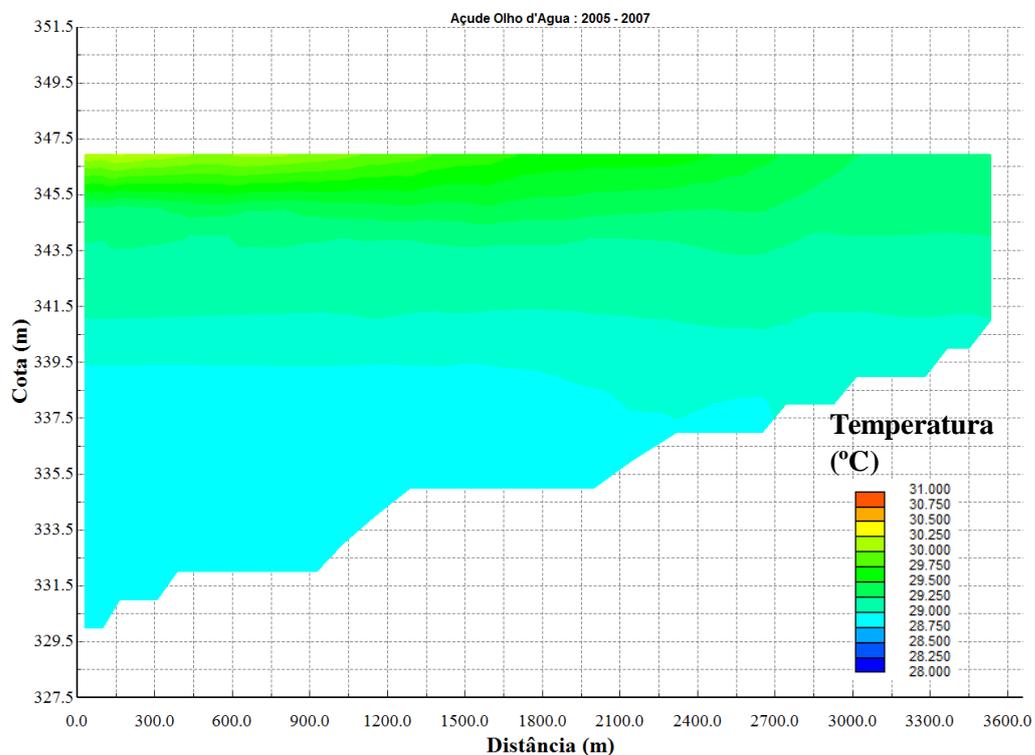


Figura 4.21 – Perfil longitudinal de temperatura no Açude Olho d'Água no dia 6 de agosto de 2007 às 12:00h (período seco).

4.2.4.2 Produtores primários fitoplanctônicos

Os perfis longitudinais de clorofila obtidos com o modelo mostram que o açude é caracterizado por valores elevados de clorofila (**Figura 4.22** e **Figura 4.23**), o que permite sugerir uma produtividade primária elevada. Uma vez que esta atividade depende da disponibilidade de nutrientes, isto significa que eles precisam estar presentes no açude, podendo ter origem na mineralização que ocorre no fundo, ou nos caudais que afluem da bacia ou do entorno do reservatório.

Em ambos os períodos os valores são mais elevados à superfície devido à disponibilidade de luz, atingindo valores significativamente elevados. Uma vez mais, os resultados mostram o estado de eutrofização do açude, uma vez que a presença de produtores primários em elevadas concentrações só é possível devido à disponibilidade de nutrientes, também em elevadas concentrações.

Analisando os resultados espacialmente verifica-se que os valores mais elevados ocorrem a montante do açude, estando esta ocorrência relacionada com a entrada de água vinda da bacia, trazendo consigo nutrientes na forma orgânica e mineral. Este padrão é particularmente visível durante o período seco. Apesar das afluições serem menores durante este período, o tempo de residência da água é maior, criando condições necessárias à formação e manutenção de *blooms*.

O máximo sub-superficial de clorofila-a que se verifica no período úmido pode representar a presença de uma estrutura que se mantém ao longo de todo este período. Este máximo de clorofila-a pode ocorrer devido à disponibilidade de nutrientes que entram no açude e a matéria orgânica que é mineralizada, disponibilizando assim nutrientes adicionais. Neste período, o tempo de residência da água poderá não ser suficiente para a formação de *blooms* à superfície, mas em profundidade poderão existir condições à sua formação.

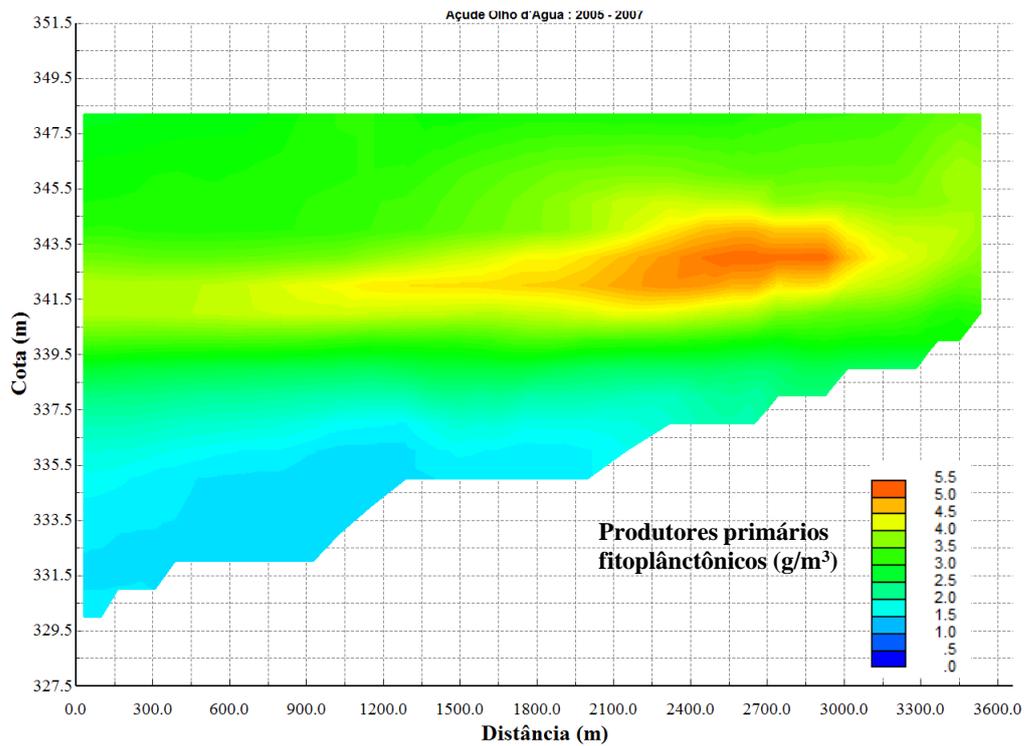


Figura 4.22 – Perfil longitudinal de concentração de produtores primários fitoplânctônicos no Açude Olho d'Água no dia 26 de março de 2007 às 12:00h (período úmido).

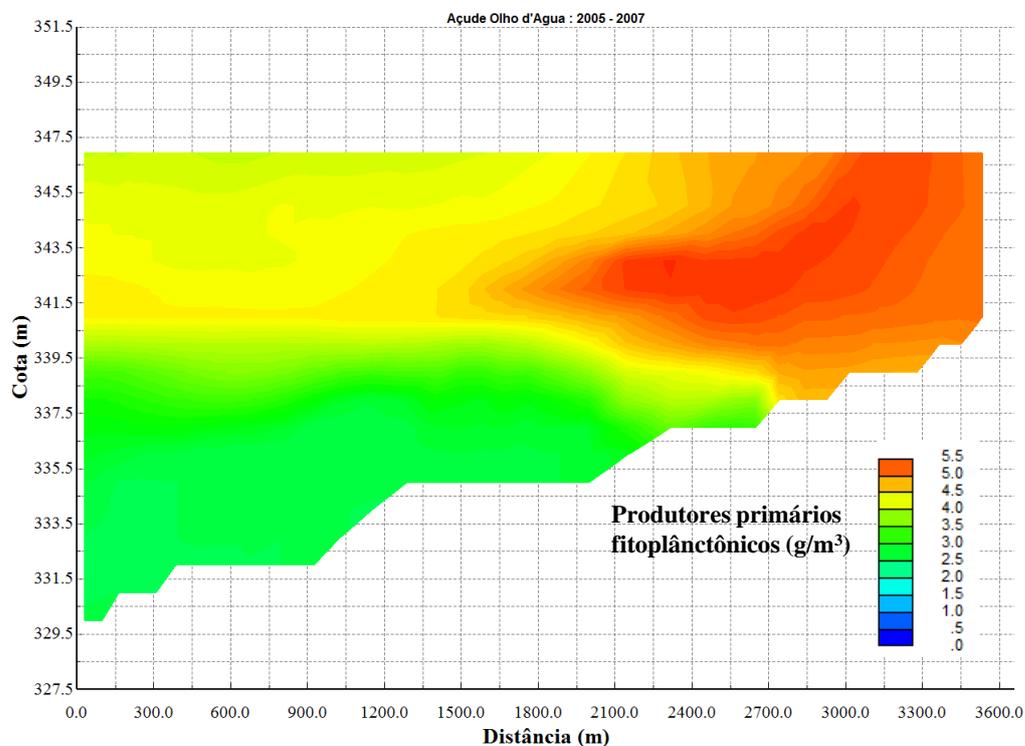


Figura 4.23 – Perfil longitudinal de concentração de produtores primários fitoplânctônicos no Açude Olho d'Água no dia 6 de agosto de 2007 às 12:00h (período seco).

4.2.4.3 Nutrientes

A distribuição de nutrientes simulada pelo modelo, representada na **Figura 4.24** e **Figura 4.25** para o fosfato, e na **Figura 4.26** e **Figura 4.27** para o nitrato, revela um padrão comum em reservatórios situados em zonas expostas a forte radiação solar todo o ano. As concentrações de nutrientes são mais baixas à superfície em consequência do seu consumo pelo fitoplâncton. Esta depleção estende-se a todo o epilímnio, zona onde a disponibilidade de luz permite a fotossíntese. Tanto a concentração de fosfato como de nitrato aumentam significativamente no hipolímnio, zona não atingida pela luz da superfície e onde não há consumo de nutrientes pelos produtores primários. Desta forma, os nutrientes acumulam.

O aumento da concentração é particularmente intenso no caso do fosfato, em resultado dos processos químicos de degradação da matéria orgânica no sedimento que liberam fosfato para a coluna d'água.

Apesar de não existirem dados que permitam uma avaliação do desempenho do modelo em reproduzir a dinâmica deste sistema, é possível dizer que os resultados mostram um cenário típico de sistemas aquáticos semelhantes ao açude em estudo.

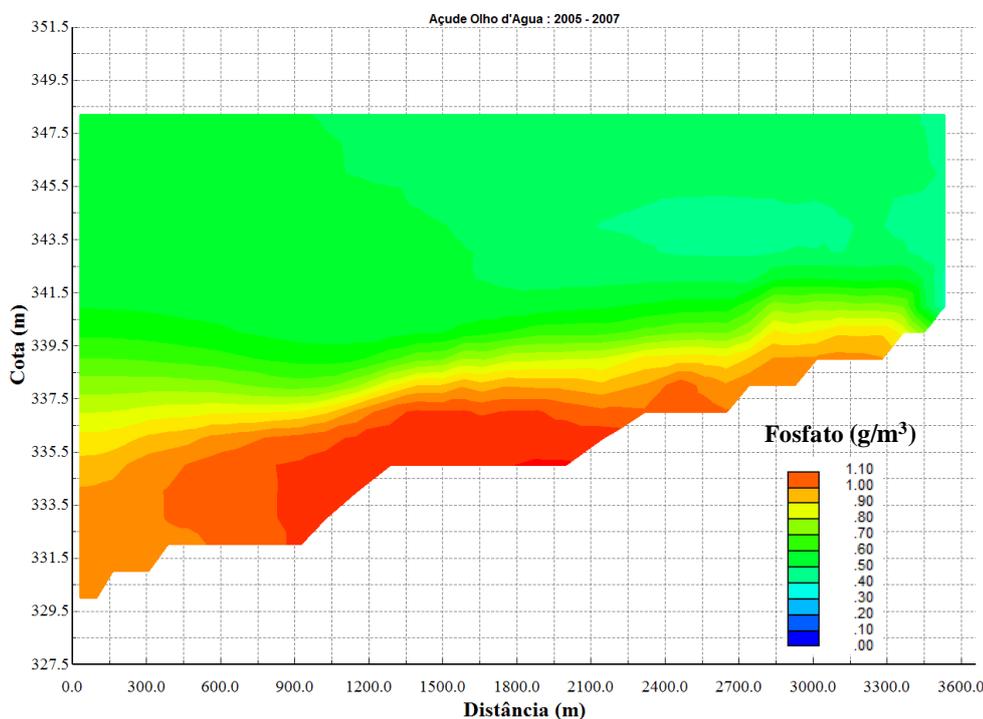


Figura 4.24 – Perfil longitudinal de concentração de fosfato no Açude Olho d'Água no dia 26 de março de 2007 às 12:00h (período úmido).

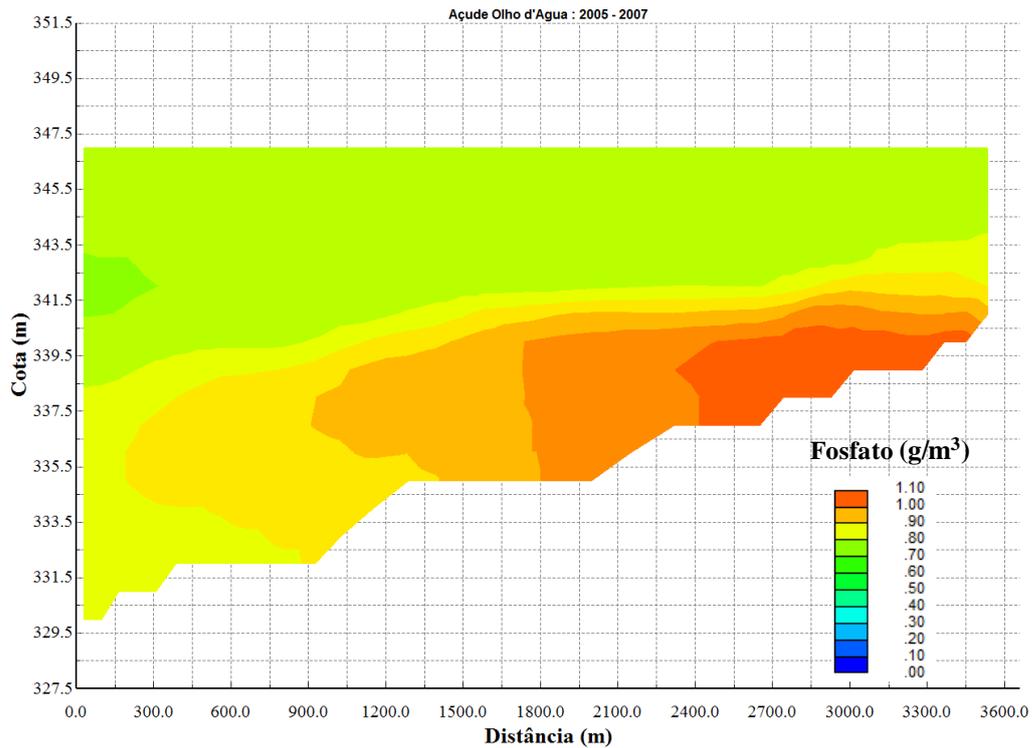


Figura 4.25 – Perfil longitudinal de concentração de fosfato no Açude Olho d'Água no dia 6 de agosto de 2007 às 12:00h (período seco).

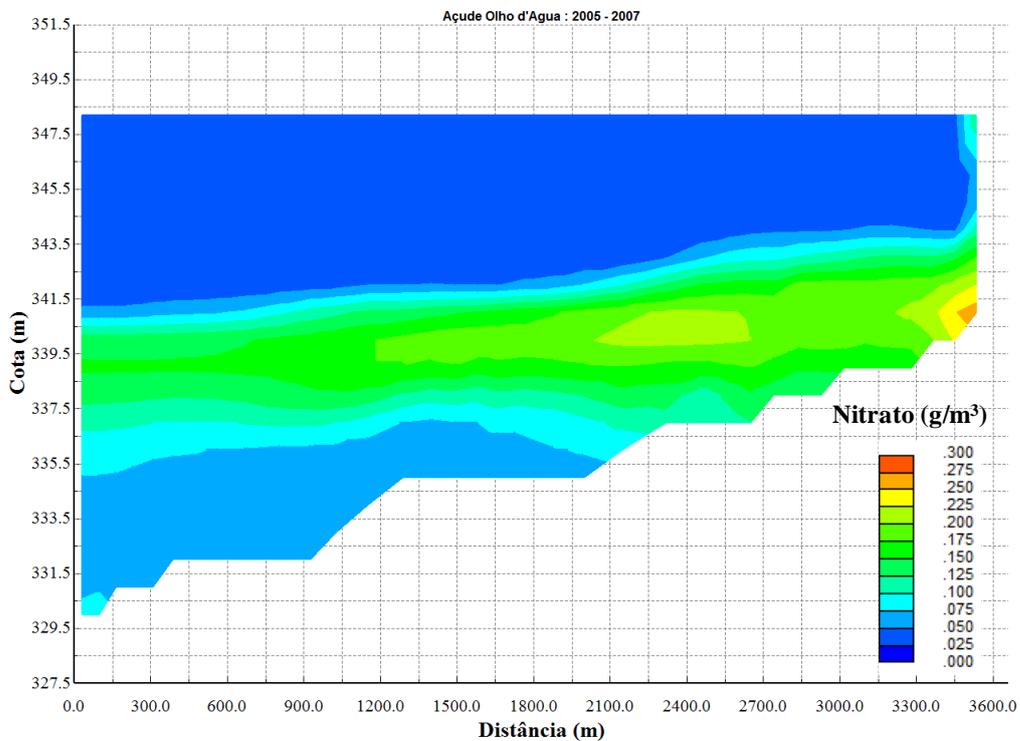


Figura 4.26 – Perfil longitudinal de concentração de nitrato no Açude Olho d'Água no dia 26 de março de 2007 às 12:00h (período úmido).

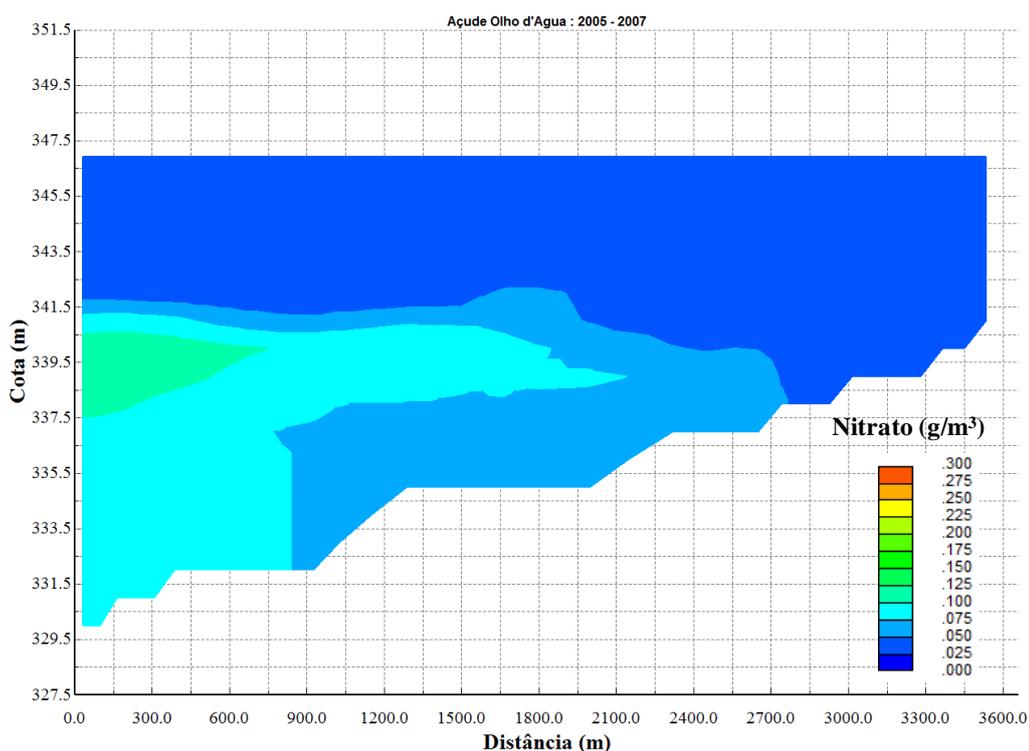


Figura 4.27 – Perfil longitudinal de concentração de nitrato no Açude Olho d'Água no dia 6 de agosto de 2007 às 12:00h.

4.2.4.4 Oxigênio Dissolvido (OD)

Os resultados do oxigênio dissolvido modelado para o Açude Olho d'Água (**Figura 4.28** e **Figura 4.29**) mostram que a dinâmica deste parâmetro é controlada, sobretudo, pela relação entre a produção primária no epilímnio e os processos de mineralização e oxidação que ocorrem no hipolímnio e no sedimento.

Juntamente com a fotossíntese que ocorre nas camadas superficiais onde há disponibilidade de radiação solar, as trocas de gases com a atmosfera contribuem também para uma oxigenação da água. Este processo físico, no entanto, é favorável à introdução de oxigênio na água por agitação (pela ação do vento, por exemplo), mas pode também resultar na perda de oxigênio para a atmosfera em função da temperatura elevada da água que não favorece a retenção deste gás, como acontece em água mais frias.

Nas camadas mais profundas não existe introdução de oxigênio, seja por processos físicos ou por processos biológicos. Em consequência, estas camadas são um sumidouro de oxigênio, sendo este gás continuamente utilizado nos processos microbiológicos de degradação da matéria orgânica que provem da superfície. O resultado desta dinâmica vertical é um gradiente em profundidade bem marcado, com concentrações que podem se aproximar de 7 mg/L à superfície, que descem para próximo de 0 mg/L por entre os 8 e 10 m de

profundidade. A depleção completa de oxigênio parece ser uma característica típica a partir desta profundidade e até ao fundo do açude. Parece, assim, existir uma camada que se pode elevar 10 m acima do fundo onde as condições de anoxia são constantes, impossibilitando assim qualquer tipo de vida animal e agravando ainda mais a liberação de nutrientes para a coluna d'água (eutrofização).

Salienta-se ainda que durante o período úmido a concentração de oxigênio tende a ser mais elevada à superfície do que no período seco.

Conforme **Figura 4.15 c)** e **Figura 4.28**, no dia 26 de março de 2007 às 12:00h o oxigênio dissolvido próximo do Açude apresenta valores entre os 7 mg/L à superfície, que descem para próximo de 0 mg/L sensivelmente aos 10 m de profundidade.

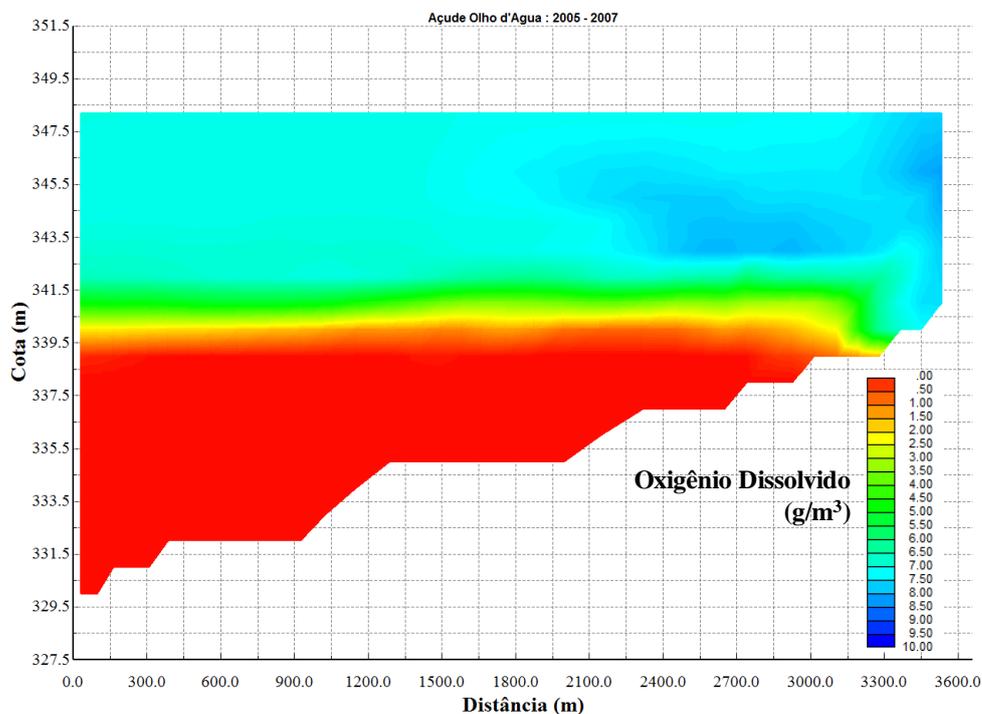


Figura 4.28 – Perfil longitudinal da concentração de oxigênio dissolvido no Açude Olho d'Água a 26 de março de 2007 às 12:00h (período úmido).

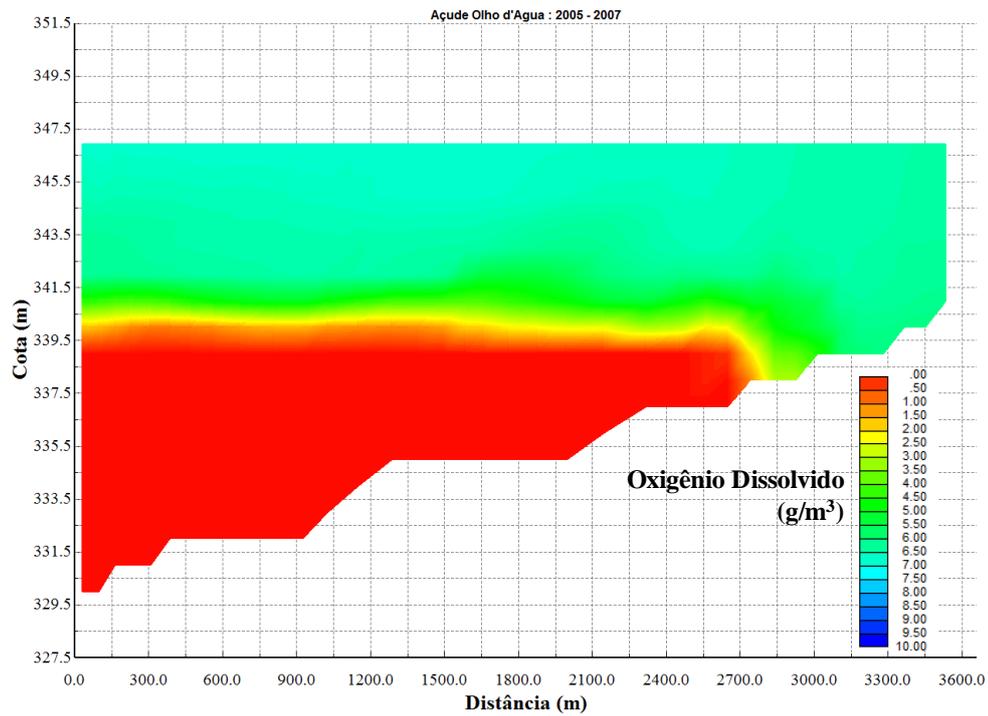


Figura 4.29 – Perfil longitudinal da concentração de oxigênio dissolvido no Açude Olho d'Água a 6 de agosto de 2007 às 12:00h (período seco).

5 AÇUDE ARARAS

5.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA

5.1.1 Considerações

Neste subcapítulo é apresentada a estratégia de modelagem hidrológica ao Açude Araras utilizando-se o modelo matemático SWAT. No **Produto 1** (Atividade 1.1) e no **Produto 2** (Atividade 1.2) este modelo já foi detalhadamente descrito, sendo que neste volume é apenas apresentada, genericamente, a abordagem de aplicação a cada caso de estudo. Serão assim descritos os dados de entrada utilizados, os processos de calibração e validação do modelo, e por último, serão apresentados os resultados obtidos e alguns cenários exemplificativos, tal como demonstrado no **Relatório 3**.

5.1.2 Dados de Entrada

Para implementação do modelo de bacia é necessária a preparação de dados de entrada específicos para cada caso de estudo. Tal como desenvolvido na bacia de drenagem do Açude Acarape do Meio no **Relatório 3**, para o processo de modelagem em bacias hidrográficas são necessários dados essenciais, como:

- topografia/declividade;
- usos do solo;
- tipos do solo;
- fontes pontuais e difusas; e,
- clima.

Os dados de entrada no modelo de bacia deverão ter maior detalhe possível. A topografia deverá ser de alta resolução, sendo que no *website* da Missão Topográfica Radar Shuttle (acrônimo em inglês SRTM) da *U.S. Geological Survey* (<http://srtm.usgs.gov/>), já é disponibilizada topografia para todo o mundo com uma resolução de 30 m, bastante aceitável para trabalhos de modelagem em bacias hidrográficas.

Quanto aos mapas de usos de solo, considerou-se como fonte o *Global Cover 2009*, com uma resolução espacial de 300 m, cujas classes foram reclassificadas tendo em conta a base de dados do modelo SWAT de usos de solo. Para os tipos de solo considerou-se o mapa adquirido em FUNCEME (2005), e estimaram-se os parâmetros hidráulicos necessários ao modelo, com base nas características físicas e químicas encontradas em IBRAIMO *et al.*, (2004) para o tipo de solo “Luvisolo Crômico” (TC). Os parâmetros hidráulicos para o tipo

de solo “Argissolo Vermelho-Amarelo” (PV) foram estimados para o **Relatório 3** para a bacia do Açude Acarape do Meio de acordo com as características físicas e químicas encontradas em BALDISSERA (2005) e LELIS (2011).

As fontes pontuais e difusas serão implementadas adequadamente no **Produto 5**.

Para a climatologia consideraram-se as quatro estações climatológicas mais próximas da bacia existentes no *Global Weather Data for SWAT – GWDS* (<http://globalweather.tamu.edu/>), uma vez que para as variáveis climáticas temperatura, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento, não existiam estações próximas da bacia. Para a precipitação, consideraram-se as estações de precipitação Hidrolândia, Tamboril, Ipueiras, Novas Russas, Guaraciaba do Norte, Monsenhor Tabosa, Açude Araras, Ararendá, Pires Ferreira e Ipú, disponíveis em ANA e FUNCEME. Na **Tabela 5.1** estão descritos os dados utilizados para entrada no modelo e na **Figura 5.1** apresentada a distribuição espacial dos usos de solo, tipos de solo, topografia e localização das estações climatológicas, respectivamente.

Tabela 5.1 - Tipos de dados de entrada no modelo, sua escala/resolução, fonte e período disponível.

Dado	Escala/resolução	Fonte	Período
Topografia/Declividade	30 m	SRTM	2000
Uso de Solo	300 m	ESA	2009
Tipos de Solo	ND	FUNCEME	2015
Fontes pontuais e difusas	*	*	*
Climatologia	Diário	ANA; FUNCEME; GWDS	1990-2015

*a ser elaborado no Produto 5.

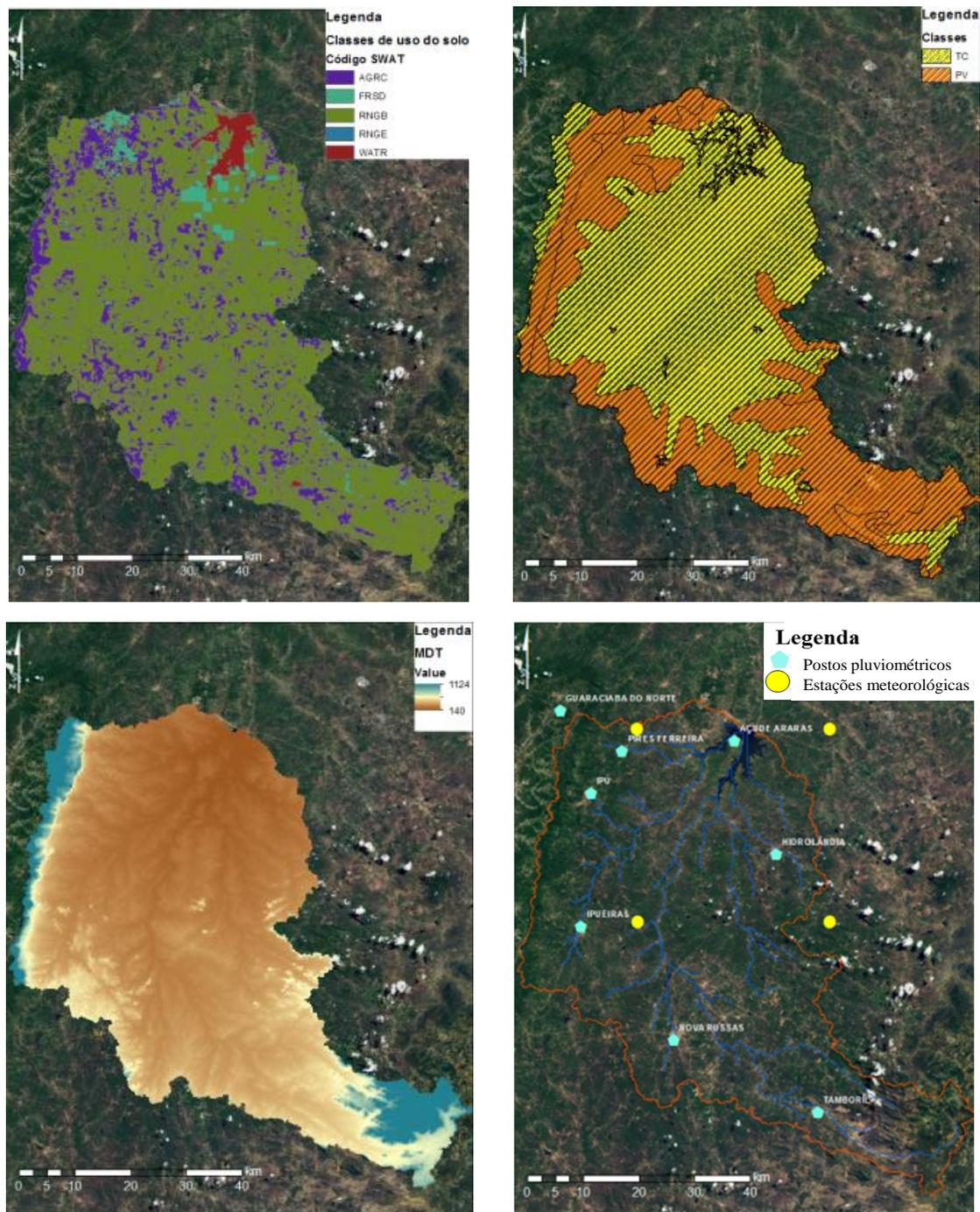


Figura 5.1 - Distribuição espacial dos dados de entrada, considerados no modelo SWAT na Bacia do Açude Araras.

5.1.3 Calibração e validação do modelo

Tal como explicado no [Relatório 3](#), os dados de base para calibração e validação do modelo numérico são essencialmente de quantidade e qualidade de água no rio. A calibração do modelo baseia-se na alteração dos parâmetros que influenciam a quantidade de água no rio,

sendo que o usuário deverá ter como base de comparação pontos de vazões medidos ao longo do rio modelado, que deverão se ajustar o melhor possível. Após a calibração do modelo, este deverá ser validado para o período de tempo seguinte, onde apenas se observa se o modelo acompanha as medidas sem que nenhum parâmetro seja alterado. Os períodos de calibração e validação não poderão se sobrepor.

A calibração e validação do modelo foram realizadas com os dados de vazão, oxigênio dissolvido e temperatura da água das duas estações existentes na bacia: Flores e Fazenda Cajazeiras. Estas estações apresentam um total de área drenada de 2263 km² o que representa quase 65% da área total drenada da bacia, sendo por isso consideradas representativas.

Tabela 5.2 - Localização das estações fluviométricas existentes na bacia do Açude Araras.

Nome	Latitude	Longitude	Área drenada (km ²)	Período
Fazenda Cajazeiras	-4.3775	-40.5492	1579	1991-2015
Flores	-4.345	-40.5622	684	2006-2016

Relativamente à estação fluviométrica Flores (35223000), vale frisar que esta se encontra validada exclusivamente até à cota 2,50 (que corresponde a uma vazão de aproximadamente 13,4 m³/s). Assim, para cotas superiores, as vazões estimadas por aplicação da curva chave da estação para partes que não estão validadas deverá ser aplicada com bastante prudência. De fato, a análise da série histórica da estação Flores disponível em ANA (2016), sugere que a aplicação da curva chave da estação para partes não validadas poderá sobrestimar significativamente a vazão obtida.

Neste contexto, conforme ANA (2016) destaca-se o mês de abril de 2009, no qual a estação Flores registrou uma vazão média diária máxima de 2032,5 m³/s no dia 28 e a estação Fazenda Cajazeiras uma vazão média diária máxima de 470,4 m³/s no dia 26 (ver **Figura 5.2**). Lembra-se que as estações Flores e Fazenda Cajazeiras monitoram bacias hidrográficas com 693 e 1.560 km² respectivamente, pelo que não será de esperar uma diferença tão expressiva nas vazões registradas.

Ademais, conforme a **Tabela 5.2**, as precipitações registradas nas bacias hidrográficas das estações em análise durante o dia 28 de abril de 2009 (admitindo como representativas as Estações Pluviométricas Nova Russas e Ipueiras localizadas nas bacias hidrográficas das Estações Fluviométricas Fazenda Cajazeiras e Flores respectivamente) não permitem justificar, à partida, a diferença expressiva de vazões registradas nas duas estações fluviométricas em análise.

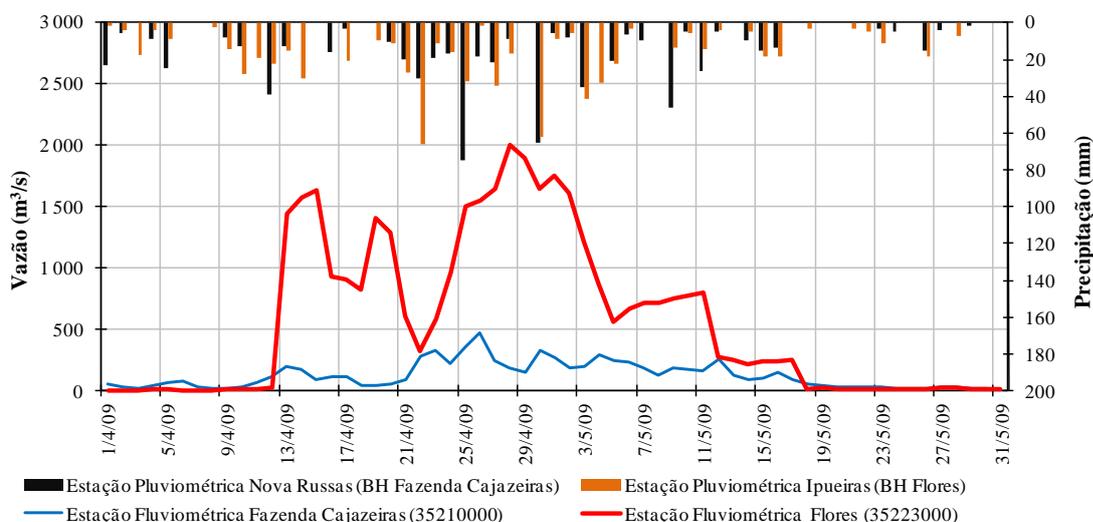


Figura 5.2 - Comparação das vazões médias diárias nas estações pluviométricas Flores e Fazenda Cajazeiras.

Deste modo, conclui-se que os registros da estação pluviométrica Flores para valores superiores a 13,4 m³/s não devem ser considerados para validar as vazões estimadas pelo modelo de precipitação-escoamento considerado no presente estudo, uma vez que a análise a esses registros sugerem que os mesmos correspondem à extrapolação desadequada para uma parte da curva chave da estação que não está validada.

O modelo SWAT foi aplicado para o período de 25 anos, de 1990 a 2015, considerando-se para calibração o período de 1991 a 2010, e para validação o período de 2010 a 2015.

À semelhança do desenvolvido para a bacia do Açude Olho d'Água, foram realizados testes de sensibilidade no processo de calibração do modelo, baseados em análises estatísticas, considerando os resultados do modelo na localização da estação Fazendas Cajazeiras, para comparação com as medidas da mesma.

Os testes realizados e aqui apresentados foram cumulativos, mostrando as melhorias observadas com os ajustes dos parâmetros escolhidos. Os parâmetros de calibração modificados são apresentados na **Tabela 5.3**.

Tabela 5.3 – Parâmetros alterados no modelo durante o processo de calibração.

Parâmetro	Original	Calibrado	Unidades	Descrição
GW_DELAY	31	1	Dia	Retardo do escoamento subterrâneo

Parâmetro	Original	Calibrado	Unidades	Descrição
ALPHA_BF	0,048	1	Dia	Fator alfa do fluxo de base
CN2	61 - 92	-20%	Adimensional	Curva Número inicial para condição de umidade do solo II
GW_REVAP	0.02	0.08	Adimensional	Coefficiente de ascensão de água à zona de saturação para evapotranspiração
REVAPMN	750	0	[mm]	Limite de nível de água do aquífero para evaporação ou para infiltração no aquífero profundo
GWQMN	1.000	7.000	[mm]	Profundidade mínima do aquífero superficial para ocorrer escoamento subterrâneo

Observa-se que os parâmetros GW_DELAY e ALPHA_BF (observado na **Tabela 5.4 a**) apesar de não provocarem uma direta visualização de melhoria as análises estatísticas, são cruciais para o ajustamento do fluxo de base, permitindo um melhor ajuste comutativo com as alterações seguintes. Na **Tabela 5.4 b** a diminuição em 20% do parâmetro CN2 (tal como no caso do Olho d'Água) e o aumento do parâmetro GW_REVAP, promovem a melhoria no que diz respeito aos volumes de água medidos e modelados (como mostrado do valor calculado do Bias, ou seja, refletido na capacidade das predições do modelo se aproximarem dos valores reais) e da eficiência do modelo mais próxima da unidade (estimada com o coeficiente de Nash-Sutcliffe). Na **Tabela 5.4 c** são mostrados os resultados estatísticos, agora com a alteração dos valores de GWQMN e REVAPMN, cumulativos aos calibrados anteriormente. Estes parâmetros melhoraram substancialmente os resultados no que respeita às vazões médias, representando as vazões observadas. Este aumento da profundidade mínima do aquífero, permite assim diminuir a contribuição deste para o fluxo de base.

Assim, com a calibração final obteve-se uma correlação de 47% ao nível diário, uma eficiência do modelo de 0,45, um Bias de 0,33 e raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE - *Root mean Square Error*) de 12,38 m³/s. Mesmo observando uma pequena diminuição da eficiência do modelo e correlação com as medidas, as médias diárias de vazões modeladas são bastante semelhantes às medidas, o que vai de encontro ao objetivo principal deste trabalho de modelagem, uma vez que a quantidade de água que entra no reservatório vai ter impacto direto na qualidade da água.

A alteração dos parâmetros é efetuada levando sempre em consideração a comparação diária das vazões medidas e modeladas, conforme **Figura 5.3**. Os aportes diários considerados apresentam grande incerteza, sendo a análise dos resultados de modelagem posteriores focada nas médias mensais e anuais. Dada esta incerteza nos valores medidos, a calibração do modelo baseou-se fundamentalmente nas médias das vazões, sendo estes os resultados mais relevantes para os objetivos do trabalho. Dada a inconsistência visual dos valores de vazões na estação de Flores, e pela sua pouca representatividade na área da bacia, apenas se apresenta a comparação diária das medidas com os valores modelados (**Figura 5.5**).

Tabela 5.4 - Testes de sensibilidade dos parâmetros alterados no modelo SWAT.

	Sem calibração		a)		b)		c)	
	Diário	Mensal	Diário	Mensal	Diário	Mensal	Diário	Mensal
Média observada [m³/s]	5,41	5,46	5,41	5,456	5,41	5,46	5,42	5,46
Média modelada [m³/s]	20,30	20,43	20,46	20,629	9,67	9,74	5,75	5,79
Desvio percentual relativo - Bias	14,88	14,98	15,04	15,17	4,25	4,286	0,33	0,33
RMSE	38,73	22,55	49,89	29,35	22,67	10,59	22,84	12,38
R²	0,32	0,58	0,41	0,58	0,52	0,75	0,25	0,47
Eficiência do modelo	-1,47	-0,81	-3,1	-2,067	0,15	0,6	0,14	0,45

a) GW_DELAY, ALPHA_BF

b) GW_DELAY, ALPHA_BF CN2 e GWREVAP

c) GW_DELAY, ALPHA_BF CN2, GWREVAP, GWQMN e REVAPMN (final)

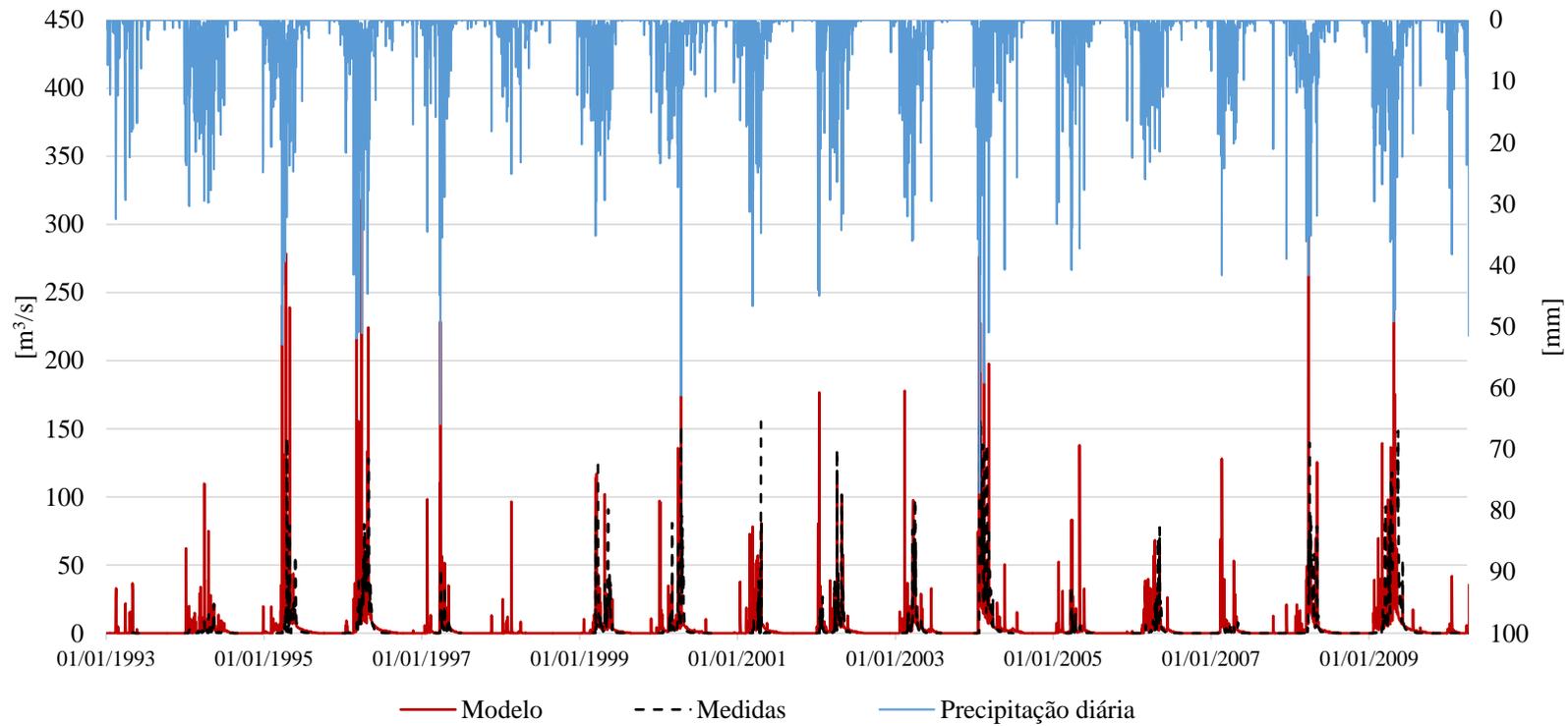


Figura 5.3 - Comparação das vazões diárias medidas em Fazenda Cajazeiras e modeladas com o SWAT.

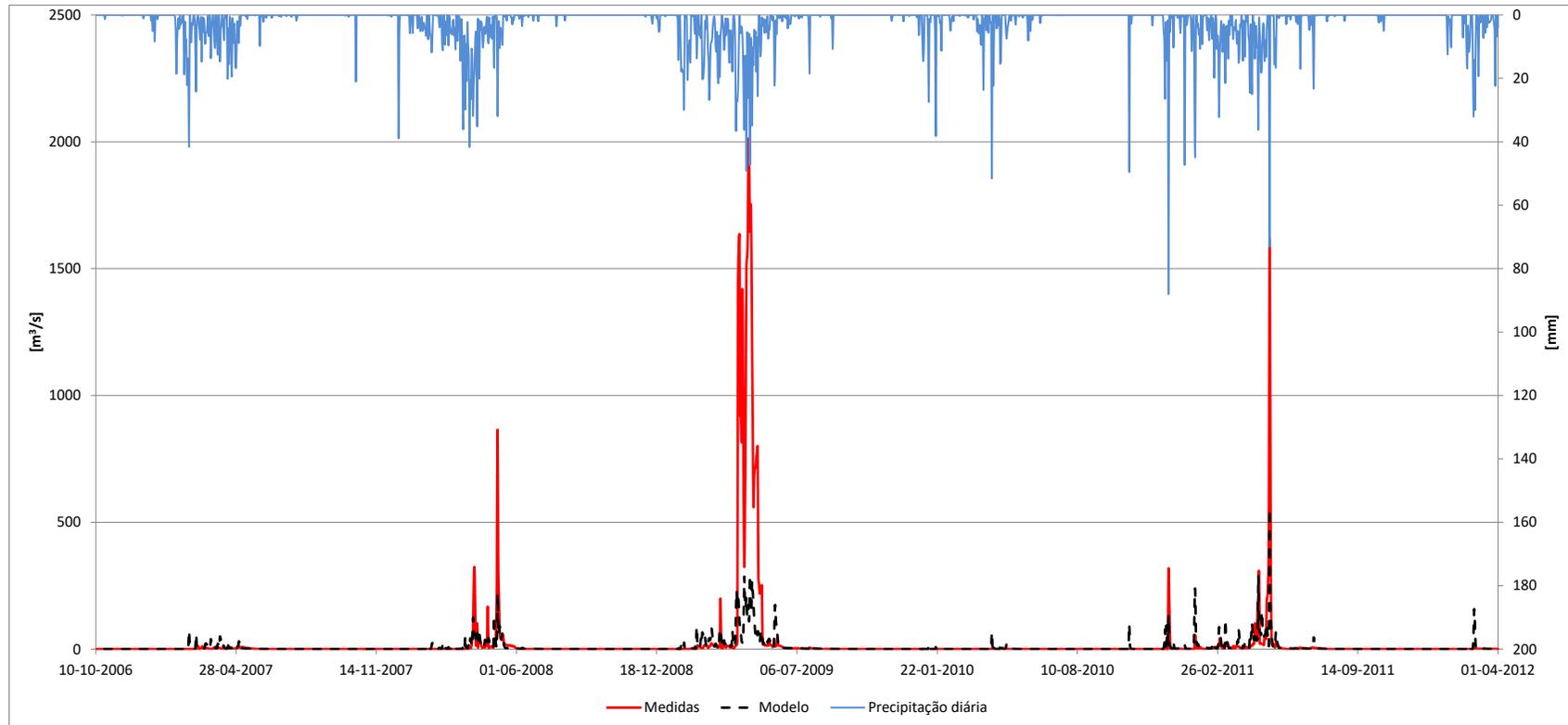


Figura 5.4 - Comparação das vazões diárias medidas em Flores e modeladas com o SWAT.

A análise estatística do escoamento (em milímetros) foi realizada ao nível anual e mensal, sendo considerado o período de 1990 a 2008, comparando os escoamentos medidos e modelados, na localização de Fazenda Cajazeiras, por ser o ponto mais representativo da bacia. É observada uma proximidade do modelo aos valores reais com elevadas correlações lineares. Ao nível anual (**Figura 5.5**) observa-se que o modelo SWAT reproduz o escoamento medido observado com uma correlação de aproximadamente 58%.

Ao nível mensal o escoamento da bacia de drenagem no ponto Fazenda Cajazeiras foi estimado com base nas médias de cada mês de todos os anos considerados. Quando comparadas as medidas e os valores modelados observa-se uma correlação de aproximadamente 63% (**Figura 5.6**).

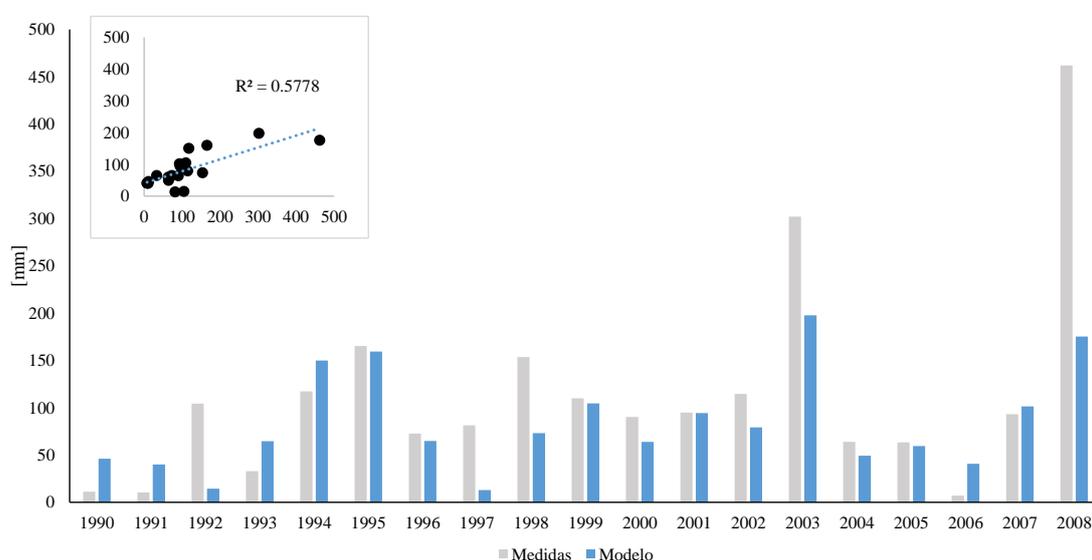


Figura 5.5 – Comparação dos escoamentos anuais medidos e modelados (em mm), no ponto Fazenda Cajazeiras.

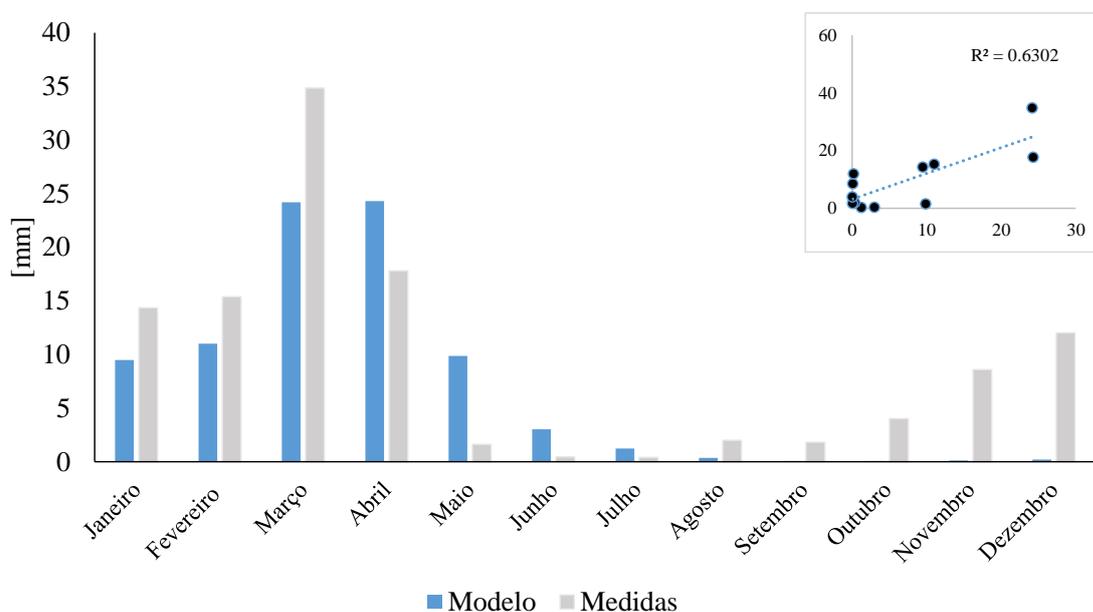


Figura 5.6 – Comparação dos escoamentos mensais medidos e modelados (em mm), no ponto Fazenda Cajazeiras.

Estão disponibilizadas no *website* da Agência Nacional das Águas (ANA), medidas de oxigênio e temperatura para os dois (2) pontos já considerados anteriormente: Flores e Fazenda Cajazeiras. Não sendo as medidas de oxigênio e temperatura nos rios das mais importantes no que se refere à qualidade da água, acresce o fato de no modelo serem variáveis que não são facilmente calibráveis. Assim, o oxigênio em rios cuja vazão é próxima de nula, poderá levar a interpretações erráticas, como se observa nos valores nulos que a série temporal dos resultados do modelo apresenta ao longo do tempo, que derivam de aproximações do modelo (**Figura 5.7** e **Figura 5.9**). A temperatura geralmente assume valores idênticos à temperatura ambiente, apresentando-se subestimada quando comparadas com as medidas (**Figura 5.8** e **Figura 5.10**).

Além destas incertezas, associadas à prestação do modelo, acrescem os fatores associados às medidas. Primeiramente, o próprio protocolo de coleta, e em segundo o fato de ser uma medida esporádica e horária. Para diminuição da incerteza das medidas no campo, o ideal será se realizar medições contínuas com intervalo mínimo de um (1) dia para que sejam excluídas situações pontuais e não representativas do local em estudo e que poderão ocorrer durante as medições. Assim, as comparações seguintes são apenas apresentadas de forma demonstrativa, sem qualquer análise quantitativa ou qualitativa.

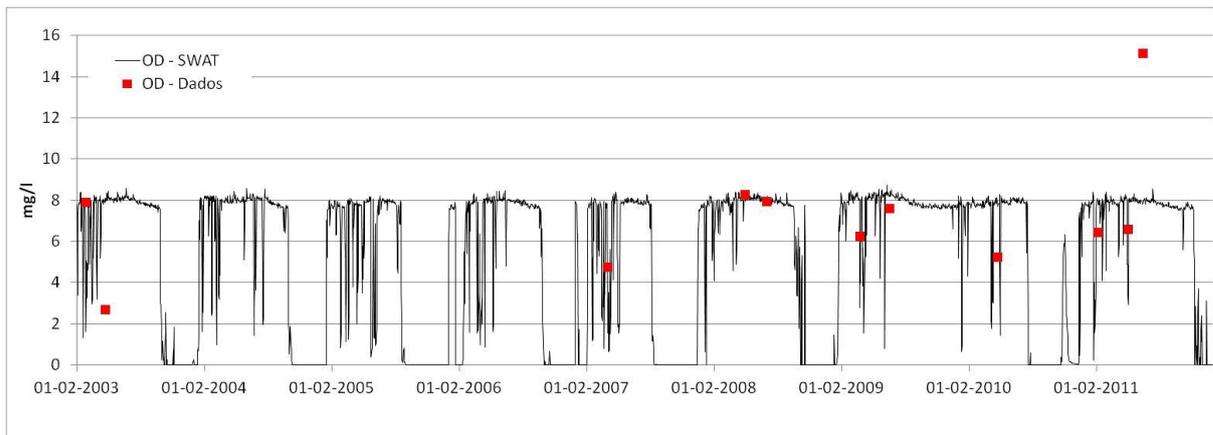


Figura 5.7 - Comparação do oxigênio dissolvido do resultado do modelo SWAT e das medidas encontradas em ANA (2016), em Flores.

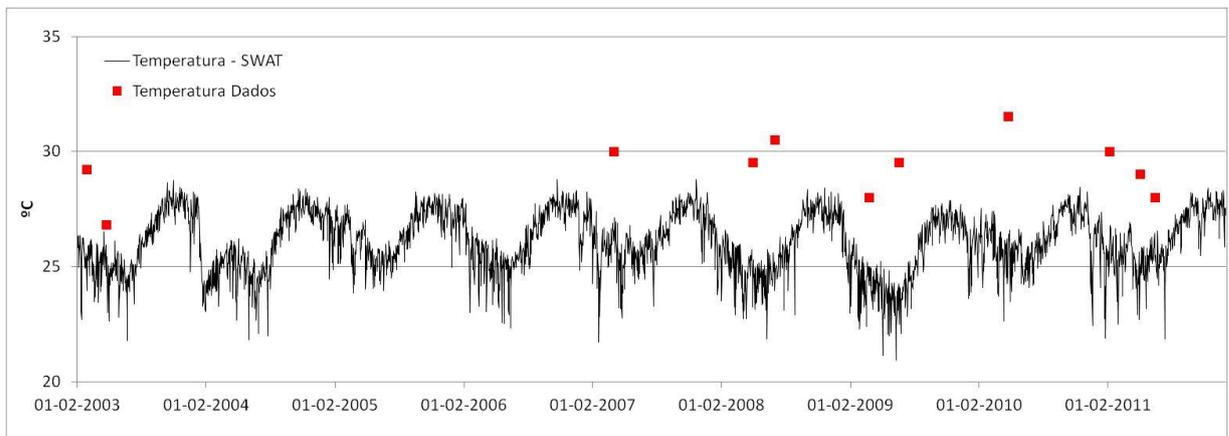


Figura 5.8 - Comparação da temperatura do resultado do modelo SWAT e das medidas encontradas em ANA (2016), em Flores.

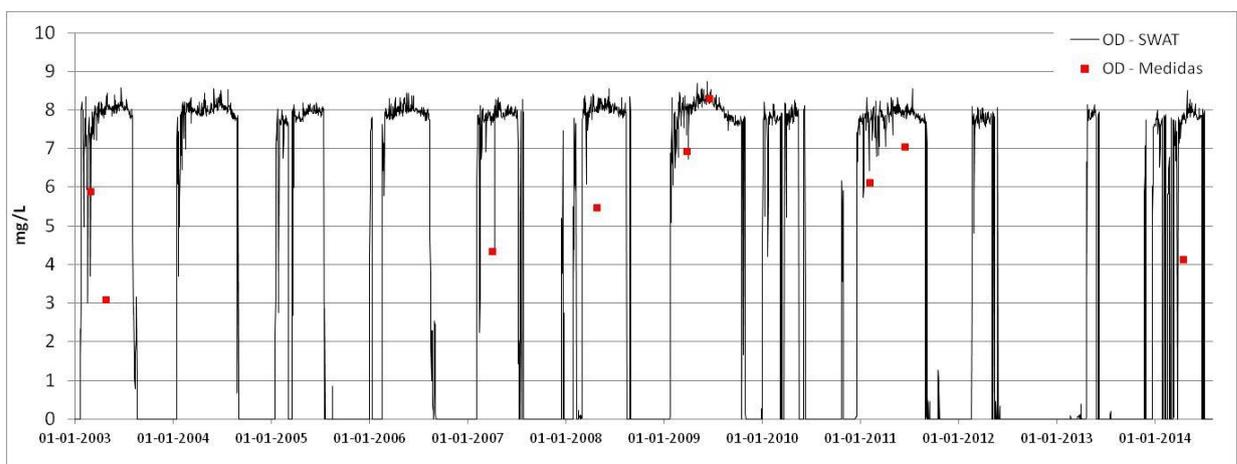


Figura 5.9 - Comparação do oxigênio dissolvido do resultado do modelo SWAT e das medidas encontradas em ANA (2016), em Fazenda Cajazeiras.

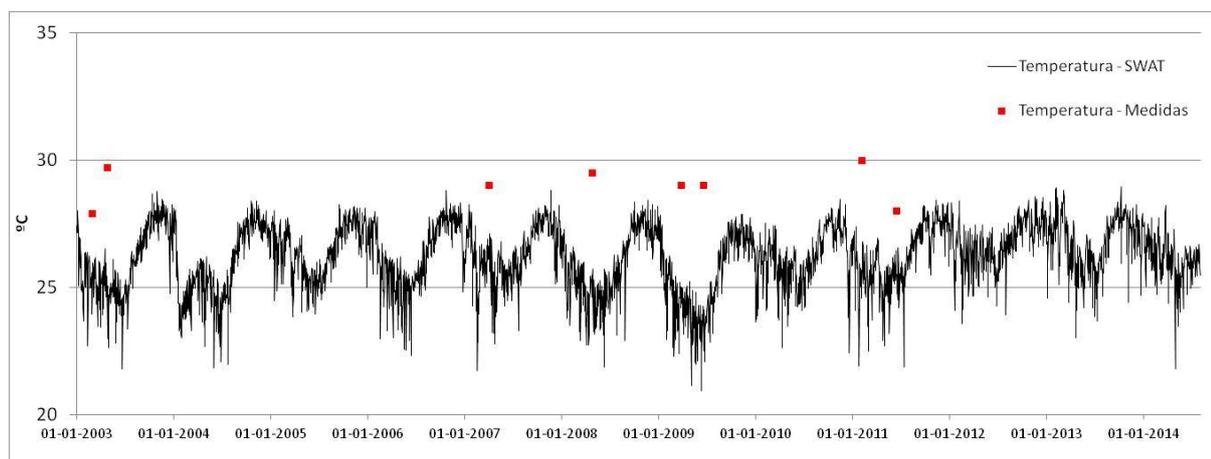


Figura 5.10 - Comparação da temperatura do resultado do modelo SWAT e das medidas encontradas em ANA (2016), em Fazenda Cajazeiras.

5.1.4 Resultados e cenários

Os modelos numéricos são bastante úteis para analisar balanços de água nas bacias hidrográficas nas quais, geralmente, apenas se conhecem valores de vazão medidos nos cursos d'água e não o comportamento hidrológico global da bacia. No entanto, as medidas de vazão existentes, assim como o conhecimento local, são muito importantes para que a análise crítica dos resultados da modelagem seja bem sucedida.

Como exemplo, na **Figura 5.11** é possível observar o balanço hídrico mensal médio dos anos simulados, considerando a precipitação, evapotranspiração real, escoamento, escoamento lateral e o superficial (*runoff*), em mm.

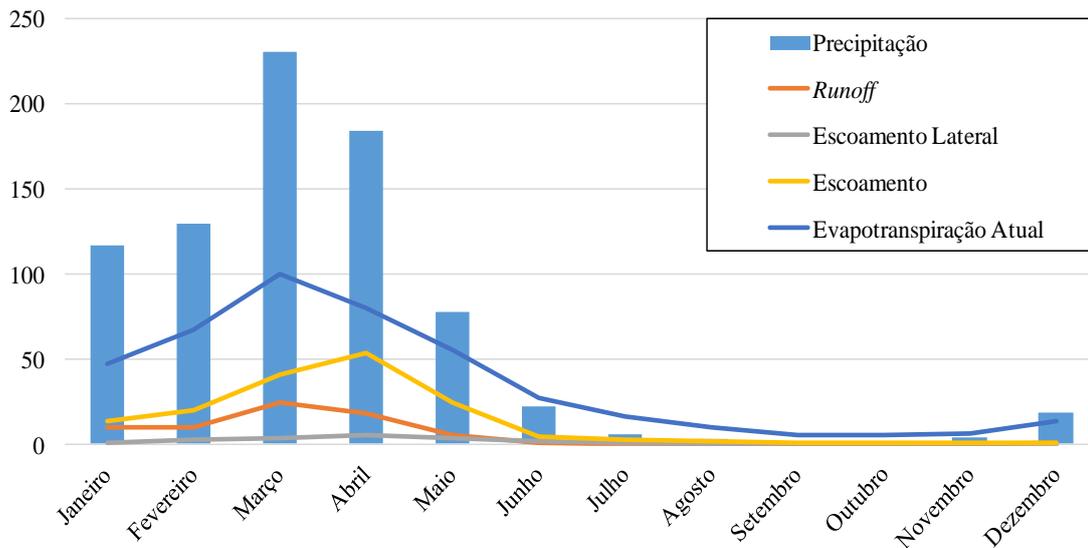


Figura 5.11 – Balanço hídrico mensal da Bacia do Açude Araras obtido com o modelo SWAT (em mm).

Neste trabalho, a título de exemplo, optou-se pela análise de dois (2) cenários, focados na qualidade da água, sendo a qualidade da água dos rios a maior influência na qualidade de água nos reservatórios.

Primeiramente, foram comparados dois (2) anos hidrológicos extremos no período considerado, sendo descritos a seguir:

- ano hidrológico úmido (em 2008, onde se observou precipitação de aproximadamente 1400 mm);
- ano hidrológico seco (em 2009, onde se observou precipitação de aproximadamente 420 mm).

O escoamento tem influência direta nos nutrientes (nitrogênio e fósforo) que chegam ao rio. O nitrogênio e o fósforo se movem para jusante: o nitrogênio porque é altamente móvel; e o fósforo, não sendo facilmente lixiviado, acaba por ser arrastado adsorvido nos sedimentos, movendo-se no processo de erosão. Como resultado da aplicação do modelo descrito, foram estimadas as cargas de nitrogênio em toneladas por hectare (por ano), conforme **Figura 5.12**, podendo ser estimadas cargas de fósforo e sedimentos, tal como mostrado no **Relatório 3**. As figuras indicam a média dos resultados do modelo para as condições climáticas ocorridas entre o ano hidrológico 2008 e 2009, adicionadas às massas de água de forma difusa, por sub-bacia.

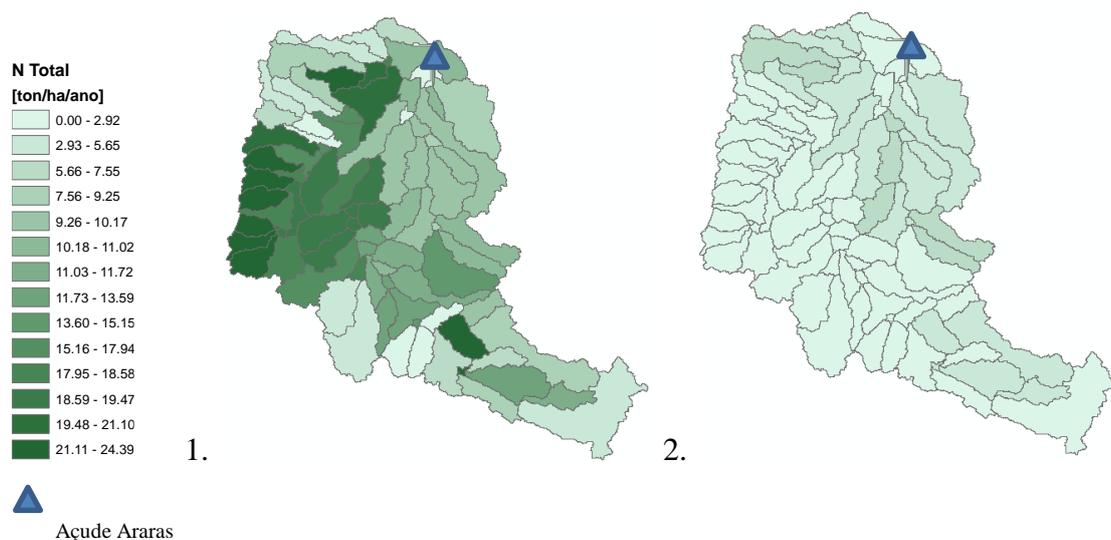


Figura 5.12 – Carga de nitrogênio de origem difusa: 1. Ano úmido; 2. Ano seco (tonN/ha/ano).

5.2 MODELAGEM DO RESERVATÓRIO

5.2.1 Considerações

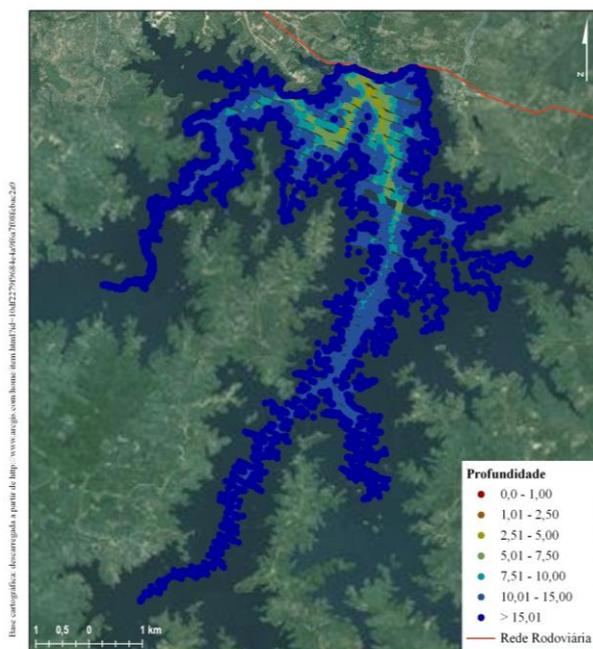
Neste subcapítulo é apresentada a estratégia de modelagem do Açude Araras utilizando-se o modelo matemático CE-QUAL-W2. No **Produto 1** e no **Produto 2** este modelo já foi detalhadamente descrito, sendo que neste volume é apenas apresentada, genericamente, a abordagem de aplicação ao caso de estudo. Serão assim descritos os dados de entrada utilizados, os processos de calibração e validação do modelo, e por último, serão apresentados os resultados obtidos e alguns cenários exemplificativos, tal como demonstrado no **Relatório 3**.

5.2.2 Dados de Entrada

Para implementação do modelo do reservatório é necessária a preparação de dados de entrada específicos para cada caso de estudo. Tal como desenvolvido no Açude Acarape do Meio no **Relatório 3**, para o processo de modelagem em reservatórios são necessários dados essenciais e condições de fronteira, como:

- batimetria;
- condições iniciais;
- condições de fronteira meteorológica; e,
- vazões.

A batimetria do Açude Araras foi gerada a partir da batimetria fornecida pela COGERH (ver **Figura 5.13**). O trabalho de campo do levantamento batimétrico foi realizado em novembro de 2014, quando o açude apresentava cota 138,0 m (aproximadamente 9,6 % da capacidade de armazenamento). Deste modo, e uma vez que o sangradouro se encontra à cota 153,00, foi necessário complementar o levantamento batimétrico com informação altimétrica para cotas superiores a 138,0 m. Para o efeito recorreu-se ao modelo digital do terreno (MDT) disponibilizado pela NASA (SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de aproximadamente 30 m.



Fonte: Elaborado a partir de COGERH (2015).

Figura 5.13 – Batimetria do Açude Araras, elaborada a partir de levantamento novembro em 2014.

Posteriormente, foram geradas curvas de nível por meio do MDT da NASA que foram comparadas e corrigidas utilizando-se imagens de satélite históricas do entorno do açude. Para o efeito, o nível d'água na data de aquisição de cada imagem de satélite analisada foi consultado no histórico do Açude Araras disponibilizado pela COGERH.

A título exemplificativo apresenta-se na **Figura 5.14**:

- (a) imagem de satélite de 29 de agosto de 2011 em que o açude estava na cota 152,6 m (96% da capacidade de armazenamento) e curva de nível à cota 153,0 m gerada por meio do MDT da NASA; e,

- (b) imagem de satélite de 5 de outubro de 2013 em que o açude estava na cota 143,35 m (40% da capacidade de armazenamento) e a curva de nível à cota 143,5 m gerada por meio do MDT da NASA.

Conforme **Figura 5.14**, existe uma adequada aproximação entre o espelho d'água nas duas imagens de satélite e as respectivas curvas de nível geradas.

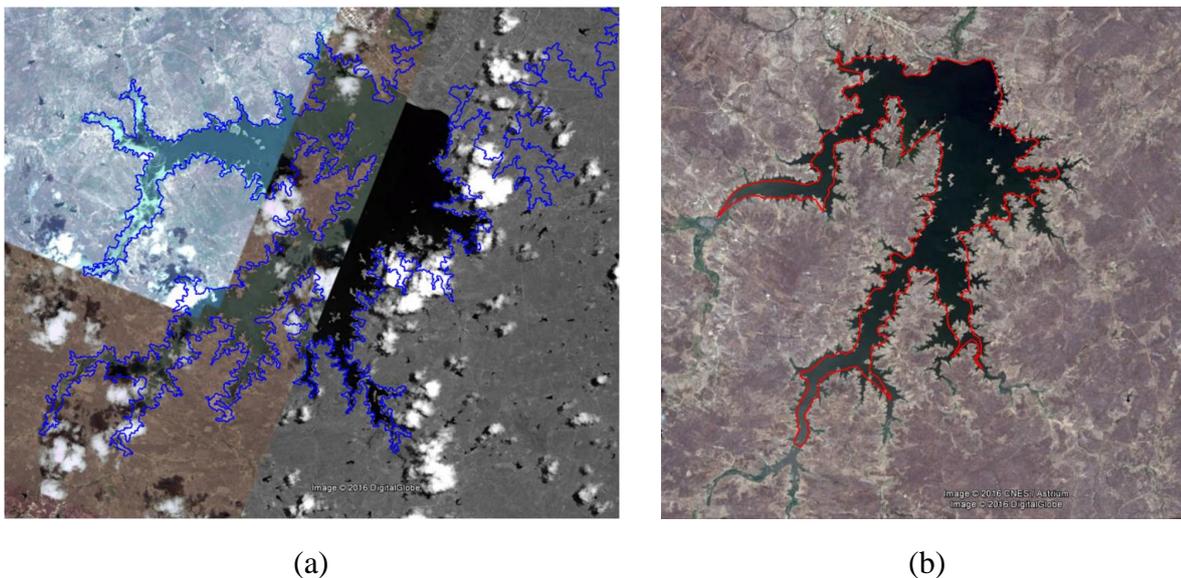


Figura 5.14 – Representação de duas imagens de satélite do Açude Araras: a 29 de agosto de 2011 e curva de nível na cota 153,00 (a) e a 5 de outubro de 2013 e curva de nível na cota 143,50 (b).

Assim, para a construção da malha computacional, foi criado um MDT que integrou o levantamento batimétrico existente e a informação altimétrica obtida por meio do MDT da NASA. Na **Figura 5.15** apresenta-se o MDT gerado para o Açude Araras.

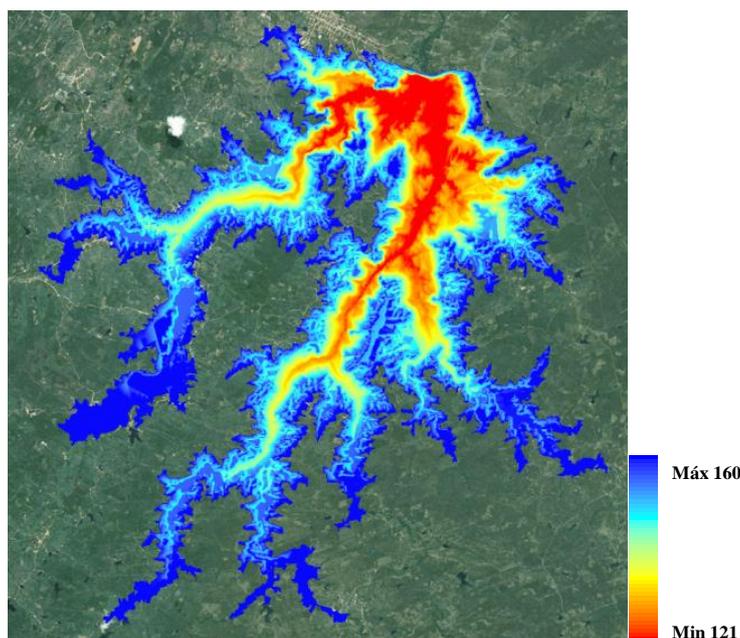


Figura 5.15 – Modelo digital do terreno da batimetria gerada para o Açude Araras.

Na **Figura 5.16** apresenta-se a comparação entre as curvas cota-volume do Açude Araras elaboradas a partir do (i) levantamento batimétrico de novembro de 2014, (ii) do MDT gerado para o Açude Araras e (iii) de projeto. Neste contexto, é importante ressaltar que existe uma significativa diferença entre as curvas cota-volume de projeto e elaborada a partir do levantamento batimétrico realizado. A título de exemplo, destaca-se que de acordo com o levantamento batimétrico realizado, para a cota 138,00 volume armazenamento é aproximadamente 84,9 hm³, ou seja, 28 % inferior ao volume de projeto para a mesma cota (ver **Figura 5.16**).

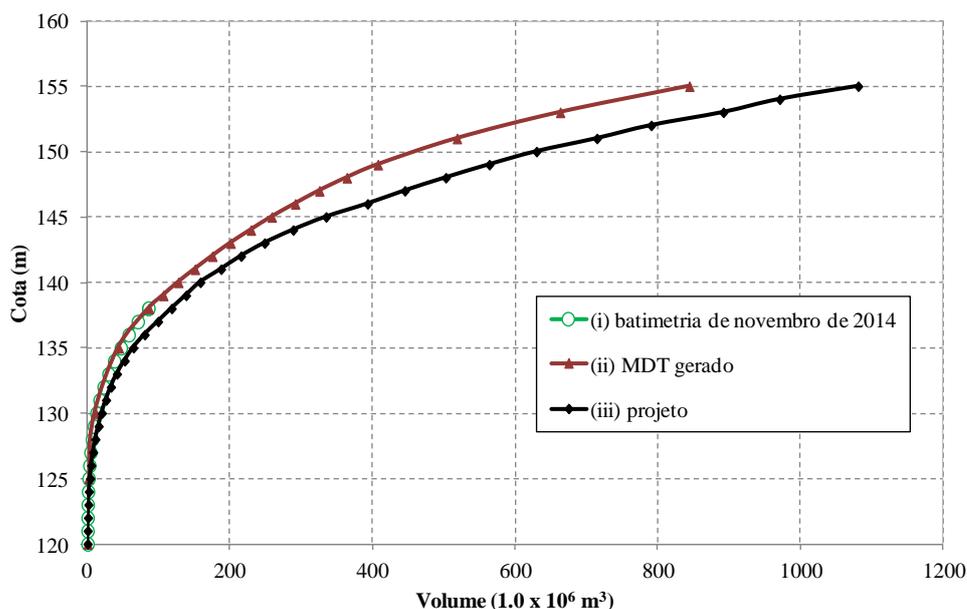
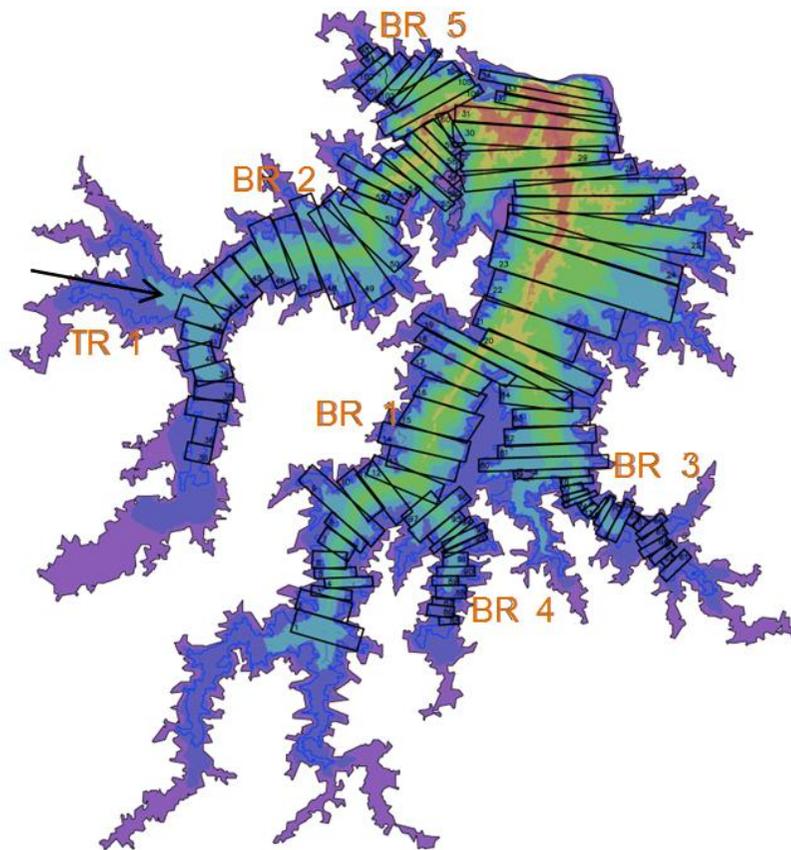


Figura 5.16 – Comparação entre curvas cota-volume para o Açude Araras elaboradas a partir de diferentes fontes de dados.

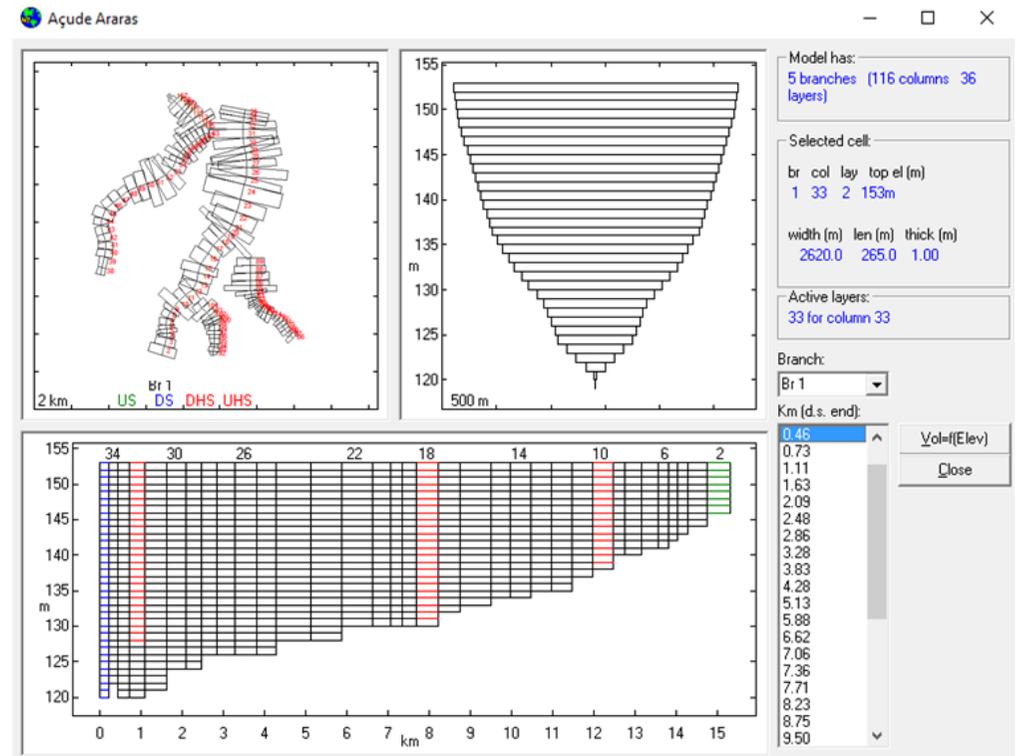
Posteriormente, foram determinadas as curvas de nível por interpolação dos dados existentes utilizando o *software* AutoCAD Civil 3D.

No mesmo *software* foram definidos os segmentos nos trechos/ramos que serão considerados no modelo CE-QUAL-W2 e que constituem o Açude Araras, atendendo aos seus perfis longitudinais e transversais (de modo a garantir transições suaves de inclinação entre segmentos). Assim, foram definidos cinco (5) trechos (BR) no modelo CE-QUAL-W2 que representam os principais cursos d'água afluentes ao açude e um tributário (TR), conforme **Figura 5.17**.

As características da malha estão representadas na **Figura 5.17** e **Tabela 5.5**.



(a)



(b)

Figura 5.17 – Definição dos segmentos do Açude Araras (a) e geometria do açude no modelo CE-QUAL-W2 (b), onde se pode visualizar a representação da área superficial, um exemplo de seção do trecho principal e perfil longitudinal.

Tabela 5.5 – Características da malha computacional para o Açude Araras.

Trecho	Resolução Vertical (m)	Número de Camadas Ativas	Número de Segmentos Ativos	Máximo Δx (m)	Mínimo Δx (m)
BR 1 (rio Acaraú)	1	34	34	855	230
BR 2 (rio Jatobá)	1	27	26	620	285
BR 3 (riacho Tubiba)	1	22	24	440	95
BR 4 (rio Batoque)	1	12	13	405	160
BR 5	1	25	9	400	200

Para validar os volumes da geometria elaborada, foi realizada uma comparação entre a curva de volumes armazenados, obtida com base na discretização descrita anteriormente, na curva de volumes fornecida no relatório de batimetria e na curva de volumes de projeto (fornecida pela COGERH).

Os resultados representados na **Figura 5.18** indicam que o modelo descreve uma curva de volumes semelhante à dos dados fornecidos, significando que a geometria construída reproduz adequadamente a relação cota-volume do açude.

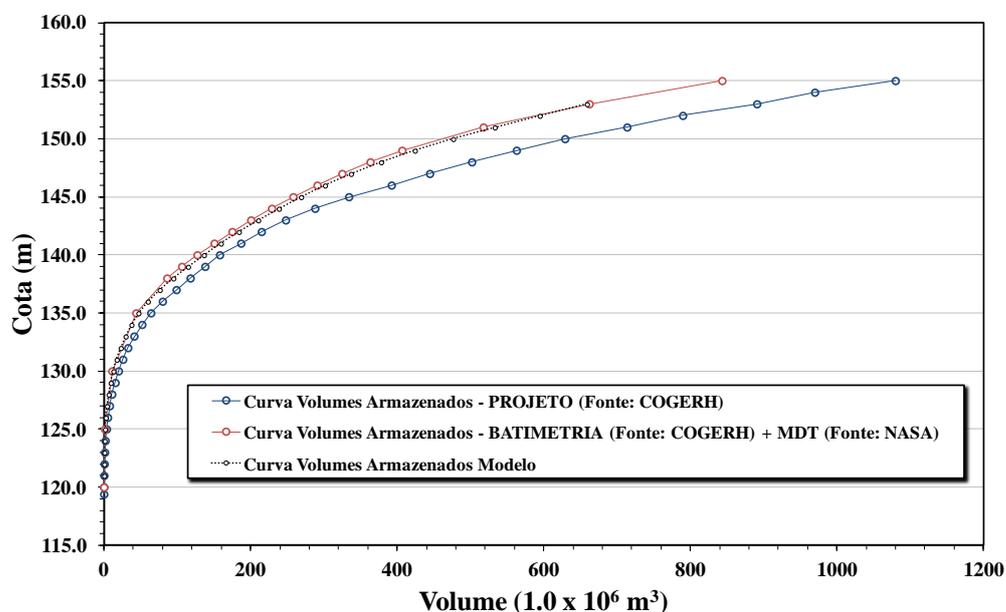


Figura 5.18 – Comparação entre curvas cota-volume para o Açude Araras geradas com dados de campo e com modelo CE-QUAL-W2.

Relativamente às condições iniciais foi considerado o nível observado pelo açude no dia do início da simulação (01/01/2006), assim como os perfis de temperatura, oxigênio dissolvido e nutrientes disponibilizados por COGERH para o dia 06/02/2007. Esta condição inicial considerada é uma aproximação à realidade, uma vez que o período de simulação se inicia em janeiro, durante o início do período úmido.

A meteorologia é a condição de fronteira requerida pelo modelo CE-QUAL-W2, sendo necessários os parâmetros temperatura do ar e do ponto de orvalho, umidade relativa, velocidade, direção do vento e nebulosidade. Foram utilizados os dados da Estação Sobral do INMET (BDMEP) (código OMM 82392).

Além da meteorologia, as vazões afluentes são também necessárias como condição de fronteira do modelo de reservatório. Para este trabalho é considerado o modelo de bacia para gerar as vazões que afluem o reservatório. As medidas nos rios, caso existam, são utilizadas para a calibração e validação deste modelo. A utilização de modelos de bacia devidamente validados permite obter vazões para o período necessário, sem falhas, assim como séries temporais de qualidade da água, que serão utilizadas também como condições de fronteira. Assim, para a qualidade de água foram considerados o nitrogênio e fósforo total, bem como a concentração de oxigênio dissolvido, proveniente do modelo SWAT (item 4.1).

De modo a reproduzir adequadamente as variações de volume de água armazenada no açude ao longo do período de simulação, foi necessário considerar os consumos de água do açude e as vazões liberadas pelo sangradouro. De fato, uma das principais funções do Açude Araras é o abastecimento de água à população de quinze (15) sedes de municípios, a saber: Varjota, Hidrolândia, Reriutaba, Ipu, Pires Ferreira, Cariré, Sobral, Forquilha, Santana do Acaraú, Morrinhos, Marco, Bela Cruz, Acaraú, Cruz e Groaíras (DNOCS, 2015).

Desta forma, foram considerados os dados disponíveis que constam na Memória dos Aportes ao Açude Araras - disponibilizada em FUNCEME (2015).

Assim, na **Tabela 5.6** encontram-se resumidos os dados necessários à implementação do modelo CE-QUAL-W2 no Açude Araras.

**Tabela 5.6 - Tipos de dados de entrada no modelo,
sua escala/resolução, fonte e período disponível.**

Dado	Escala/resolução	Fontes	Período
Batimetria	Adimensional e 30 m	COGERH e NASA	NA
Meteorologia	Sub-diário	INMET	2006 a 2008
Quantidade e qualidade de água afluente	Diário	SWAT	2006 a 2008

5.2.3 Calibração e validação do modelo

O modelo Ce-QUAL-W2 foi aplicado ao Açude Araras para o período de três (3) anos, compreendido entre 01/01/2006 e 31/12/2008.

Desta forma, foi consultado o “[Banco de Dados de Qualidade da Água do Açude Araras](#)”, disponibilizado pela FUNCEME, no qual constam medições (por sonda e em laboratório) de vários parâmetros físicos e químicos da água do açude no período que compreende os anos de 1998 a 2015.

Analogamente ao referido anteriormente para o Açude Olho d’Água, também para o Açude Araras se verifica uma reduzida disponibilidade de registros de qualidade de água bem como a existência de diversos valores “anómalos” e discrepâncias significativas entre dados de campo (sonda) e em laboratório para a mesma data, conforme se mostra nas alíneas seguintes.

Assim, a fraca aderência dos resultados do modelo aos dados de campo que por vezes se verifica não pode ser utilizada como critério de avaliação do desempenho do modelo, dado que a qualidade dos dados não pode ser avaliada e a presença de valores “anómalos” sugere que os mesmos poderão não representar correctamente o sistema. Além disso, a falta de dados representativos da evolução do sistema dificulta a avaliação do modelo.

Deste modo, durante o processo de calibração e validação pretendeu-se que o modelo reproduzisse adequadamente o padrão de evolução dos perfis térmicos e de propriedades da água (nutrientes, oxigênio, clorofila) típicos de açudes localizados em ambientes semi-áridos.

Para a calibração do modelo foram consideradas as medições realizadas na superfície da coluna d’água (mais precisamente a 0,3 m de profundidade) referentes à temperatura, ao oxigênio dissolvido, a clorofila-a, ao nitrogênio total, ao fósforo total e ao ferro no ponto de monitoramento ARA-01, com localização representada na **Figura 5.19**.

Ademais, foram ainda comparados os perfis de temperatura, oxigênio dissolvido e clorofila-a registrados em 2007 e 2008 no ponto de monitoramento ARA-01, com localização representada na **Figura 5.19**.

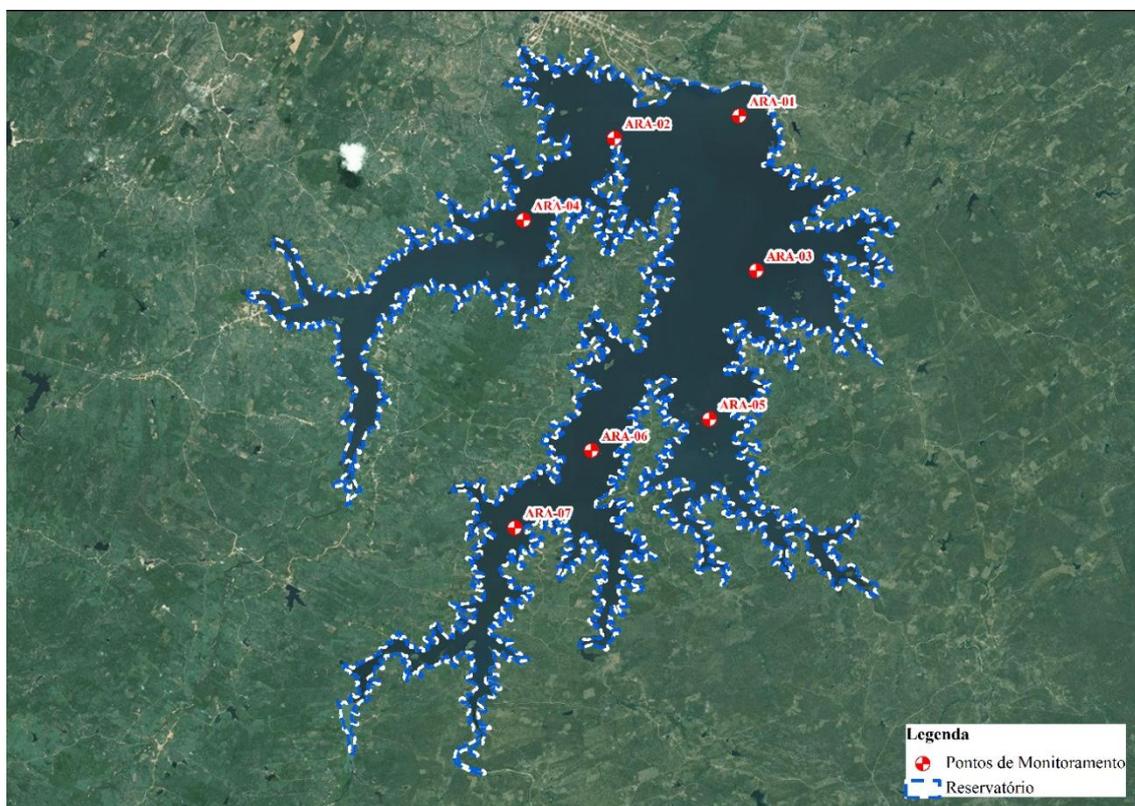


Figura 5.19 – Localização dos pontos de monitoramento do Açude Araras.

5.2.3.1 Balanço de volumes no reservatório

Para a verificação e calibração do balanço de volumes no reservatório foi estabelecida a comparação entre as cotas de água simuladas pelo modelo com as cotas registradas no açude no período de 2006 a 2008. Essa comparação é apresentada na **Figura 5.20**.

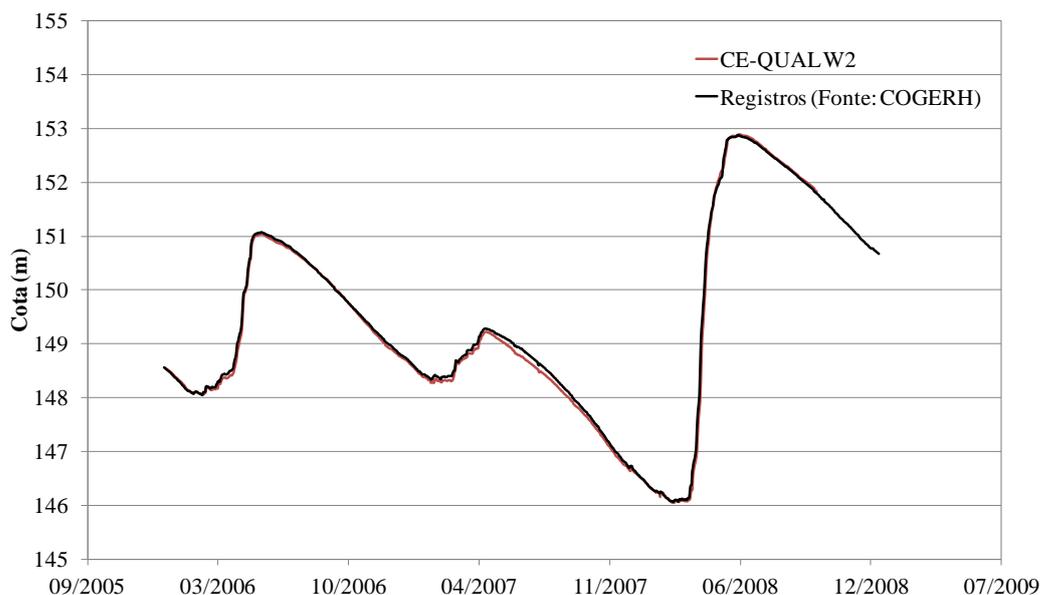


Figura 5.20 – Comparação das cotas simuladas pelo CE-QUAL-W2 e registradas no Açude Araras.

Conforme **Figura 5.20**, pode concluir-se que as cotas de água no reservatório foram simuladas adequadamente, obtendo-se uma boa representação da sua evolução ao longo do período simulado (2006 a 2008). As pequenas divergências entre o nível calculado e registrado resultam de diferenças entre a batimetria real e a estimada para uso do modelo.

5.2.3.2 Evaporação no reservatório

Para a verificação da evaporação no reservatório foi realizada a comparação entre os valores simulados pelo modelo com os registros da estação meteorológica Sobral (através de atmômetro de Piché) e com as médias mensais conforme Ficha Técnica do Açude.

Conforme a **Figura 5.21** verifica-se que o modelo reproduz o padrão de variação sazonal na evaporação, mais elevado nos meses secos (entre junho e dezembro) e menor nos meses úmidos (entre janeiro e maio), embora esta variação seja mais expressiva nos dados da estação. No entanto, conforme os estudos realizados para o Nordeste do Brasil - LIMEIRA *et al.*, (2004) e SILVEIRA *et al.*, (2011) - as evaporações estimadas por meio de atmômetro de Piché tendem a ser sobrestimadas durante o período seco e subestimadas durante o período úmido. Ademais, conforme **Figura 5.21** verifica-se ainda que as evaporações simuladas pelo modelo são bastante próximas das evaporações normais apresentadas na Ficha Técnica do Açude, o que sugere serem adequadas as evaporações simuladas pelo modelo.

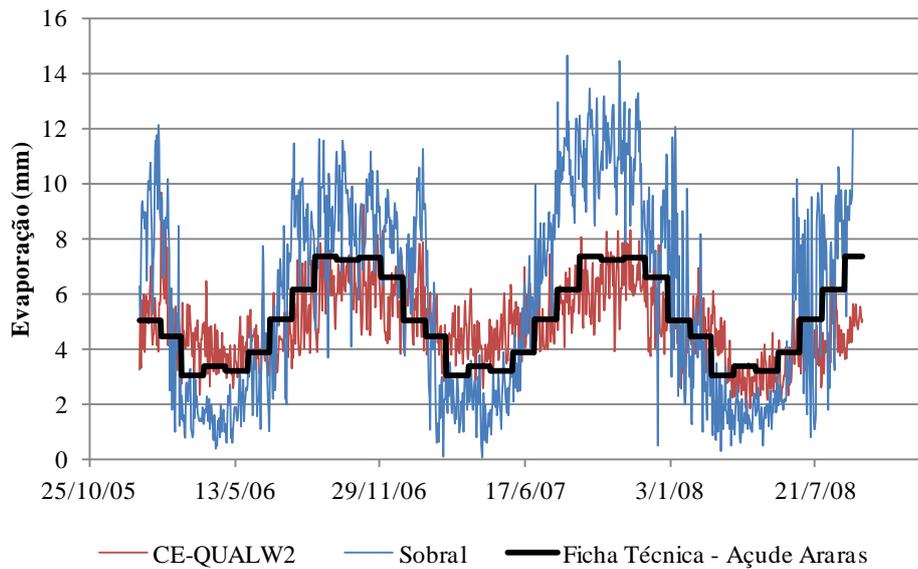


Figura 5.21 – Comparação da evaporação simulada pelo CE-QUAL-W2 no reservatório Araras e registradas na estação meteorológica Sobral.

5.2.3.3 Temperatura da água no reservatório

Na **Figura 5.22** apresenta-se a série temporal de temperatura medida na superfície da coluna d'água (especificamente a 0,30 m de profundidade) no Açude Araras (ponto ARA-01). Conforme apresentado na **Figura 5.22**, os resultados obtidos pelo modelo são próximos dos registros existentes, com um erro médio absoluto de 0,66°C e erro médio quadrático de 0,88°C, para os nove (9) pares de dados comparados (modelados e registrados).

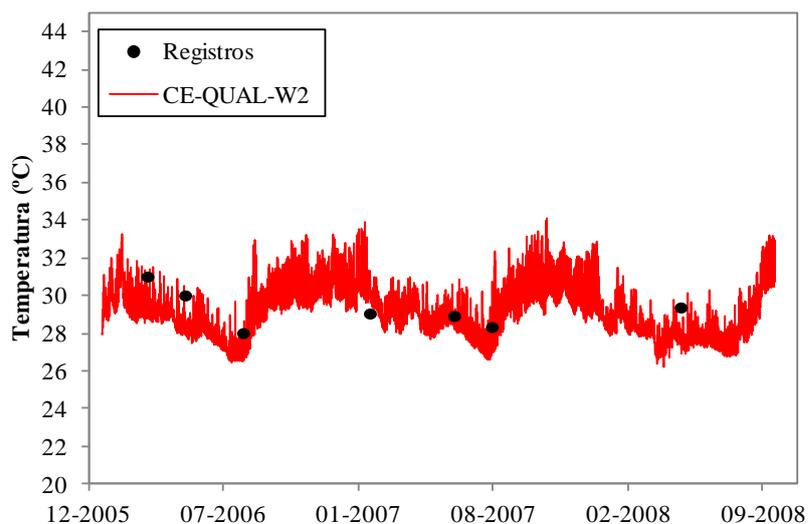


Figura 5.22 – Série temporal de temperatura da água à superfície no Açude Araras (ponto ARA-01).

Ademais, conforme apresentado na **Figura 5.23**, onde se estabelece a comparação entre os resultados do modelo e perfis de temperatura registrados para o ano de 2007 e 2008, verifica-se que o modelo, apesar de apresentar diferenças médias da ordem de 1°C, simula a variação da temperatura em profundidade. No entanto, é importante ressaltar que esta diferença de temperatura pode ser resultante do fato de se ter utilizado uma estação meteorológica afastada do açude, de onde se retiraram os dados para aplicar o modelo.

Assim, considera-se que o modelo reproduz o padrão de evolução dos perfis térmicos típicos de açudes localizados em ambientes semi-áridos, podendo sugerir que este deverá descrever o seu comportamento hidrodinâmico de uma forma igualmente adequada.

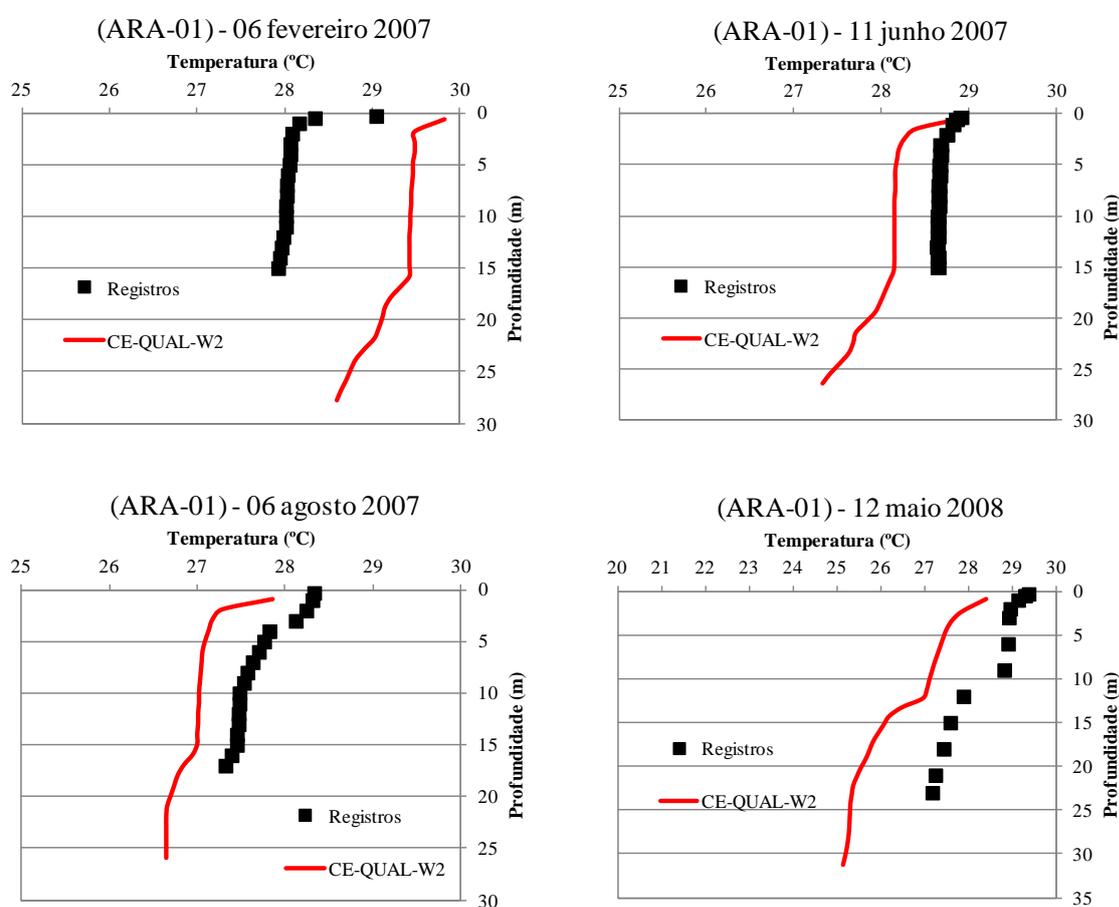


Figura 5.23 – Perfis de temperatura no Açude Araras no ponto de monitoramento ARA-01 nos anos de 2007 e 2008.

5.2.3.4 Qualidade da água

No seguimento da calibração da temperatura no sistema, procedeu-se à calibração do modelo para representar adequadamente os parâmetros de qualidade da água. Para isto, deverão existir dados suficientes de qualidade da água que permitam representar a sua variabilidade sazonal.

Neste contexto e conforme referido anteriormente, vale frisar que foram detectadas várias discrepâncias nas medições existentes no Banco de Dados de Qualidade da Água do Açude Araras, realizadas em campo (por sonda) e em laboratório (disponibilizado pela FUNCEME). A título de exemplo, na **Figura 5.24** é possível observar as medições de clorofila-a e oxigênio dissolvido realizadas no dia 6 de fevereiro de 2007 por sonda e em laboratório. Conforme indica a **Figura 5.24**, a medição da clorofila-a em laboratório foi bastante superior aos registros de campo realizados com a sonda multiparamétrica. Por outro lado, a medição de oxigênio dissolvido em laboratório foi bastante inferior às medições de campo.

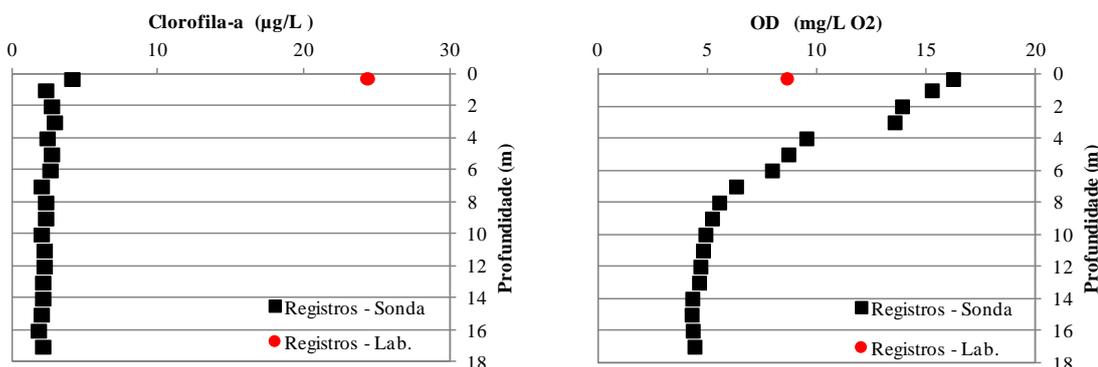


Figura 5.24 – Medições de clorofila-a (à esquerda) e oxigênio dissolvido (à direita) no Açude Araras no ponto de monitoramento ARA-01 no dia 6 de fevereiro de 2007.

Deste modo, o desempenho do modelo será novamente avaliado com base nos resultados das campanhas de monitoramento da qualidade da água realizada no âmbito do presente estudo.

Dada a falta de dados que caracterizam devidamente o açude, juntamente com a incerteza associada aos dados existentes, o exercício de calibração do modelo fica seriamente comprometido. Não é por isso recomendável calibrar os parâmetros do modelo com base em dados de campo que diferem significativamente entre si, dependendo do modo como foram obtidos (sonda ou laboratório). No entanto, a título ilustrativo, são apresentados os dados disponíveis e os resultados do modelo após tentativa de calibração.

a) Oxigênio Dissolvido (OD)

Os resultados do modelo para a concentração de oxigênio dissolvido à superfície no Açude Araras são apresentados na **Figura 5.25**.

Embora existam discrepâncias com os dados de campo apresentados, o modelo simula uma evolução da concentração de OD típica destes sistemas, como é possível verificar em algumas das correspondências entre dados e resultados do modelo.

Os perfis verticais de OD (**Figura 5.26**) mostram que as concentrações do modelo nem sempre se aproximam dos valores medidos em campo.

Face ao exposto anteriormente, a calibração do modelo para o oxigênio foi realizada de modo a conseguir o melhor ajuste entre dados e modelo, sempre considerando a incerteza em relação aos dados.

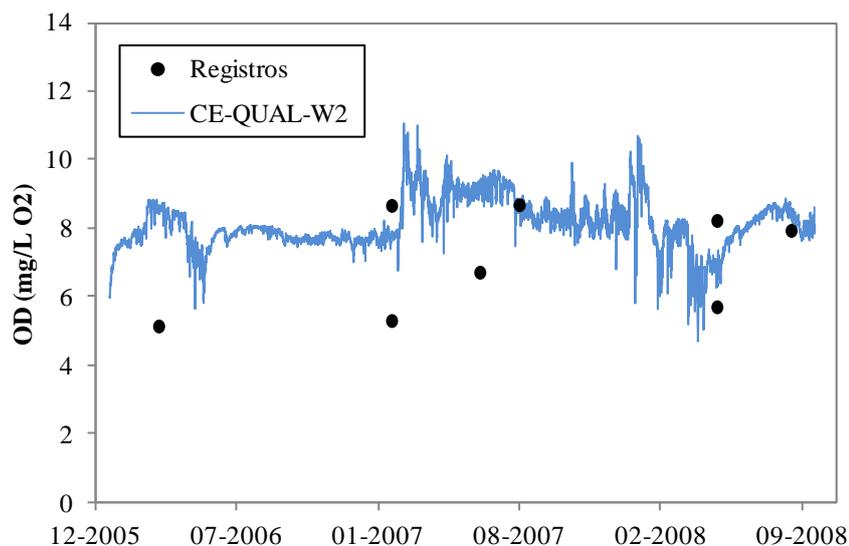
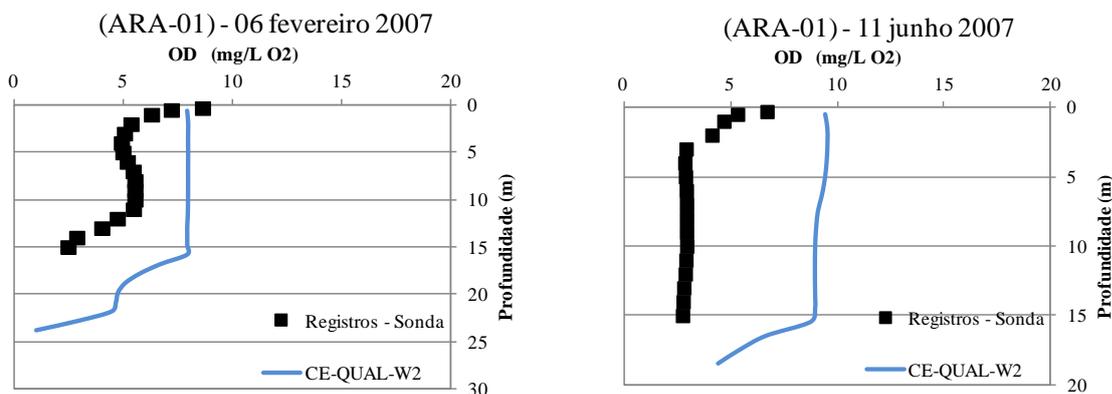


Figura 5.25 – Série temporal de oxigênio dissolvido à superfície da coluna d'água no Açude Araras no ponto de monitoramento ARA-01.



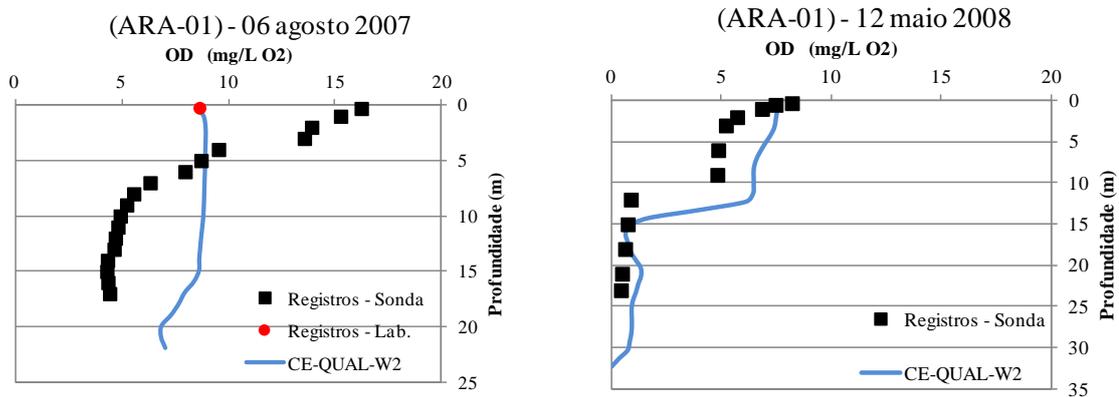


Figura 5.26 – Perfis verticais de oxigênio dissolvido no Açude Araras no ponto de monitoramento ARA-01 nos anos de 2007 e 2008.

b) Clorofila-a

Relativamente à clorofila-a, vale frisar que, durante a análise dos registros disponíveis no Banco de Dados, foram detectadas diferenças significativas dos valores medidos por sonda e em laboratório. Face a essas diferenças, e não sendo possível aferir qual dos conjuntos está correto, não será adequado avaliar o comportamento do modelo utilizando os dados de laboratório. Deste modo, o desempenho do modelo será novamente avaliado com base nos resultados das campanhas de monitoramento da qualidade da água realizada no âmbito do presente estudo.

Não obstante, apresenta-se na **Figura 5.27** a comparação dos resultados do modelo com as medições disponíveis no Banco de Dados na superfície para os anos de 2006 a 2008.

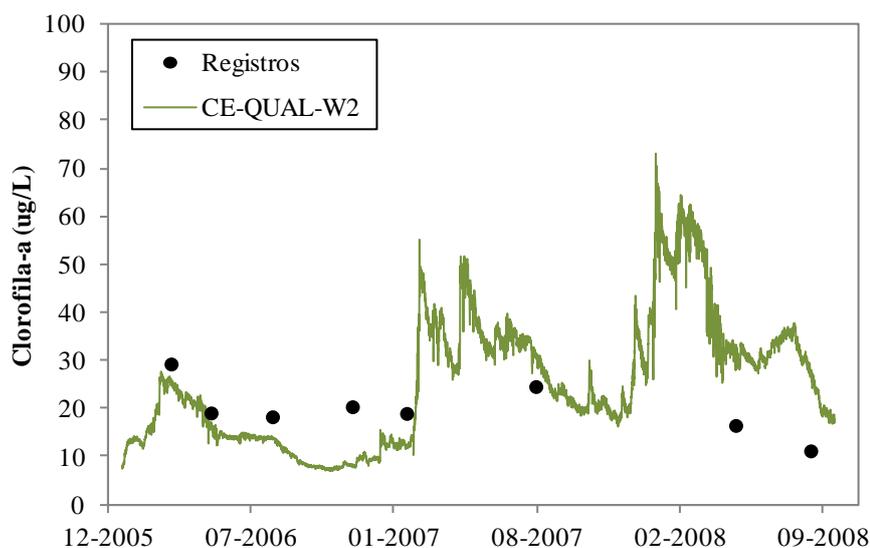


Figura 5.27 – Série temporal de clorofila-a à superfície da coluna d’água no Açude Araras no ponto de monitoramento ARA-01.

c) Nitrato

Na **Figura 5.28** apresenta-se a série temporal de nitrato medido na superfície da coluna d’água do Açude Araras, no ponto de monitoramento ARA-01. A série foi estimada pelo modelo entre os anos de 2006 e 2008. Na mesma figura apresentam-se, ainda, os registros de nitrato disponíveis para o período em análise.

Conforme **Figura 5.28**, os registros disponíveis para os anos de 2006 e 2008 não permitem identificar um padrão ou relação com outros indicadores. Assim sendo, não foi possível avaliar a qualidade do ajustamento entre o conjunto de resultados do modelo e os registros no período.

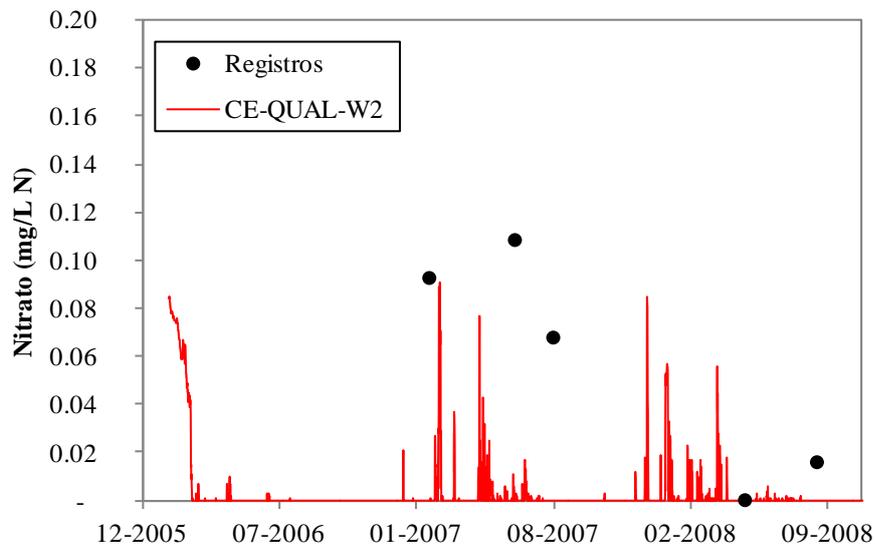


Figura 5.28 – Série temporal de nitrato à superfície da coluna d'água no Açude Araras no ponto de monitoramento ARA-01.

d) Amônia

A **Figura 5.29** apresenta a série temporal de amônia à superfície da coluna d'água do Açude Araras no ponto de monitoramento ARA-01 estimada pelo modelo entre os anos de 2006 e 2008. A mesma figura apresenta, ainda, os registros de amônia disponíveis para o período em análise.

Conforme **Figura 5.29**, os registros disponíveis para os anos de 2006 e 2008 não permitem identificar um padrão ou relação com outros indicadores. Assim sendo, não foi possível avaliar a qualidade do ajustamento entre o conjunto de resultados do modelo e os registros no período.

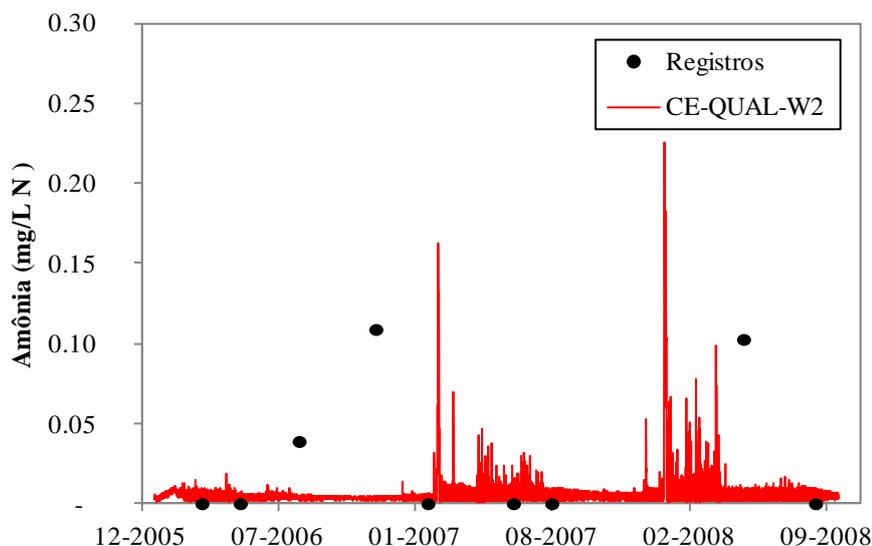


Figura 5.29 – Série temporal de amônia à superfície da coluna d'água no Açude Araras no ponto de monitoramento ARA-01.

5.2.4 Resultados e cenários

A análise de dados disponíveis para o Açude Araras, tal como anteriormente se verificou para o Açude Olho d'Água, expõe uma limitação na caracterização da dinâmica destes sistemas. A insuficiência de dados é uma limitação habitual para estes sistemas por vários motivos, entre os quais salienta-se a necessidade de implementação recente de programas de monitoramento, as dificuldades logísticas na realização de campanhas devido ao acesso dificultado aos açudes, problemas financeiros, etc. Todos estes impedimentos são frequentes na gestão dos recursos hídricos a uma escala global, motivo pelo qual a utilização de modelos numéricos tem aumentado significativamente nas últimas décadas.

No exercício da modelagem, esta limitação significa que o esforço de calibração do modelo poderá ficar de certa forma comprometido. No entanto, o modelo utilizado foi desenvolvido para estudar a dinâmica física, química e biológica de reservatórios, o que significa que os valores utilizados por defeito para os seus parâmetros estão dentro dos limites conhecidos para estes sistemas aquáticos. Assim, ainda que a calibração seja dificultada pela falta de dados, os resultados do modelo conseguem reproduzir a variação esperada para estes sistemas, fornecendo, por isso, informação relevante quanto ao seu funcionamento.

5.2.4.1 Temperatura da água

A temperatura do Açude Araras (**Figura 5.30** e **Figura 5.31**) apresenta uma gama de variação estreita ao longo do ano e em profundidade, com valores que oscilam entre 25° C e 29° C.

Como frequentemente acontece em reservatórios sujeitos a climas semelhantes, existe uma termoclina permanente, ainda que com um gradiente pouco intenso entre o fundo e a superfície. No caso do Açude Araras, este gradiente é de cerca de 4° C, com uma temperatura próxima de 25° C junto ao fundo durante o período úmido e 28.5° C à superfície. No período seco as temperaturas sobem ligeiramente em profundidade, mas tendem a ser um pouco mais baixas à superfície. Neste período parece haver uma maior mistura da coluna d'água, que pode ocorrer devido à ação do vento, como se verifica na maior parte da estrutura térmica da coluna d'água.

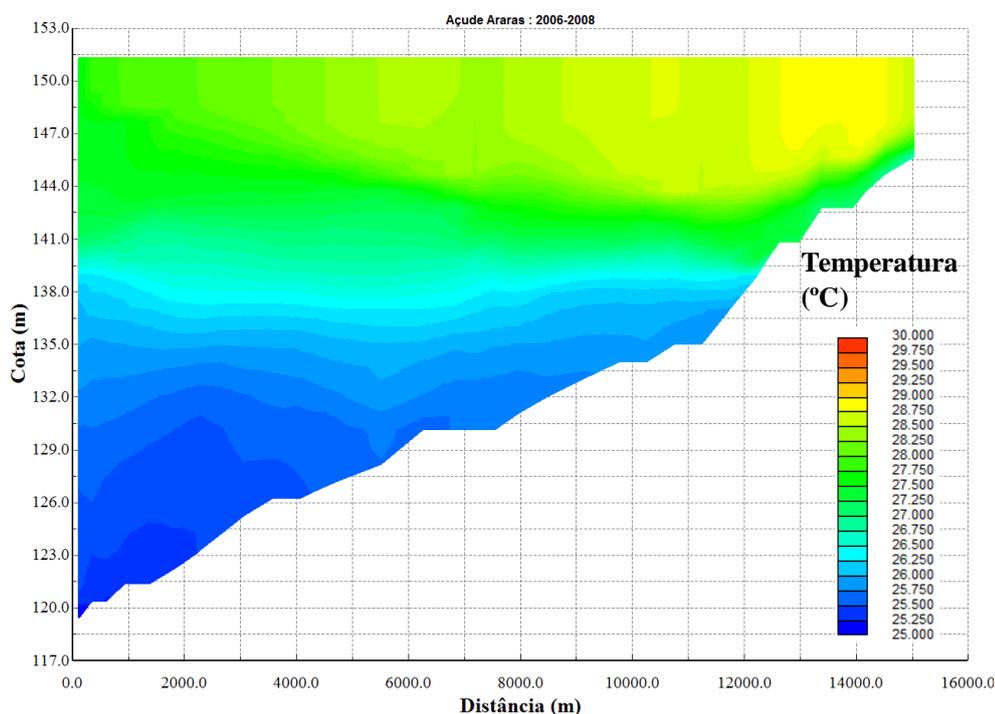


Figura 5.30 – Perfil longitudinal de temperatura no Açude Araras no dia 14 de maio de 2008 (período úmido).

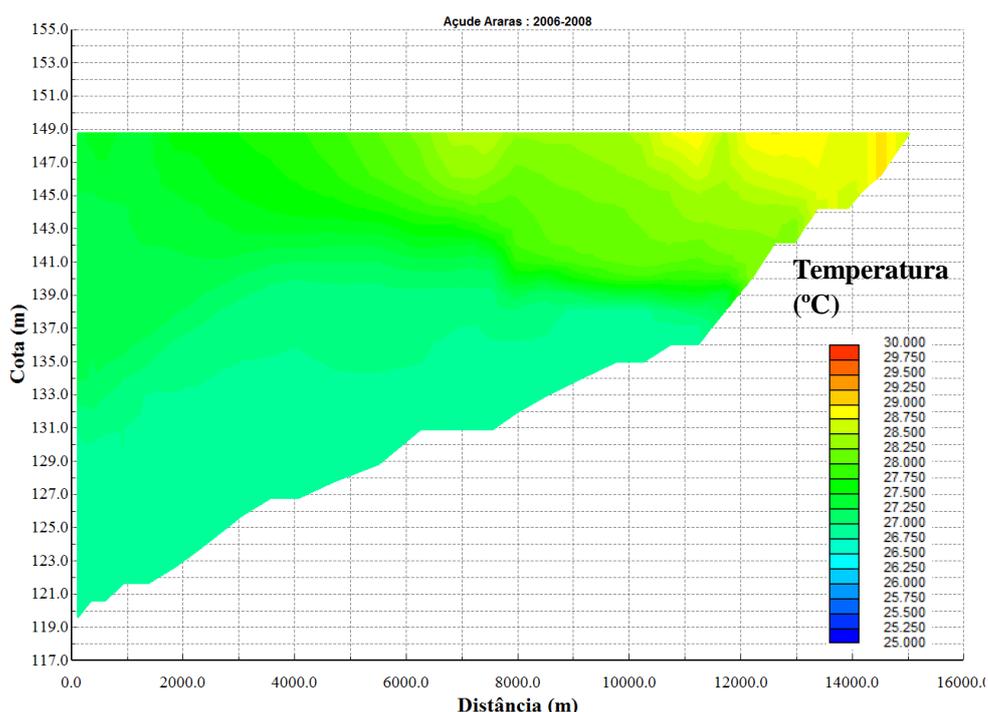


Figura 5.31 – Perfil longitudinal de temperatura no Açude Araras no dia 6 de agosto de 2007 (período seco).

5.2.4.2 Produtores primários fitoplanctônicos

Apesar da termoclina não ser tão marcada entre os dois (2) períodos do ano, as condições térmicas do Açude Araras, que criam uma camada permanente de elevada atividade biológica à superfície que se estende por todo o ano, este padrão é evidente nos resultados do modelo para a concentração da clorofila-a, tanto no período úmido (**Figura 5.32**), como durante o período seco (**Figura 5.33**).

As elevadas concentrações à superfície revelam um fornecimento constante de nutrientes, indicando que o açude é um sistema eutrofizado. Uma vez mais, nas camadas mais profundas do hipolímnio as concentrações são baixas, dada a falta de radiação solar para realização da fotossíntese. Os valores de clorofila-a verificados nestas profundidades resultam, sobretudo, de fitoplâncton senescente que sedimenta.

Salienta-se que a espessura da camada superficial de alta produtividade estende-se até maior profundidade no período seco, o que se justifica pela maior mistura da coluna d' água que promove o fornecimento de nutrientes para o epilímnio, com origem no hipolímnio. No entanto, os valores máximos de clorofila-a não variam significativamente entre os dois (2) períodos.

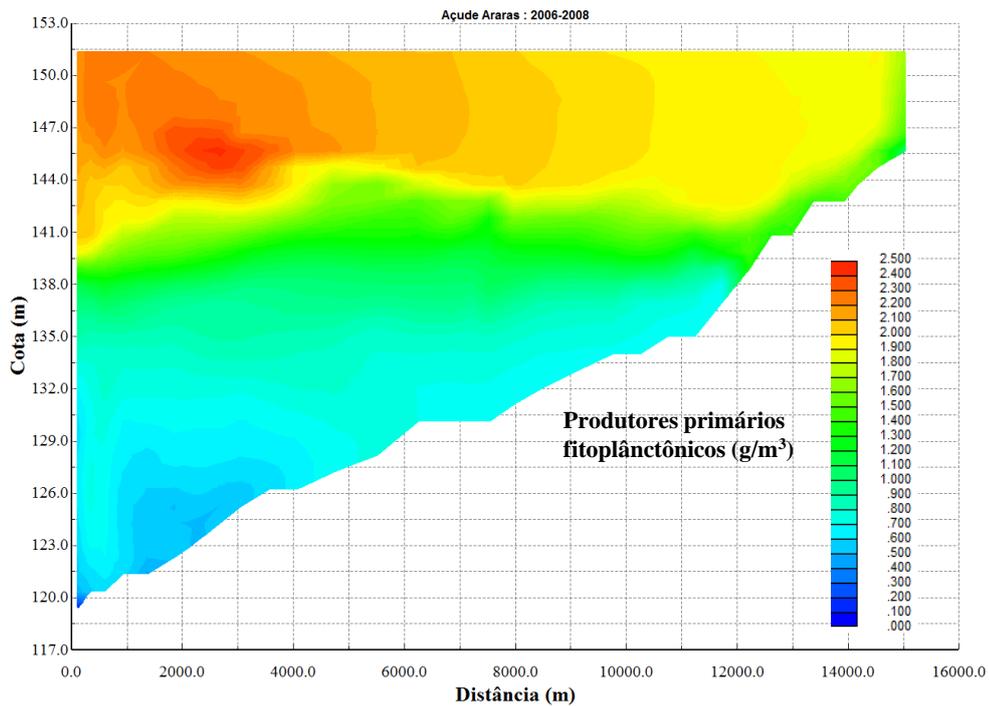


Figura 5.32 – Perfil longitudinal de concentração de produtores primários fitoplancctônicos no Açude Araras no dia 12 de Maio de 2008 (período úmido).

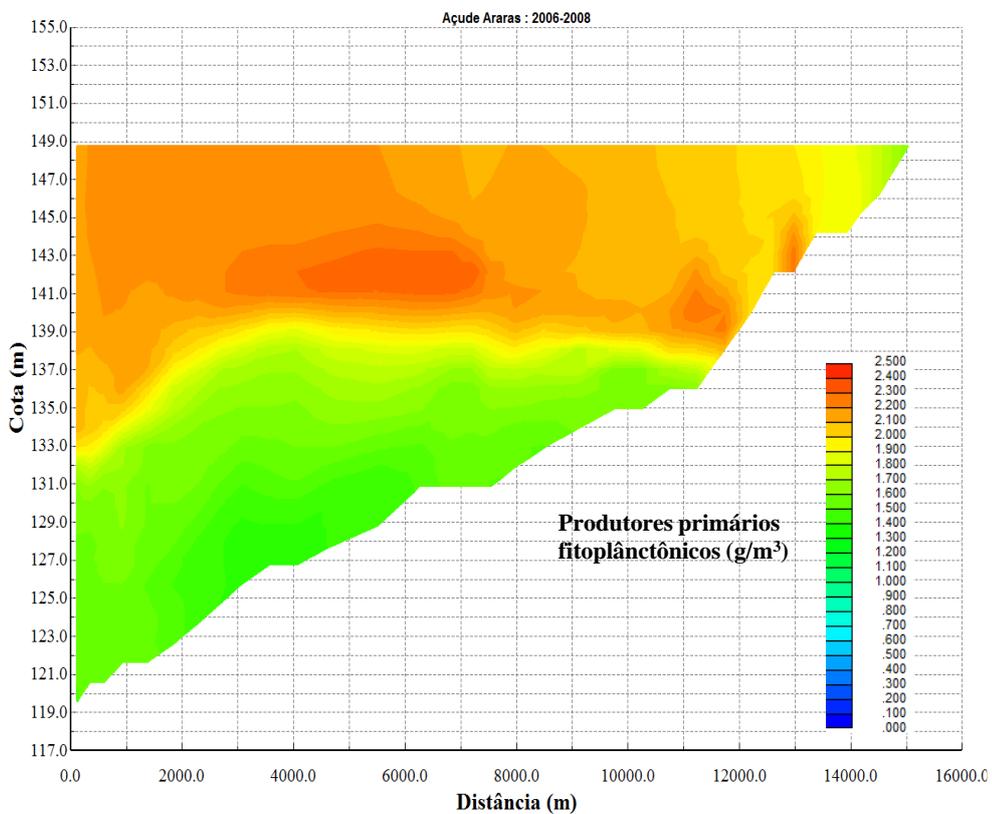


Figura 5.33 – Perfil longitudinal de concentração de produtores primários fitoplancctônicos no Açude Araras no dia 6 de Agosto de 2007 (período seco).

5.2.4.3 Nutrientes

Os resultados do modelo para a dinâmica dos nutrientes revelam um cenário em que estes parecem estar continuamente com concentrações relativamente baixas. Relacionando estes resultados com os valores verificados para a clorofila-a, é possível verificar que as baixas concentrações de nutrientes se justificam por um consumo constante pelos produtores primários.

No caso do fosfato (**Figura 5.34** e **Figura 5.35**) parece haver uma distribuição homogênea destes nutrientes em todo o açude e ao longo do ano. Salienta-se apenas o máximo junto ao fundo verificado no período úmido, mas o mesmo não corresponde a uma estrutura permanente.

Os resultados do modelo para o nitrato (**Figura 5.36** e **Figura 5.37**) indicam algo diferente no cenário, com condições claras de depleção deste nutriente à superfície, mas com disponibilidade em profundidade. Este aumento das concentrações em profundidade é mais evidente durante o período úmido. A existência de concentrações mais elevadas no hipolímnio justifica-se, mais uma vez, na falta do seu consumo, dado a inexistência de atividade dos produtores primários a esta profundidade.

Em ambos os nutrientes há um fornecimento constante para a coluna d'água, resultante dos processos de mineralização que ocorrem no hipolímnio e no sedimento. Considerando que os nutrientes apresentam um padrão distinto, com disponibilidade de nitrato, mas não de fosfato, é possível avançar com a sugestão de o fosfato ser o nutriente limitante no açude.

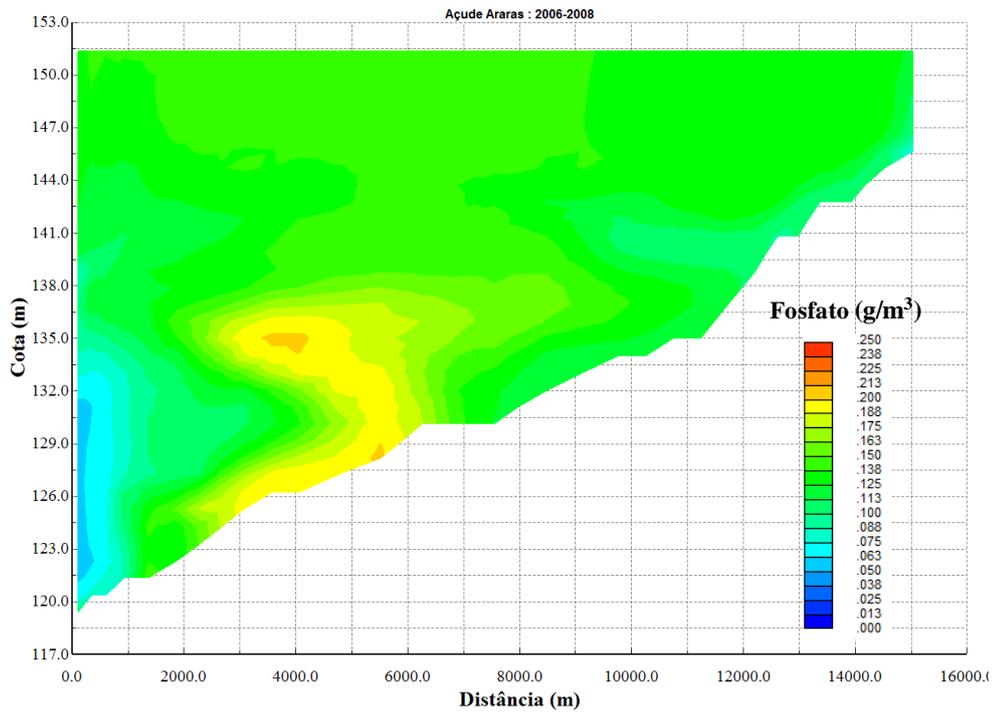


Figura 5.34 – Perfil longitudinal de concentração de fosfato no Açude Araras no dia 12 de maio de 2008 às 12:00h (período úmido).

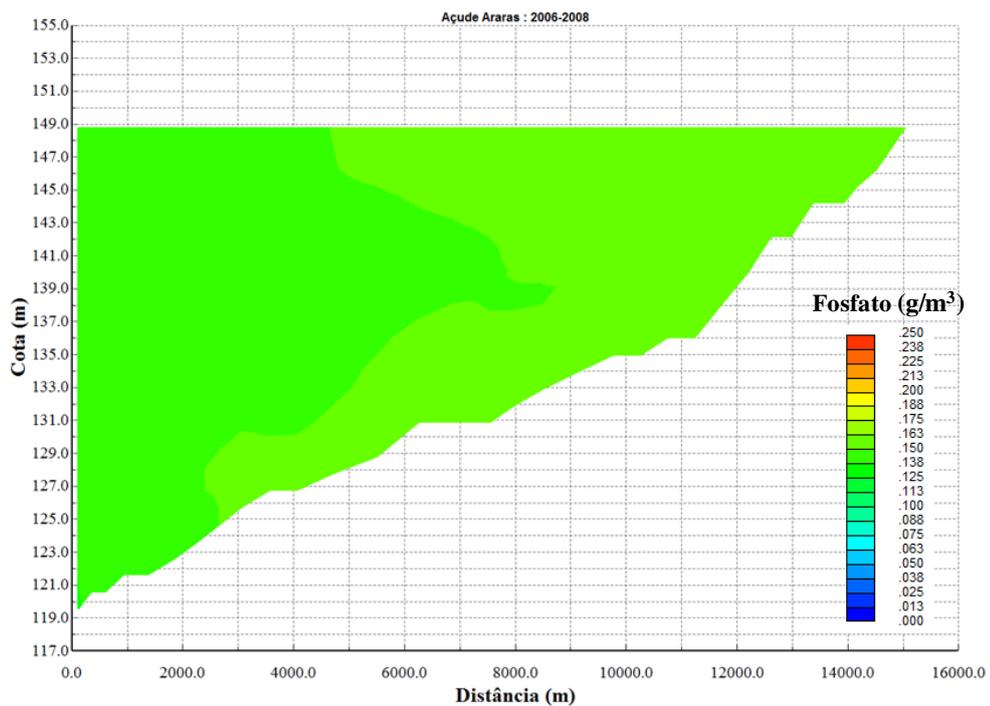


Figura 5.35 – Perfil longitudinal de concentração de fosfato no Açude Araras no dia 6 de agosto de 2007 às 12:00h (período seco).

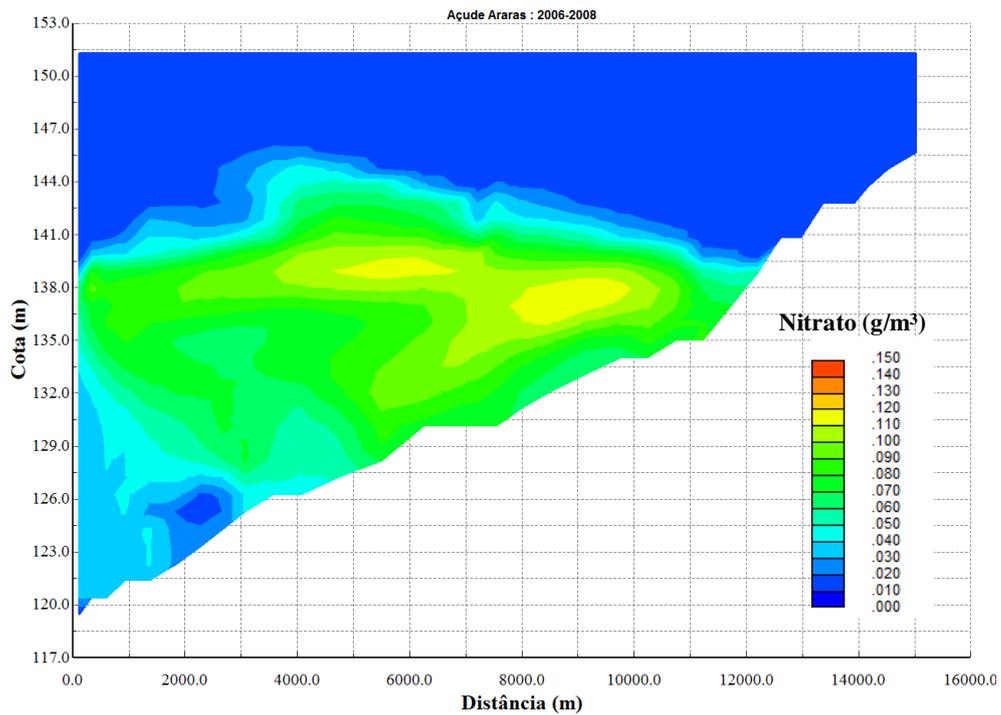


Figura 5.36 – Perfil longitudinal de concentração de nitrato no Açude Araras no dia 12 de maio de 2008 às 12:00h (período úmido).

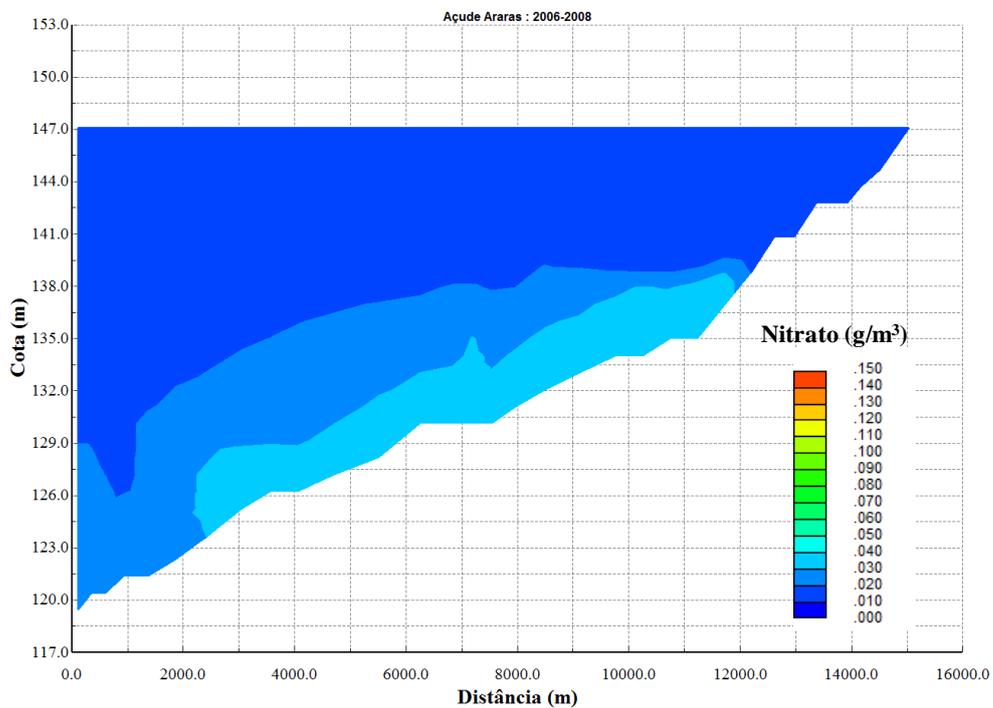


Figura 5.37 – Perfil longitudinal de concentração de nitrato no Açude Araras no dia 6 de agosto de 2007 às 12:00h (período seco).

5.2.4.4 Oxigênio Dissolvido (OD)

A distribuição do OD no açude é uma consequência direta da atividade biológica controlada, sobretudo, pela dinâmica dos produtores primários. A elevada produtividade verificada no açude durante todo o ano, expressada nas elevadas concentrações de clorofila-a, implica uma liberação contínua de oxigênio para a água em resultado da fotossíntese. Verificando os resultados do modelo para o OD (**Figura 5.38** e **Figura 5.39**) é evidente a relação entre a abundância de fitoplâncton e as elevadas concentrações de OD no epilímnio.

Também como consequência desta atividade biológica à superfície, ocorre um fornecimento constante de matéria orgânica para as camadas mais profundas, que vai fazer com que os processos heterotróficos consumam o pouco oxigênio dissolvido que esteja disponível. Este controle biológico, juntamente com a falta de mistura intensa da coluna d'água, criam uma camada persistente de OD baixo ou de depleção.

Embora a distribuição vertical de OD se assemelhe entre os dois (2) períodos, com uma diferença marcada entre a superfície e o fundo, o gradiente é mais intenso no período úmido. Tal como se expôs para o perfil vertical da temperatura durante o período seco, a mistura vertical torna a coluna d'água mais homogênea. Esta mistura promove a troca de água mais profunda com água de camadas mais superficiais onde a concentração de OD é mais elevada, levando a uma oxigenação do hipolímnio. Este processo pode justificar os valores que se aproximam dos 5 mg/L, os quais foram verificados nas camadas mais profundas, e que contrastam com a depleção verificada no período úmido.

Salienta-se que uma explicação alternativa pode ser avançada, especificamente quanto a realização de descargas de água de fundo. Estas descargas de fundo implicam um sumidouro de água pouco oxigenada e subsequente substituição da água de fundo por águas mais superficiais e mais oxigenadas.

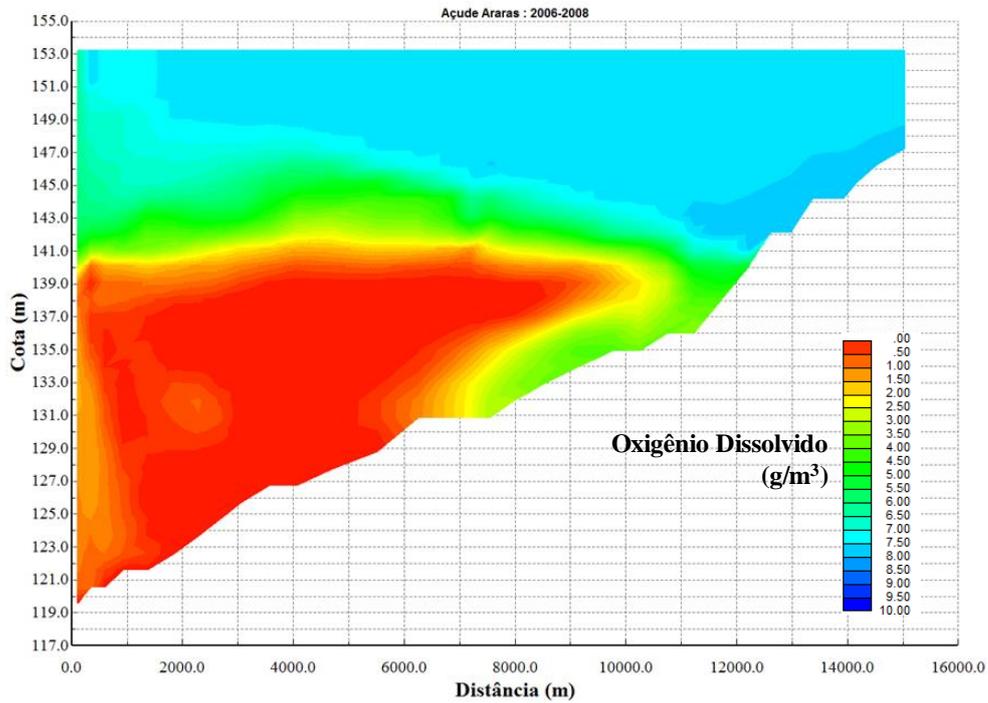


Figura 5.38 – Perfil longitudinal da concentração de oxigênio dissolvido no Açude Araras no dia 12 de maio de 2008 às 12:00h (período úmido).

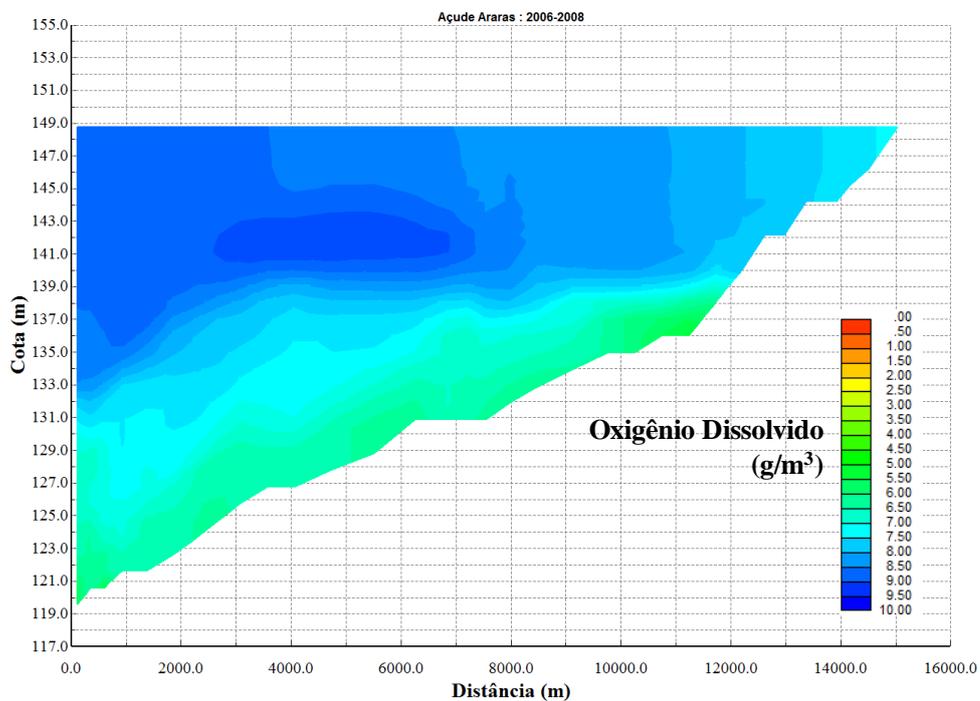


Figura 5.39 – Perfil longitudinal da concentração de oxigênio dissolvido no Açude Araras no dia 6 de agosto de 2007 às 12:00h (período seco).

6 AÇUDE ACARAPE DO MEIO

6.1 ANTECEDENTES

Uma vez que a coleta de dados estimada para este projeto ainda não terminou, optou-se por não apresentar as melhorias ao Açude do Acarape do Meio, como previsto no [Relatório 3](#). Salienta-se que no [Produto 5](#) já são objetivos a apresentação do modelo calibrado e validado da qualidade de água para os três (3) açudes objetos do estudo, banco de dados atualizado e versão fonte do modelo, acompanhado de manual de utilização e calibração detalhado.

Neste subcapítulo pretende-se descrever as melhorias na modelagem que serão implementadas no caso concreto do Açude Acarape do Meio, já desenvolvido e explanado no [Relatório 3](#).

As melhorias que serão aqui descritas estão relacionadas com o aumento de confiança nos resultados obtidos no que diz respeito à qualidade da água. Uma vez que para o modelo de reservatório são necessárias as vazões que afluem a ele, e que os processos que ali ocorrem estejam diretamente relacionados com a qualidade e quantidade de água que entra proveniente da bacia de drenagem, os resultados do modelo de bacia são de extrema importância.

6.2 MELHORIAS A SEREM IMPLEMENTADAS

Serão implementadas as melhorias referidas na [Tabela 8.1](#) do [Relatório 3](#) para o Açude Acarape do Meio, sendo:

- aprofundamento da caracterização da área, procurando um detalhamento das fontes de poluição pontuais e difusas;
- incorporação dos dados de níveis que estão sendo coletados em campo;
- aplicação de outras fontes de dados meteorológicos, especificamente quanto aos geradores climáticos, modelos climáticos, radares, etc.; e,
- incorporação de dados mais precisos da exploração do açude.

Para as melhorias relacionadas às fontes de poluição pontuais, será considerado que para localidades que não possuem esgotamento sanitário, cada pessoa gera, conforme Araújo (2000), em média 100 L de esgoto bruto por dia, com uma concentração de fósforo, segundo Sperling (1995), de 14 mg/L. De acordo com Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE, 2014b), cerca de 30 a 40% da população possui esgotamento sanitário ([Tabela 6.1](#)). Assim, considerar-se-á que mais da metade (aproximadamente 60%) da população não

se encontra abrangida por esgotamento sanitário, o que significa que serão em média 116.520 habitantes.

Tabela 6.1 - Taxas de cobertura dos serviços de água e esgoto, por situação do domicílio, dos municípios integrantes da bacia do Açude Acarape do Meio para os anos de 2012 e 2013.

Municípios	Taxa de Cobertura (%)							
	Abastecimento de Água				Esgotamento Sanitário			
	Urbana		Rural		Urbana		Rural	
	2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013
GUARAMIRANGA	99,02	98,34	-	-	36,81	64,36	-	-
MULUNGU	98,53	98,58	20,15	-	18,56	18,42	-	-
PACOTI	97,34	97,31	50,72	-	74,24	83,25	-	-
PALMÁCIA	99,26	99,28	59,96	-	30,35	29,98	-	-
REDENÇÃO	95,72	95,76	28,25	-	4,10	9,49	-	-

Fonte: IPECE (2014b).

Serão assim considerados estes valores de fósforo como fonte pontual nas localizações da bacia mais povoadas. Isto é possível, na opção *Point sources* do modelo SWAT.

Com relação a incorporação dos dados mais detalhados do açude, como o seu nível, serão considerados todos os dados que serão coletados até o final das campanhas de monitoramento previstas no âmbito deste estudo.

Quanto aos dados meteorológicos, serão considerados dados provenientes de modelos climáticos atuais e coincidentes com o período da coleta de dados em campo.

7 ANÁLISE DA METODOLOGIA/ESTRATÉGIA PROPOSTA

7.1 CONSIDERAÇÕES

Os estudos de modelagem dos reservatórios do Estado do Ceará apresentados no **Relatório 3** e no presente documento (**Relatório 4**) foram antecedidos de um estudo prévio sobre os modelos disponíveis e sua adequação ao trabalho proposto, apresentado no **Produto 2**, intitulado “*Proposta de Estratégia de Modelagem da Qualidade da Água em Reservatórios – Elaboração da Metodologia de Qualidade da Água para Reservatórios do Estado do Ceará (Estudo de viabilidade e hierarquia dos modelos identificados e avaliados)*”. Este estudo, detalhando das características de cada modelo, foi o ponto de partida para o trabalho de modelagem, permitindo avaliar a capacidade de cada modelo proposto e identificar suas potencialidades e limitações no âmbito do presente trabalho. Este trabalho preliminar levou à escolha dos modelos matemáticos utilizados nos estudos subsequentes.

De acordo com o Termo de Referência do estudo em questão, foram sugeridas (no **Produto 2**) características que o modelo selecionado deveria englobar para simular adequadamente os processos que controlam a qualidade da água nos reservatórios. Estas seriam:

- considerar aspectos regionais que afetam o regime qualitativo e que influenciam a variabilidade observada dos parâmetros monitorados;
- estar ligado ao sistema de monitoramento;
- representar o estado da arte em monitoramento e modelagem da qualidade da água; e,
- apresentar capacidade de modelar alguns processos físico-químicos fundamentais, tais como os processos eutrofizantes e a estratificação térmica (ciclo diurno).

A seguir é apresentada uma breve avaliação do trabalho no que se refere a cada um dos tópicos anteriormente citados.

7.2 ASPECTOS REGIONAIS

Dada sua extensão geográfica, o Estado do Ceará abrange distintas condições ambientais em todo seu território. O clima, por exemplo, varia significativamente dentro do Estado, assim como o tipo de solo ou a sua cobertura. Da mesma forma, as condições socioambientais variam significativamente entre locais, o que aumenta a heterogeneidade nas características dos açudes e respectivas bacias de drenagem dentro do Estado. Desta forma, para a correta modelagem de cada bacia de drenagem e respectivo açude, é necessária a caracterização de ambos com dados de campo, mas também utilizar um modelo que não seja desenvolvido

exclusivamente para um conjunto específico de parâmetros ou para intervalos restritos de valores.

Cada açude apresenta um conjunto de características próprias, frequentemente singulares, que se devem à sua localização, tamanho ou tipo de estrutura, mas também devido a particularidades nas suas bacias de drenagem, tais como tipo de solo, o seu uso e ocupação. As cargas antropogênicas são determinantes para a qualidade da água no açude, pelo que a atividade humana no entorno do reservatório e ao longo de toda a bacia é um fator fundamental para o estado dos corpos d'água.

7.3 LIGAÇÃO A SISTEMAS DE MONITORAMENTO

As diferenças nas características de cada açude e bacia de drenagem só podem ser corretamente aferidas quando existe um conjunto de dados que as permitem caracterizar nas suas dimensões espacial e temporal. Só desta forma os modelos podem ser aplicados a diferentes sistemas, reproduzindo a dinâmica de cada um, em função das suas características socioambientais. Neste contexto, os sistemas de monitoramento ambiental (qualidade da água, condições meteorológicas, etc.) são uma condicionante a qualquer exercício de modelagem, pois só eles permitem obter a informação necessária à correta aplicação dos modelos e subsequente exploração em um contexto de gestão.

Os estudos de modelagem apresentados para os três (3) açudes mostram a importância dos dados e revelaram algumas limitações associadas à sua indisponibilidade em algumas situações. Ainda assim, os modelos selecionados revelaram ser capazes de reproduzir a dinâmica de cada um dos açudes.

O primeiro exercício a ser aplicado para outros açudes que venham a ser modelados no futuro será, portanto, a avaliação da disponibilidade de dados. Só assim se poderá saber de antemão se haverá algum impedimento significativo à modelagem.

7.4 ESTADO DA ARTE

O trabalho de modelagem realizado para os três (3) açudes selecionados foi precedido por uma extensa avaliação dos diferentes modelos matemáticos de qualidade da água. Foi igualmente realizada uma caracterização dos açudes de modo a identificar as características de cada um e os principais fatores que condicionam a disponibilidade e qualidade da água na bacia e açude. Com base neste estudo prévio foram então escolhidos os modelos dentre os vários disponíveis.

Do estudo de hierarquização dos modelos apresentado no **Produto 2** resultou a escolha dos modelos utilizados neste trabalho, sendo que os mesmos representavam, até ao momento em que o referido Produto foi finalizado, o estado da arte em modelos numéricos de qualidade da água em reservatórios e na bacia. Garantiu-se, desta forma, que os estudos de modelagem dos açudes fossem realizados com as melhores ferramentas disponíveis até à data. Propôs-se, de igual modo, a melhor metodologia possível para o estudo de outros açudes no Estado do Ceará, seguindo o estado da arte na modelagem de reservatórios, apresentado em estudos de igual natureza.

7.5 MODELAGEM DE PROCESSOS

Independentemente das características próprias de cada açude, o seu funcionamento enquanto corpo d'água no que se refere à dinâmica física, química e ecológica, não varia entre locais. Isto significa que os processos simulados são iguais entre os vários açudes, podendo, por isso, ser simulados com modelos orientados por processos que reproduzem as leis físicas que regem os diferentes fenômenos naturais. Desta forma, os modelos são genéricos, sendo que a modelagem dos açudes tem em consideração as características particulares de cada um, assim como das suas bacias de drenagem, no cálculo da evolução do estado das propriedades em estudo.

A aplicação da metodologia proposta com uso dos modelos selecionados revelou, portanto, eficácia na simulação da evolução da qualidade da água nos diferentes açudes, sendo por isso possível a sua utilização no estudo de cenários de gestão da bacia e reservatório. Depois de demonstrada por meio da modelagem dos três (3) açudes selecionados, esta abrangência pode ser estendida aos demais reservatórios do Estado do Ceará.

Uma das características apontadas no **Produto 2** como sendo um dos critérios fundamentais para a escolha do modelo foi a sua capacidade de simular a estratificação térmica da coluna d'água, um processo físico frequente em lagos e reservatórios. O modelo CE-QUAL-W2 foi capaz de reproduzir adequadamente a estrutura térmica vertical dos diferentes corpos d'água modelados, apesar das condições físicas marcadamente distintas entre eles, tais como variações significativas nos valores dos parâmetros ambientais (vento, radiação solar, etc.), vazões afluentes, profundidade do reservatório ou tempo de residência da água. Desta forma, a evolução da termoclina foi conseguida após calibração do modelo usando dados de campanhas de monitoramento, mostrando ser possível a utilização do modelo em outros reservatórios do Estado do Ceará que possuam, igualmente, um conjunto de dados adequados.

O modelo mostrou ser igualmente útil na simulação dos processos de eutrofização nos açudes. Para tal, foram necessárias a parametrização dos produtores primários e a identificação das fontes de poluição nas bacias de drenagem e subsequente quantificação das cargas orgânica e mineral a elas associadas. A utilização do modelo SWAT beneficiou ainda este estudo ao permitir simular a qualidade da água dos afluentes, quantificando as cargas orgânicas e minerais em função do uso e ocupação do solo em todas as bacias envolvidas.

7.6 AVALIAÇÃO GERAL

Avaliando os resultados obtidos por meio da utilização dos modelos, assim como a metodologia proposta e implementada nestes estudos, verifica-se, inequivocamente, que o trabalho de modelagem alcançou os dois (2) objetivos fundamentais propostos no **Produto 2** para a gestão da qualidade de água nos açudes, sendo eles:

- melhorar o conhecimento do sistema, pois permitiram avaliar a relação entre processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem simultaneamente; os resultados do modelo permitem ainda ter uma descrição espacial da distribuição das várias propriedades da água (ao longo de todo o reservatório e em profundidade), assim como da sua evolução temporal, avançando assim com conhecimento sobre a dinâmica do sistema até então inexistente e impossível de obter unicamente através do esforço de monitorização e,
- analisar cenários de gestão na bacia e nos próprios açudes, uma vez que possibilitaram estabelecer relações de causa e efeito entre pressões antrópicas e o seu impacto no estado da qualidade da água.

8 PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS PRODUTOS

No escopo deste trabalho de *Avaliação da Metodologia/Estratégia Proposta*, a equipe prosseguirá os estudos por meio da execução das tarefas apresentadas a seguir.

- **Produto 5** – Modelo da qualidade de água calibrado e validado para os três (3) açudes objetos do estudo, banco de dados atualizado e versão fonte do modelo, acompanhado de manual de utilização e calibração detalhado.
- **Relatório 5** – Relatório com recomendações e detalhamento do que necessita ser feito para implementar a metodologia em outros reservatórios do Estado do Ceará.

O **Produto 5** consistirá no modelo da qualidade de água para os três (3) açudes objeto do estudo, devidamente validados e calibrados. As melhorias referidas no presente Relatório serão implementadas. Será também entregue o Banco de Dados devidamente atualizado e a versão fonte do modelo.

O **Relatório 5** consistirá no relatório com as recomendações e detalhamento do que necessita ser feito para implementar a metodologia em outros reservatórios do Estado do Ceará. Este relatório será estruturado de forma sistematizada e sintética, podendo funcionar também como um manual de procedimentos.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Hidroweb*: Sistema de Informações Hidrológicas. 2016. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 03 de out. de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, ANA, 2013 – Shapefile digital da hidrografia Ottocodificada Ceara.

ANNETT B, SULLIVAN H, JAGER I & RALPH M, 2003. Modeling white sturgeon movement in a reservoir: the effect of water quality and sturgeon density. *Ecological Modelling* 167(1): 97–114.

ARAÚJO, L.F.P. Reuso com lagoas de estabilização : potencialidade do Ceará. Fortaleza : SEMAGE, 2000.

Arino, Olivier; Ramos Perez, Jose Julio; Kalogirou, Vasileios; Bontemps, Sophie; Defourny, Pierre; Van Bogaert, Eric (2012):

BALDISSERA, G. C., 2005 Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (soil and water assessment tool), para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT. Dissertação (Mestrado em física e meio ambiente) - Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá.

CARACO N, COLE JJ, LIKENS G.E. 1989. Evidence for sulfate-controlled phosphorus release from sediments of aquatic systems. *Nature* 341: 341-318.

CARVALHO FILHO A., CURI N., SHINZATO E., Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. *Pesq.agropec.*, Brasília, v.45, n.8, p.903-916, ago, 2010.

CEARÁ. Revisão do Plano de Gerenciamento das Águas das Bacias Metropolitanas - *Fase I: Estudos Básicos e Diagnóstico*. Relatório Final - Edição Definitiva (RFED). Novembro de 2010. Disponível em: <<http://www.cogerh.ce.gov.br/planos-de-bacias/category/54-relatorio-final-edicao-definitiva-fase-i?download=172:bacias-metropolitanas-relatorio-final-definitivo-fase-i>>. Acesso em: 27 out. 2015.

CHIN, D.A., 2000. *Water-Resources Engineering*. Prentice-Hall.

CHOW, V. T., MAIDMENT D. R., MAYS .L. W., 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.

COELHO H., LEITÃO P. C., 2010. Modelação integrada de bacias e albufeiras: os casos do Pocinho e do Enxoé. Integrated modelling of watershed and reservoirs: Pocinho and Enxoés cases. Revista da APRH. Vol. 31, nº1.

COLE, T.M., WEELS, S. A. 2016 "CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydro-dynamic and water quality model, version 4.0," Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland, OR.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS - COGERH. Açude - Acarape do Meio. 2015. 6 p. Tabela.

CORREL, D.L., 1998. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. J. Environ. Qual. 28:261–266.

DEUS R, BRITO D, MATEUS M, KENOV I, FORNARO A, NEVES R, ALVES C N., 2013. Impact evaluation of a pisciculture in the Tucuruí reservoir (Para, Brazil) using a two-dimensional water quality model. Journal of Hydrology 487: 1–12..

ESSENDELDER, A. H., 2016. SWAT Weather Database: A Quick Guide. Version: v.0.16.06. doi: 10.13140/RG.2.1.4329.1927

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *In*: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10, 1979. Rio de Janeiro, 1979.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS – FUNCEME 2015c. *Shapefile* digital de uso dos solos. Fortaleza,

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS – FUNCEME. BD qualidade ACARAPE DO MEIO.xls. Planilha digital: monitoramento da qualidade da água no Açude Acarape do Meio. Fortaleza, 2015b.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS – FUNCEME. 2015c. Planilha de dados (Microsoft Excel).

FIRMINO, M.B.M, PAULINO, W.D., JÚNIOR, D.S.R., MARTINS, E.S.P.R, 2009. Avaliação do monitoramento da qualidade das águas do reservatório Acarape do Meio integrado com o monitoramento meteorológico e hidrológico, XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

Global Land Cover Map for 2009 (GlobCover 2009). © *European Space Agency (ESA) & Université catholique de Louvain (UCL)*, doi:10.1594/PANGAEA.787668

HARGREAVES, HARGREAVES G.L., G.H., RILEY J.P. 1985. Agricultural benefits for Senegal River Basin. J. Irrig. and Drain. Engr. 111(2):113-124.

HORNE, A.J. & GOLDMAN, C.R. Limnology, 2ª Edição, Nova Iorque: McGraw-Hill, 1994.

IBRAIMO M. M., SCHAEFER C.E.G.R, KER J. C., LANI J.L., ROLIM-NETO F.C., ALBUQUERQUE M.A. & MIRANDA V.J. Gênese e micromorfologia de solos sob vegetação xeromórfica (Caatinga) na região dos Lagos (RJ). R.Bras. Ci Solo, 28:695-712, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Cidades: Redenção – CE: Informações Completas: Censo Demográfico 2010. 2010. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=231160&search=ceara|redencaoinfograficos:-informacoes-completas> >. Acesso em: 09 out. 2015.

KLAFF, J, 2002. Limnology . Prentice Hall.

LELIS, T.; 2011. Modelagem do escoamento superficial e perda de solo na bacia do Ribeirão São Bastolomeu, zona da Mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT. Tese de Doutorado na Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais – Brasil.

LIMEIRA, RODRIGO CÉZAR; DE SOUSA, FRANCISCO DE ASSIS SALVIANO; DE FARIAS BORGES, PERICLES, 2004. Análise das evaporações estimadas pelo Tanque Classe A e pelo Evaporímetro de Piche.

MATEUS, M.; ALMEIDA, C.; BRITO, D.; NEVES, R., 2014. From Eutrophic to Mesotrophic: Modelling Watershed Management Scenarios to Change the Trophic Status of a Reservoir. Int. J. Environ. Res. Public Health 2014, 11, 3015-3031.

MONTEITH, J.L., 1965. Evaporation and the environment. p. 205-234. *In* The state and movement of water in living organisms. *In 19th Symposia of the Society for Experimental Biology*. Cambridge Univ. Press, London, U.K.

MONTEITH, J.L., 1977b. Climate and the efficiency of crop production in Britain. Philosophical Transaction Royal society of London, Ser. B, 281, 277-294.

NASH, J.E. & SUTCLIFFE, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1. A discussion of principles. Journal of Hydrology.

NEITSCH, S.L., ARNOLD J.G., J.R. KINIRY, WILLIAMS J.R., KING K.W. 2009, SWAT2009 Theoretical Documentation. Grassland, Soil and water Research Laboratory Agricultural research service.

PEIXOTO, F. S. , 2014 Análise da Relação Espaço-Temporal do Uso e Ocupação do Solo com a Qualidade da Água na Bacia do Açude Acarape do Meio. Novembro de 2014. 123f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza.

PIDWIRNY, M. J., 2002. Fundamentals of Physical Geography. Introduction to Biogeography and Ecology, The Nitrogen Cycle.

PRIESTLEY, C.H.B., TAYLOR R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Mon. Weather Rev. 100:81- 92.

SILVEIRA, C. D. S., SOUZA, J. L., JUNIOR, J., ARAÚJO, B. D., ALMEIDA, F. A. F., STUDART, T., e LUNA, R. M., 2011. Análise espacial da evapotranspiração no estado do Ceará: análise comparativa entre métodos. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió–AL. Anais.. Maceió–AL: Edição dos Organizadores, 430-459.

SPERLING, M.V. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte : UFMG, 1995.

USEPA. 2000. Clean Water Action Plan: The Second Year Report: Progress Through Partnerships. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC.

WETZEL, R. G. 2001. Limnology: Lake and River Ecosystems. Academic Press, San Diego. 1006 pp.

WETZEL, R.G. 1983. Limnology. Second Edition. Saunders College Publishing. 860 pp.

WILLIAMS, J.R. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds. Water Resour. Bull. 11(5):965-974.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington, DC: USDA. (Agriculture handbook, 537).

YU S J, LEE J Y, HA S R., 2010. Effect of a seasonal diffuse pollution migration on natural organic matter behavior in a stratified dam reservoir. Journal of Environmental Sciences 22(6): 908–914.

ANEXO 1 - DESCRIPTIVOS ESTADÍSTICOS

ANEXO 1 – DESCRITIVOS ESTATÍSTICOS

Enviesamento (Bias):

O enviesamento corresponde a uma média aritmética dos erros observados – diferença entre os valores observados e os valores estimados, emparelhados. Trata-se, portanto, de uma medida de localização, vindo nas mesmas unidades da variável. Calcula-se com base no estimador apresentado na Equação 1 (Bias – Enviesamento), onde x_i são os valores observados e y_i os valores calculados pelo modelo, estando assim nas mesmas unidades das variáveis. Quanto mais próximo de zero, melhor o desempenho global do modelo. Valores positivos indicam que o modelo está, em média, a sobrestimar os valores, enquanto valores negativos indicam que o modelo está a simular valores em média inferiores aos observados.

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{n} \quad (1)$$

Coefficiente de correlação linear de Pearson (R²)

Este coeficiente mede a **associação linear** entre duas variáveis. Calcula-se com base no estimador apresentado na Equação 2 (R² – coeficiente de determinação), onde x_i são cada um dos valores observados e x_m a sua média. y_i corresponde a cada um dos n valores calculados pelo modelo e y_m a sua média.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)(x_i - x_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2 (x_i - x_m)^2}} \right) \quad (2)$$

Este valor é adimensional, entre 0 e 1, apresentando-se em percentagem e devendo ser interpretado como a percentagem de variabilidade nos valores observados que é explicada pelos valores modelados, naturalmente quanto mais próximo de 1 mais eficiente é a previsão. Em geral, admitem-se como satisfatórios os modelos com coeficiente de correlação superior 0,5 a 0,6.

Demonstra-se facilmente que se $Y=AX+B$ o coeficiente de determinação também é igual a 1. Se B (ordenada na origem) diferir significativamente de zero então a

magnitude dos dados é diferente (aditividade) e se A (declive) for diferente de 1 então existem diferenças na magnitude dos dados observados. Claramente nestes casos embora a variabilidade da curva esteja perfeitamente explicada por uma relação linear entre os dados, não se pode concluir que a correlação seja perfeita.

Coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE)

Definida por Nash *et al.* (1970), tal como o coeficiente de correlação, descrito anteriormente é uma medida à *bondade do ajustamento*, sendo esta estatística recomendada para utilização em estudos hidrológicos pela American Society of Civil Engineers (ASCE). O valor da estatística já vai diminuir quando a ordenada na origem e o declive se afastarem, respectivamente, de zero e um. As diferenças sistemáticas de magnitude de escala já vão ser detectadas, no entanto, a questão da sensibilidade aos *outliers* ainda se coloca.

Fisicamente corresponde à razão entre o erro quadrático médio e a variância dos dados observados subtraída à unidade. Nesta estatística o valor 1 indica um ajustamento perfeito entre os valores modelados e observados. Valores próximos de 0 indicam que as previsões efectuadas, pelo modelo, são idênticas às obtidas utilizando a média das observações, logo, valores superiores a zero indicam que o modelo tem capacidade preditiva.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2} \quad (3)$$

Calcula-se com base no estimador apresentado na Equação 3 (NSE-Coeficiente de eficiência global – Nash –Sutcliffe Efficiency), onde x_i são cada um dos valores observados e x_m a sua média. y_i corresponde a cada um dos n valores calculados pelo modelo e y_m a sua média.

Um valor de 0,7 no coeficiente de eficiência (NSE) indica que as diferenças entre os valores observados e os modelados são 30% da variância nos valores observados.