



# nemus

EDP - Gestão da  
Produção de Energia, S.A.

**PROGRAMA ESPECIAL DA  
ALBUFEIRA DE FOZ TUA**

**ELEMENTOS FINAIS**

Volume 1  
RELATÓRIO

Tomo 3 – Modelação da Qualidade  
Da Água

Julho de 2016



EDP - Gestão da  
Produção de Energia, S.A.

---

**PROGRAMA ESPECIAL DA  
ALBUFEIRA DE FOZ TUA**

**ELEMENTOS FINAIS**

Volume 1  
RELATÓRIO

Tomo 3 – Modelação da Qualidade  
Da Água

Julho de 2016



---

## **Programa Especial da Albufeira de Foz Tua**

### **Elementos Finais**

---

#### **Volume I – Relatório**

**Tomo I – Levantamento / Caracterização da  
Situação de Referência**

**Tomo 2 – Diagnóstico e proposta**

**Tomo 3 – Modelação da Qualidade da Água**

**Modelo Territorial**

**Volume 2 – Diretivas**

**Volume 3 – Programa de Execução e Plano de  
Financiamento**

**Volume 4 – Relatório Ambiental e resumo não técnico**

**Tomo I – Relatório Ambiental**

**Tomo 2 – Resumo Não Técnico**

**Volume 5 – Resumo Não Técnico do PEAFT**

**Anexo Cartográfico**

**Desenhos**

**Fontes**

**Regulamento de Gestão da Albufeira de Foz Tua**



## ÍNDICE GERAL

---

<b>1. Introdução</b>	<b>I</b>
1.1. Enquadramento geral	I
1.2. Caracterização do sistema em estudo	2
1.3. Critérios de avaliação da qualidade da água	6
1.4. Aspetos gerais da modelação da albufeira	9
<b>2. Informação de base</b>	<b>13</b>
2.1. Bacia hidrográfica do Tua	13
2.2. Bacia hidrográfica da Régua/Douro	19
2.3. Cargas afluentes à albufeira de Foz Tua	22
2.4. Cargas afluentes à albufeira da Régua	36
2.5. Regime de exploração	37
2.6. Conclusões	37
<b>3. Modelação numérica das albufeiras de Foz Tua e da Régua</b>	<b>39</b>
3.1. Descrição do modelo	39
3.2. Batimetria e malha computacional	42
3.3. Condições iniciais	45
3.4. Condições de fronteira	46
3.5. Albufeira da Régua – Cenário de referência e validação	55
3.6. Albufeira de Foz Tua – Cenário de referência	65
3.7. Conclusões	77
<b>4. Modelação conjunta das albufeiras da Régua e de Foz Tua</b>	<b>79</b>
4.1. Simulação conjunta das albufeiras da Régua e de Foz Tua	79
4.2. Análise comparativa da estrutura vertical em Foz Tua	91
4.3. Conclusões	97
<b>5. Cenários a estudar</b>	<b>99</b>

5.1. Hidrologia	99
5.2. Cargas de nutrientes e matéria orgânica	99
5.3. Qualidade microbiológica	101
<b>6. Classificação da qualidade da água nos diferentes cenários</b>	<b>103</b>
6.1. Cenários de cargas de nutrientes e matéria orgânica	103
6.2. Qualidade microbiológica	109
6.3. Conclusões	110
<b>7. Discussão, conclusões e recomendações</b>	<b>111</b>
<b>8. Bibliografia</b>	<b>115</b>



## ÍNDICE DETALHADO

---

<b>1. Introdução</b>	<b>I</b>
1.1. Enquadramento geral	I
1.2. Caracterização do sistema em estudo	2
1.2.1. Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua	2
1.2.2. Aproveitamento Hidroelétrico da Régua	3
1.2.3. Regime de exploração	3
1.3. Critérios de avaliação da qualidade da água	6
1.3.1. Estado trófico	6
1.3.2. Potencial ecológico	8
1.3.3. Qualidade Microbiológica	8
1.4. Aspetos gerais da modelação da albufeira	9
<b>2. Informação de base</b>	<b>13</b>
2.1. Bacia hidrográfica do Tua	13
2.1.1. Enquadramento	13
2.1.2. Hidrologia	15
2.1.3. Qualidade da água	15
2.1.4. Batimetria	18
2.1.5. Meteorologia	18
2.2. Bacia hidrográfica da Régua/Douro	19
2.2.1. Enquadramento	19
2.2.2. Hidrologia	20
2.2.3. Qualidade da água	21
2.2.4. Batimetria	22
2.2.5. Meteorologia	22
2.3. Cargas afluentes à albufeira de Foz Tua	22
2.3.1. Metodologia de estimativa de cargas	22

2.3.2. Estimativa de volumes e cargas de nutrientes/matéria orgânica no Rabaçal e no Tuela	24
2.3.3. Estimativa de volumes e cargas de nutrientes/matéria orgânica no Tua	26
2.3.4. Estimativa de cargas com os dados do SNIRH	27
2.3.5. Estimativa de cargas com os dados do programa de monitorização do AHFT	30
2.3.6. Intercomparação das estimativas de cargas	34
2.4. Cargas afluentes à albufeira da Régua	36
2.5. Regime de exploração	37
2.6. Conclusões	37
<b>3. Modelação numérica das albufeiras de Foz Tua e da Régua</b>	<b>39</b>
3.1. Descrição do modelo	39
3.1.1. Versão modificada	41
3.2. Batimetria e malha computacional	42
3.2.1. Albufeira de Foz Tua	42
3.2.2. Albufeira da Régua	44
3.2.3. Modelo acoplado das albufeiras	45
3.3. Condições iniciais	45
3.4. Condições de fronteira	46
3.4.1. Caudais afluentes	46
3.4.1.1. Foz Tua	46
3.4.1.2. Régua	47
3.4.1.3. Modelo acoplado	48
3.4.2. Cargas de nutrientes e matéria orgânica	51
3.4.2.1. Foz Tua	51
3.4.2.2. Régua	52
3.4.2.3. Modelo acoplado	53
3.4.3. Forçamento atmosférico	53
3.5. Albufeira da Régua – Cenário de referência e validação	55

3.6. Albufeira de Foz Tua – Cenário de referência	65
3.7. Conclusões	77
<b>4. Modelação conjunta das albufeiras da Régua e de Foz Tua</b>	<b>79</b>
4.1. Simulação conjunta das albufeiras da Régua e de Foz Tua	79
4.2. Análise comparativa da estrutura vertical em Foz Tua	91
4.3. Conclusões	97
<b>5. Cenários a estudar</b>	<b>99</b>
5.1. Hidrologia	99
5.2. Cargas de nutrientes e matéria orgânica	99
5.3. Qualidade microbiológica	101
<b>6. Classificação da qualidade da água nos diferentes cenários</b>	<b>103</b>
6.1. Cenários de cargas de nutrientes e matéria orgânica	103
6.2. Qualidade microbiológica	109
6.3. Conclusões	110
<b>7. Discussão, conclusões e recomendações</b>	<b>111</b>
<b>8. Bibliografia</b>	<b>115</b>



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Volumes turbinados e bombados – Ano seco	4
Quadro 2 – Volumes turbinados e bombados – Ano Médio	4
Quadro 3 – Volumes turbinados e bombados – Ano Húmido	6
Quadro 4 – Critério de classificação do estado trófico de lagos e albufeiras, segundo a OCDE (1982)	7
Quadro 5 – Classificação quanto ao estado trófico de acordo com as concentrações médias de clorofila-a (APA, 2012)	7
Quadro 6 – Limiares máximos para os parâmetros físico-químicos gerais para o estabelecimento do Bom potencial ecológico em massas de água fortemente modificadas	8
Quadro 7 – Valores de fronteira Bom/Razoável para o tipo de albufeira Norte para o Elemento de Qualidade Biológica Fitoplâncton	8
Quadro 8 – Classificação da qualidade da água para consumo humano de acordo com o Decreto-Lei n.º 236/98 para parâmetros microbiológicos	9
Quadro 9 – Classificação da qualidade das águas balneares interiores de acordo com o Decreto-Lei n.º 135/2009 para parâmetros microbiológicos	9
Quadro 10 – Lista de estações hidrométricas na bacia do Tua, disponíveis no SNIRH e utilizadas no estudo	15
Quadro 11 – Lista de estações de qualidade da água na bacia do Tua, disponíveis no SNIRH	16
Quadro 12 – Média e desvio padrão ( $\bar{x} \pm \sigma$ ) dos principais parâmetros de qualidade obtidos nas estações de qualidade da água na bacia do Tua relevantes para este trabalho	16
Quadro 13 – Lista de pontos de monitorização da bacia do Tua pela EDP	18
Quadro 14 – Lista de estações hidrométricas na bacia drenante para a albufeira da Régua, disponíveis no SNIRH	21
Quadro 15 – Lista de estações hidrométricas na bacia drenante para a albufeira da Régua, disponíveis no SNIRH	21
Quadro 16 – Média e desvio padrão ( $\bar{x} \pm \sigma$ ) dos principais parâmetros de qualidade obtidos nas estações hidrométricas na bacia drenante para a albufeira da Régua, disponíveis no SNIRH	22
Quadro 17 – Definição de ano seco, médio e húmido e número de anos em cada categoria no período entre 1986 e 2005, de acordo com o EIA do AHFT (Profico Ambiente, 2008)	25
Quadro 18 – Listagem de anos secos, médio e húmidos de acordo com o estabelecido no Quadro 17	25
Quadro 19 – Resumo da estimativa de escoamento e cargas obtidas nas bacias dos rios Tuela, Rabaçal e Tua com base nos dados do SNIRH	29
Quadro 20 – Cargas calculadas com base nos dados medidos pela EDP na bacia de Foz Tua	30

Quadro 21 – Classificação do Estado Final para as massas de água “rio” monitorizadas (fonte: PGRH – ARH Norte, 2012)	36
Quadro 22 – Caudais e cargas médias anuais afluentes à albufeira da Régua	37
Quadro 23 – Condições iniciais para todas as simulações	46
Quadro 24 – Anos simulados pela EDP para estabelecer os cenários de turbinagem e bombagem	49
Quadro 25 – Tabela de caudais anuais, entre 1990 e 2005, utilizados na construção de série temporal simulada	49
Quadro 26 – Médias anuais da clorofila-a, fósforo total e transparência na albufeira da Régua	56
Quadro 27 – Concentrações médias anuais de nutrientes e clorofila-a (também calculada de verão, visto que se trata do valor relevante para as classificações quer quanto ao estado trófico, quer quanto ao Bom potencial ecológico)	76
Quadro 28 – Concentrações médias anuais na água superficial de nutrientes e clorofila-a (também calculada de verão, visto que se trata do valor relevante para as classificações quer quanto ao estado trófico, quer quanto ao Bom potencial ecológico)	90
Quadro 29 – Conjunto de cenários estudados no PEAF	101
Quadro 30 – Comparação de concentrações médias anuais, para um ano seco (1992), de nutrientes, oxigénio dissolvido e clorofila-a (média anual e média de verão)	104
Quadro 31 – Comparação de concentrações médias anuais, para um ano médio (1994), de nutrientes, oxigénio dissolvido e clorofila-a (média anual e média de verão)	104
Quadro 32 – Comparação de concentrações médias anuais, para um ano húmido (2000 – com e sem bombagem), de nutrientes, oxigénio dissolvido e clorofila-a (média anual e média de verão)	105
Quadro 33 – Comparação de concentrações médias anuais, para a globalidade da simulação, de nutrientes, oxigénio dissolvido e clorofila-a (média anual e média de verão)	106
Quadro 34 – Probabilidade de ocorrência de má qualidade da água em termos de concentração de coliformes fecais na albufeira de Foz Tua, de acordo com a legislação em vigor	109

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Localização das albufeiras de Foz Tua e da Régua	2
Figura 2 – Planta geral do aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua (adaptada de EDP, 2012)	5
Figura 3 – Bacia hidrográfica do Tua, incluindo a sub-bacia Tuela/Rabaçal	14
Figura 4 – Localização das 18 estações de monitorização do programa de monitorização do AHFT	17
Figura 5 – Bacia hidrográfica da albufeira da Régua, em Portugal	20
Figura 6 – Escoamento anual e cargas de CBO5, azoto inorgânico e fósforo inorgânico em Castanheiro	28
Figura 7 – Escoamento anual e cargas de CBO5, azoto inorgânico e fósforo inorgânico na foz do Tuela	28
Figura 8 – Escoamento anual e cargas de CBO5, azoto inorgânico e fósforo inorgânico na foz do Rabaçal	29
Figura 9 – Caudais Medidos pela EDP entre 2010 e 2014 nas estações TIN2, RAB2, TUE2, TUA5 e TUA7	32
Figura 10 – Concentração de Azoto Total entre 2010 e 2014 medidas nas estações de TIN2, RAB2, TUE2, TUA5 e TUA7	32
Figura 11 – Concentração de Fósforo Total entre 2010 e 2014 medidas nas estações de TIN2, RAB2, TUE2, TUA5 e TUA7	33
Figura 12 – Concentração de CBO5 entre 2010 e 2014 medidas nas estações de TIN2, RAB2, TUE2, TUA5 e TUA7	33
Figura 13 – Volumes e cargas presentes na massa de água nos anos hidrológicos de 2010-11 e subsequentes nas estações TIN2 (Tinhela), RAB2 (Rabaçal), TUE2 (Tuela), TUA5 e TUA 7	35
Figura 14 – Concentrações médias de Fósforo Total na Foz do Tua (1994 a 1999 estação de Castanheiro, 2010 a 2013 programa de monitorização do AHFT)	36
Figura 15 – Representação esquemática dos principais processos da versão do modelo CE-QUAL-W2 utilizada	42
Figura 16 – Representação em planta da batimetria da albufeira de Foz Tua e dos afluentes considerados	43
Figura 17 – Validação da curva de volumes acumulados na albufeira de Foz Tua: vermelho – dados de projeto; azul – batimetria utilizada no modelo	43
Figura 18 – Representação em planta da batimetria da albufeira da Régua e dos afluentes considerados	44
Figura 19 – Curva de volume acumulado na albufeira da Régua: Vermelho – batimetria utilizada no modelo; azul – dados INAG; verde – dados de projeto	45
Figura 20 – Caudais afluentes à albufeira de Foz Tua entre 1985 e 2000 (em cima) e caudais lançados para jusante (em baixo) no cenário em que não se considera bombagem	47

Figura 21 – Caudais afluentes à albufeira da Régua entre 1990 e 2009 (em cima) e caudais lançados para jusante (em baixo) no cenário em que não se considera bombagem	48
Figura 22 – Cenários simulados com caudais afluentes à albufeira da Foz Tua entre 1990 e 2005 (em cima), caudais turbinados para jusante (ao centro) e caudais bombados a partir da albufeira da Régua (em baixo)	50
Figura 23 – Caudais afluentes à albufeira da Régua provenientes do Douro, Pinhão e Távora entre 1990 e 2005 (em cima) e caudais lançados para jusante (em baixo) em cenário de bombagem	51
Figura 24 – Cargas de Nutrientes e Matéria Orgânica afluentes a Foz Tua entre 1985 e 2000. À esquerda cargas mensais e à direita cargas anuais. A escala das cargas anuais é logarítmica	52
Figura 25 – Cargas afluentes à albufeira da Régua no cenário de base sem Foz Tua	53
Figura 26 – Temperatura média mensal (°C) de Vila Real no período de 1985-2005	54
Figura 27 – Temperatura do ponto de orvalho média mensal (°C) de Vila Real no período de 1985-2005	54
Figura 28 – Velocidade do vento média mensal (m/s) de Vila Real no período de 1985-2005	55
Figura 29 – Cobertura nebulosa utilizada na simulação da qualidade da água na albufeira de Foz Tua	55
Figura 30 – Relação entre Clorofila-a e fósforo total na albufeira da Régua a partir dos dados de monitorização fornecidos pela EDP	56
Figura 31 – Análise Multivariada no Índice de Estado Trófico na albufeira da Régua	57
Figura 32 – Cotas simuladas (azul) e observadas (tracejado) na albufeira da Régua	58
Figura 33 – Temperatura simulada (a cheio) e observada (circunferências) na albufeira da Régua	58
Figura 34 – Comparação da temperatura simulada e observada e erro médio quadrático	59
Figura 35 – Comparação dos perfis verticais de temperatura na albufeira da Régua em 1995. As observações são os pontos isolados	59
Figura 36 – Clorofila-a simulada (a cheio) e observada (circunferências) na albufeira da Régua	60
Figura 37 – Comparação da clorofila-a simulada e observada e erro médio quadrático	61
Figura 38 – Comparação dos perfis verticais de clorofila-a na albufeira da Régua em 1995. As observações são os pontos isolados	61
Figura 39 – Ortofosfato simulado (a cheio) e observado (circunferências) na albufeira da Régua. Concentrações expressas em mg PO <sub>4</sub> /L	63
Figura 40 – Comparação entre o ortofosfato simulado e observado e erro médio quadrático. Concentrações expressas em mg PO <sub>4</sub> /L	63
Figura 41 – Fósforo Total simulado (a cheio) e observado (circunferências) na albufeira da Régua. Concentrações expressas em mg P/L	64
Figura 42 – Comparação dos perfis verticais de ortofosfato na albufeira da Régua em 1995. Concentrações expressas em mg PO <sub>4</sub> /L	64



Figura 43 – Nitrato simulado (a cheio) e observado (circunferências) na albufeira da Régua. Concentrações expressas em mg NO <sub>3</sub> /L	65
Figura 44 – Séries temporais à superfície de oxigénio dissolvido e temperatura junto à barragem em ano seco (1992)	66
Figura 45 – Perfis de Temperatura em Dezembro, Março, Junho e Setembro junto à barragem	67
Figura 46 – Perfis de Oxigénio Dissolvido em Dezembro, Março, Junho e Setembro junto à barragem	68
Figura 47 – Séries temporais à superfície de clorofila-a e nutrientes junto à barragem em ano seco (1992)	69
Figura 48 – Perfis de Clorofila-a em Dezembro, Março, Junho e Setembro junto à barragem	70
Figura 49 – Perfis de Ortofosfato em Dezembro, Março, Junho e Setembro junto à barragem	71
Figura 50 – Perfis de Nitrato em Dezembro, Março, Junho e Setembro junto à barragem	72
Figura 51 – Séries temporais à superfície de oxigénio dissolvido e temperatura junto à barragem em ano médio (1994)	73
Figura 52 – Séries temporais de clorofila-a e nutrientes à superfície junto à barragem em ano médio (1994)	74
Figura 53 – Séries temporais à superfície de oxigénio dissolvido e temperatura junto à barragem em ano húmido (1997)	75
Figura 54 – Séries temporais à superfície de nutrientes e clorofila-a junto à barragem em ano húmido (1997)	76
Figura 55 – Séries temporais à superfície de nutrientes e clorofila-a junto à barragem em ano seco (1992). A azul resultados da simulação com bombagem e a preto sem bombagem	80
Figura 56 – Séries temporais à superfície de nutrientes e clorofila-a junto à barragem em ano médio (1994). A azul resultados da simulação com bombagem e a preto sem bombagem	81
Figura 57 – Séries temporais à superfície de nutrientes e clorofila-a junto à barragem em ano húmido (2000). A azul resultados da simulação com bombagem e a preto sem bombagem	82
Figura 58 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira da Régua: P-Total (mgPO <sub>4</sub> /L). A tracejado encontram-se representados os limites associados ao critério de classificação para o potencial ecológico e para o estado trófico (OCDE)	83
Figura 59 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira da Régua: Nitrato (mgNO <sub>3</sub> /L). A tracejado encontram-se representados os limites associados ao critério de classificação para o potencial ecológico	83
Figura 60 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira da Régua: Oxigénio Dissolvido. A tracejado encontram-se representados os limites associados ao critério de classificação para o potencial ecológico	84
Figura 61 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira da Régua: Clorofila-a. A tracejado encontram-se representados os limites associados ao critério de classificação para o potencial ecológico e para o estado trófico (OCDE)	84

Figura 62 – Séries temporais à superfície de oxigénio dissolvido e temperatura junto à barragem em ano seco (1992)	85
Figura 63 – Séries temporais à superfície de nutrientes e clorofila-a junto à barragem em ano seco (1992)	86
Figura 64 – Séries temporais à superfície de oxigénio dissolvido e temperatura junto à barragem em ano médio (1994)	87
Figura 65 – Séries temporais à superfície de nutrientes e clorofila-a junto à barragem em ano médio (1994)	88
Figura 66 – Séries temporais à superfície de oxigénio dissolvido e temperatura junto à barragem em ano húmido (1991)	89
Figura 67 – Séries temporais à superfície de nutrientes e clorofila-a junto à barragem em ano húmido (1991)	90
Figura 68 – Perfis de Temperatura, Oxigénio Dissolvido e Matéria Orgânica de verão para as simulações considerando a bombagem (preto) e num cenário apenas com turbinagem (vermelho)	92
Figura 69 – Perfis verticais de biomassa no verão para as simulações considerando a bombagem (preto) e num cenário apenas com turbinagem (vermelho)	93
Figura 70 – Perfis verticais de nutrientes no verão para as simulações considerando a bombagem (preto) e num cenário apenas com turbinagem (vermelho)	94
Figura 71 – Perfis de Temperatura, Oxigénio Dissolvido e Matéria Orgânica no início de dezembro para as simulações considerando a bombagem (preto) e num cenário apenas com turbinagem (vermelho)	95
Figura 72 – Perfis verticais de biomassa no início de dezembro para as simulações considerando a bombagem (preto) e num cenário apenas com turbinagem (vermelho)	96
Figura 73 – Perfis verticais de nutrientes no início de dezembro para as simulações considerando a bombagem (preto) e num cenário apenas com turbinagem (vermelho)	97
Figura 74 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira de Foz-Tua: P-Total. A tracejado encontram-se representados os limites associados ao critério de classificação para o potencial ecológico e para o estado trófico (OCDE)	106
Figura 75 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira de Foz-Tua: NO3. A tracejado encontra-se representado o limite associado ao critério de classificação para o potencial ecológico	107
Figura 76 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira de Foz-Tua: Oxigénio Dissolvido. A tracejado encontra-se representado o limite associado ao critério de classificação para o potencial ecológico	107
Figura 77 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira de Foz-Tua: Clorofila a – Média de Verão. A tracejado encontram-se representados os limites associados ao critério de classificação para o potencial ecológico ainda em vigor e os critérios estabelecidos durante a 2ª fase do Exercício de Intercalibração (ainda não integrados no sistema de classificação nacional)	108
Figura 78 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira de Foz-Tua: Clorofila a – Média Anual. A tracejado encontra-se representado o limite associado ao critério de classificação para o estado trófico (OCDE)	108

# I. Introdução

## I.1. Enquadramento geral

A albufeira de Foz Tua foi considerada, nos termos do Decreto-Lei n.º 107/2009, como uma albufeira de águas públicas, tendo sido classificada, através da Portaria n.º 91/2010, como albufeira de utilização protegida, uma vez que se prevê que possa vir a ser utilizada para o abastecimento público. Neste sentido torna-se obrigatória a elaboração de um Programa de Albufeira de águas públicas para a albufeira de Foz Tua (PEAFT), algo que é também estabelecido na Declaração de Impacte Ambiental, emitida a 11 de maio de 2009, na sequência do processo de Avaliação de Impacte Ambiental desenvolvido para o Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua.

Enquadra-se neste âmbito o presente estudo sobre a qualidade da água da albufeira de Foz Tua, que tem em conta as interações com a albufeira da Régua, promovidas pelo turbinamento e bombagem efetuado pelo aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua (AHFT), para diferentes cenários hidrológicos e de cargas afluentes.

A albufeira de Foz Tua foi objeto de estudos prévios, como por exemplo o Estudo de Impacte Ambiental do Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua (Profico Ambiente, 2008), não existindo, contudo, qualquer estudo de modelação da sua qualidade da água, o mesmo sucedendo com a albufeira da Régua. O presente estudo pretende colmatar estas lacunas através da modelação matemática da qualidade da água nas albufeiras de Foz Tua e da Régua utilizando o modelo CE-QUAL-W2.

O trabalho de modelação da qualidade da água foi antecedido de uma compilação e análise da informação de base disponível e de uma estimativa das cargas de nutrientes e matéria orgânica produzidas nas respetivas bacias de drenagem.

A modelação das albufeiras de Foz Tua e da Régua foi desenvolvida isoladamente para cada albufeira, num cenário sem bombagem, e de forma acoplada, considerando o turbinamento em Foz Tua e a bombagem a partir da Régua. Este último cenário permite mimetizar o sistema após a entrada em exploração do AHFT e avaliar a sua influência na qualidade da água de ambas as albufeiras com recurso a diferentes critérios de avaliação. Adicionalmente foram estudados diferentes cenários de evolução das cargas afluentes à albufeira de Foz Tua em condições próximas das reais.

## I.2. Caracterização do sistema em estudo

### I.2.1. Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua

O sistema em estudo integra o Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua (AHFT) e o Aproveitamento Hidroelétrico da Régua, estando ambos integrados na bacia hidrográfica do rio Douro. Na **Figura 1** apresenta-se a localização das albufeiras de Foz Tua e da Régua.

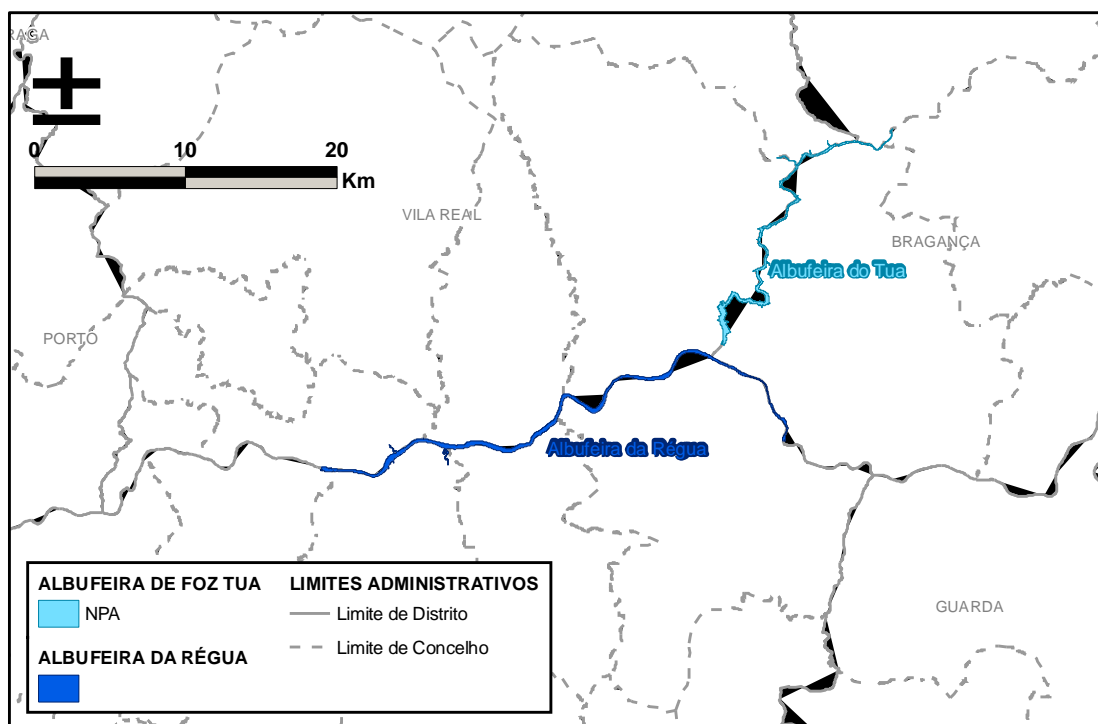


Figura 1 – Localização das albufeiras de Foz Tua e da Régua

O AHFT será implementado no rio Tua, numa localização que domina uma bacia hidrográfica de 3.809km<sup>2</sup>, sensivelmente 99% da totalidade da bacia do rio Tua (ver **Desenho 2**, no Anexo Cartográfico).

A albufeira do AHFT, para o nível de pleno armazenamento (NPA) a 170 m, terá uma extensão aproximada de 27 km, ocupando áreas dos concelhos de Alijó, Mirandela, Murça, Carrazeda de Ansiães, e Vila Flor. Esta albufeira inundará uma área total de 420,9 ha ao NPA com uma capacidade total de 106,1 hm<sup>3</sup>. A albufeira terá, em condições normais, um regime de exploração entre o NPA, à cota 170 m, e o nível mínimo de exploração (NmE), à cota 167 m. O nível mínimo de exploração extraordinário situa-se à cota 162 m. Os caudais turbinados ou descarregados são totalmente restituídos na albufeira da Régua, a jusante. A tomada de água, que funciona também como estrutura de entrega dos caudais para a albufeira quando se inverte o sentido do escoamento durante a bombagem, encontra-se entre a cota 139 e a cota 150 m.

### I.2.2. Aproveitamento Hidroelétrico da Régua

O aproveitamento hidroelétrico de Régua localiza-se no rio Douro, que constitui a principal fonte de aflúências à albufeira criada pela barragem. Além do Douro, destacam-se ainda na margem direita, o rio Tua (12% do total das aflúências) e o rio Pinhão (1% das aflúências) e na margem esquerda o rio Távora (1% das aflúências). A área da bacia hidrográfica é de 90.800 km<sup>2</sup>. A aflúência média anual, à bacia própria do aproveitamento é de 1759 hm<sup>3</sup> (valor médio da série hidrológica 1966/2005). O caudal de máxima cheia, considerado no projeto, é de 21.400 m<sup>3</sup>/s.

O aproveitamento de Régua localiza-se cerca de 4 km a montante da cidade de Peso da Régua próximo da povoação da Bagaúste. A albufeira, criada pela barragem, estende-se por cerca de 43,5 km, inunda uma área de 850 ha, ao NPA de 73,50 m e tem uma capacidade total de 95 hm<sup>3</sup>, dos quais 12 hm<sup>3</sup> podem ser turbináveis em regime de exploração normal, entre o NPA e o NmE à cota 72,00 m. Nestas condições a albufeira apresenta um volume morto de cerca de 83 hm<sup>3</sup>. Os caudais turbinados e os caudais descarregados são restituídos no rio Douro, imediatamente a jusante da barragem.

### I.2.3. Regime de exploração

Os caudais turbinados em Foz Tua serão restituídos na albufeira da Régua e bombados de volta para a albufeira de Foz Tua onde serão introduzidos através da tomada de água mencionada, que se localiza entre as cotas 139 e 150. Na **Figura 2** apresenta-se a planta geral do AHFT onde constam as principais infraestruturas envolvidas na turbinagem e na bombagem de água entre as albufeiras de Foz Tua e da Régua.

O regime de exploração do conjunto das duas albufeiras tem em consideração as cotas normais de funcionamento das albufeiras (Régua: 72-73,5 m; Foz Tua: 167-170 m). A este respeito, é de notar o facto de que o volume útil em Foz Tua (cerca de 10 hm<sup>3</sup>) ser semelhante ao da Régua (cerca de 12 hm<sup>3</sup>). Sendo o caudal turbinado máximo de 310 m<sup>3</sup>/s, aproximadamente 9 horas de turbinagem contínua permitem escoar todo o volume útil da albufeira. Inversamente, sendo o caudal bombeado máximo de 248 m<sup>3</sup>/s, em pouco mais de 11 horas é possível voltar a encher a albufeira de Foz Tua até ao seu NPA.

Os volumes turbinados e bombados e o peso da bombagem no turbinamento são apresentados no **Quadro 1** para ano seco, **Quadro 2** para ano médio e **Quadro 3** para ano húmido. Os valores obtidos mostram que o peso da bombagem sobre o turbinamento é mais importante em anos secos.

O regime de exploração é ainda condicionado pelas afluências naturais a todo o sistema e, no que depende da albufeira da Régua, pelas afluências regularizadas pela cascata de albufeiras a montante.

Estes aspetos, e os próprios da produção hidroelétrica, foram tidos em conta na definição dos cenários de exploração que se traduziram na simulação de séries de caudais horários de turbinagem e bombagem no Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua para um conjunto de 8 anos com características hidrológicas díspares. Foram estes cenários de exploração, definidos e desenvolvidos pela EDP, os considerados na modelação. No **Capítulo 3.4.1.3** apresenta-se a descrição de como os regimes de exploração foram transformados em caudais afluentes aos modelos das albufeiras de Foz Tua e da Régua.

Quadro 1 – Volumes turbinados e bombados – Ano seco

Ano Seco	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Volume Turbinado (hm <sup>3</sup> )	245.9	258.7	318.2	240.9	230.7	205.6	223.7	219.9	164.9	180.7	260.5	303.0	2852.7
Volume Bombado (hm <sup>3</sup> )	182.7	217.9	305.6	157.8	212.6	185.0	220.0	216.9	163.1	174.7	244.8	185.8	2466.9
Peso da bombagem no Turbinamento	0.743	0.842	0.960	0.655	0.921	0.900	0.984	0.986	0.989	0.967	0.940	0.613	0.865

Quadro 2 – Volumes turbinados e bombados – Ano Médio

Ano Médio	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Volume Turbinado (hm <sup>3</sup> )	204.4	193.7	282.4	296.4	444.8	196.0	157.2	196.3	104.9	280.5	293.1	356.0	3005.7
Volume Bombado (hm <sup>3</sup> )	135.7	133.3	194.8	122.6	74.3	126.9	122.0	183.8	101.2	286.5	235.8	110.3	1827.1
Peso da bombagem no Turbinamento	0.664	0.688	0.690	0.414	0.167	0.648	0.776	0.936	0.964	1.021	0.805	0.310	0.608

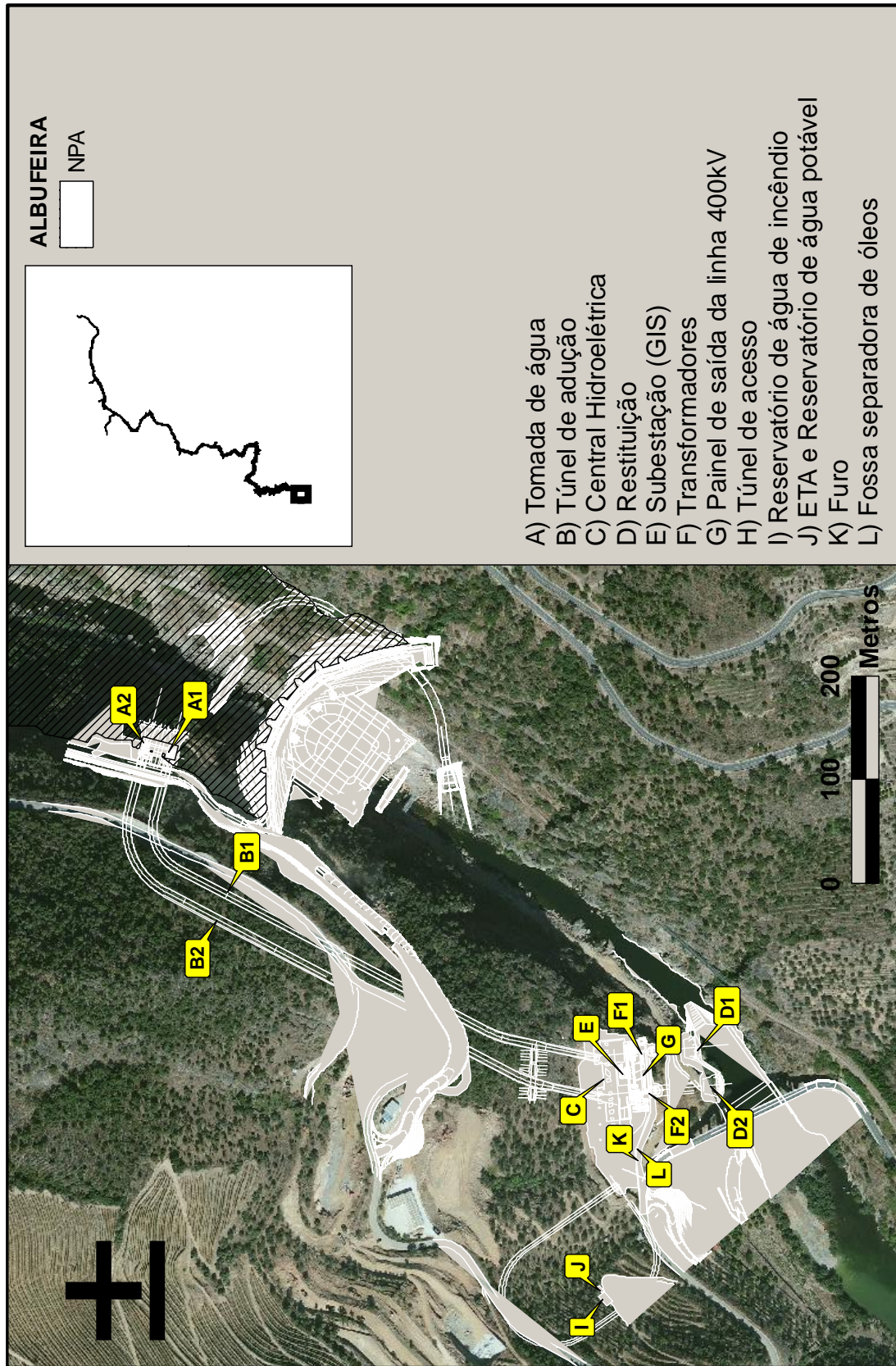


Figura 2 – Planta geral do aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua (adaptada de EDP, 2012)

Quadro 3 – Volumes turbinados e bombados – Ano Húmido

Ano Húmido	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Volume Turbinado (hm3)	335.7	565.5	408.2	131.7	157.7	89.6	138.3	230.9	113.7	232.8	293.7	501.5	3199.4
Volume Bombado (hm3)	110.7	54.7	42.4	20.5	0.0	33.2	130.3	215.2	115.7	242.6	279.7	79.0	1323.9
Peso da bombagem no Turbinamento	0.330	0.097	0.104	0.156	0.000	0.371	0.942	0.932	1.018	1.042	0.952	0.158	0.414

### 1.3. Critérios de avaliação da qualidade da água

#### 1.3.1. Estado trófico

Na atualidade, o suplemento excessivo de nutrientes produzidos pelas diversas atividades antropogénicas e a consequente eutrofização cultural, surge como o principal problema na gestão de albufeiras à escala mundial (UNEP, 1999). O conceito de eutrofização pode ser descrito como o enriquecimento do meio aquático com nutrientes, sobretudo compostos de fósforo e azoto, que promove o crescimento acelerado de algas e formas superiores de plantas, produzindo perturbações indesejáveis para o equilíbrio ecológico e para a qualidade da água (OSPAR, 2001). Estes efeitos podem-se manifestar por elevada turbidez, reduzida transparência da água, alteração do sabor e cheiro, depleção do oxigénio hipolimnético e mortalidade da fauna piscícola.

Nas últimas décadas foram desenvolvidas diversas ferramentas para otimizar a gestão e promover a regressão trófica de lagos, baseadas em relações preditivas entre a concentração de nutrientes, a biomassa fitoplanctónica (clorofila *a*) e a transparência da água (profundidade de Secchi) (USEPA, 2000). Os primeiros modelos empíricos de larga escala foram desenvolvidos para um conjunto de lagos predominantemente localizados em regiões temperadas (Dillon & Rigler, 1975; Vollenweider, 1976). Estes modelos seguiam um princípio comum induzido pela entrada de fósforo nos lagos (Schindler, 1977; OCDE, 1982; Prairie & Marshall, 1995). Todavia, diversos estudos efetuados à escala regional demonstraram que a magnitude das respostas tróficas de lagos e albufeiras é parcialmente controlada por outros fatores, como o azoto, a geologia e alcalinidade, a morfometria, a hidrologia e o clima (Fee, 1979; Smith, 1982; Wetzel, 2001).

A avaliação do estado trófico de uma albufeira corresponde a uma classificação do grau de eutrofização em diferentes classes, ou seja, da sua produtividade (e.g. oligotrófico, mesotrófico, eutrófico). Os critérios utilizados agregam, habitualmente, fatores de promoção da eutrofização (e.g. concentração de nutrientes),



parâmetros de medição da produção primária (clorofila *a*) e parâmetros potencialmente afetados pela eutrofização (transparência e concentração de oxigénio dissolvido).

No presente estudo a determinação do estado trófico foi efetuada através da aplicação dos critérios da OCDE (1982) (**Quadro 4**) e do critério utilizado em Portugal no âmbito da Diretiva Nitratos (Diretiva 91/676/CEE) (**Quadro 5**).

Quadro 4 – Critério de classificação do estado trófico de lagos e albufeiras, segundo a OCDE (1982)

<b>Estado Trófico</b>	<b>Média Anual Clorofila <i>a</i> (mg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Média Anual Profundidade de Secchi (m)</b>	<b>Média Anual Fósforo total (mg P/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Máximo Anual Clorofila <i>a</i> (mg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Mínimo Anual Profundidade de Secchi (m)</b>
Ultraoligotrófico	≤ 1,0	≥ 12,0	≤ 4,0	≤ 2,5	≥ 6,0
Oligotrófico	≤ 2,5	≥ 6,0	≤ 10,0	≤ 8,0	≥ 3,0
Mesotrófico	2,5 – 8	6 – 3	10 – 35	8 – 25	3 – 1,5
Eutrófico	8 – 25	3 – 1,5	35 – 100	25 – 75	1,5 – 0,7
Hipereutrófico	≥ 25	≤ 1,5	≥ 100	≥ 75	≤ 0,7

Quadro 5 – Classificação quanto ao estado trófico de acordo com as concentrações médias de clorofila-*a*<sup>1</sup>  
(APA, 2012)

<b>Classificação INAG</b>	<b>Oligotrófico</b>	<b>Mesotrófico</b>	<b>Eutrófico</b>
Clorofila <i>a</i> (mg/m <sup>3</sup> )	< 2,5	2,5 – 9,5	> 9,5

Nota: Os valores correspondem a médias aritméticas para o período de verão.

De forma complementar, foi aplicado o índice de Carlson (Carlson, 1977) à albufeira da Régua com o objetivo de compreender as relações entre as concentrações de clorofila-*a*, de fósforo total e transparência.

Com base nas médias aritméticas anuais e de verão dos resultados do modelo, foram produzidas as respetivas classificações quanto ao estado trófico.

<sup>1</sup> Poluição Provocada por Nitratos de Origem Agrícola - Diretiva 91/676/CEE, de 12 dezembro – Relatório 2008-2011, DGADR e APA, julho de 2012

### 1.3.2. Potencial ecológico

Para o bom potencial ecológico, procedeu-se à classificação da albufeira de Foz Tua aplicando alguns dos indicadores e critérios definidos no âmbito da implementação da Diretiva-Quadro da Água (DQA) em Portugal para massas de água fortemente modificadas. Os indicadores utilizados foram aqueles para os quais existem dados disponíveis e/ou para os quais os modelos produzem resultados. Os valores limite considerados são os que se indicam no **Quadro 6** e no **Quadro 7**. A albufeira da Régua pertence ao tipo Curso Principal não existindo qualquer critério de classificação.

Quadro 6 – Limiares máximos para os parâmetros físico-químicos gerais para o estabelecimento do Bom potencial ecológico em massas de água fortemente modificadas <sup>2</sup>

Parâmetros	Limite para o Bom Potencial
	Tipo Norte
Taxa de Saturação em Oxigénio (1)	Entre 60% e 120%
Nitratos (2)	≤ 25 mg NO <sub>3</sub> /L
Fósforo Total (2)	≤ 0,05 mg P/L

(1) – 80% das amostras se a frequência for mensal ou superior; (2) – Média Anual

Quadro 7 – Valores de fronteira Bom/Razoável para o tipo de albufeira Norte para o Elemento de Qualidade Biológica Fitoplâncton

Tipo de Albufeira	Componente	Indicador	Limite Razoável/Bom
Norte	Biomassa	Clorofila-a (mg/m <sup>3</sup> )	9.5 (1)

(1) – Valor médio de verão

### 1.3.3. Qualidade Microbiológica

No que se refere à qualidade microbiológica, a classificação foi efetuada de acordo com os critérios especificados no Anexo I do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de agosto, relativo à produção de água para consumo humano e pelo Decreto-Lei n.º 135/2009, de 3 de junho, referente à classificação da qualidade das águas balneares (ver **Quadro 8** e **Quadro 9**).

<sup>2</sup> Critérios para a Classificação do Estado das Massas de Água Superficiais – Rios e Albufeiras. INAG, 2009

Quadro 8 – Classificação da qualidade da água para consumo humano de acordo com o Decreto-Lei n.º 236/98 para parâmetros microbiológicos

		A1		A2		A3	
		VMR	VMA	VMR	VMA	VMR	VMA
Coliformes Totais	/100 mL	50	-	5000	-	50000	-
Coliformes Fecais		20	-	2000	-	20000	-
Estreptococos Fecais		20	-	1000	-	10000	-

Quadro 9 – Classificação da qualidade das águas balneares interiores de acordo com o Decreto-Lei n.º 135/2009 para parâmetros microbiológicos

	Excelente	Boa	Aceitável
Enterococos intestinais em ufc/100ml	(*)200	(*)400	(**)330
<i>Escherichia coli</i> em ufc/100ml	(*)500	(*)1000	(**)900

\* - Com base numa avaliação do percentil 95

\*\* - Com base numa avaliação do percentil 90

Notar que Enterococos intestinais e Streptococos fecais representam o mesmo indicador

## I.4. Aspetos gerais da modelação da albufeira

A modelação matemática de albufeiras tem como objetivo diagnosticar, para possíveis cenários futuros, a qualidade da água, o estado trófico e o potencial ecológico, assim como o impacto de possíveis eventos de contaminação microbiológica.

Os modelos a utilizar em albufeiras devem permitir simular as principais características físicas das mesmas devendo ter em conta a forma, o tamanho, o tempo de residência e variabilidade sazonal do nível da água – ou seja, a variabilidade do volume armazenado – que são fatores físicos com grandes implicações sobre a atividade biológica nas albufeiras. Eles determinam a disponibilidade de luz e a estrutura térmica da coluna de água e podem determinar a disponibilidade de nutrientes na zona fótica.

Um fator determinante para a correta simulação das albufeiras é a previsão da evolução da sua estrutura térmica. No outono, o arrefecimento do ar e a diminuição da radiação solar tendem a fazer baixar a temperatura da superfície da albufeira. Como a superfície da água arrefece, torna-se mais densa e mistura-se com a água das camadas subsuperficiais por ação do vento. Neste período, conhecido como *turnover* da albufeira, a disponibilidade em nutrientes na zona fótica aumenta e eventualmente ocorrem florescências de algas. A continuação deste processo de arrefecimento e mistura acaba por conduzir à existência de uma

coluna de água perfeitamente homogênea, sem gradientes verticais quer de densidade quer de nutrientes, durante o período de inverno.

Com a chegada da primavera, o aumento da temperatura do ar e da radiação disponível produz um aumento da temperatura nas camadas superficiais. O gradiente térmico estabelecido inibe a mistura vertical e origina o aparecimento de duas zonas bem distintas e com características físicas, químicas e biológicas diferentes:

- uma camada superficial quente, oxigenada, com elevada produtividade e com subsequente depleção de nutrientes;
- uma camada profunda rica em nutrientes, fria, pouco iluminada, na qual a fotossíntese é geralmente limitada pela disponibilidade de luz e onde a mineralização de material particulado pode esgotar o oxigênio dissolvido, melhorando os processos de desnitrificação.

A camada superficial tem espessuras que variam entre a dezena de metros e 1 a 2 metros, dependendo da altura do ano e da latitude a que se encontra a albufeira. A separar estas duas regiões existe uma zona de variação rápida das propriedades conhecida por termoclina ou picnoclina. Este processo de aquecimento superficial e criação de estratificação é um processo contínuo que decorre desde o início da primavera até ao início do outono. Frequentemente a produtividade primária cessa na camada superficial por depleção dos nutrientes após a florescência de primavera. A existência do gradiente térmico entre a camada superficial e a zona profunda inibe as trocas de qualquer tipo de propriedade entre as duas regiões.

Um dos modelos mais utilizados para simulação de questões deste tipo é o CE-QUAL-W2 (uma descrição detalhada pode encontrar-se em <http://www.cee.pdx.edu/w2/>). Um modelo deste tipo permite simular os processos numa albufeira e estimar a qualidade da água em qualquer zona desta.

A modelação das albufeiras requer a definição de várias tipos condições de fronteira, sendo a condição mais difícil de estabelecer a respeitante à quantidade e qualidade das afluências. A quantidade de água que afluí a uma albufeira depende da precipitação na bacia hidrográfica e dos mecanismos evapotranspiração, escorrência superficial e de infiltração e que aí ocorrem. No que respeita à qualidade da água, é necessário ter em conta a produção de nutrientes e matéria orgânica na respetiva bacia hidrográfica, agregando a informação das fontes de poluição de origem difusa (tipicamente de origem agrícola) e de origem pontual (descargas origem urbana e industrial).

No presente estudo pretende-se:

- i. implementar e validar o modelo na albufeira da Régua com o objetivo de estabelecer um cenário de referência para esta albufeira que permita avaliar a existência de impactes pela entrada em funcionamento do AHFT;

- ii. implementar um modelo para a albufeira de Foz Tua que permita estabelecer um cenário de referência;
- iii. implementar um modelo acoplado das duas albufeiras em que se avalia simultaneamente o impacto de Foz Tua na Régua e o impacto da bombagem em Foz Tua;
- iv. testar cenários de redução ( $< 30\%$ ) e aumento ( $> 5\%$  e  $> 20\%$ ) das cargas afluentes a Foz Tua e cenários de poluição microbiológica.



## 2. Informação de base

Para o desenvolvimento da modelação matemática foi considerado um conjunto de informação de base, que se identifica no presente capítulo, referente aos seguintes aspetos:

- Bacias hidrográficas do Tua e da Régua/Douro, sendo efetuado o enquadramento das bacias hidrográficas e apresentados os dados utilizados relativos à hidrologia, qualidade da água, batimetria e meteorologia;
- Cargas afluentes à albufeira de Foz Tua, sendo apresentados: a metodologia utilizada para a estimativa de cargas; a estimativa de volumes, cargas de nutrientes/matéria orgânica no Rabaçal e no Tuela; a estimativa de volumes, cargas de nutrientes/matéria orgânica no Tua; os resultados e comparação pelas diferentes metodologias;
- Cargas afluentes à albufeira da Régua;
- Regime de exploração do sistema Foz Tua/Régua.

### 2.1. Bacia hidrográfica do Tua

#### 2.1.1. Enquadramento

A bacia hidrográfica do rio Tua, com 82% da sua área em território nacional, tem como limites, a sul e a oeste, as serras de Vilarelho, Padrela (1.148 m) e Las Peñas Librés (1.000 m), a norte, as serras de El Cañizo (1.400 m) e La Gemoneda (1.855 m), enquanto a leste, a sua fronteira passa pelas cumeadas das serras de Montesinho (933 m), Nogueira e Bornes (1.200-1.318 m).

Orograficamente, a bacia do Tua é essencialmente planáltica, situando-se o ponto mais elevado da bacia à cota (1.860 m), na serra da Gemoneda em Espanha e, a sua foz à cota (70 m), junto ao rio Douro. A altitude média da bacia é de 679 metros, sendo que a maior parte se situa entre as cotas 300 e 1.000 metros.

O Tua aflui à margem direita do rio Douro e resulta da confluência dos rios Tuela e Rabaçal, cerca de 4 km a Norte de Mirandela.

O rio Rabaçal, nasce na Galiza, entra em Portugal no concelho de Vinhais e tem um percurso total de cerca de 83 km até à confluência com o rio Tuela. Nesta secção domina uma bacia hidrográfica de 1.454,4 km<sup>2</sup>. O rio Tuela nasce em Espanha, no Parque Natural de la Sanábria, na Sierra Segundera. Entra em território nacional também no concelho de Vinhais. Tem um percurso de cerca de 25 km em Espanha e, em Portugal, de 80 km, até à confluência com o rio Rabaçal. Nesta secção o rio Tuela domina uma bacia hidrográfica de 1.127,0 km<sup>2</sup>.

O rio Tua corre aproximadamente de Norte para Sul. Desde a confluência dos rios Tuela e Rabaçal até ao Douro, onde desagua no lugar de Foz Tua, o rio Tua percorre 56,5 km. É um curso de água que domina uma bacia hidrográfica de 3.813,5 km<sup>2</sup> (incluindo as bacias do Tuela e Rabaçal), dos quais 3.122,8 km<sup>2</sup> (82%) se situam em território português e os restantes 690,74 km<sup>2</sup> em território espanhol. A **Figura 3** mostra a bacia hidrográfica do Tua em território português.

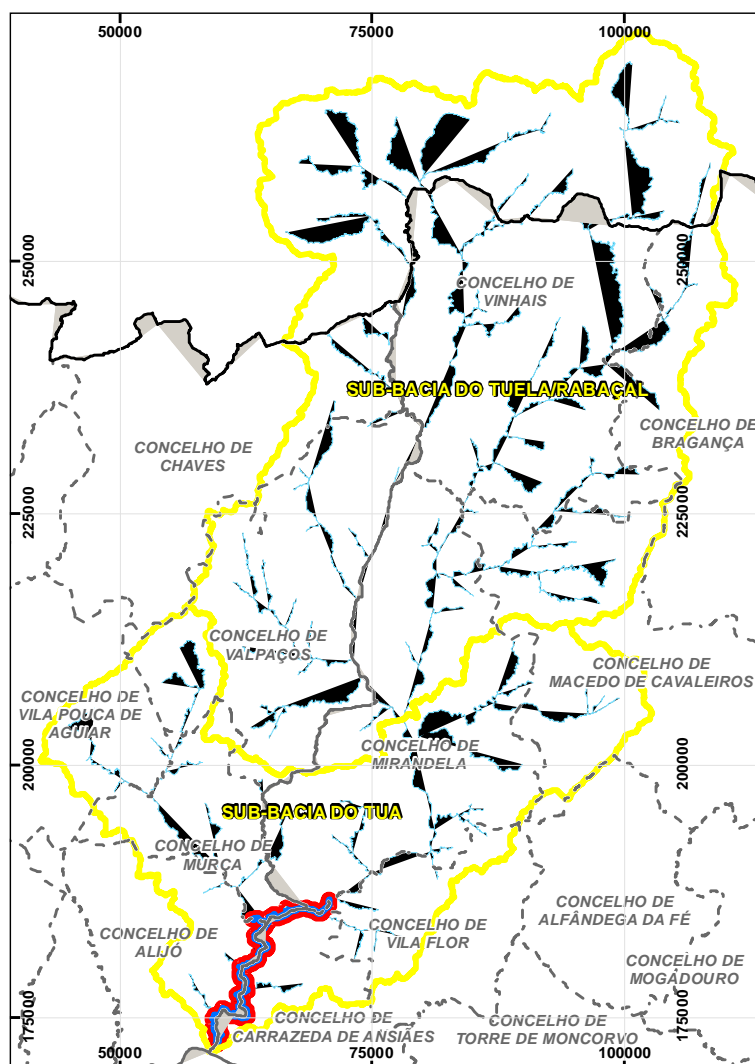


Figura 3 – Bacia hidrográfica do Tua, incluindo a sub-bacia Tuela/Rabaçal



## 2.1.2. Hidrologia

No desenvolvimento da simulação matemática foram consultados os caudais afluentes à albufeira de Foz Tua descritos no EIA do AHFT (Volume I do EIA do AHFT, Profico Ambiente, 2008). Além destes dados, foram ainda consultados e utilizados para a estimativa de cargas dados da rede hidrométrica nacional (disponíveis no SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos). O volume de informação disponível permite uma caracterização hidrológica precisa do ponto de vista dos valores absolutos e da heterogeneidade. Os dados existentes são listados no **Quadro 10**.

Quadro 10 – Lista de estações hidrométricas na bacia do Tua, disponíveis no SNIRH e utilizadas no estudo

Código	Nome	Rio	Área Drenada (Km <sup>2</sup> )	Entrada Funcionamento (Convencional)	Encerramento (Convencional)	Entrada Funcionamento (Automática)	Estado
06M/01H	Castanheiro	Tua	3.766,76	15-11-1958	-	-	Ativa (EDP)
04O/01H	Ponte Pedra	Tuela	702,7	18-06-1980	-	01-09-2003	Ativa
04N/01H	Ponte Vale Telhas	Rabaçal	962,78	04-08-1980	-	17-09-2003	Ativa
03N/01H	Rebordelo	Rabaçal	868,61	01-10-1955	-	-	Ativa (EDP)
03P/01H	Vinhais (Quinta Ranca)	Tuela	478,54	24-08-1955	-	-	Ativa (EDP)

## 2.1.3. Qualidade da água

Os dados consultados e utilizados têm como fontes:

- A rede de monitorização nacional de qualidade da água disponível no SNIRH (ver **Quadro 11**);
- O Programa de Monitorização da Qualidade Ecológica da Água do projeto do AHFT, do período do verão de 2010 ao inverno de 2014;
- O Plano de Bacia Hidrográfica do rio Douro (INAG, 2001);
- O Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Douro RH3 (Agosto 2012).

Os dados do Programa de Monitorização da Qualidade Ecológica da Água do projeto do AHFT, do período do verão de 2010 ao inverno de 2014, tendo em conta a sua menor extensão quando comparada com a dos dados do SNIRH, tiveram como objetivo validar a estimativa de cargas. Aquele programa de monitorização abrange a área de influência do projeto assim como a área de jusante, montante e os afluentes principais com um total de 18 estações de monitorização. Os dados consistem numa série de parâmetros físico-químicos medidos trimestralmente em simultâneo com os caudais (ver **Quadro 13** e **Figura 4**).

Quadro 11 – Lista de estações de qualidade da água na bacia do Tua, disponíveis no SNIRH

Código	Nome	Rio	Área Drenada (km <sup>2</sup> )	Entrada em Funcionamento	Data de Fecho	Estado
05N/04	Alb. Cachão	Tua	2984.4	17-01-1994	19-01-2000	Extinta
05M/02	Sobreira	Tua	3232.4	17-01-1994	-	Ativa
06M/01	Castanheiro	Tua	3818.44	22-05-1990	26-01-2000	Extinta
04N/05	Eixes	Rabaçal	1404.67	25-10-1993	-	Ativa
05N/03	Frechas	Tua	2891.08	17-01-1994	-	Ativa
04O/01	Ponte Pedra	Tuela	702.7	17-01-1994	19-01-2000	Extinta
02O/01	Ponte Santa Rufina (Quiraz)	Rabaçal	174.98	24-07-2001	-	Ativa
04N/01	Ponte Vale Telhas	Rabaçal	962.78	17-01-1994	-	Ativa
05N/02	Quinta Canal	Tua	2573.75	17-01-1994	23-10-1996	Extinta
04N/06	Quinta Maravilha	Tuela	1129.01	25-03-1996	-	Ativa

Quadro 12 – Média e desvio padrão ( $\bar{x} \pm \sigma$ ) dos principais parâmetros de qualidade obtidos nas estações de qualidade da água na bacia do Tua relevantes para este trabalho

Estação	Temperatura (°C)	Oxigénio Dissolvido (mg/L)	Oxigénio Dissolvido (%)	Azoto Amoniacal (mgNH <sub>4</sub> /L)	Nitrato (mgNO <sub>3</sub> /L)	Fósforo Total (mgP/L)	Ortofosfato (mgPO <sub>4</sub> /L)
Castanheiro	15.1 ± 4.6	9.1 ± 1.2	89 ± 12	0.09 ± 0.05	3.62 ± 2.10	0.07 ± 0.01	0.08 ± 0.04
Eixes	13.7 ± 1.8	9.1 ± 0.7	82 ± 10	0.09 ± 0.04	2.59 ± 1.63	0.06 ± 0.06	0.08 ± 0.04
Frechas	14.6 ± 3.1	8.8 ± 0.7	83 ± 6	0.12 ± 0.05	2.76 ± 1.69	0.06 ± 0.03	0.05 ± 0.04
Quinta Canal	17.3 ± 0.9	8.0 ± 0.9	85 ± 9	0.09 ± 0.03	2.11 ± 0.19	-	0.08 ± 0.01
Quinta Maravilha	14.7 ± 1.5	9.1 ± 10.6	85 ± 8	0.07 ± 0.02	2.23 ± 0.56	0.05 ± 0.05	0.08 ± 0.09

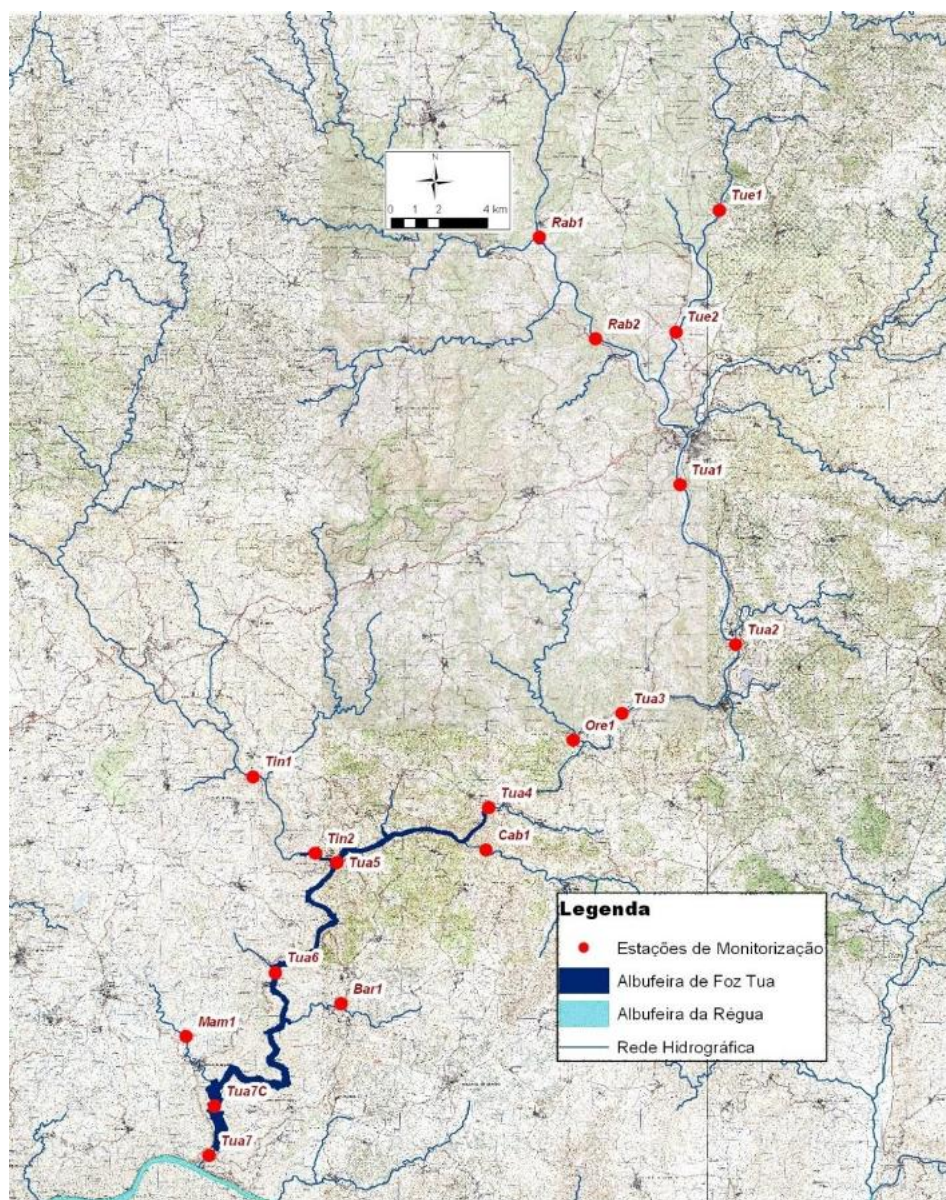


Figura 4 – Localização das 18 estações de monitorização do programa de monitorização do AHFT

Quadro 13 – Lista de pontos de monitorização da bacia do Tua pela EDP

Designação	Código	Curso de Água	Contexto Espacial	Distância Foz (km)	Distância AHFT/NPA (km)
Guribanes	TUE1	Tuela	Montante	9,1	-
Carvalhais	TUE2	Tuela	Montante	3,5	-
Rio Torto	RAB1	Rabaçal	Montante	9,3	-
Eixes	RAB2	Rabaçal	Montante	3,7	-
Barreiro	TUA1	Tua	Montante	51,6	23,1 (NPA)
Frechas	TUA2	Tua	Montante	46,6	21,1 (NPA)
Vilarinho das Azenhas	TUA3	Tua	Montante	36,6	8,1 (NPA)
Abreiro	TUA4	Tua	Limite albufeira	28,5	≈ 0 (NPA)
Brunheda	TUA5	Tua	albufeira	20,6	19,5 (AHFT)
Amieiro	TUA6	Tua	albufeira	12,7	11,6 (AHFT)
Foz Tua	TUA7	Tua	Jusante	0,4	-
Foz Tua Controlo	TUA7C	Tua	albufeira	2,3	1,2 (AHFT)
Pte de Martim	TIN1	Tinhela	Afluente	7,8	5,3 (NPA)
Caldas de Carlão	TIN2	Tinhela	albufeira	1,2	-
Pereiros	CAB1	Cabreira	Afluente	1,1	1,1
Barcel	ORE1	Orelhão	Afluente	0,5	0,5
Paradela	BAR1	Barrabáz	Afluente	3,4	3
S. Mamede de Ribatua	MAM1	S. Mamede de Ribatua	Afluente	3,8	3,2

## 2.1.4. Batimetria

Um levantamento topográfico à escala 1:2.000, facultado pela EDP, foi utilizado para construir a batimetria da albufeira de Foz Tua, necessária para a aplicação do modelo. A batimetria da albufeira foi validada com a curva de volumes acumulados da mesma (apresentada na **Figura 17 – Capítulo 3.2.1**).

## 2.1.5. Meteorologia

No que diz respeito à meteorologia, foram compilados dados de temperatura do ar, vento, temperatura do ponto de orvalho e cobertura nebulosa. Dado que as estações de monitorização do INAG/ARH não contêm estes dois últimos parâmetros, recorreu-se à informação existente da estação meteorológica de Vila Real da

rede meteorológica do Instituto Português do Mar e da Atmosfera, para o período entre 1975 e 2005, de onde se utilizaram dados diários de temperatura média do ar e da humidade relativa às 09 UTC (a partir da qual se determinou a temperatura de ponto de orvalho) e da velocidade média do vento. No caso da nebulosidade optou-se por utilizar as normais climatológicas (1961-1990) da estação meteorológica de Montalegre, com uma discretização mensal.

## **2.2. Bacia hidrográfica da Régua/Douro**

### **2.2.1. Enquadramento**

O rio Douro nasce em Espanha, na Serra de Urbión (Montes Ibéricos), e tem a sua foz na costa atlântica, junto à cidade do Porto. O seu curso, cujo comprimento total é de 850 km, desenvolve-se ao longo de 525 km em território espanhol, após o que define numa extensão de 112 km a fronteira entre Portugal e Espanha, percorrendo em seguida cerca de 213 km em território português. A parte da bacia situada em Portugal abrange cerca de 21.500 km<sup>2</sup>, ou seja, aproximadamente ¼ da superfície do território continental. O perfil longitudinal do rio, desde a sua entrada em território português, apresenta duas zonas com declives próprios bastante distintos. A primeira, correspondendo praticamente a todo o troço fronteiriço designada por Douro Internacional, é caracterizada por um forte declive médio, de 3m/km, e por um perfil transversal constantemente encaixado. A partir da confluência do Huebra, o declive reduz-se para 0,55 m/km, valor que se mantém até à foz, ao longo de todo o troço designado por Douro Nacional, onde se localiza o aproveitamento da Régua.

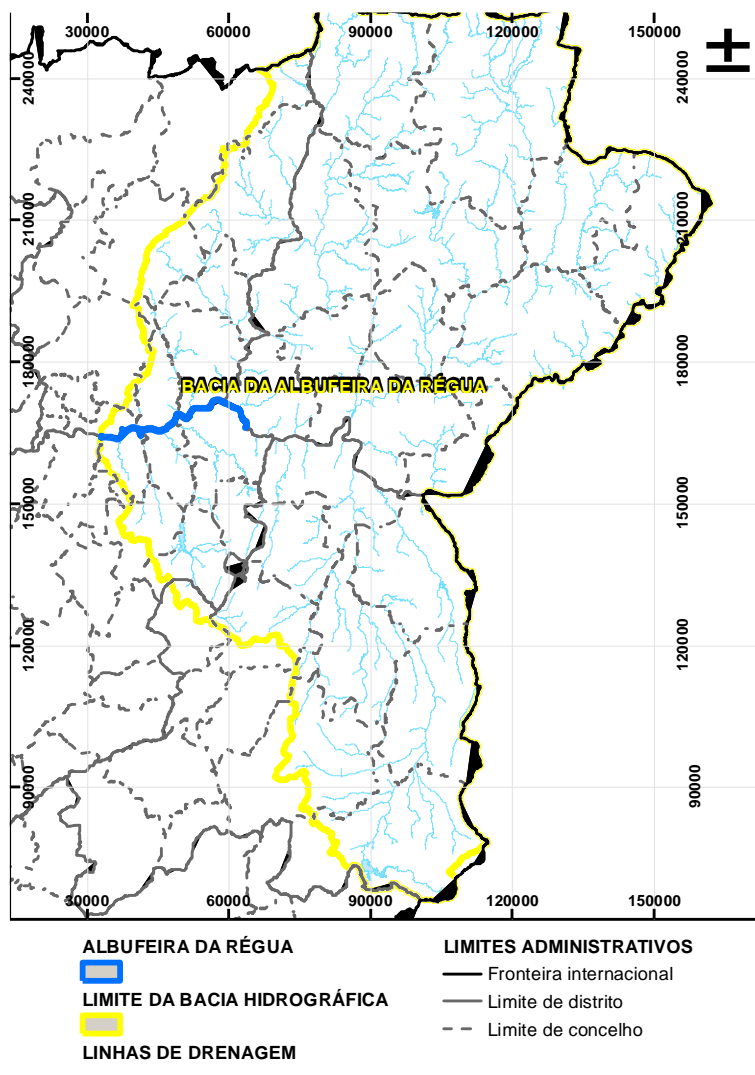


Figura 5 – Bacia hidrográfica da albufeira da Régua, em Portugal

### 2.2.2. Hidrologia

Os caudais afluentes à albufeira da Régua foram deduzidos a partir dos dados disponíveis no SNIRH para a estação da Régua. Os valores representados para os caudais afluentes consideram as contribuições dos rios Douro, Tua, Pinhão e Távora (ver Quadro de estações - **Quadro 14**)

Quadro 14 – Lista de estações hidrométricas na bacia drenante para a albufeira da Régua, disponíveis no SNIRH

Código	Nome	Rio	Área Drenada (Km2)	Entrada Funcionamento (Convencional)	Encerramento (Convencional)	Entrada Funcionamento (Automática)	Estado
06M/01H	Castanheiro	Tua	3.766,76	15-11-1958	-	-	Ativa (EDP)
06M/05H	Castanheiro (INAG)	Tua	3.767,41	-	-	28-08-2006	Ativa
06M/02H	Foz do Tua	Tua	3.819,44	01-10-1934	31-05-1941	-	Extinta
07L/01H	Moinho da Ponte Nova	Távora	439.92	-	-	28-02-2002	Ativa
06L/02H	Vale de Mendiz	Pinhão	246.17	08-10-1981	-	12-09-2003	Ativa
07K/01A	Régua (EDP)	Douro	91.030,5	01-01-1973	-	29-01-1997	Ativa
07K/04H	Régua (INAG)	Douro	91.505,69	-	-	29-01-1997	Ativa

### 2.2.3. Qualidade da água

Para a estimativa de cargas afluentes à albufeira da Régua foram utilizados os dados de qualidade da albufeira da Valeira produzidos pela EDP. Estes dados foram medidos trimestralmente em duas estações de monitorização nos anos de 1996, 1997, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008 e com uma periodicidade de seis vezes por ano em 2009 e 2011. De forma adicional foram consultados e utilizados os dados de qualidade disponíveis no SNIRH para os rios Távora e Pinhão (**Quadro 15**).

Quadro 15 – Lista de estações hidrométricas na bacia drenante para a albufeira da Régua, disponíveis no SNIRH

Código	Nome	Rio	Área Drenada (Km2)	Entrada Funcionamento (Convencional)	Encerramento (Convencional)	Entrada Funcionamento (Automática)	Estado
07L/01	Moinho Ponte Nova	Távora	384,14	29-05-1990	-	-	Ativa
5L/01	Ribeira São Vicente	Pinhão	101,46	21-03-2000	-	-	Ativa

A validação do modelo desenvolvido para a albufeira da Régua foi efetuada com recurso aos dados de monitorização produzidos pela EDP para esta albufeira no período entre 1995 e 2012. Estes dados são obtidos

em duas estações e são, na generalidade, medidos trimestralmente e em ciclos de dois em dois anos. A média e o desvio padrão apresentam-se no **Quadro 16**.

Quadro 16 – Média e desvio padrão ( $\bar{x} \pm \sigma$ ) dos principais parâmetros de qualidade obtidos nas estações hidrométricas na bacia drenante para a albufeira da Régua, disponíveis no SNIRH

Estação	Temperatura (°C)	Oxigénio Dissolvido (mg/L)	Oxigénio Dissolvido (%)	Azoto Amoniacal (mgNH <sub>4</sub> /L)	Nitrato (mgNO <sub>3</sub> /L)	Fósforo Total (mgP/L)	Ortofosfato (mgPO <sub>4</sub> /L)
Moinho Ponte Nova	11.6 ± 3	8.7 ± 1.1	78 ± 7	0.12 ± 0.08	3.1 ± 1.5	0.10 ± 0.04	0.08 ± 0.05
Ribeira São Vicente	12 ± 1	9.7 ± 0.33	90 ± 5	0.06 ± 0.02	3.1 ± 2.6	0.08 ± 0.08	0.12 ± 0.10

#### 2.2.4. Batimetria

A batimetria da Régua foi deduzida a partir da informação disponível nas Cartas Militares de Portugal à escala 1:25.000, por extrapolação dos declives existentes nas margens. Tal como na albufeira de Foz Tua, a batimetria estabelecida foi validada com a curva de volumes acumulados da albufeira da Régua (**Figura 19**).

#### 2.2.5. Meteorologia

Os dados meteorológicos utilizados para as simulações da albufeira da Régua são os mesmos utilizados para Foz Tua de forma que o forçamento atmosférico seja uniforme.

### 2.3. Cargas afluentes à albufeira de Foz Tua

#### 2.3.1. Metodologia de estimativa de cargas

A forma mais direta de estimar as cargas num rio é através da medição simultânea do caudal e das concentrações de nutrientes. No caso hipotético de se ter acesso a uma medição em contínuo a carga é dada por:



$$L = \int_{t_1}^{t_2} Q(t)C(t)dt$$

Em que  $L$  é a carga total no período compreendido entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$ ,  $Q(t)$  é o caudal volúmico e  $C(t)$  a concentração de um poluente qualquer.

Contudo, raramente existem disponíveis medidas em contínuo das grandezas necessárias para a determinação das cargas. Estas existem apenas em certos instantes discretos, obrigando a determinar a carga através da seguinte expressão:

$$L = \sum_{i=1}^N Q_i C_i \Delta t$$

Em que  $N$  é o número de amostragens no período compreendido entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$ , e  $\Delta t = (t_2 - t_1)/N$ , assumindo (por simplicidade) que o período de amostragem permanece constante.

Esta expressão tem utilidade desde que algumas condições se verifiquem:

- Existem medidas simultâneas de caudal e concentrações;
- As medidas são realizadas no mesmo ponto;
- As medidas são representativas da distribuição espacial e temporal dos caudais e das concentrações.

Contudo, é frequente que nenhuma das três condições enumeradas se verifique. Em geral as medições de caudais e concentrações não são simultâneas (1ª condição) nem são feitas no mesmo local (2ª condição). Além disso, a periodicidade das medidas de concentrações é em geral mensal, de onde resulta que estas podem não ser temporalmente representativas (3ª condição). Acresce ainda que, mesmo que as condições enunciadas se verifiquem, os dados podem existir num local que não é relevante para o problema em estudo.

Assim sendo torna-se necessário encontrar estratégias alternativas que permitam a extrapolação da informação existente para os pontos e instantes relevantes. Existem várias metodologias passíveis de serem utilizadas, baseando-se o presente trabalho na intercomparação entre diferentes estimativas.

Importa referir que as cargas pretendidas para o desenvolvimento do modelo são as formas inorgânicas de nutrientes (ortofosfatos -  $PO_4$ , nitratos e nitritos -  $NO_x$  e azoto amoniacal), a matéria orgânica e a poluição microbiológica. O tratamento do cálculo das cargas é feito separadamente para os nutrientes/matéria orgânica e para a poluição microbiológica.

No caso da albufeira de Foz Tua foi adotada uma metodologia de extrapolação para estimar as cargas e volumes na foz dos rios Rabaçal e Tuela e no rio Tua. Dadas as especificidades dos dados existentes, foram utilizadas metodologias diferenciadas, sendo os procedimentos metodológicos descritos nos próximos capítulos. De referir que a carga relevante a calcular é à entrada da Albufeira de Foz-Tua, sendo as estimativas no rio Rabaçal e Tuela efectuadas apenas para robustecer a estimativa pretendida.

### 2.3.2. Estimativa de volumes e cargas de nutrientes/matéria orgânica no Rabaçal e no Tuela

A aplicação da metodologia de extrapolação exige a resolução de duas questões: (i) a determinação do caudal no ponto onde se pretende calcular a carga e (ii) a determinação da concentração de nutrientes e matéria orgânica nesse mesmo ponto.

As bacias do Tuela e do Rabaçal ocupam 1127 km<sup>2</sup> e 1400 km<sup>2</sup>, respetivamente. Existem estações hidrométricas, com dados utilizáveis, em Vinhais (03P/01H) e em Ponte de Pedra (04O/01H), no rio Tuela, que drenam áreas de 478,54 km<sup>2</sup> e 702,9 km<sup>2</sup>, respetivamente. No rio Rabaçal, existem as estações de Rebordelo (03N/01H) e de Ponte de Vale de Telhas (04N/01H), cuja área de drenagem é 868,61 km<sup>2</sup> e 962,78 km<sup>2</sup>, respetivamente. Finalmente, no rio Tua existe a estação de Castanheiro (06M/01H), com uma área drenada de 3767,41 km<sup>2</sup> (as estações referidas estão detalhadas no **Quadro 10**).

Com o objetivo de estimar as contribuições dos rios Rabaçal e Tuela, em cada uma das estações referidas, pode ser calculado o caudal por unidade de área e esses valores podem ser projetados para outro ponto qualquer da respetiva bacia.

Os dois conjuntos de dados do rio Tuela e os dois conjuntos de dados do rio Rabaçal podem ser utilizados para fazer essa projeção. Por outro lado, a soma das contribuições dos rios Rabaçal e Tuela pode ser comparada com a projeção dos dados do rio Tua (em Castanheiro) para o ponto de junção dos dois rios. Fica-se assim com duas estimativas da contribuição individual de cada rio (Tuela e Rabaçal) e com duas estimativas do contributo do conjunto dos dois rios. A validade da aproximação será tanto maior quanto menores forem as diferenças relativas entre cada estimativa. Note-se que as estimativas do Tuela e Rabaçal servem apenas para reforçar a robustez dos resultados obtidos para a globalidade da bacia hidrográfica do Tua.

A concentração de nutrientes e matéria orgânica necessita de uma abordagem diferente. As séries existentes não cobrem o período pretendido e, além disso, de entre os dados disponíveis nem todos obedecem aos critérios de qualidade mínimos (existem por exemplo, inúmeros valores abaixo do limite de deteção). Assim, optou-se por calcular as concentrações médias em ano seco, médio e húmido em estações selecionadas (Quinta da Maravilha na bacia do Tuela e Eixes na bacia do Rabaçal).

A metodologia adotada consistiu em classificar os 20 anos pretendidos para a simulação (1986 a 2005) em anos secos, húmidos ou médios (ver **Quadro 17** e **Quadro 18**). Posteriormente considerou-se que em anos secos a qualidade afluenta em cada mês é o valor médio dos anos secos nesse mês, utilizando o mesmo princípio para anos médios e húmidos.

Quadro 17 – Definição de ano seco, médio e húmido e número de anos em cada categoria no período entre 1986 e 2005, de acordo com o EIA do AHFT (Profico Ambiente, 2008)

	Definição de ano seco, médio e húmido	Número de ocorrências
Ano Seco	<729,6 hm <sup>3</sup>	6
Ano Médio	Entre 729,6 hm <sup>3</sup> e 1957 hm <sup>3</sup>	10
Ano Húmido	>1957 hm <sup>3</sup>	4

Quadro 18 – Listagem de anos secos, médio e húmidos de acordo com o estabelecido no Quadro 17

<b>Anos Secos</b>	1989, 1992, 1993, 1999, 2002 e 2005
<b>Anos Médios</b>	1986, 1987, 1988, 1990, 1991, 1994, 1995, 1997, 2000 e 2004
<b>Anos Húmidos</b>	1996, 1998, 2001 e 2003

Com esta abordagem foram determinadas as cargas de azoto, fósforo e matéria orgânica na foz dos rios Rabaçal e Tuela.

Relativamente às estações de monitorização hidrométricas no Tuela (Vinhais e Ponte de Pedra), a série de Ponte de Pedra tem dados apenas a partir de julho de 1980, enquanto a série de Vinhais é mais completa, com dados entre outubro de 1958 e setembro de 1990. Optou-se por considerar apenas as séries mais longas, sendo assim o escoamento total produzido na bacia do Tuela determinado a partir de dois conjuntos de dados: os de Vinhais e os de Castanheiro, recorrendo às seguintes expressões:

$$V_{mensal} = \frac{V_{mensalVinhais}}{479} 1127$$

$$V_{mensal} = \frac{V_{mensalCastanheiro}}{3767} 1127$$

em que 479 é a área drenada para a estação de Vinhais, 3767 para a estação de Castanheiro e 1127 a área da bacia do Tuela, todas expressas em km<sup>2</sup>.

O mesmo procedimento foi adotado para a bacia do Rabaçal, onde existem duas estações hidrométricas: Rebordelo e Ponte de Vale de Telhas com áreas drenadas de 869 e 963 km<sup>2</sup>, respetivamente, que

representam 62% e 69% dos 1400 km<sup>2</sup> do total da bacia. Neste caso, é a estação de Ponte de Vale de Telhas que tem uma série relativamente curta (entre 1981 e 1990 com algumas falhas), pelo que se considerou apenas a estação de Rebordelo.

A comparação dos volumes produzidos na bacia do Tuela estimados com base nos dados de Vinhais e de Castanheiro mostram algumas diferenças significativas que se acentuam depois na estimativa das cargas. Os caudais estimados com base nos dados de Vinhais são consideravelmente superiores aos que se estimam com base nos dados de Castanheiro. Existem razões para que assim seja, nomeadamente o regime de precipitação não ser uniforme em toda a bacia do Tua. Duma forma geral isso acontece no Norte de Portugal onde a precipitação varia entre os 400-500 mm, nos vales encaixados de Mirandela ou Vilariça, e os 1500 mm, nas zonas montanhosas do Marão, Montalegre ou Montesinho.

A área em estudo, em grande parte, tem altitude inferior a 400-500 m e precipitação entre os 600 e 800 mm ou inferior a 600 mm. A restante porção da bacia tem altitude entre 400-500 m ou 600-700 m e precipitação entre os 600 e 1200 mm. Em particular, o baixo Tua tem precipitação a variar entre 600 e 800 mm e o alto Tuela e o alto Rabaçal entre 1000 e 1200 mm.

Por outro lado, as taxas de infiltração também diferem entre as zonas de cabeceira e as regiões mais a jusante. Assim a determinação dos volumes na foz do Tuela e do Rabaçal por projecção dos valores medidos em Vinhais e Rebordelo, pode conduzir a uma sobrestimação em termos de caudal que se reflete também em termos de carga. Já a projecção baseada nos dados de Castanheiro pode levar a subestimar os volumes e consequentemente as cargas. Optou-se assim por estimar os volumes na Foz do Tuela e do Rabaçal considerando o valor médio das duas estimativas acima descritas:

$$V_{Tuela}^* = 0.5(V_{Castanheiro}^* + V_{Vinhais}^*)$$

$$V_{Rabaçal}^* = 0.5(V_{Castanheiro}^* + V_{Rebordelo}^*)$$

onde os \* se referem a volumes projetado (volumes calculados num ponto e projectados para outro tendo em conta a relação entre as áreas de bacia drenada)

As concentrações foram determinadas da forma anteriormente descrita utilizando os dados das estações de Quinta da Maravilha (Tuela) e Eixes (Rabaçal) – duas estações ainda activas e que por isso reflectem melhor as condições actuais ao contrário do que acontece com a estação de qualidade de Castanheiro que apenas tem dados de qualidade até ao ano 2000

### 2.3.3. Estimativa de volumes e cargas de nutrientes/matéria orgânica no Tua

Para o rio Tua a metodologia utilizada é mais simples do que para o Rabaçal e Tuela, uma vez que a estação hidrométrica do Castanheiro tem dados disponíveis para o período pretendido e existe uma estação de qualidade geograficamente coincidente. Assim, o cálculo da carga foi feito através da multiplicação do caudal afluente mensal pela concentração média do respetivo mês.

O procedimento adotado consistiu em utilizar os caudais mensais medidos em Castanheiro entre outubro de 1985 e setembro de 2005. Como as séries de qualidade não têm igual extensão, procedeu-se à classificação de cada ano hidrológico – seco, médio ou húmido – e de seguida calculou-se para cada mês a concentração de azoto amoniacal, nitrato, ortofosfato e CBO5, em cada ano tipo. No final obteve-se a concentração típica em cada mês para ano seco, médio e húmido. Finalmente a carga anual foi determinada pelo somatório das cargas mensais no período descrito (anos hidrológicos de 1986 a 2005). O resultado obtido representa a carga total de azoto inorgânico dissolvido, de fósforo inorgânico dissolvido e de CBO5. O facto de se calcularem as formas inorgânicas não representa um problema pois elas podem facilmente ser convertidas em azoto e fósforo total. Um dos pontos fracos da determinação das cargas totais no Tua é o facto de a estação de qualidade de Castanheiro só possuir dados até 2000 (abaixo comparam-se estes dados com dados mais recentes para comprovar a sua representatividade). Note-se que a utilização da estação de qualidade de Castanheiro como fonte de dados de qualidade justifica-se pelo facto de ela ser representativa de toda a bacia hidrográfica.

#### 2.3.4. Estimativa de cargas com os dados do SNIRH

A metodologia descrita para a extrapolação de dados foi aplicada nas bacias do Tuela, Rabaçal e Tua (após a confluência do Rabaçal com o Tuela). Os valores anuais determinados para a totalidade da bacia apresentam-se na **Figura 6**. Os valores médios calculados a partir destes dados resultam num escoamento médio de **1257** hm<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> e cargas de **1757,5** ton CBO5 ano<sup>-1</sup>, **1107** ton N ano<sup>-1</sup> e **59.2** ton P ano<sup>-1</sup>, de CBO5, Azoto Inorgânico e Fósforo Inorgânico, respetivamente.

Na **Figura 7** e na **Figura 8** mostram-se os volumes e cargas anuais estimados para a foz dos rios Tuela e do Rabaçal, respetivamente, e no **Quadro 19** apresentam-se os valores médios anuais obtidos.

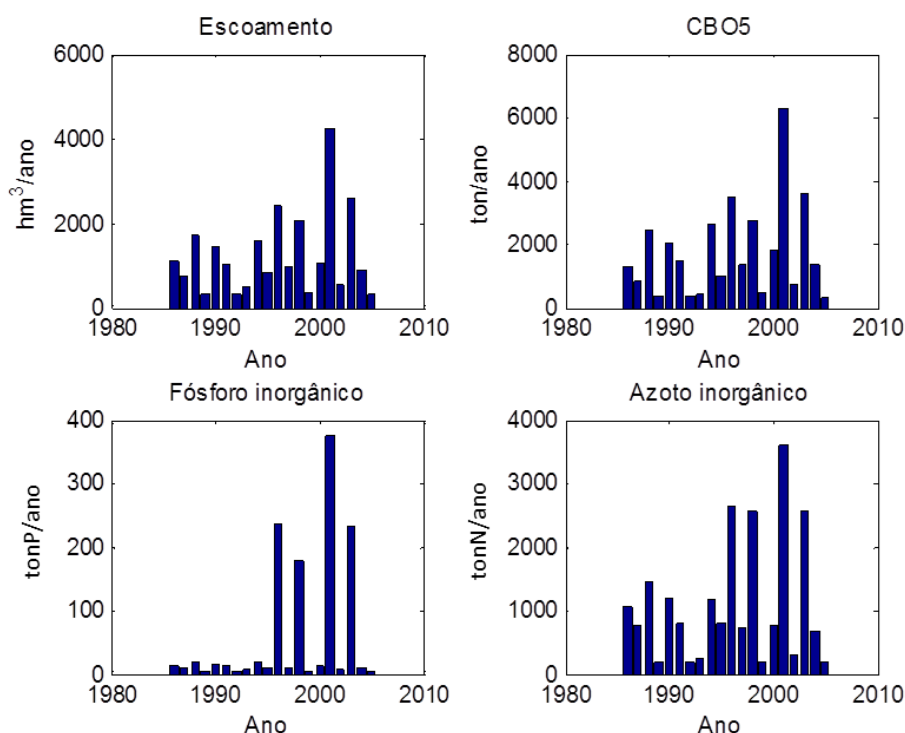


Figura 6 – Escoamento anual e cargas de CBO5, azoto inorgânico e fósforo inorgânico em Castanheiro

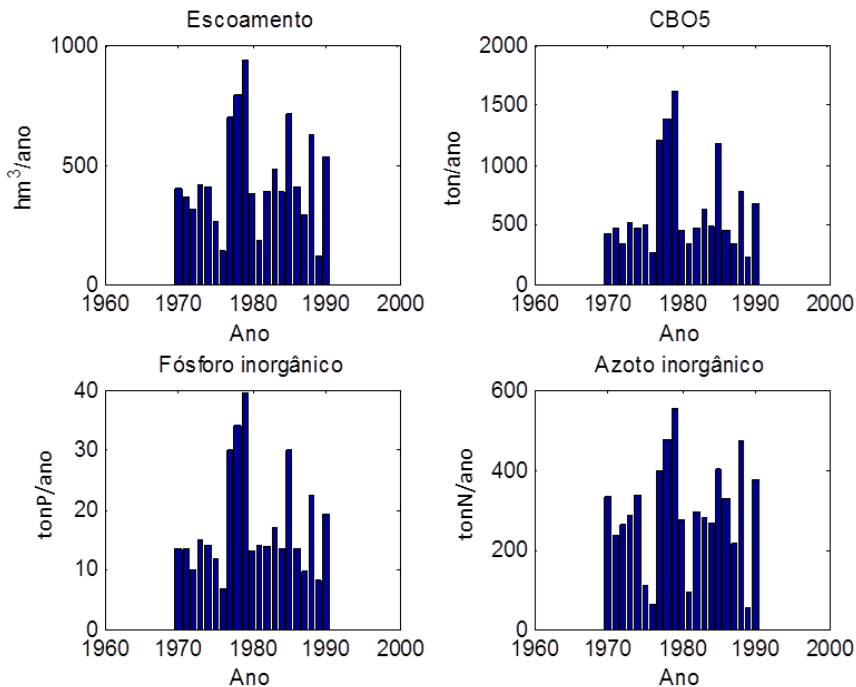


Figura 7 – Escoamento anual e cargas de CBO5, azoto inorgânico e fósforo inorgânico na foz do Tuela

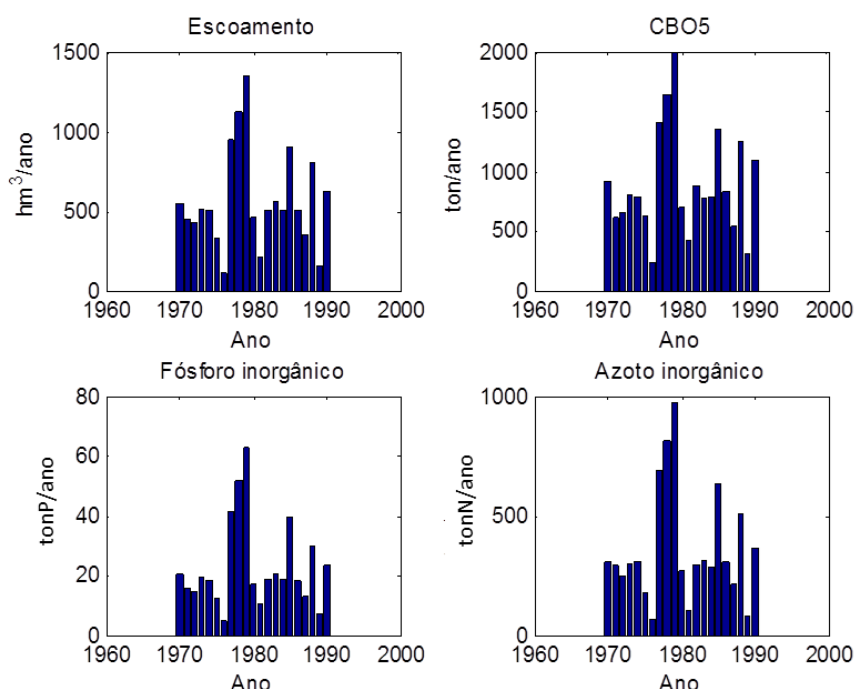


Figura 8 – Escoamento anual e cargas de CBO5, azoto inorgânico e fósforo inorgânico na foz do Rabaçal

Quadro 19 – Resumo da estimativa de escoamento e cargas obtidas nas bacias dos rios Tuela, Rabaçal e Tua com base nos dados do SNIRH

	<b>Caudal (hm³/ano)</b>	<b>CBO5 (ton/ano)</b>	<b>Fósforo inorgânico (tonP/ano)</b>	<b>Azoto inorgânico (tonN/ano)</b>
Tuela	441	630	17,3	290,8
Rabaçal	568,3	889,7	22,9	361,2
Tua (toda a bacia)	1257,2	1757,5	59,2	1107

O Plano de Bacia Hidrográfica do Douro (INAG, 2001) indica um valor de 83 ton ano<sup>-1</sup> de fósforo total produzidos em toda a bacia do Tua, um valor aproximado das 59,2 ton.ano<sup>-1</sup> de fósforo inorgânico estimadas com base nos dados do SNIRH.

Uma outra forma de validar a estimativa consiste em utilizar as medições de fósforo total em vez do fósforo inorgânico. Apesar da quantidade de dados de fósforo total não permitir uma estimativa robusta, optou-se pela sua utilização de modo obter uma ordem de grandeza da carga. Com base nos dados de Castanheiro compilados no presente estudo, estimou-se um valor de fósforo total entre as 90 e as 110 ton ano<sup>-1</sup>. Este valor, que representaria toda a carga produzida na bacia do Tua, é semelhante ao referenciado no Plano de Bacia Hidrográfica do Douro (INAG, 2001).

De forma semelhante, os dados da estação de Eixes permitem determinar um valor entre as 25 e as 35 ton ano<sup>-1</sup> representativas da carga produzida na bacia do Rabaçal e os dados da estação de Quinta da Maravilha permitem, de igual modo, estimar uma produção na bacia do Tuela entre as 27 e as 37 ton ano<sup>-1</sup>. Significa isto que as estimativas feitas a partir dos dados são consistentes entre si.

### 2.3.5. Estimativa de cargas com os dados do programa de monitorização do AHFT

Finalmente analisaram-se os dados do programa de monitorização do AHFT que incluem medidas simultâneas de parâmetros químicos (nutrientes) e de caudal, sendo a estimativa de carga direta. Embora os dados sejam trimestrais, ou seja, sem a necessária frequência para obter uma estimativa robusta, permitem obter uma ordem de grandeza das cargas de Fósforo Total, Azoto Total e Matéria Orgânica. Os resultados apresentam-se no **Quadro 20** e revelam mais uma vez concordância (em termos de ordem de grandeza) com as estimativas obtidas com base nos dados do SNIRH recorrendo ao método de extrapolação.

Os dados recolhidos no programa de monitorização do AHFT são trimestrais e cobrem 4 anos (2010-2011, 2011-2012, 2012-2013 e 2013-2014). O ano hidrológico de 2013-2014 não é completo mas inclui o período de maior afluência.

Quadro 20 – Cargas calculadas com base nos dados medidos pela EDP na bacia de Foz Tua

	<b>CBO5 (ton/ano)</b>	<b>Fósforo (ton P/ano)</b>	<b>Azoto (ton N/ano)</b>
Tuela	300 a 713	2 a 8	24 a 163
Rabaçal	89 a 657	2 a 11	24 a 301
Tua	698 a 1668	33 a 47	256 a 765

Numa perspetiva espacial, os resultados das campanhas de monitorização permitem constatar que os principais afluentes do rio Tua (Rabaçal, Tuela e Tinhela) apresentam uma boa qualidade da água. As características físico-químicas da água ao longo do rio Tua revelaram-se relativamente homogéneas e dentro dos critérios de qualidade estabelecidos. Apenas de referir que **TUA1**, localizada a jusante de Mirandela, foi a estação que apresentou maiores indícios de degradação da qualidade da água, muitas vezes com qualidade inferior aos critérios de qualidade estabelecidos para o Bom Estado (e.g. fósforo total). A ribeira de Orelhão (**ORE1**) apresentou genericamente uma boa qualidade da água, sem indícios de problemas de poluição. Em relação aos três afluentes de menor dimensão localizados no sector de jusante da bacia do rio Tua (Barrabáz, Cabreira e São Mamede de Ribatua), é de destacar que todos apresentaram problemas de qualidade da água, particularmente associados a elevadas concentrações de fósforo total e fosfatos. A Ribeira de São Mamede de



Ribatua (**MAM1**) apresenta constantemente problemas de qualidade da água, sobretudo associados às elevadas concentrações de nutrientes.

As figuras seguintes mostram as medições feitas pela EDP em 5 estações (TUA7, TUA5, Tin2, TUE2 e RAB2) entre 2010 e 2014 (caudais e concentrações). As estações correspondem a amostragens realizadas na foz (ou próximo da foz) dos rios Tuela, Rabaçal, Tinhela e Tua, com exceção da estação TUA5, que corresponde a um ponto localizado na cabeceira da futura barragem. Os caudais medidos mostram que 2010-2011 corresponde a um ano típico, 2011-2012 a um ano seco e 2012-2013 e 2013-2014 correspondem a anos com forte precipitação concentrada nos meses de Inverno. O ano de 2013-2014 não está obviamente completo, mas é igualmente analisado, visto que grande parte das afluências de nutrientes se concentram no período de Inverno. As concentrações de azoto total e matéria orgânica revelam um padrão de variabilidade sazonal com valores mais elevados de Inverno do que de Verão, de forma que as cargas anuais correspondentes serão apenas função do volume anual. Já no que diz respeito ao fósforo total, as concentrações mais elevadas são registadas no Verão/Outono estando possivelmente relacionadas com períodos de maior mobilização de fósforo a partir dos sedimentos. Os valores são particularmente elevados nos anos secos permitindo suspeitar da ocorrência de condições de anoxia junto ao fundo do rio.

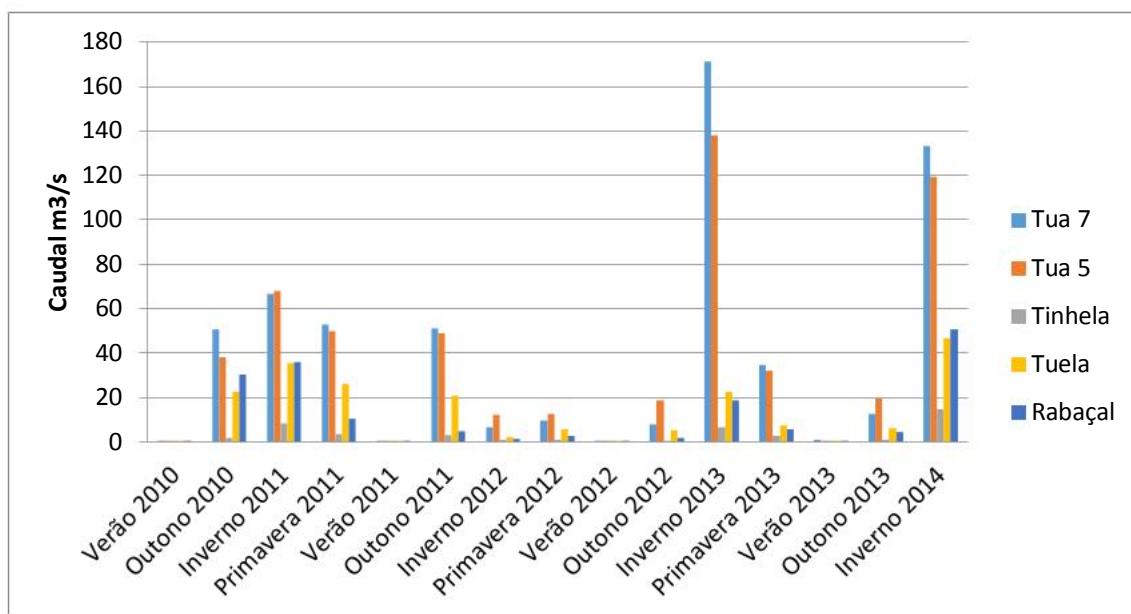


Figura 9 – Caudais Medidos pela EDP entre 2010 e 2014 nas estações TIN2, RAB2,TUE2, TUA5 e TUA 7

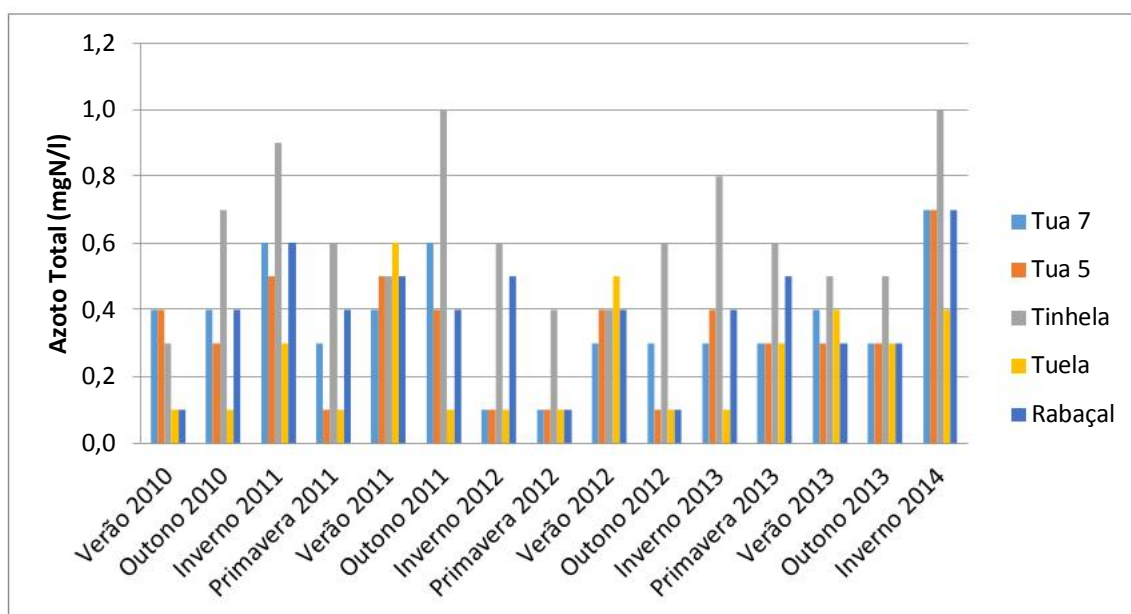


Figura 10 – Concentração de Azoto Total entre 2010 e 2014 medidas nas estações de TIN2, RAB2, TUE2, TUA5 e TUA7

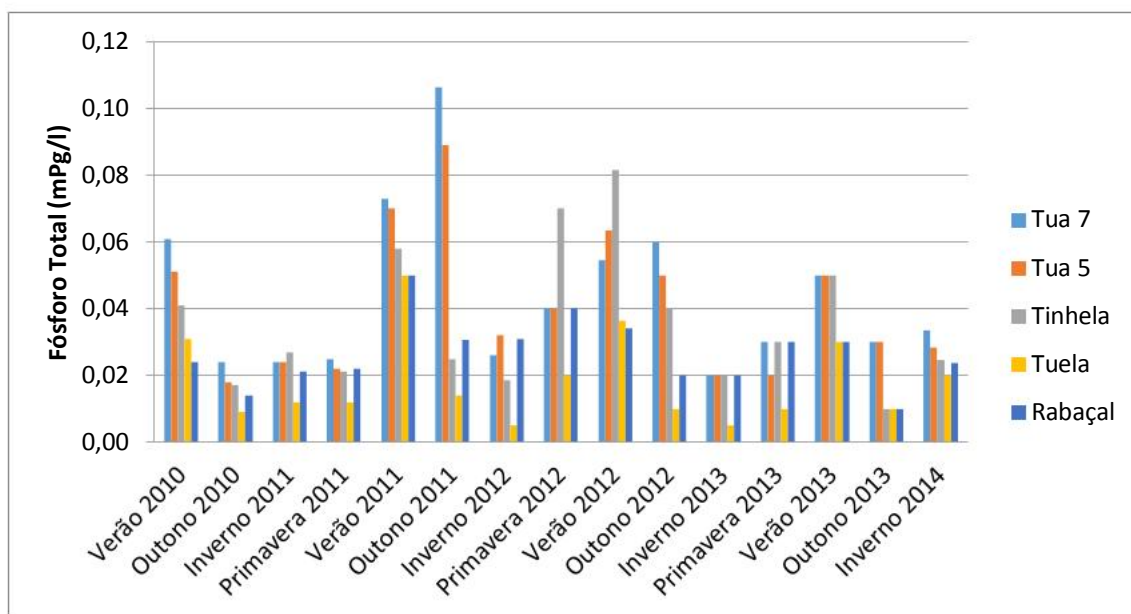


Figura 11 – Concentração de Fósforo Total entre 2010 e 2014 medidas nas estações de TIN2, RAB2, TUE2, TUA5 e TUA7

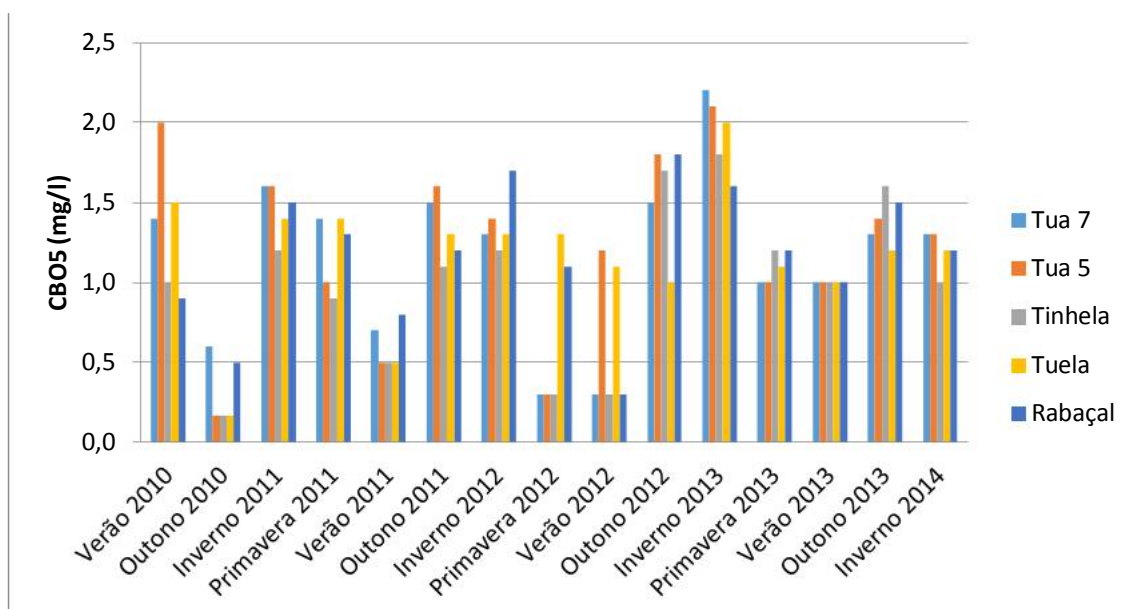


Figura 12 – Concentração de CBO5 entre 2010 e 2014 medidas nas estações de TIN2, RAB2, TUE2, TUA5 e TUA7

### 2.3.6. Intercomparação das estimativas de cargas

Com base nas amostragens efectuadas entre 2010 e 2014 é possível determinar as cargas presentes nas massas de água. Esta amostra por si só não permite avaliar tendências de evolução da bacia hidrográfica. Em todo o caso, permite mostrar que relativamente aos dados utilizados da estação de Castanheiro (estação SNIRH 06M/01 com dados até 2000) não existe uma evolução significativa. Em particular é possível concluir que não houve um aumento significativo das cargas na bacia de Foz-Tua.

Embora sejam cargas determinadas de 3 em 3 meses, durante 4 anos, permitem pelo menos ter uma ideia da ordem de grandeza. Os resultados, detalhados ano a ano, mostram-se na **Figura 13**. Em particular, as cargas determinadas em TUA7 são comparáveis com as determinadas na estação de Castanheiro (estação SNIRH 06M/01). Dessa comparação pode concluir-se acerca da representatividade destas no presente. Os resultados obtidos, nomeadamente para o fósforo total (valores entre 33 e 47 ton P/ano) permitem concluir que não existe razão para suspeitar que a qualidade da água no Rio Tua se tenha degradado desde então, podendo assim assumir-se como válidas as cargas estimadas com base nos dados do SNIRH apresentados nas secções anteriores.

Verificou-se ainda a tendência de evolução das concentrações de fósforo próximo da Foz do rio Tua, comparando os dados da estação de Castanheiro (entre 1994 e 1999) com os dados actuais resultantes da amostragem da EDP. Os valores médios anuais das concentrações no presente (entre 2010 e 2014) são em geral bastante inferiores como se pode observar na **Figura 14**.

Tal como se referiu acima, o padrão geral de qualidade físico-química, que resulta da análise da monitorização entre 2010 e 2014, revela uma boa qualidade da água nos afluentes principais (Tuela, Rabaçal e Tinhela) e na generalidade no rio Tua, e qualidade inferior a bom em alguns dos pequenos tributários localizados no sector de jusante da área de estudo.

Assinala-se a consistência desta análise com o obtido no PGRH (ARH Norte, 2012) em que as massas de água Tuela e Tua foram classificadas como boas no que diz respeito ao estado químico (incluindo a concentração de azoto e fósforo) (ver **Quadro 21**).

Após esta análise considera-se que as cargas estimadas pelo método de extrapolação (**Quadro 19**) são válidas e passíveis de ser utilizadas como condição de fronteira para a simulação da albufeira de Foz Tua.

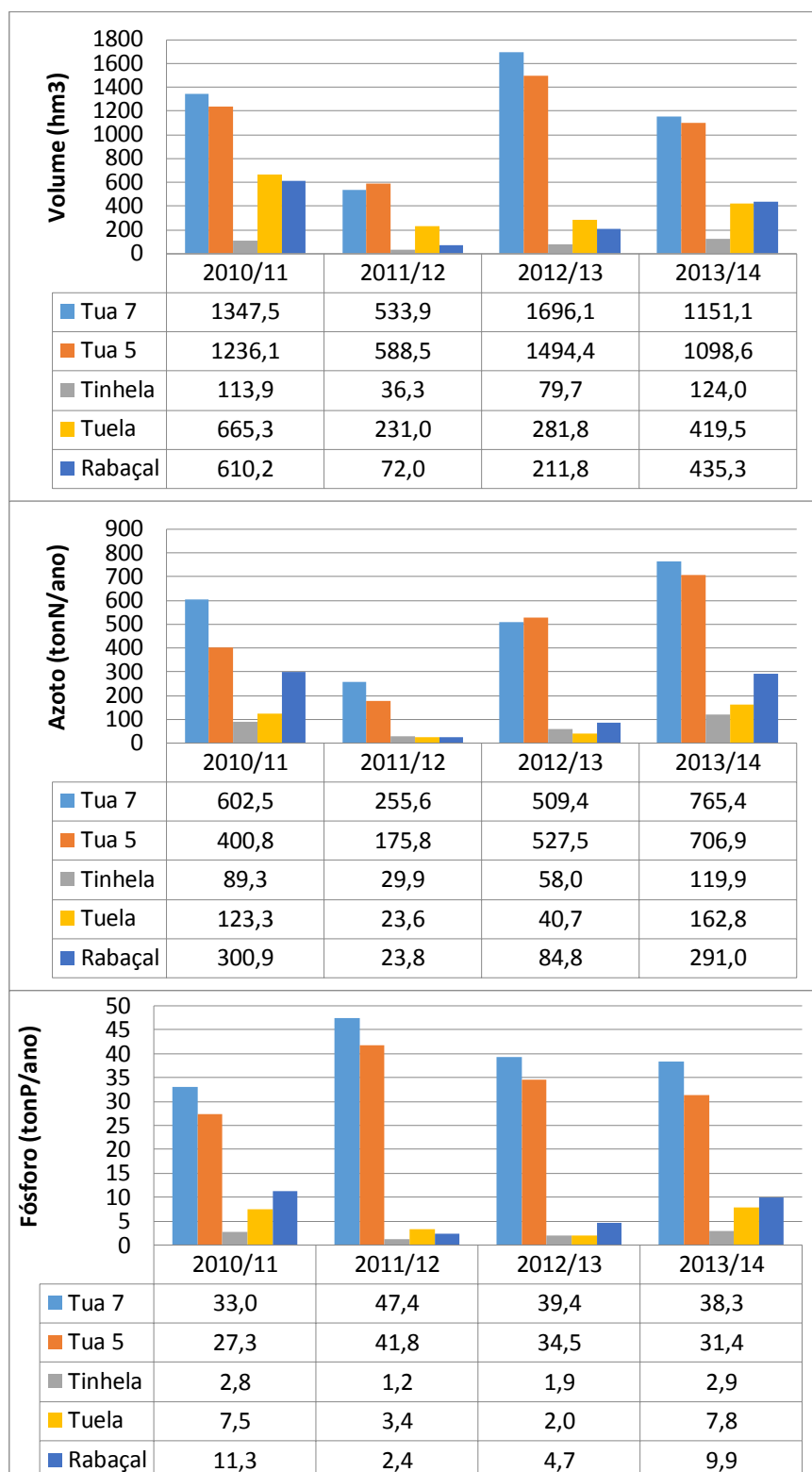


Figura 13 – Volumes e cargas presentes na massa de água nos anos hidrológicos de 2010-11 e subsequentes nas estações TIN2 (Tinhela), RAB2 (Rabaçal), TUE2 (Tuela), TUA5 e TUA 7

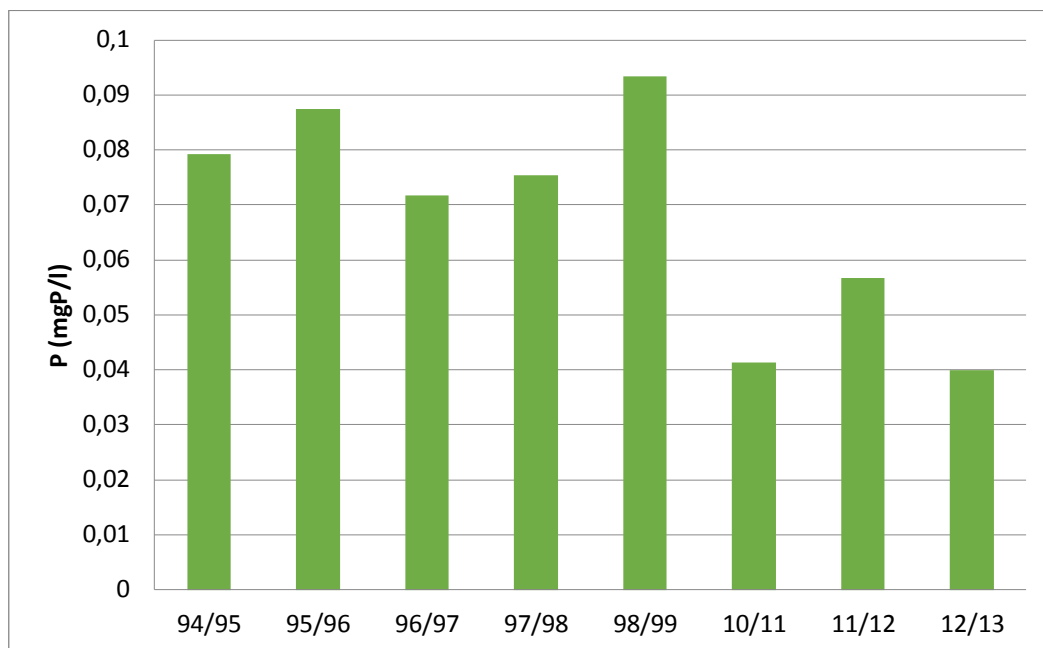


Figura 14 – Concentrações médias de Fósforo Total na Foz do Tua (1994 a 1999 estação de Castanheiro, 2010 a 2013 programa de monitorização do AHFT)

Quadro 21 – Classificação do Estado Final para as massas de água “rio” monitorizadas (fonte: PGRH – ARH Norte, 2012)

	Estado Ecológico	Estado Químico
Tuela	Razoável (IPTIN*)	Bom
Rabaçal	Bom	ND
Tua	Mediocre (IPTIN*)	Bom

\* - Índice Português de Invertebrados do Norte (IPTIN)

## 2.4. Cargas afluentes à albufeira da Régua

As cargas afluentes à albufeira da Régua foram obtidas utilizando os caudais afluentes disponíveis no SNIRH (dados mensais entre 1990 e 2010) e os dados de qualidade medidos na albufeira da Valeira, que se encontra imediatamente a montante na Cascata de albufeiras do Douro. Estes dados foram medidos trimestralmente nos anos de 1996, 1997, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2009 e 2011. Neste caso, a dificuldade na obtenção das cargas reside na necessidade de obter uma série mensal de concentrações de fósforo, azoto e matéria orgânica. Por esse motivo, a metodologia utilizada consistiu em obter valores médios para o inverno,

primavera, verão e outono, em ano seco, médio e húmido, respetivamente, e assumir que os valores obtidos são representativos de todos os meses correspondentes a cada estação do ano.

Além disso, utilizaram-se também os dados de qualidade disponíveis para os rios Távora e Pinhão, bem como os respetivos caudais, adotando-se um procedimento semelhante ao descrito para a estimativa de cargas afluentes no rio Douro. Consideraram-se ainda as cargas geradas no Tua cuja estimativa foi descrita no subcapítulo anterior. As cargas médias calculadas encontram-se no **Quadro 22**.

Quadro 22 – Caudais e cargas médias anuais afluentes à albufeira da Régua

	<b>Caudal anual (hm<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>Carga anual de Azoto (tonNano<sup>-1</sup>)</b>	<b>Carga anual de fósforo (tonPano<sup>-1</sup>)</b>
Rio Douro	9596	23990	864
Rio Tua	1257	1007**	84*
Rio Távora	120	180	10
Rio Pinhão	97	155	12
<b>Total</b>	<b>11220</b>	<b>25432</b>	<b>970</b>

\* As 84 ton P/ano são estimadas a partir da fração inorgânica cujo valor é 59.2 ton P/ano

\*\* Corresponde apenas à fração inorgânica de azoto.

## 2.5. Regime de exploração

O regime de exploração do sistema Foz Tua/Régua foi estimado a partir de simulações realizadas pela EDP. Os resultados foram fornecidos na forma de caudais turbinados e bombados horários para 8 anos tipo que cobrem uma gama abrangente no que diz respeito ao escoamento. A forma como estas estimativas foram utilizadas para montar um cenário de simulação com turbinagem e bombagem é descrita adiante quando se apresentam as condições de simulação.

## 2.6. Conclusões

Após uma compilação relativamente exaustiva de dados respeitantes à bacia do Tua e à bacia drenante para a albufeira da Régua, foi desenvolvida uma metodologia de cálculo das cargas afluentes às duas albufeiras em estudo. Os resultados obtidos permitem estabelecer condições de fronteira a montante para cada uma das albufeiras em estudo (Foz Tua e Régua).

A estimativa aqui realizada com base em dados do SNIRH, e que se utilizou posteriormente na simulação das albufeiras, revelou-se concordante nomeadamente com estimativas obtidas a partir de dados recentes de monitorização do AHFT obtidos pela EDP. Considera-se assim que a estimativa apresentada é robusta e sustentável com base nos dados disponíveis.



### 3. Modelação numérica das albufeiras de Foz Tua e da Régua

A modelação da qualidade da água exige que, em primeiro lugar, seja estabelecido um cenário de referência, devidamente validado, que constituirá a base para o desenvolvimento de todos os estudos subsequentes. Neste capítulo, apresentam-se os fatores que foram considerados para a construção do modelo, de modo a estabelecer e validar o cenário de referência do modelo, que no caso do presente trabalho é constituído pelas albufeiras de Foz Tua e da Régua. Neste contexto, apresentam-se nos subcapítulos seguintes:

- A descrição do modelo utilizado, com indicação das questões mais relevantes para o trabalho de modelação;
- A identificação da batimetria e da malha computacional consideradas para a albufeira de Foz Tua, para a albufeira da Régua e para o modelo acoplado das duas albufeiras;
- A identificação das condições iniciais de desenvolvimento do modelo;
- A definição das condições de fronteira do modelo, nomeadamente caudais afluentes, cargas de nutrientes e matéria orgânica (albufeira de Foz Tua, albufeira da Régua e modelo acoplado das duas albufeiras), e forçamento atmosférico;
- A definição e validação do cenário de referência para a albufeira da Régua;
- A definição e validação do cenário de referência para a albufeira de Foz Tua.

#### 3.1. Descrição do modelo

O modelo CE-QUAL-W2, na sua versão 3.12, permite simular um grande número de parâmetros de qualidade da água, entre os quais vários grupos distintos de algas (diatomáceas, clorófitas, cianobactérias, etc.). O CE-QUAL-W2 é um modelo hidrodinâmico e de qualidade da água atualmente suportado pelo US Army Corp's of Engineer's, na Waterways Experiments Station (WES).

Este modelo simula processos biológicos e químicos que ocorrem nos sistemas aquáticos, como a eutrofização e as relações entre temperatura, nutrientes, algas, oxigénio dissolvido, matéria orgânica e sedimentos. Contudo, o CE-QUAL-W2 tem algumas insuficiências na simulação da interação dos sedimentos com a coluna de água, nomeadamente nas trocas de fósforo em períodos de anoxia. Para colmatar essa lacuna foram implementadas ligeiras modificações ao modelo (ver **Capítulo 3.1.1**).

O CE-QUAL-W2 é baseado na resolução das equações bidimensionais do movimento e de advecção-difusão integradas lateralmente, e simula variações de temperatura, carência bioquímica de oxigénio, oxigénio dissolvido, algas, bactérias e outras variáveis, tendo em conta os ciclos do azoto, fósforo, carbono e sílica.

Um modelo deste tipo é capaz de resolver os processos principais que ocorrem numa albufeira associados à estratificação e que influenciam definitivamente os ciclos biogeoquímicos e a dinâmica do ecossistema. De salientar que o modelo utiliza um algoritmo de braços que permite a descrição de geometrias complexas e, se necessário, uma maior definição de zonas específicas, através do uso de uma malha de espaçamento variável.

Ao utilizar um algoritmo de “*Autosteping*”, onde o passo temporal é calculado em cada iteração, o modelo garante os requisitos de estabilidade numérica. Admite caudais de entrada de fontes pontuais e não pontuais e ainda trocas com atmosfera (precipitação/evaporação). Os caudais de saída podem ser especificados como descargas no último segmento de um braço ou como caudais laterais. Como referido anteriormente, o CE-QUAL-W2 é composto por duas componentes interligadas, a hidrodinâmica e a qualidade da água.

Na componente hidrodinâmica são utilizadas aproximações das equações de Navier-Stokes para escoamentos incompressíveis (equações de Saint-Venant, ou ‘shallow-water equations’, na linguagem anglo-saxónica) para o cálculo do campo de velocidades, onde se considera uma situação de equilíbrio hidrostático e as aproximações de Boussinesq. Ainda relativamente à hidrodinâmica, o modelo calcula a elevação da superfície livre de forma implícita, o que elimina algumas restrições ao passo temporal. Calcula ainda o campo de temperatura, cuja influência na densidade é considerada no cálculo hidrodinâmico. No transporte das propriedades, os termos relativos à advecção e à difusão de propriedades são determinados através do campo da velocidade e dos coeficientes de viscosidade turbulenta.

Na componente da qualidade da água são calculadas as fontes e poços das propriedades em estudo, incluindo as interações entre nutrientes, fitoplâncton e oxigénio dissolvido em condições de anoxia, permitindo analisar a variação da concentração em cada célula e em cada passo temporal. O modelo possibilita a introdução e análise individual de diferentes grupos de fitoplâncton, assim como de outras propriedades que afetam o desenvolvimento das algas e ainda a seleção dos parâmetros de interesse definidos pelo utilizador (sendo estes bastante diversificados), o que reduz o esforço computacional. Esta versatilidade representa uma grande vantagem na modelação da produção primária e na escolha deste modelo em detrimento de outros.

### 3.1.1. Versão modificada

Na versão *standard* do CE-QUAL-W2 os processos inerentes ao compartimento dos sedimentos apresentam algumas limitações, nomeadamente o facto de assumir que o reservatório de fósforo adsorvido à matéria particulada é infinito, fazendo com que a carga interna de nutrientes só dependa da quantidade de matéria orgânica degradada e da consequente anoxia. Esta simplificação pode condicionar os resultados quando se utiliza o modelo com o intuito de prever impactes positivos da redução de cargas afluentes à albufeira. Nessa situação é de prever que a quantidade de fósforo adsorvido à matéria particulada diminua.

Perante esta limitação foram introduzidas ligeiras modificações no modelo.

Em primeiro lugar foi introduzida no modelo a possibilidade de a decomposição da matéria orgânica particulada, em condições óxicas, produzir nitrato em vez de amónia. A ideia é que a nitrificação da amónia ocorre nos sedimentos superficiais e pode ser uma componente do consumo de oxigénio pelos sedimentos. Faz, portanto, sentido que, sob determinadas condições, possa ser o nitrato a ser libertado da decomposição da matéria orgânica presente nos sedimentos.

No CE-QUAL-W2 a decomposição aeróbica da matéria orgânica liberta fósforo para a coluna de água de acordo com uma reação de 1ª ordem, em que a quantidade de fósforo libertado é proporcional à concentração de sedimentos (que por sua vez contém uma determinada proporção de fósforo). Este algoritmo pode, em última análise, libertar fósforo em excesso para a coluna de água o qual é, em parte, adsorvido aos óxidos de ferro presentes nos sedimentos superficiais. Este fenómeno pode ser muito intenso, evitando que muito do fósforo libertado chegue efetivamente à coluna de água.

Em segundo lugar, a matéria orgânica presente nos sedimentos é frequentemente menos rica em fósforo do que a matéria orgânica existente na coluna de água sobrejacente. Se os sedimentos forem menos ricos em fósforo, então o algoritmo original pode facilmente sobrestimar a quantidade de fósforo libertado. Finalmente, alguns organismos presentes nos sedimentos consomem eles próprios o fósforo originando a depleção previamente referida.

Para simular a adsorção do fósforo pelos óxidos de ferro presentes no sedimento, em condições óxicas, o código original foi modificado para possibilitar a retenção duma fração do fósforo libertado – especificada pelo utilizador do modelo. Esta retenção permite que a referida fração fique adsorvida ao sedimento e não passe para a coluna de água.

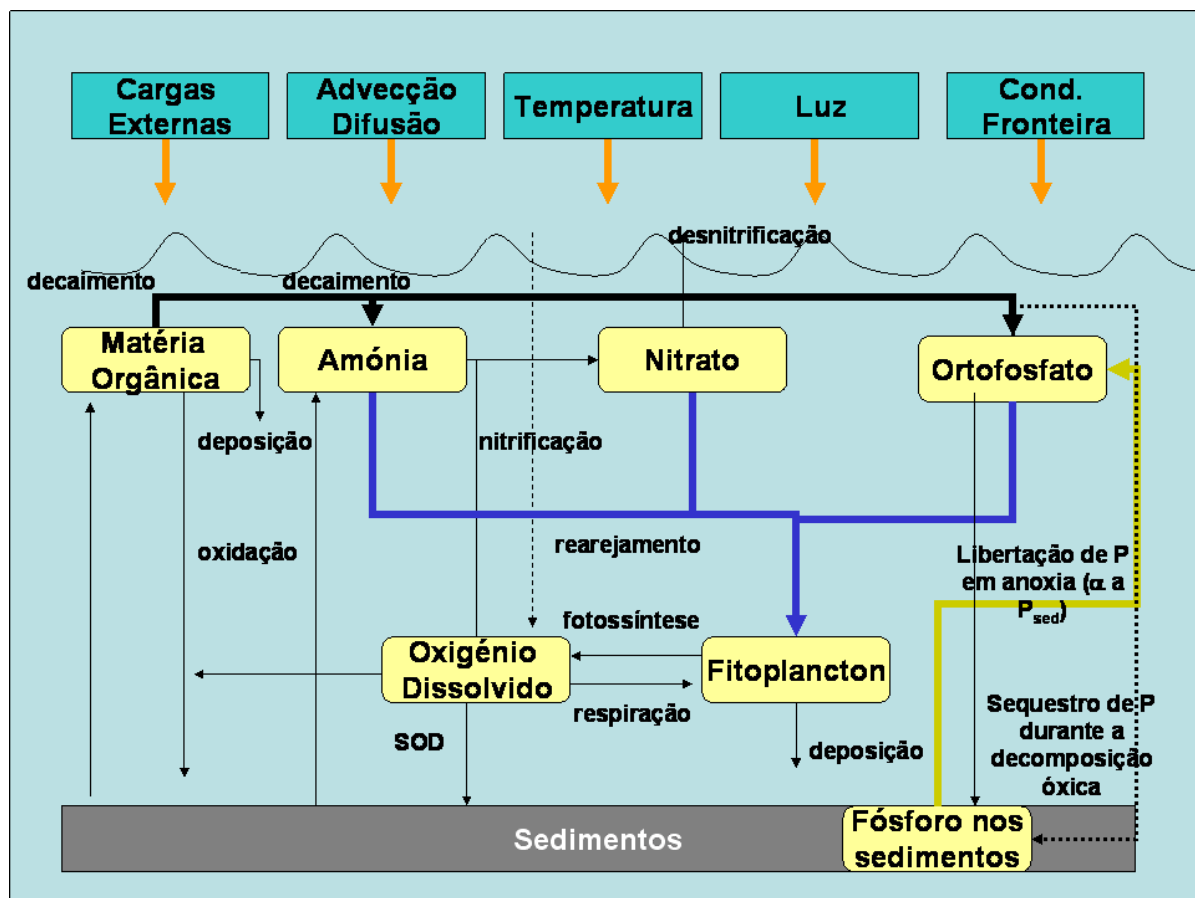


Figura 15 – Representação esquemática dos principais processos da versão do modelo CE-QUAL-W2 utilizada

Por outro lado, em condições de anoxia, uma parte do fósforo adsorvido aos sedimentos é libertada para a coluna de água. Aqui, a versão *standard* do CE-QUAL-W2 admite que a quantidade de fósforo libertável é infinita (o modelo contempla uma reação de ordem zero). Na versão modificada do modelo foi introduzida uma reação de 1ª ordem, em que a quantidade de fósforo libertada, em condições de anoxia, é proporcional à quantidade de fósforo retida. Isto obrigou à criação de uma nova variável de estado, que representa a quantidade de fósforo retido e que pode ser libertado em condições anóxicas.

## 3.2. Batimetria e malha computacional

### 3.2.1. Albufeira de Foz Tua

O perfil longitudinal da albufeira de Foz Tua foi discretizado, considerando apenas um braço principal, em 19 segmentos com comprimentos variáveis entre os 473 m e os 2835 m. Na vertical consideram-se 56 camadas

de 2 m de espessura cada. A **Figura 16** mostra a discretização horizontal da albufeira e a localização dos 2 tributários considerados (rio Tinhela e ribeira de São Mamede de Ribatua), ambos na margem direita.

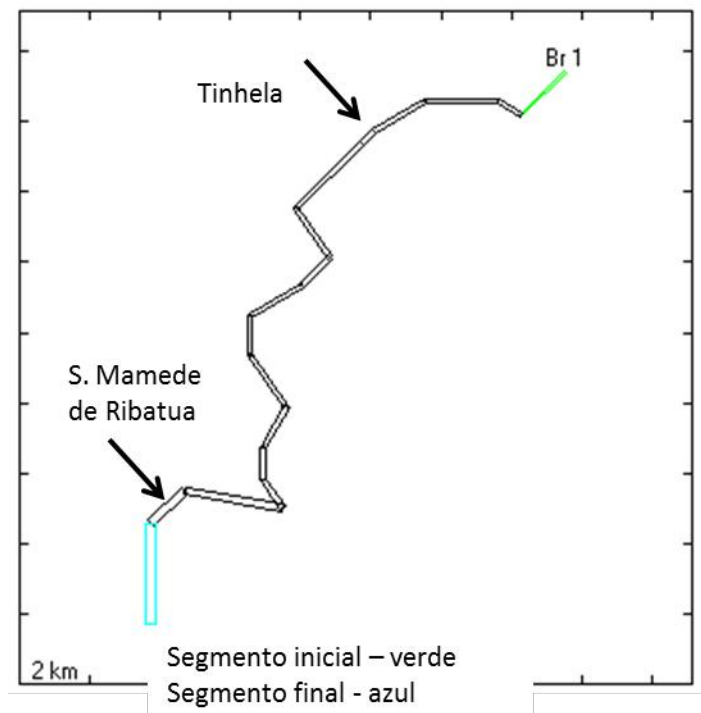


Figura 16 – Representação em planta da batimetria da albufeira de Foz Tua e dos afluentes considerados

Na **Figura 17** mostra-se a validação da curva de volumes acumulados recorrendo aos dados de projeto.

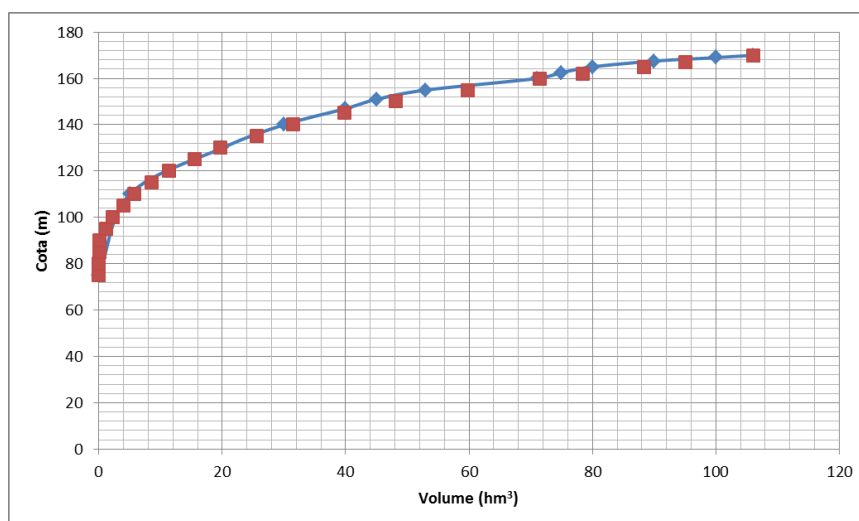


Figura 17 – Validação da curva de volumes acumulados na albufeira de Foz Tua: vermelho – dados de projeto; azul – batimetria utilizada no modelo

### 3.2.2. Albufeira da Régua

O perfil longitudinal da albufeira da Régua foi discretizado, considerando apenas um braço principal, em 29 segmentos com comprimentos variáveis entre os 600 e os 3400 m. Na vertical consideram-se 43 camadas de 1 m de espessura cada. A **Figura 18** mostra a discretização horizontal da albufeira e a localização dos afluentes. Na **Figura 19** encontra-se a validação da curva de volumes acumulados efetuada recorrendo aos dados de projeto e aos disponíveis no SNIRH. Foram considerados 3 tributários que escoam diretamente para a albufeira: o rio Tua e rio Pinhão, na margem direita, e o rio Távora, na margem esquerda.

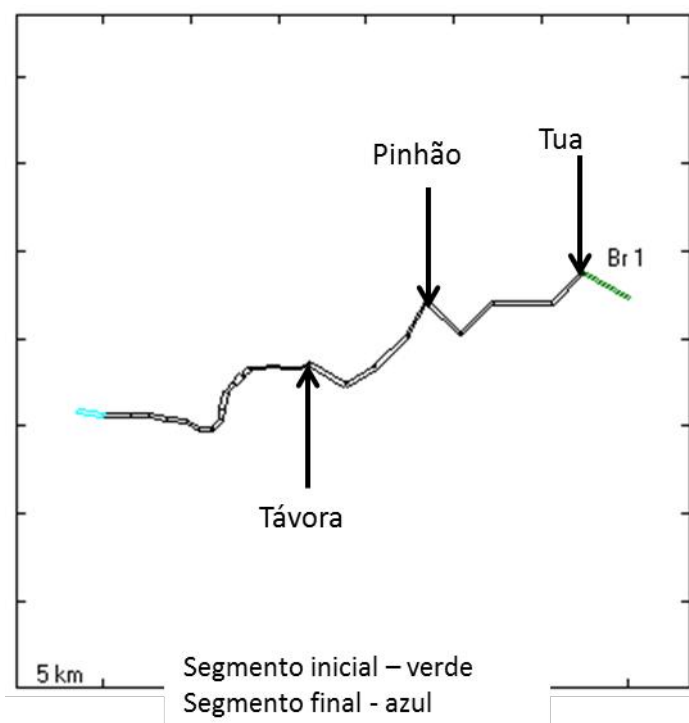


Figura 18 – Representação em planta da batimetria da albufeira da Régua e dos afluentes considerados

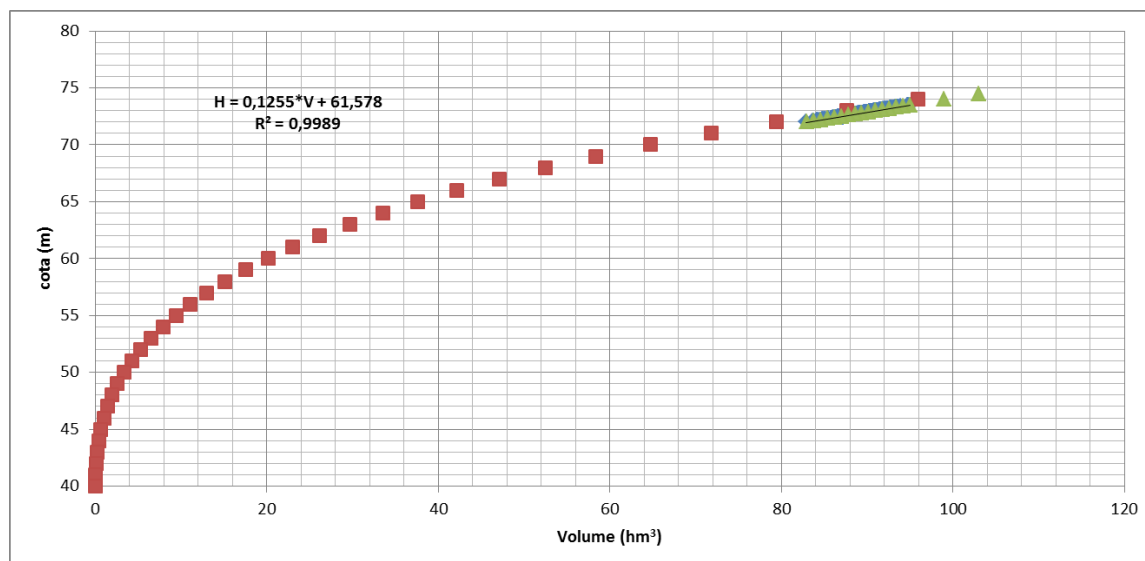


Figura 19 – Curva de volume acumulado na albufeira da Régua: Vermelho – batimetria utilizada no modelo; azul – dados INAG; verde – dados de projeto

### 3.2.3. Modelo acoplado das albufeiras

O acoplamento das duas albufeiras foi efetuado considerando a opção de ter dois corpos de água ligados pelo órgão de descarga da albufeira de Foz Tua. Na albufeira da Régua foi considerado um braço adicional na margem direita que representa o troço entre o AHFT e a foz do Tua. A bombagem foi considerada através da ativação da opção “Pumpback” que permite bombear para montante caudais pré-definidos.

## 3.3. Condições iniciais

A condição inicial para ambas as albufeiras corresponde a uma situação típica de inverno onde se considera que a coluna de água se encontra homogênea do ponto de vista térmico e de condições de oxigenação (ver **Quadro 23**). A cota inicial em ambas as albufeiras é a cota do NPA e em ambos os casos se considera que a massa de água se encontra em repouso.

Quadro 23 – Condições iniciais para todas as simulações

Parâmetro	Foz-Tua	Régua
Cota da Superfície	170 m	73,5 m
Temperatura	10 C	10 C
Nitrato	0,5 mg N-NO <sub>3</sub> /L	0,8 mg N-NO <sub>3</sub> /L
Fosfato	0,02 mg P-PO <sub>4</sub> /L	0,4 P-PO <sub>4</sub> /L
Algas	0,2 mg C/L	0,3 mg C/L
O <sub>2</sub>	10 mg/L	10 mg/L
Materia Orgânica	2,7 mg/L	2,7 mg/L

### 3.4. Condições de fronteira

#### 3.4.1. Caudais afluentes

##### 3.4.1.1. Foz Tua

Considerou-se que os caudais afluentes à albufeira de Foz Tua são os medidos na estação de Castanheiro entre outubro de 1985 e dezembro de 2000, período durante o qual o modelo foi integrado. Na **Figura 20** mostram-se os volumes mensais afluentes à albufeira de Foz Tua e os caudais lançados para jusante que foram utilizados na simulação da albufeira.



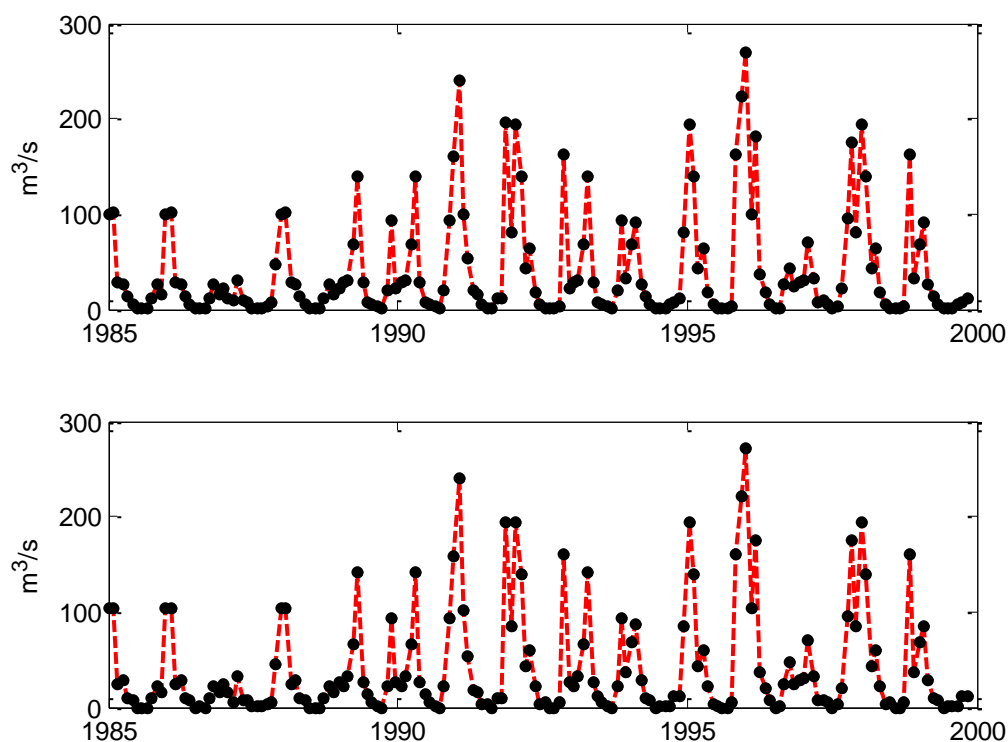


Figura 20 – Caudais afluentes à albufeira de Foz Tua entre 1985 e 2000 (em cima) e caudais lançados para jusante (em baixo) no cenário em que não se considera bombagem

### 3.4.1.2. Régua

Os caudais utilizados como condição de fronteira na albufeira da Régua foram deduzidos dos dados disponíveis no SNIRH para a estação da Régua. Os valores mensais desses caudais mostram-se na **Figura 21**. Os valores representados para os caudais afluentes consideram as contribuições do Douro, Tua, Pinhão e Távora. O modelo isolado da Régua foi integrado entre janeiro de 1990 e dezembro de 2008.

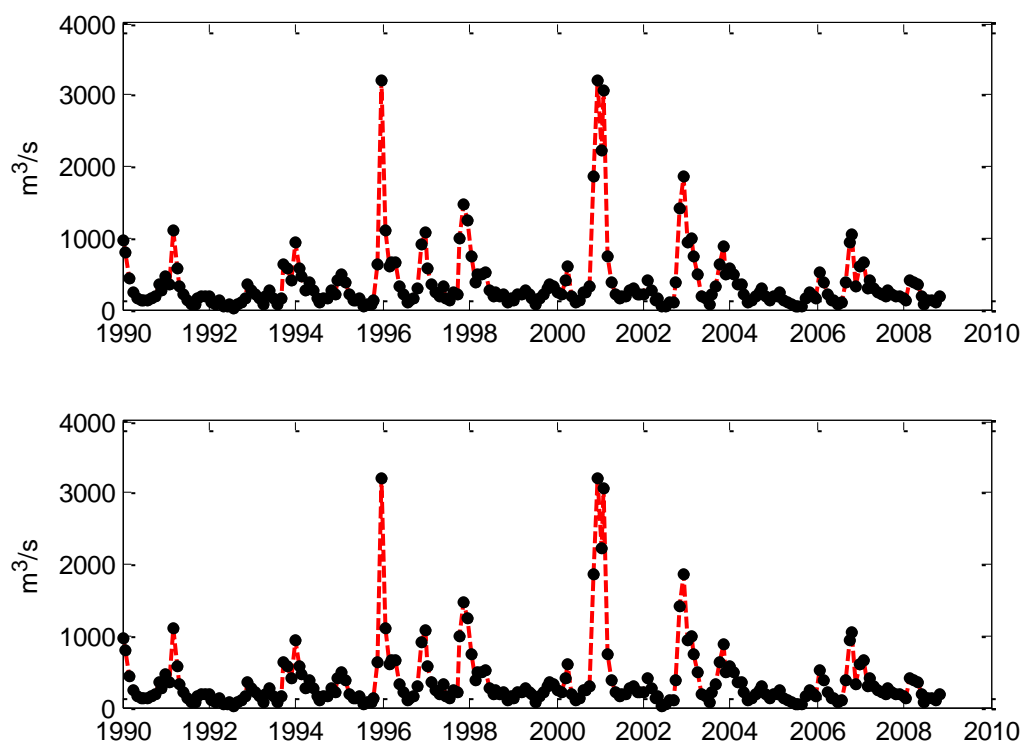


Figura 21 – Caudais afluentes à albufeira da Régua entre 1990 e 2009 (em cima) e caudais lançados para jusante (em baixo) no cenário em que não se considera bombagem

### 3.4.1.3. Modelo acoplado

A montagem do modelo acoplado requer o estabelecimento de um regime de exploração. A EDP forneceu a simulação de 8 anos tipo em que são conhecidas as afluências à albufeira de Foz Tua e são determinados os caudais turbinados e bombados a partir da albufeira da Régua. A abordagem foi comparar uma série de 15 anos (entre 1990 e 2005) de dados reais e classificá-los de acordo com cada um desses anos tipo de forma a reconstruir uma série temporal capaz de mimetizar a série real. Os anos fornecidos pela EDP são os que se mostram no **Quadro 24**. A série temporal foi construída de acordo com o **Quadro 25**. A partir dos critérios estabelecidos obtêm-se as séries que se mostram na **Figura 22** para Foz Tua, e na **Figura 23** para a Régua.

Quadro 24 – Anos simulados pela EDP para estabelecer os cenários de turbinagem e bombagem

Tipo	Ano Simulado
1	1992
2	1975
3	1990
4	1983
5	2002
6	1978
7	1977
8	1966

Quadro 25 – Tabela de caudais anuais, entre 1990 e 2005, utilizados na construção de série temporal simulada

Ano	Bombeado	Turbinado	Afluência	Tipo
1990	1982,8	2844,9	862,1	3
1991	1982,8	2844,9	862,1	3
1992	2466,9	2852,7	385,8	1
1993	1982,8	2844,9	862,1	3
1994	1827,1	3005,7	1178,6	4
1995	1827,1	3005,7	1178,6	4
1996	1203,5	3342,7	2139,2	7
1997	1323,9	3199,4	1875,5	6
1998	1827,1	3005,7	1178,6	4
1999	2124,6	2822,5	697,9	2
2000	1323,9	3199,4	1875,5	6
2001	1052,4	3493,5	2441,1	8
2002	2028,8	3284,9	1256,1	5
2003	1323,9	3199,4	1875,5	6
2004	2124,6	2822,5	697,9	2

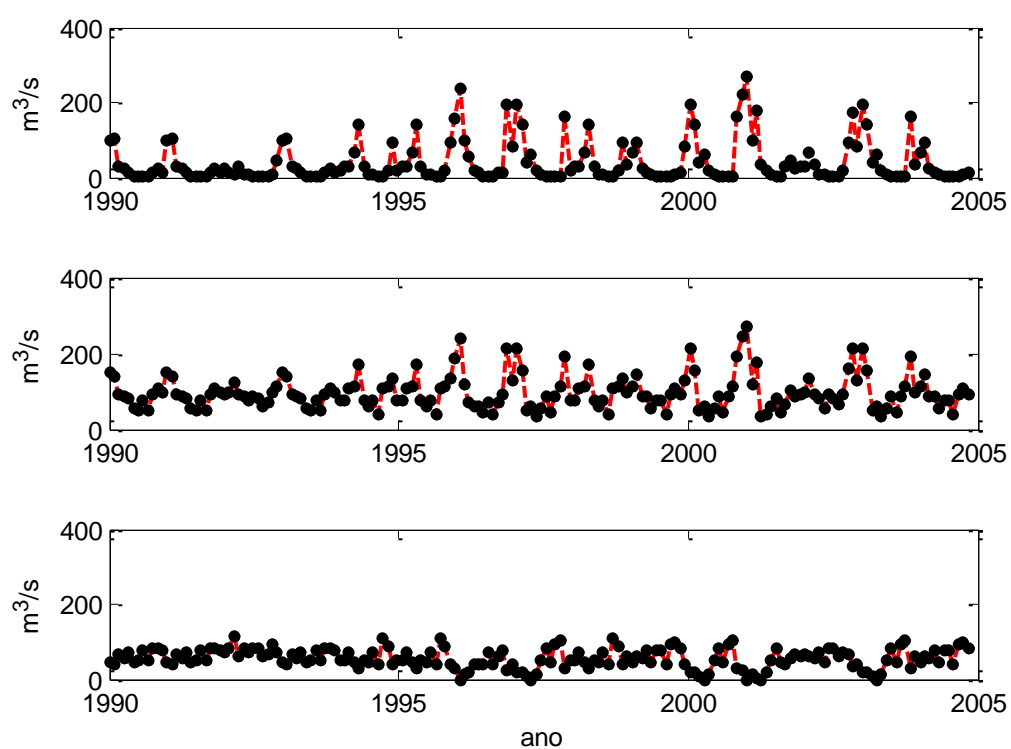


Figura 22 – Cenários simulados com caudais afluentes à albufeira da Foz Tua entre 1990 e 2005 (em cima), caudais turbinados para jusante (ao centro) e caudais bombados a partir da albufeira da Régua (em baixo)

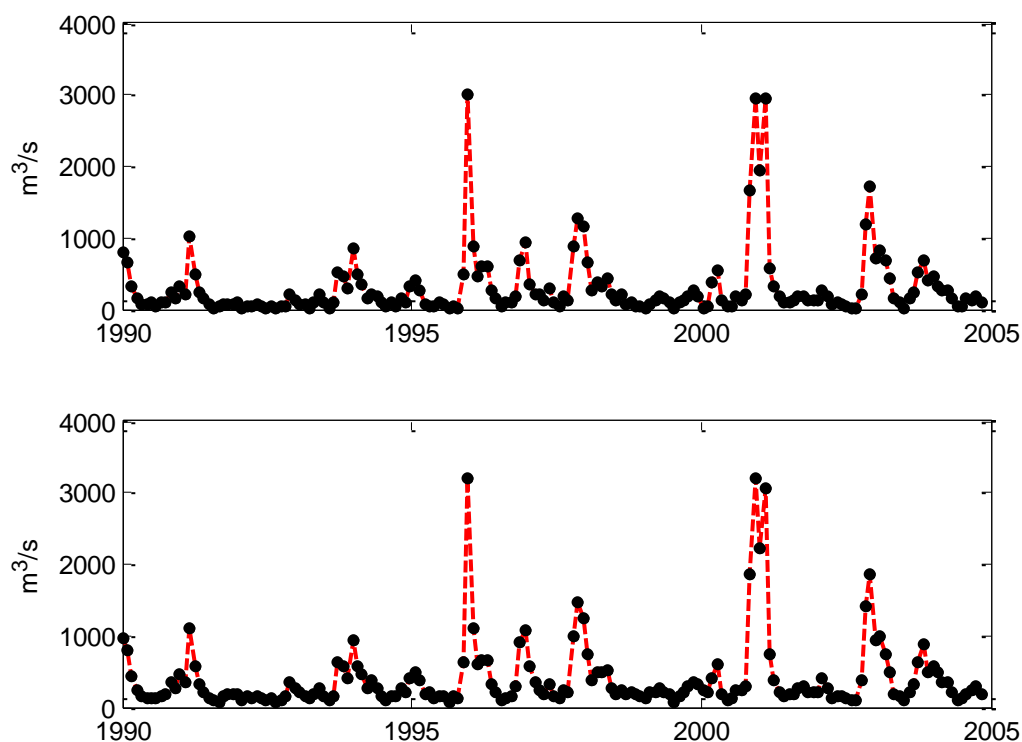


Figura 23 – Caudais afluentes à albufeira da Régua provenientes do Douro, Pinhão e Távora entre 1990 e 2005 (em cima) e caudais lançados para jusante (em baixo) em cenário de bombagem

### 3.4.2. Cargas de nutrientes e matéria orgânica

#### 3.4.2.1. Foz Tua

No cenário de base de Foz Tua as concentrações de nutrientes e matéria orgânica afluentes à albufeira foram estabelecidas de acordo com o procedimento descrito no **Capítulo 2.3**. Foi assim reconstruída uma série de 15 anos com valores mensais médios de ano seco, médio e húmido. As cargas mensais e anuais obtidas mostram-se na **Figura 24**.

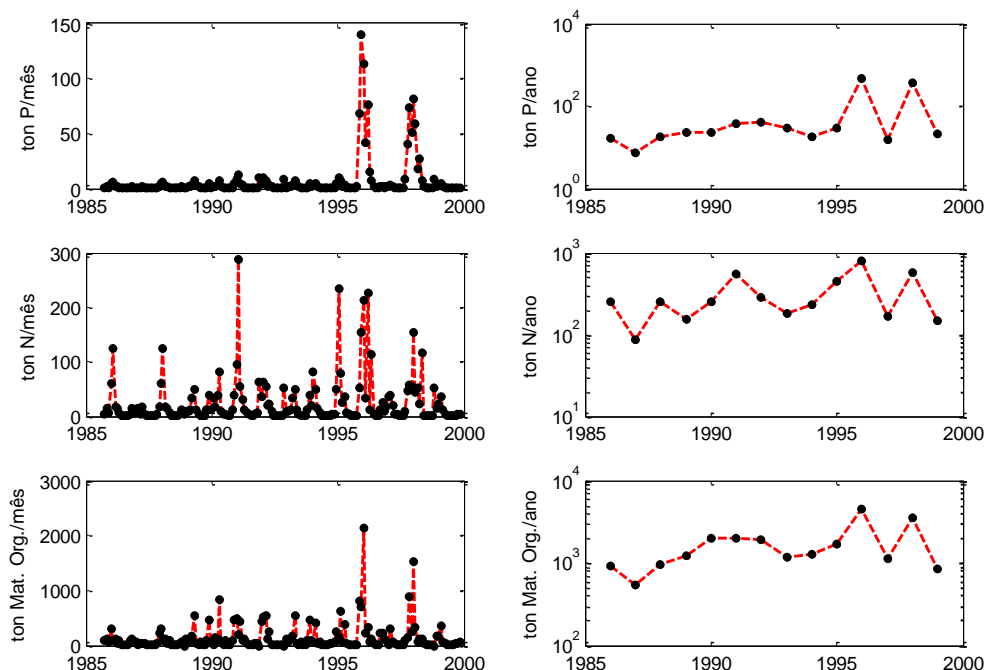


Figura 24 – Cargas de Nutrientes e Matéria Orgânica afluentes a Foz Tua entre 1985 e 2000. À esquerda cargas mensais e à direita cargas anuais. A escala das cargas anuais é logarítmica

### 3.4.2.2. Régua

As cargas afluentes à Régua obtiveram-se de acordo com a metodologia apresentada no **Capítulo 2.4**, para o período entre 1990 e 2009. As cargas mensais decorrentes desse cálculo mostram-se na **Figura 25**. Deve notar-se que os dados disponíveis, para o cálculo da carga e cálculo da concentração de nutrientes e matéria orgânica, são trimestrais e obtidos de 2 em 2 anos. Este facto obrigou à reconstituição de séries mensais e ao cálculo das concentrações em ano seco, médio e húmido (um processo semelhante ao realizado para Foz Tua).

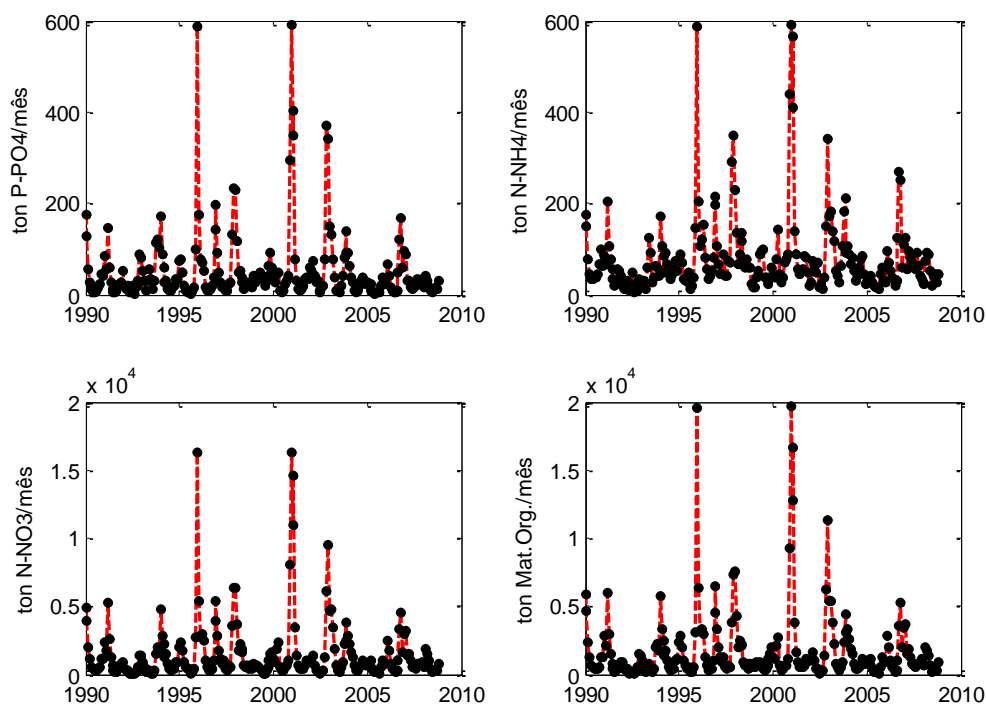


Figura 25 – Cargas afluentes à albufeira da Régua no cenário de base sem Foz Tua

### 3.4.2.3. Modelo acoplado

No modelo acoplado, mantêm-se inalteradas as cargas afluentes a Foz Tua provenientes da bacia do rio Tua, bem como as cargas afluentes à Régua provenientes dos rios Douro, Pinhão e Távora. Nesta simulação, a diferença fundamental, no que diz respeito à albufeira da Régua, é que em vez da descarga do rio Tua considerada no modelo de base tem-se a descarga da albufeira de Foz Tua à cota a que está instalada a respetiva infraestrutura. Relativamente a Foz Tua, considera-se a bombagem a partir da Régua. Os valores dos caudais bombados encontram-se na **Figura 22** e as concentrações são determinadas dinamicamente pelo modelo, que considera os processos físicos envolvidos na mistura das massas de água, bem como todos os processos químicos e biológicos.

### 3.4.3. Forçamento atmosférico

Os dados meteorológicos, que serviram de base a este estudo, englobam parâmetros como a temperatura média do ar, a temperatura do ponto de orvalho, a nebulosidade e a velocidade média do vento.

Considerando o período entre 1975 e 2005, foram utilizados dados diários de temperatura média do ar (ver **Figura 26**), de humidade relativa às 09 UTC (a partir da qual se determinou a temperatura do ponto de orvalho) (**Figura 27**) e de velocidade média do vento (ver **Figura 28**), da estação meteorológica de Vila Real, da rede meteorológica do Instituto de Meteorologia. Esta estação é das mais próximas da área de interesse e a que apresenta uma série mais longa e mais consistente. No caso da nebulosidade optou-se por utilizar as normais climatológicas (1961-1990) da estação meteorológica de Montalegre, com uma discretização mensal (ver **Figura 29**). O mesmo conjunto de dados foi utilizado nas albufeiras da Régua e de Foz Tua.

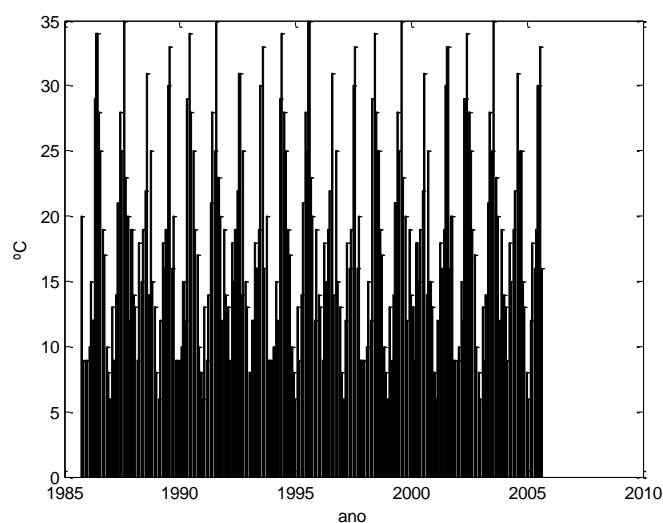


Figura 26 – Temperatura média mensal (°C) de Vila Real no período de 1985-2005

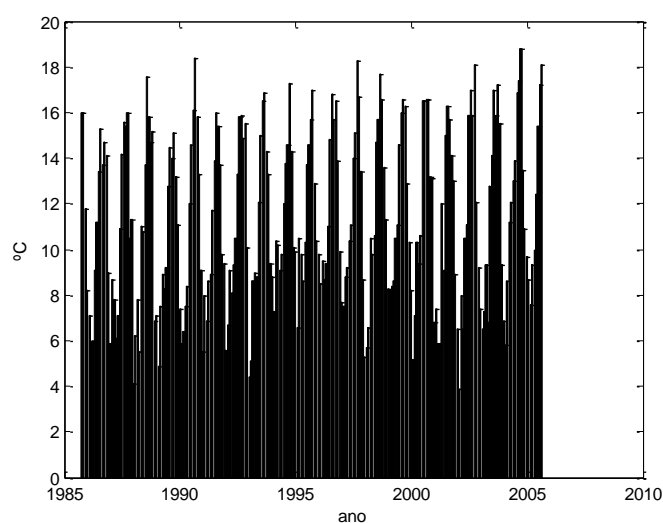


Figura 27 – Temperatura do ponto de orvalho média mensal (°C) de Vila Real no período de 1985-2005



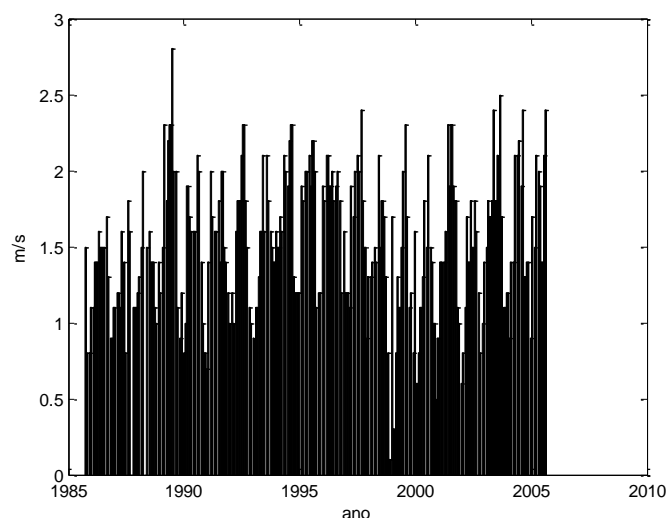


Figura 28 – Velocidade do vento média mensal (m/s) de Vila Real no período de 1985-2005

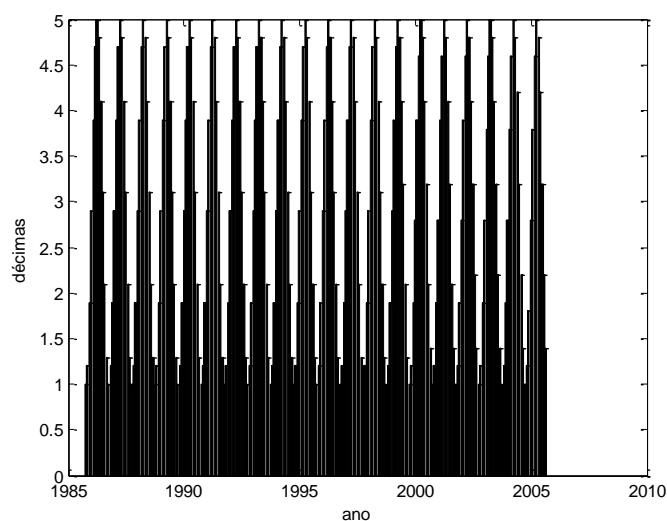


Figura 29 – Cobertura nebulosa utilizada na simulação da qualidade da água na albufeira de Foz Tua

### 3.5. Albufeira da Régua – Cenário de referência e validação

Um dos principais objetivos da implementação do modelo da albufeira da Régua é a validação da parametrização utilizada, ou seja, do cenário de referência (sem bombagem). Os dados de monitorização da albufeira da Régua foram utilizados para este fim, em particular utilizaram-se os dados de nutrientes, clorofila-a e transparência medidos na Estação mais próxima da Barragem da Régua (**Quadro 26**). As

concentrações médias anuais de fósforo total indicam que a albufeira é eutrófica, o mesmo sucedendo, na generalidade dos anos, para o indicador clorofila-*a* (para ambos os critérios). Os valores de transparência de Secchi enquadram a albufeira da Régua na mesotrofia.

A análise dos dados não revela nenhuma tendência em particular. Mesmo a variabilidade interanual verificada, por exemplo nas concentrações médias de fósforo e clorofila-*a*, não apresenta correlação com as afluências à albufeira. Verifica-se, por exemplo, que as concentrações médias anuais mais elevadas ocorrem em 2007 e 2008, anos médio e seco respetivamente, sendo os valores semelhantes ao observado em 2003, um ano húmido. A correlação encontrada entre a concentração média anual de clorofila-*a* e de fósforo total é igualmente baixa (ver **Figura 30**).

Quadro 26 – Médias anuais da clorofila-*a*, fósforo total e transparência na albufeira da Régua

Ano	Fósforo Total (µgP/L)	Clorofila- <i>a</i> (µg/L)	Transparência (m)
1995	78,4	-	2,9
1998	77,9	13,6	2,9
2003	80,9	7,5	1,9
2005	76,3	10,4	2,7
2007	81,1	22,6	1,6
2008	86,1	21,5	1,9
2010	62,3	11,8	1,4
2012	64,6	8,4	2,6

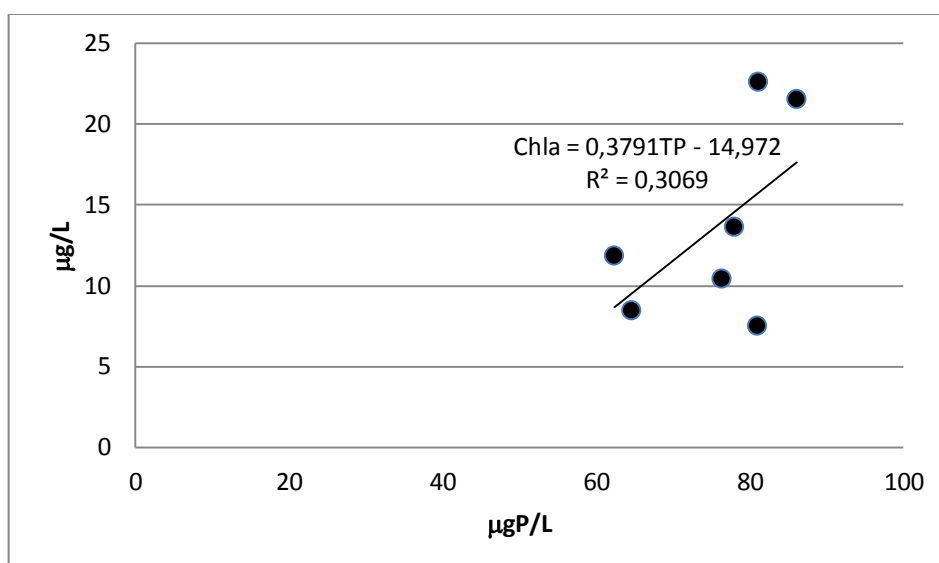


Figura 30 – Relação entre Clorofila-*a* e fósforo total na albufeira da Régua a partir dos dados de

monitorização fornecidos pela EDP

A partir dos dados de monitorização foi calculado o índice de estado trófico de Carlson (Carlson, 1977) e efetuada a análise gráfica que permite observar a relação entre os diferentes indicadores. Esta análise indica um excesso de fósforo na albufeira da Régua (3º ou 4º quadrante, na **Figura 31**) e uma variação sazonal da turbidez. De inverno a turbidez é dominada pela presença de sedimentos (3º quadrante), possivelmente com fósforo adsorvido, enquanto de verão a turbidez é dominada pela presença de algas, o que reduz também a diferença entre o índice calculado pelas algas e o calculado pelo fósforo.

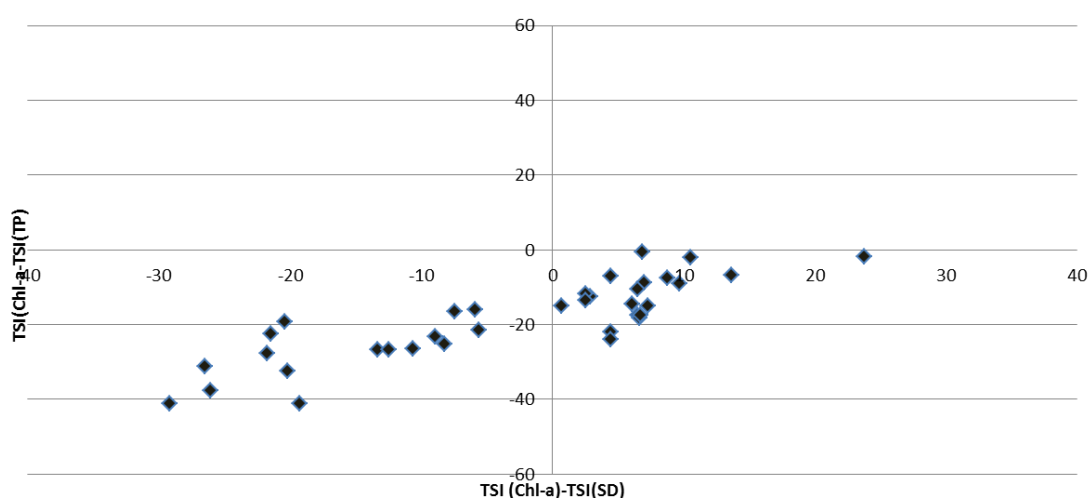


Figura 31 – Análise Multivariada no Índice de Estado Trófico na albufeira da Régua

O processo de validação do cenário de referência para a albufeira da Régua obtido com o modelo CE-QUAL-W2 foi iniciado com a verificação do balanço hídrico, observando-se um ótimo ajustamento (**Figura 32**).

Em relação à temperatura da água à superfície, os resultados simulados também mimetizam com realismo os valores existentes (**Figura 33**). De realçar que o erro quadrático obtido entre os valores simulados e os observados é de 0,67 (ver **Figura 34**), que se pode considerar satisfatório.

A evolução sazonal da temperatura da albufeira da Régua é típica de lagos monomicticos quentes, com valores de temperatura elevados da água superficial no verão, que favorecem o aparecimento de estratificação térmica, e com um período extenso de homeotermia da coluna de água e de valores de temperatura relativamente baixos de inverno.

A análise dos perfis verticais de temperatura mostra que também a esse nível a concordância entre modelo e dados é boa (ver **Figura 35**), para além de revelar que a albufeira nunca apresenta uma estratificação

pronunciada (mesmo de verão) em resultado do elevado hidrodinamismo e tempos de residência baixos (da ordem dos poucos dias).

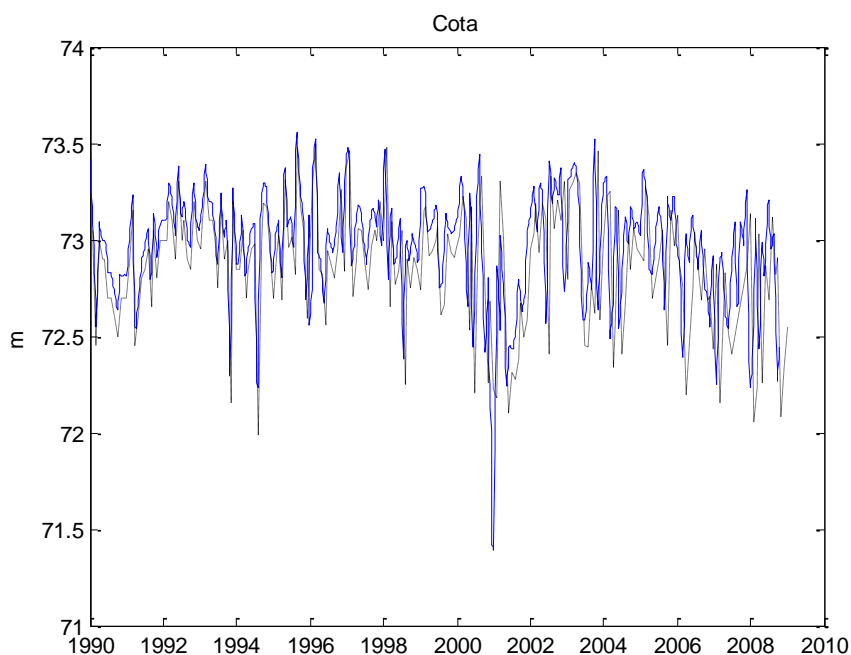


Figura 32 – Cotas simuladas (azul) e observadas (tracejado) na albufeira da Régua

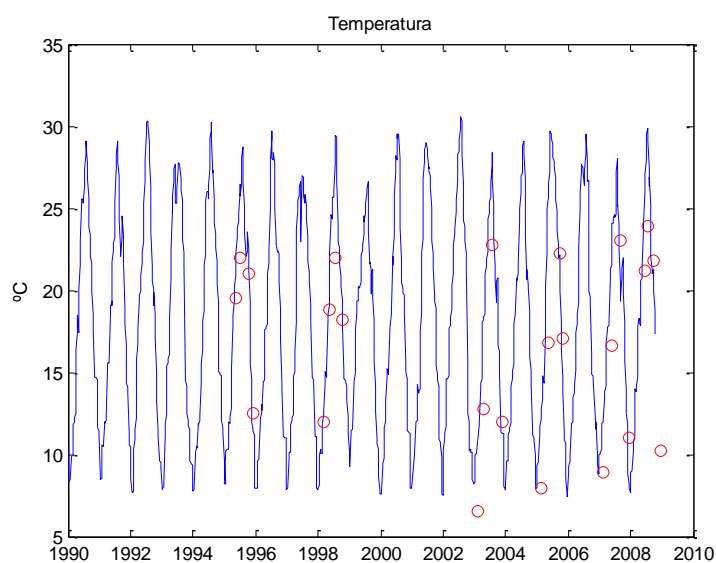


Figura 33 – Temperatura simulada (a cheio) e observada (circunferências) na albufeira da Régua

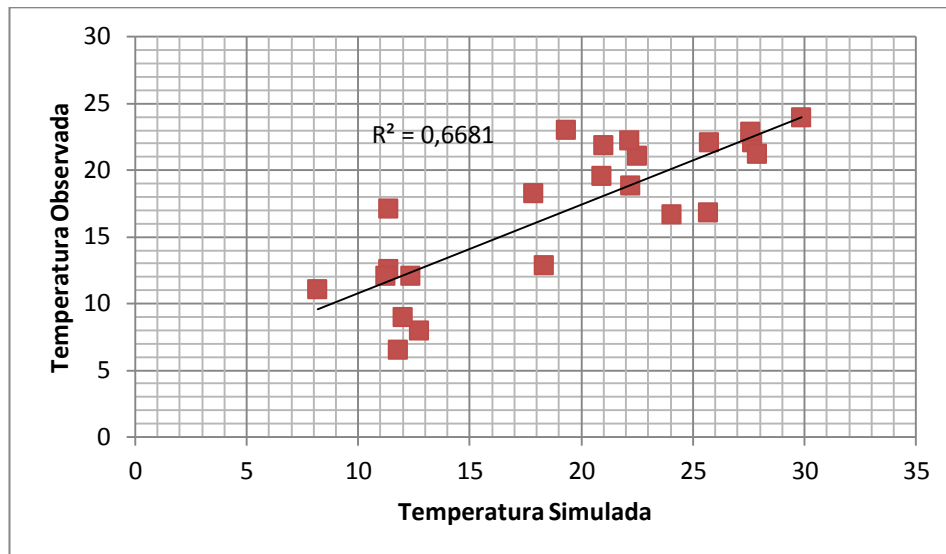


Figura 34 – Comparação da temperatura simulada e observada e erro médio quadrático

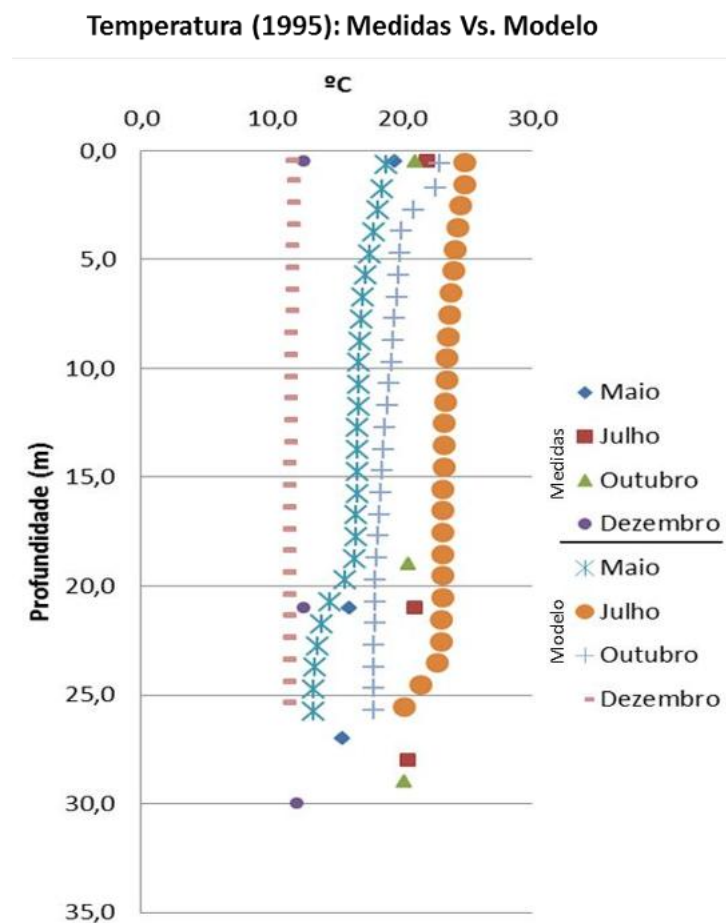


Figura 35 – Comparação dos perfis verticais de temperatura na albufeira da Régua em 1995. As

observações são os pontos isolados

Para a concentração de clorofila-*a* foi adotado um procedimento de comparação semelhante ao efetuado para a temperatura, obtendo-se um elevado nível de concordância e um erro médio quadrático próximo da unidade (**Figura 36 e Figura 37**).

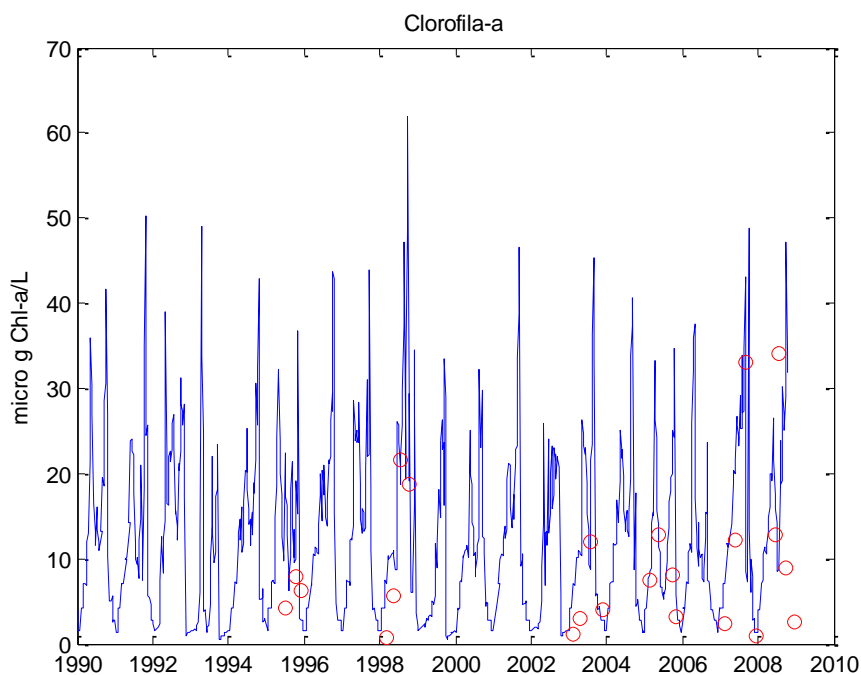


Figura 36 – Clorofila-a simulada (a cheio) e observada (circunferências) na albufeira da Régua

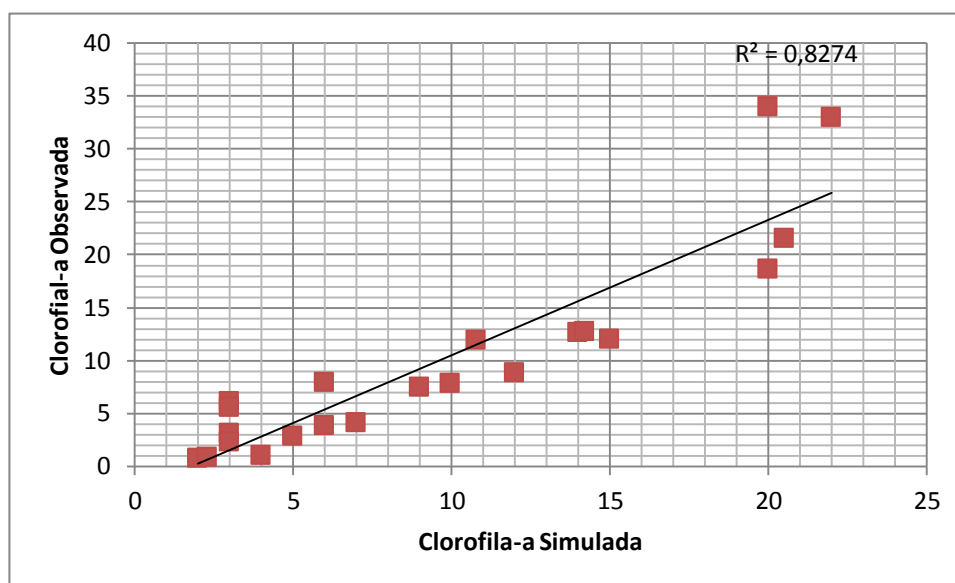


Figura 37 – Comparação da clorofila-a simulada e observada e erro médio quadrático

Relativamente à estrutura vertical da clorofila-a, a comparação com os dados revela-se satisfatória. Os perfis simulados apresentam boa concordância com os resultados observados, sendo que, na generalidade, estes não cobrem a zona onde se desenvolve o máximo subsuperficial típico, que é bastante pronunciado entre a primavera e o outono (ver **Figura 38**). A partir de 2010 as amostras são integradas na zona eufótica, mas o pico subsuperficial aparece esbatido por via da integração. Verifica-se que o máximo de produtividade ocorre durante a primavera e é geralmente dominado por clorofitas, ocorrendo um segundo pico de menor intensidade no final do verão/início do outono, onde as cianobactérias ganham dominância.

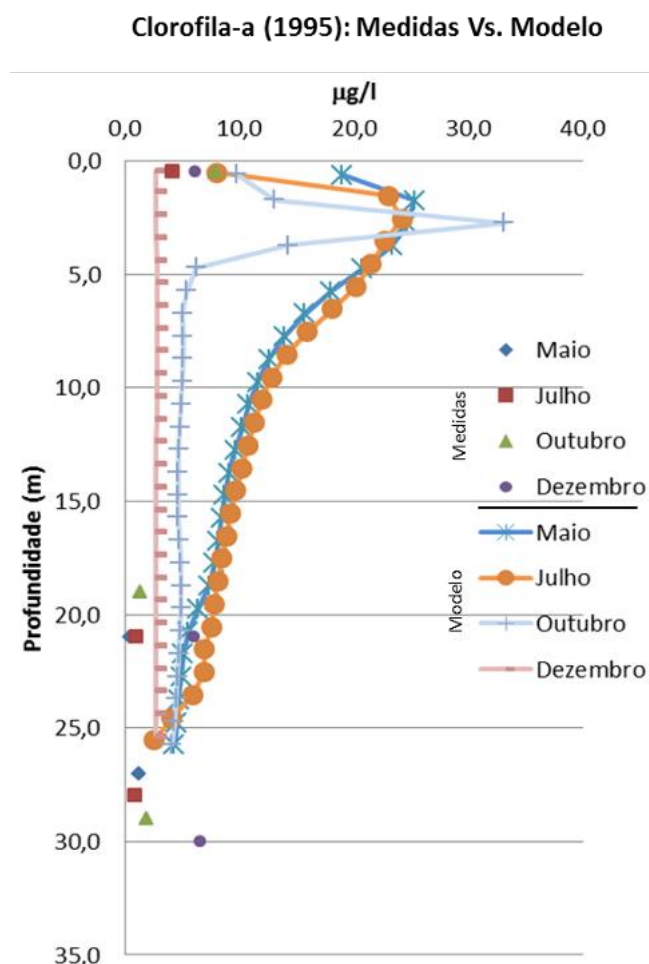


Figura 38 – Comparação dos perfis verticais de clorofila-a na albufeira da Régua em 1995. As observações são os pontos isolados

Quanto aos nutrientes, a concordância apresentada continua a ser boa, como se pode observar na **Figura 39**, **Figura 41**, **Figura 42** e **Figura 43**. A albufeira da Régua apresenta um tempo de residência muito baixo (da

ordem dos poucos dias), de forma que é muito dependente da condição de fronteira, ou seja, a evolução temporal da concentração dos nutrientes depende essencialmente das afluências e por isso apresenta máximos nos períodos de maior caudal, ou seja, de outono e inverno.

No período de maio a outubro, ocorre um aumento da concentração de ortofosfato em profundidade, associada ao decaimento e degradação da matéria orgânica particulada ao longo da coluna de água, mas também relacionada com alguma libertação por parte dos sedimentos em condições anóxicas (pouco frequentes) e com a diminuição do consumo em profundidade por parte do fitoplâncton.

Os resultados da simulação para o fósforo total apresentaram uma menor precisão. Deve notar-se que o modelo considera apenas a fração inorgânica dissolvida do fósforo na condição de fronteira. As restantes componentes, em particular a fração particulada, são calculadas no modelo como um parâmetro derivado dependentes da estequiometria da matéria orgânica (dissolvida e particulada) e da fração de fósforo adsorvida aos sólidos inorgânicos. O desconhecimento dos valores corretos destas frações está possivelmente na origem das discrepâncias observadas.

Deve notar-se que as discrepâncias observadas na simulação do fósforo total não influenciam a correta simulação da produtividade primária. De facto, a componente de fósforo relevante para a simulação da produtividade primária é a fração inorgânica (ortofosfato, essencialmente). Nos resultados observa-se que o fósforo total é em geral subestimado pelo modelo, ou seja, aparentemente existe mais fósforo na albufeira do que aquele que o modelo considera. Acontece que o fósforo particulado que possa existir em excesso é transformado em fósforo inorgânico essencialmente em condições de anoxia, que não se verificam na albufeira. Por essa razão a simulação quer da produtividade primária, quer do ortofosfato apresentam resultados satisfatórios apesar da subestimação do fósforo total.



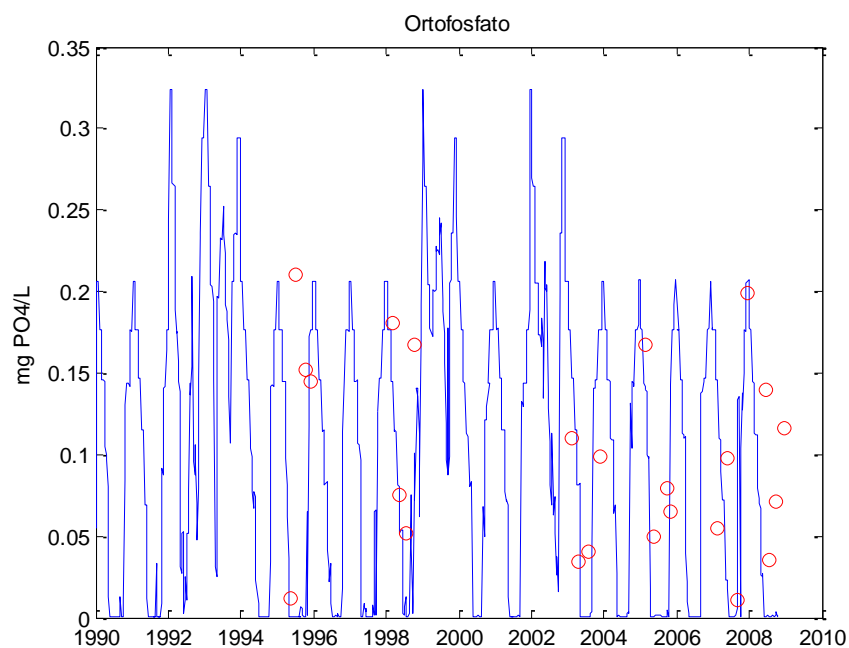


Figura 39 – Ortofosfato simulado (a cheio) e observado (circunferências) na albufeira da Régua.

Concentrações expressas em mg PO<sub>4</sub>/L

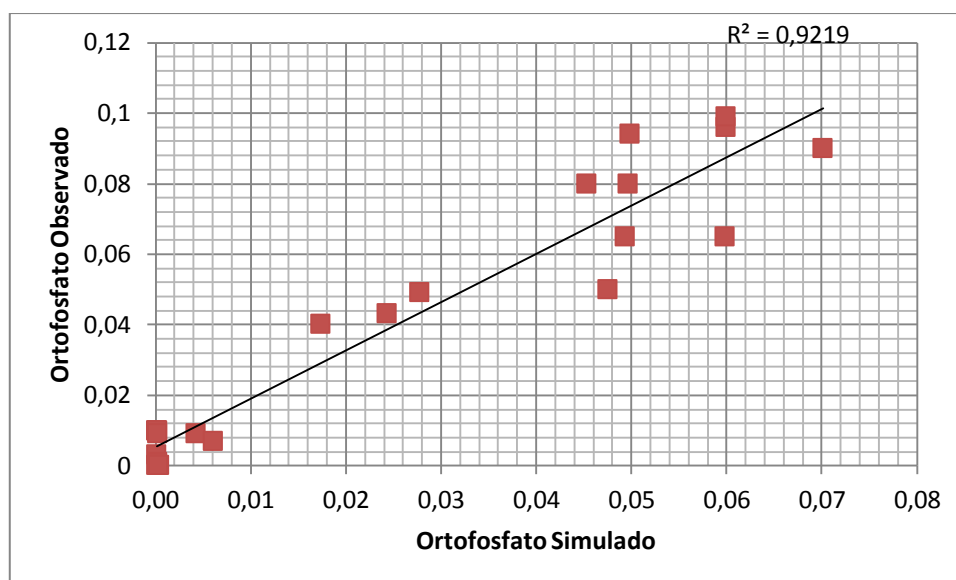


Figura 40 – Comparação entre o ortofosfato simulado e observado e erro médio quadrático. Concentrações expressas em mg PO<sub>4</sub>/L

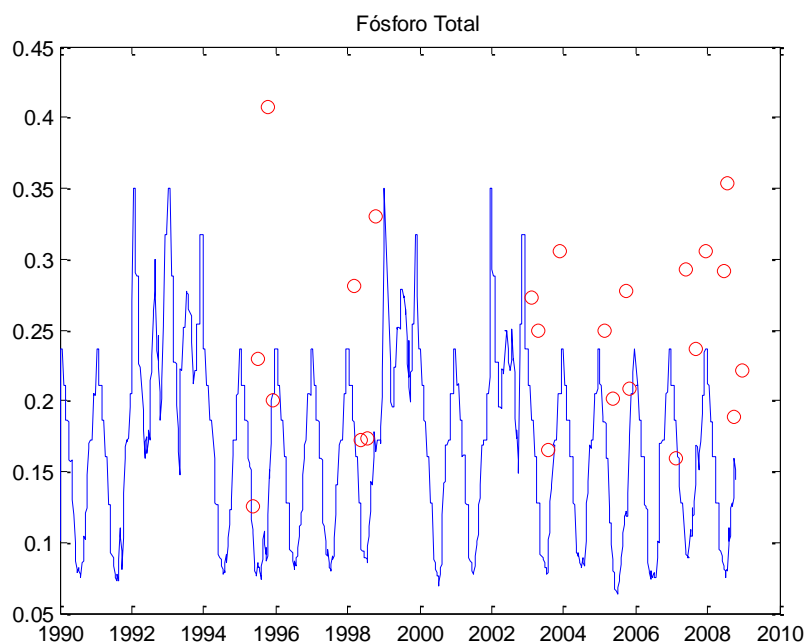


Figura 41 – Fósforo Total simulado (a cheio) e observado (circunferências) na albufeira da Régua. Concentrações expressas em mg P/L

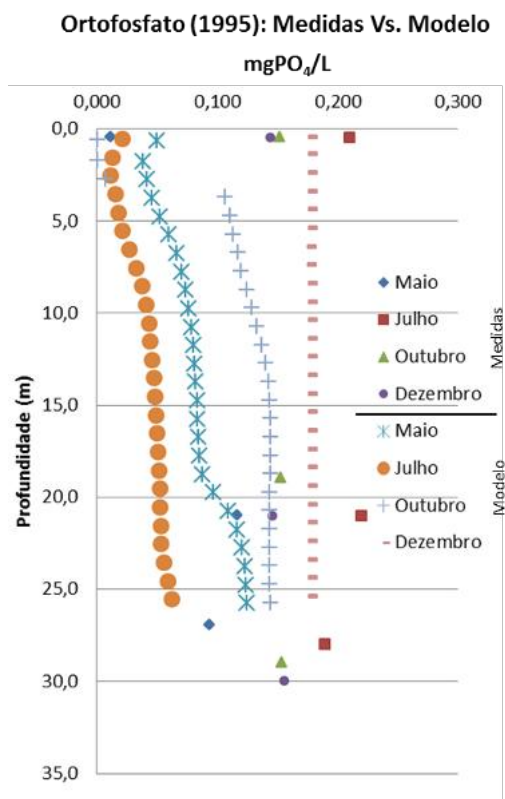


Figura 42 – Comparação dos perfis verticais de ortofosfato na albufeira da Régua em 1995. Concentrações

expressas em mg PO4/L

Relativamente aos nitratos, os resultados obtidos são muito satisfatórios, como se pode observar na **Figura 43**, o que traduz a qualidade da condição de fronteira, da qual muito dependem os resultados, em particular em albufeiras com um baixo tempo de residência, e a correta simulação dos processos internos que dependem da parametrização escolhida.

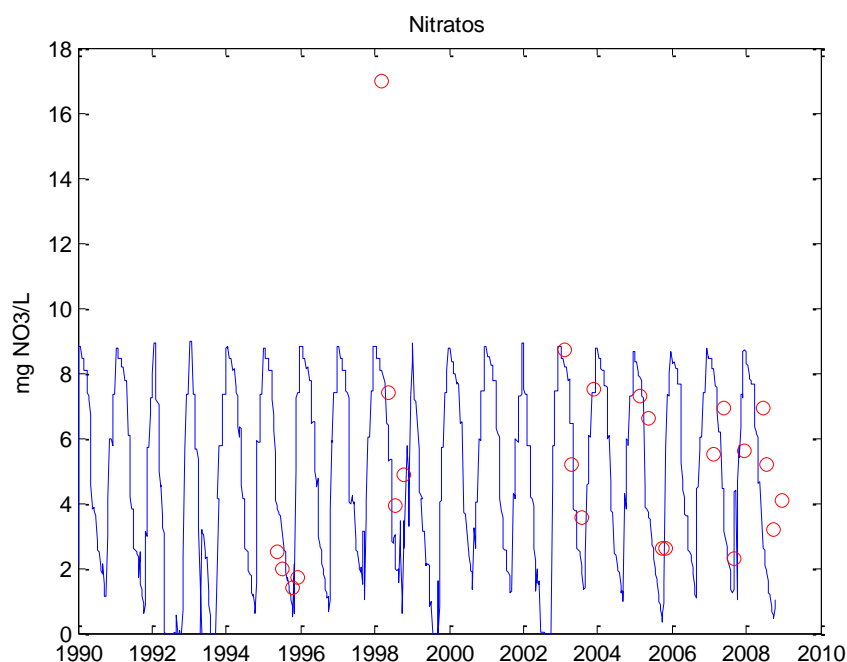


Figura 43 – Nitrato simulado (a cheio) e observado (circunferências) na albufeira da Régua. Concentrações expressas em mg NO3/L

### 3.6. Albufeira de Foz Tua – Cenário de referência

A análise dos dados em Foz Tua no cenário de referência, sem bombagem, é feita para três anos diferentes: um ano seco (1992), um ano médio (1994) e um ano húmido (1988).

As séries de Temperatura e Oxigénio Dissolvido em ano seco mostram-se na **Figura 44**. A temperatura mostra a evolução típica em Portugal com valores mais elevados no verão. Em geral os valores de oxigénio à superfície são elevados, como quase sempre acontece em massas de água que apresentam uma qualidade da água satisfatória, oscilando em consonância com os valores de temperatura, sendo este comportamento expectável dada a importância daquela variável na solubilidade do oxigénio na água. Contudo, são de registar,

também neste período, pontuais situações de sobressaturação de oxigénio associadas a períodos de maior produtividade primária.

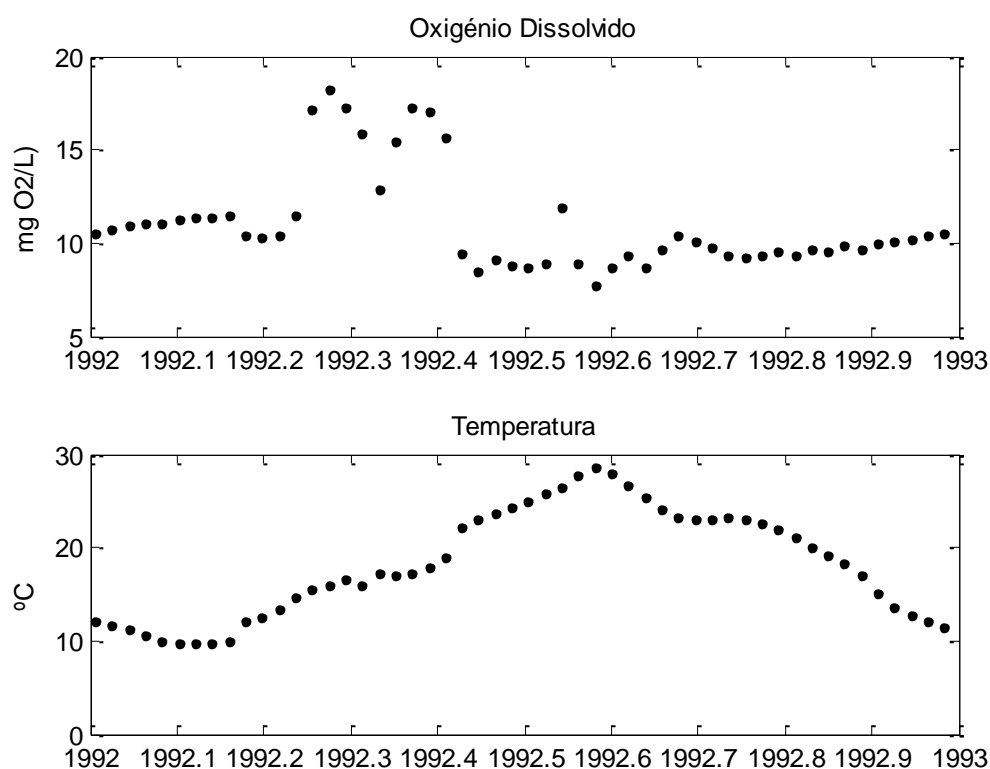


Figura 44 – Séries temporais à superfície de oxigénio dissolvido e temperatura junto à barragem em ano seco (1992)

Os perfis verticais de temperatura (ver **Figura 45**) mostram que a albufeira apresenta uma estratificação muito acentuada com início na primavera e que tende a permanecer até ao final do outono. A termoclina no verão estende-se entre a camada superficial com 1 a 2 m de espessura e os 40 m de profundidade, sendo depois progressivamente erodida com o abaixamento da temperatura nas camadas superiores.

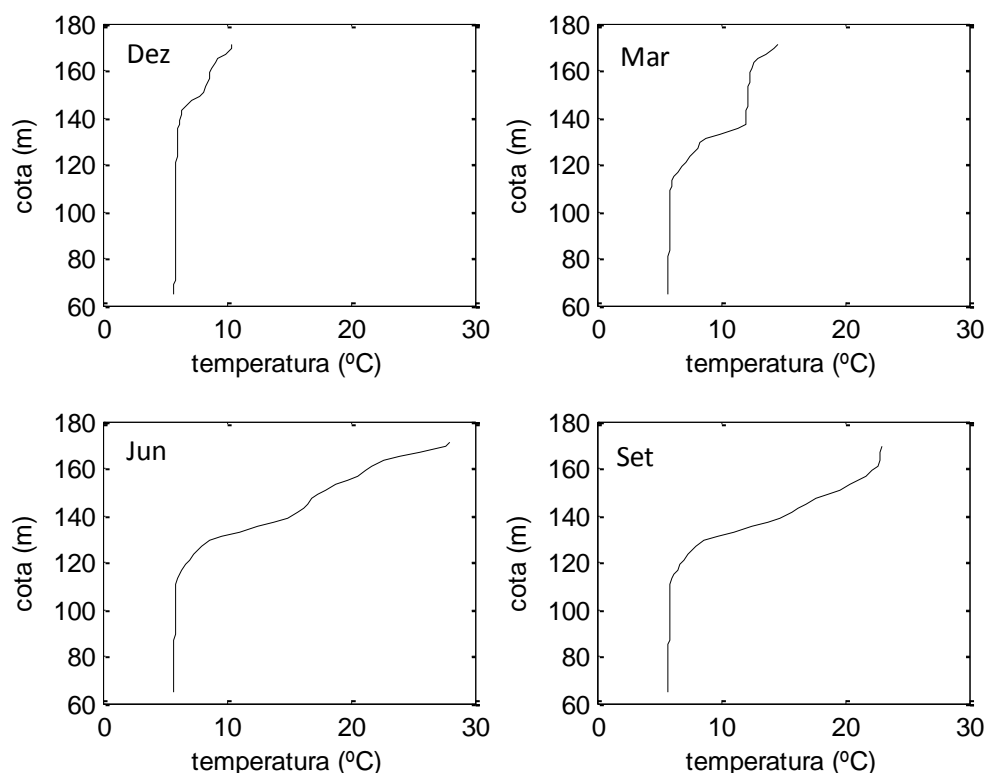


Figura 45 – Perfis de Temperatura em Dezembro, Março, Junho e Setembro junto à barragem

Em termos de oxigénio dissolvido, ocorrem mínimos no metalímnio entre o verão e o outono devidos à degradação de matéria orgânica, mas nunca se verifica anoxia (ver **Figura 46**). A anoxia resulta em geral da eutrofização da albufeira e da consequente acumulação de matéria orgânica no fundo. A degradação da mesma origina elevado consumo de oxigénio e o consequente abaixamento das concentrações. Nestas condições ocorre a libertação de ortofosfato com origem em fósforo inorgânico particulado que constitui uma fonte interna daquele componente. Tal processo não ocorre na albufeira de Foz Tua de acordo com os resultados obtidos, visto não se tratar de uma albufeira eutrofizada e dado que a degradação da matéria orgânica ocorre ainda na coluna de água.

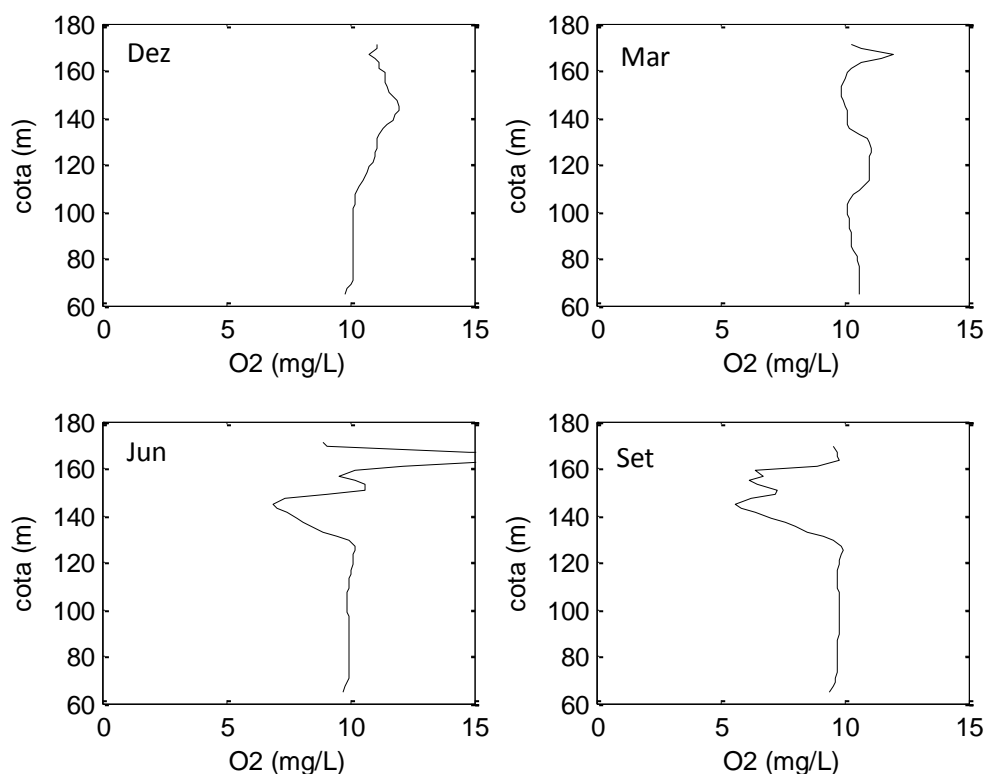


Figura 46 – Perfis de Oxigênio Dissolvido em Dezembro, Março, Junho e Setembro junto à barragem

As séries temporais de Clorofila-a, Nitrato e Fósforo Total e Ortofosfato em ano seco mostram-se na **Figura 47**. A série de Clorofila-a mostra 2 picos em abril e outubro que correspondem a florescências de clorófitas, que num cenário sem bombagem deveria ser sempre o grupo dominante na albufeira de Foz Tua. As concentrações Fósforo e Ortofosfato exibem em Ano Seco uma evolução sazonal dependente das afluições, mas que são em geral relativamente baixas. Situação idêntica se passa com o Nitrato que apresenta concentrações inferiores a 2 mg NO<sub>3</sub>/L. Nos picos de produtividade a clorofila-a não excede as 20 µg/L.

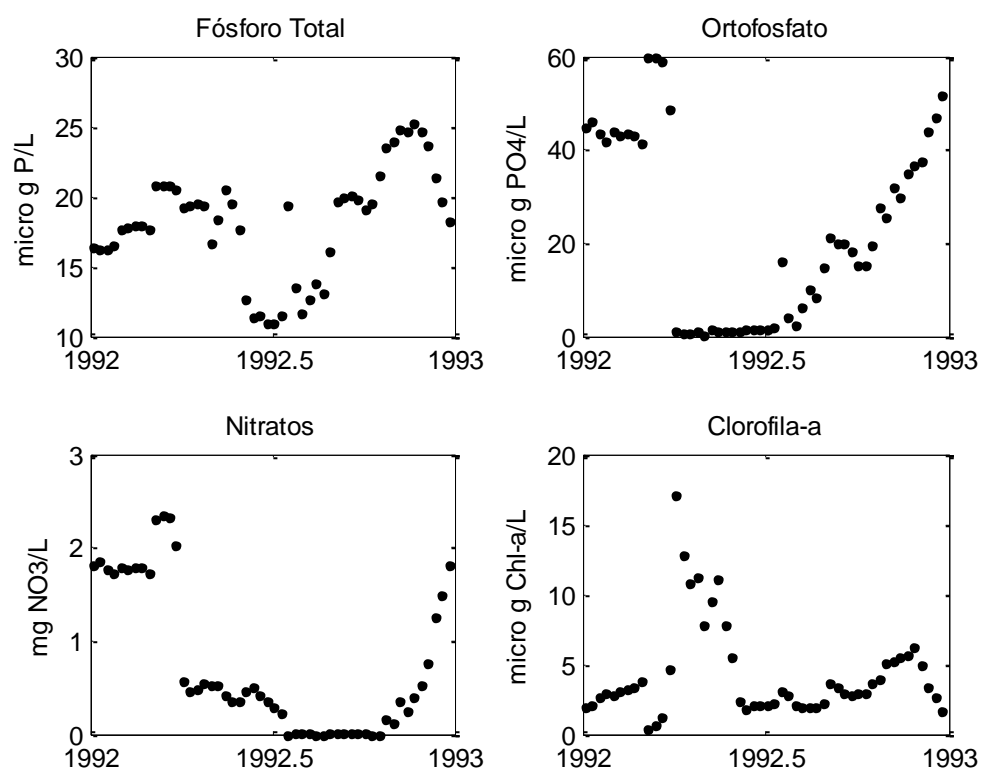


Figura 47 – Séries temporais à superfície de clorofila-a e nutrientes junto à barragem em ano seco (1992)

Os perfis verticais de Clorofila-a mostram-se na **Figura 48**, e exibem um máximo subsuperficial entre a primavera e o verão. No restante período os máximos de clorofila-a ocorrem na camada superficial. Os perfis verticais de Ortofosfato e Nitrato (**Figura 49** e **Figura 50**) apresentam máximos subsuperficiais entre o verão e o outono em consequência da remineralização da matéria orgânica (processo que está na origem da ocorrência do mínimo de oxigênio dissolvido já descrito). Não se observa um aumento da concentração de ortofosfato nas camadas de fundo o que confirma que este componente não é libertado dos sedimentos em condições de anoxia.

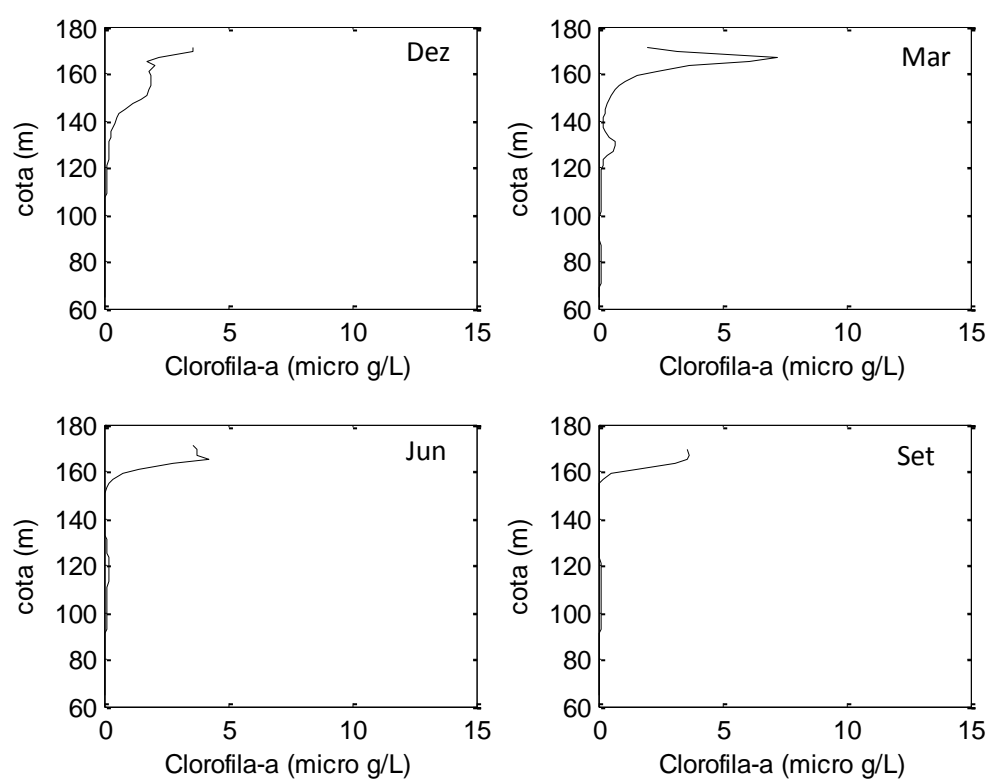


Figura 48 – Perfis de Clorofila-a em Dezembro, Março, Junho e Setembro junto à barragem



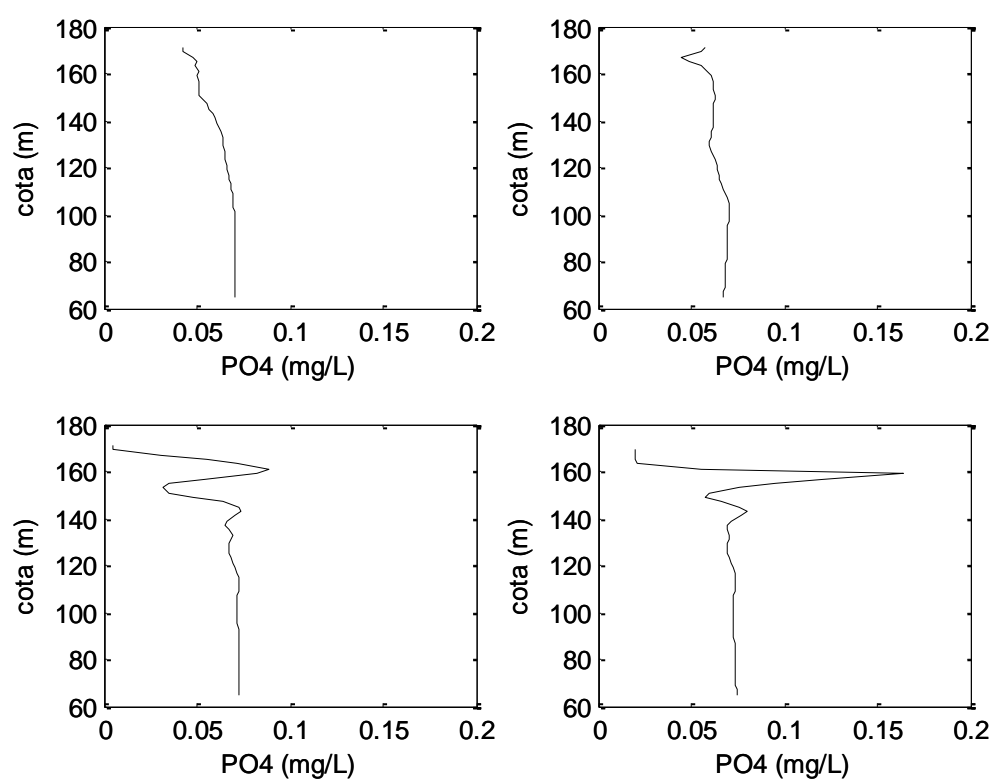


Figura 49 – Perfis de Ortofosfato em Dezembro, Março, Junho e Setembro junto à barragem

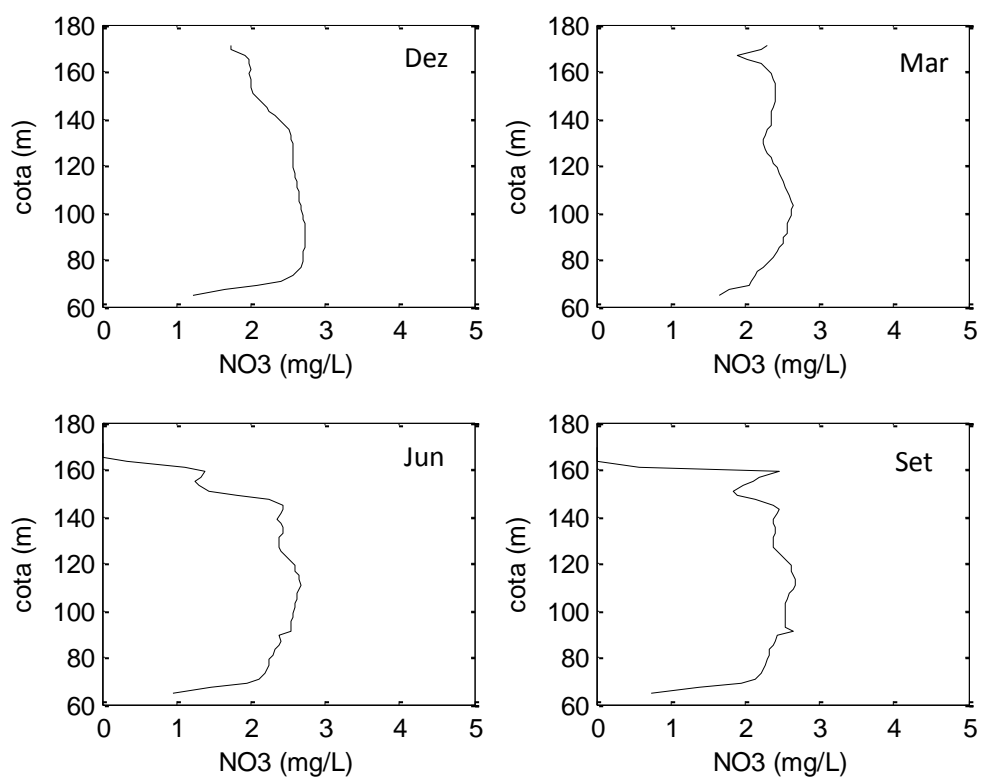


Figura 50 – Perfis de Nitrato em Dezembro, Março, Junho e Setembro junto à barragem

Em ano médio (que aqui se ilustra com o ano de 1994 – ver **Figura 51** e **Figura 52**), o cenário não é muito diferente do descrito para ano seco. A albufeira apresenta maior produtividade de verão, essencialmente porque existem mais nutrientes disponíveis comparativamente com o ano seco.

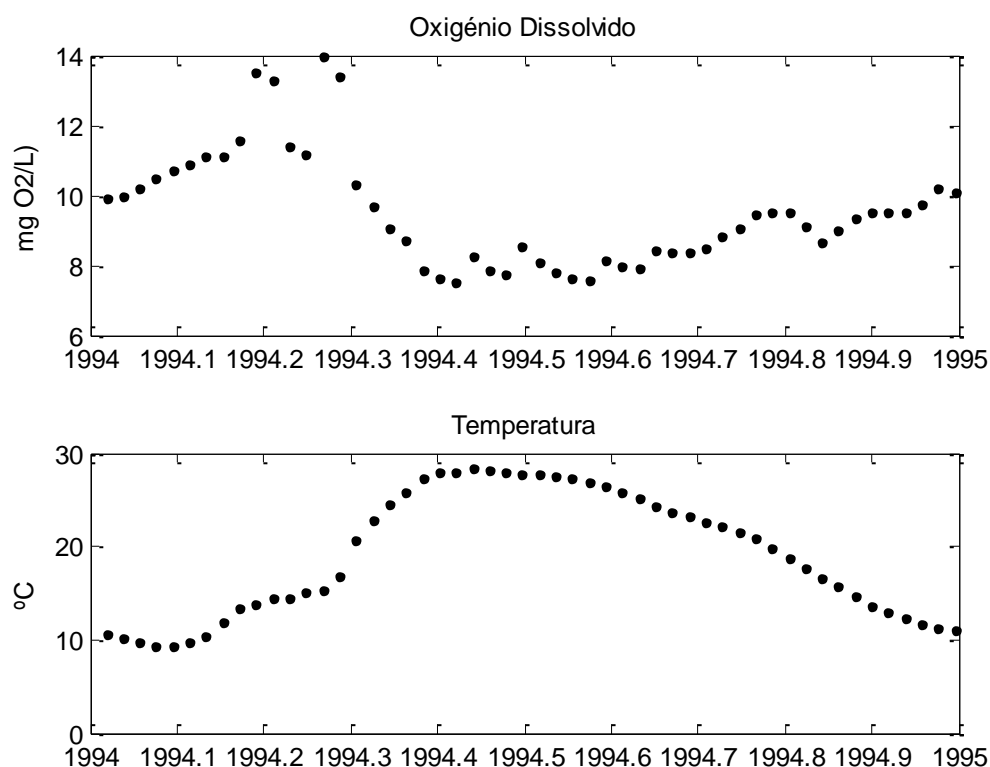


Figura 51 – Séries temporais à superfície de oxigénio dissolvido e temperatura junto à barragem em ano médio (1994)

Os níveis simulados, quer de nutrientes quer de biomassa, são semelhantes aos obtidos em ano seco e continuam essencialmente dependentes da forma como ocorrem as afluências em termos de evolução temporal. A grande profundidade da albufeira não deixa transparecer qualquer perturbação que possa ocorrer junto ao fundo, por exemplo em termos de concentração de fósforo dissolvido por efeito de anoxia.

Os resultados para ano húmido apresentam algumas diferenças, mas a classificação não varia substancialmente (ver **Figura 53** e **Figura 54**). Em particular a produtividade da albufeira não é particularmente afetada, exibindo um padrão muito semelhante ao de ano seco.

Um resumo dos valores médios anuais das concentrações simuladas mostra-se no **Quadro 27**.

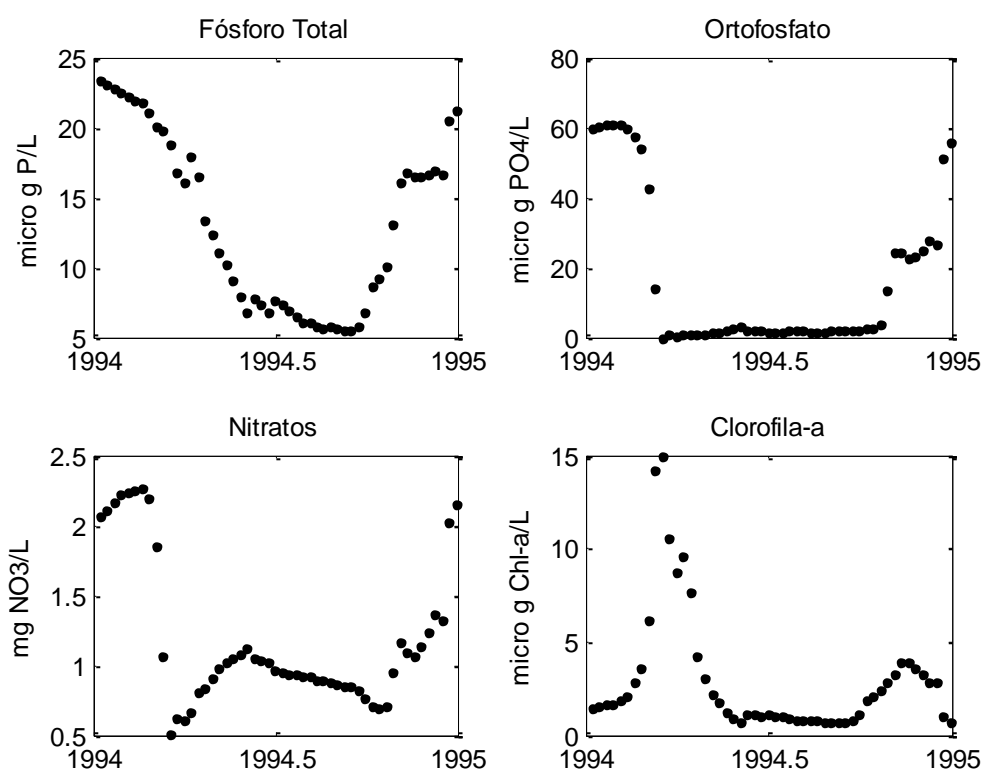


Figura 52 – Séries temporais de clorofila-a e nutrientes à superfície junto à barragem em ano médio (1994)

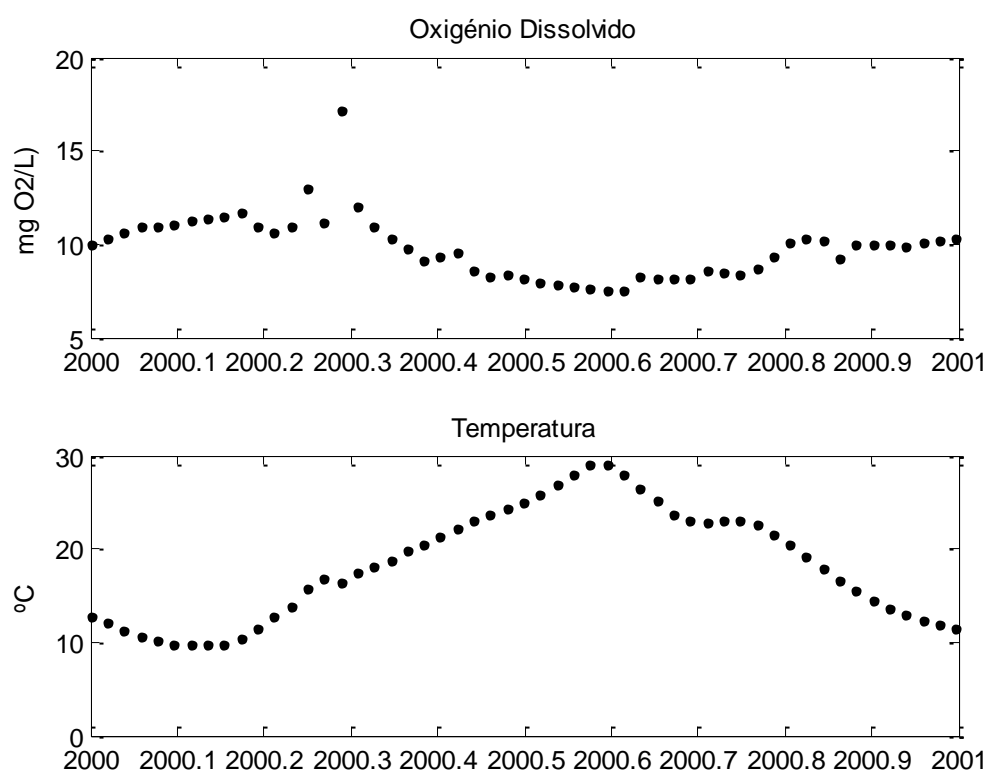


Figura 53 – Séries temporais à superfície de oxigénio dissolvido e temperatura junto à barragem em ano húmido (1997)

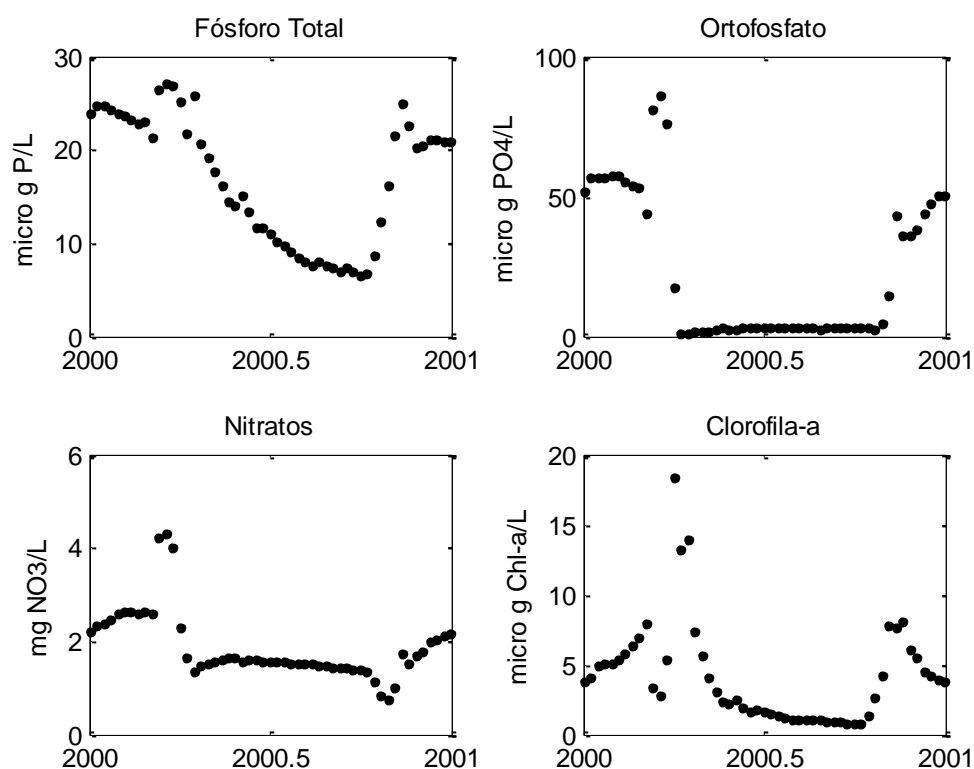


Figura 54 – Séries temporais à superfície de nutrientes e clorofila-a junto à barragem em ano húmido (1997)

Quadro 27 – Concentrações médias anuais de nutrientes e clorofila-a (também calculada de verão, visto que se trata do valor relevante para as classificações quer quanto ao estado trófico, quer quanto ao Bom potencial ecológico)

	Foz Tua Referência		
	1992 Ano Seco	1994 Ano Médio	2000 Ano Húmido
Chl-a ( $\mu\text{g/L}$ )	5,3	3,7	4,1
P Total ( $\mu\text{g P/L}$ )	22,8	16,5	17,0
PO <sub>4</sub> ( $\mu\text{gPO}_4\text{/L}$ )	22,9	16,9	23,5
NO <sub>3</sub> (mg NO <sub>3</sub> /L)	0,7	1,2	1,9
Oxigénio (mg/L)	11	9,5	9,8
Chl-a verão ( $\mu\text{g/L}$ )	2,5	7,9	5,2

Em suma, a albufeira apresenta em geral boa qualidade, quer no que respeita à concentração de nutrientes quer à biomassa. As variações interanuais são provocadas essencialmente por variações hidrológicas.

### 3.7. Conclusões

Neste capítulo apresentaram-se as simulações dos cenários de referência para a albufeira da Régua e para a albufeira de Foz Tua. Nestes cenários, as albufeiras foram simuladas separadamente, isto é, sem qualquer interação entre elas.

A albufeira da Régua foi simulada utilizando as atuais aflúências, provenientes dos rios Douro, Tua, Távora e Pinhão (os principais afluentes). As cargas afluentes à albufeira da Régua foram estimadas com base em dados de monitorização dos respetivos rios bem como dos caudais. Os resultados obtidos na simulação foram comparados com dados de monitorização fornecidos pela EDP e mostram uma concordância muito boa que permite concluir sobre a validade do modelo utilizado e da respetiva parametrização escolhida. A albufeira apresenta com frequência concentrações de clorofila-a que permitem classificá-la como eutrófica.

Relativamente a Foz Tua, as simulações do cenário de referência evidenciam que a albufeira teria boa qualidade, num cenário de exploração sem bombagem a partir da albufeira da Régua, não ultrapassando os limites para que pudesse ser classificada como mesotrófica e com Bom Potencial Ecológico. Deve notar-se que o cenário considerado, embora não sendo o cenário mais provável de exploração da albufeira, serve como termo de comparação para avaliar os efeitos da bombagem de água da albufeira da régua.





## 4. Modelação conjunta das albufeiras da Régua e de Foz Tua

A modelação conjunta das albufeiras da Régua e de Foz Tua tem como objetivo obter o cenário da simulação mais aproximado da situação real prevista, uma vez que são considerados os cenários de referência validados para as duas albufeiras (**Capítulo 3**) e considerado o regime de exploração previsto para a albufeira de Foz Tua. Com a simulação deste cenário, comparativamente com o cenário sem bombagem (ou seja, o cenário de referência para as duas albufeiras), será possível perceber o modo como a exploração da albufeira interferirá com as duas albufeiras, ou seja, o efeito da turbinagem de água de Foz Tua para a Régua e da bombagem da Régua para Foz Tua.

Seguidamente apresentam-se os resultados da simulação conjunta das albufeiras da Régua e de Foz Tua, bem como a análise comparativa da estrutura vertical em Foz Tua entre as situações com e sem bombagem.

### 4.1. Simulação conjunta das albufeiras da Régua e de Foz Tua

Tendo por base as condições definidas no **Capítulo 3**, foi efetuada a simulação conjunta das albufeiras da Régua e de Foz Tua.

No que se refere à albufeira da Régua, os resultados da simulação permitiram concluir que os impactes da descarga na albufeira da Régua de água proveniente da albufeira de Foz Tua não são significativos, em todos os indicadores analisados, sendo apenas relevantes no troço do rio Tua imediatamente a jusante da Barragem de Foz Tua (ver **Figura 55**, **Figura 56** e **Figura 57**). Os tempos de residência da água na albufeira da Régua são ligeiramente reduzidos no cenário com bombagem, comparativamente com o cenário de referência, mas os restantes parâmetros não sofrem alterações significativas.

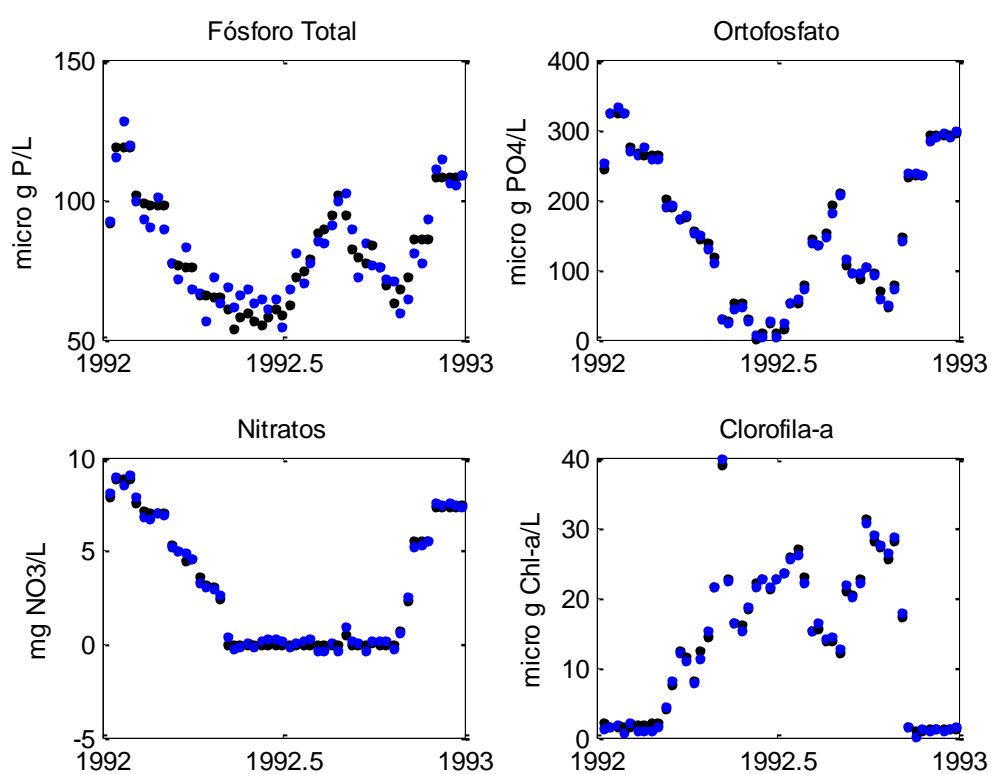


Figura 55 – Séries temporais à superfície de nutrientes e clorofila-a junto à barragem em ano seco (1992). A azul resultados da simulação com bombagem e a preto sem bombagem

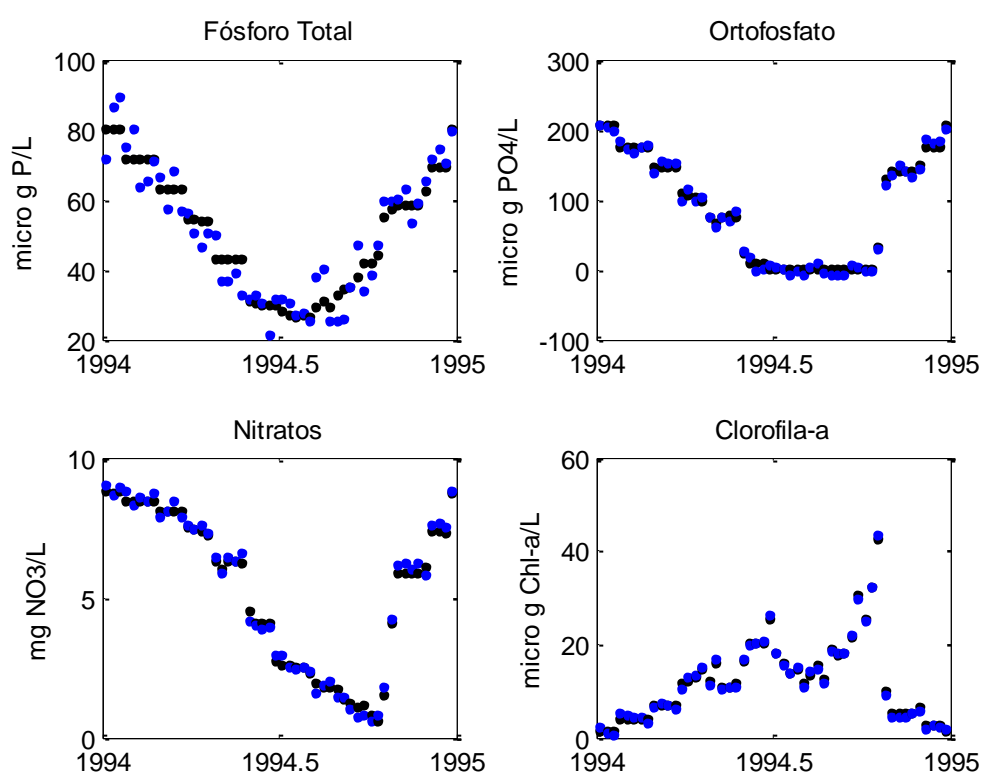


Figura 56 – Séries temporais à superfície de nutrientes e clorofila-a junto à barragem em ano médio (1994).

A azul resultados da simulação com bombagem e a preto sem bombagem

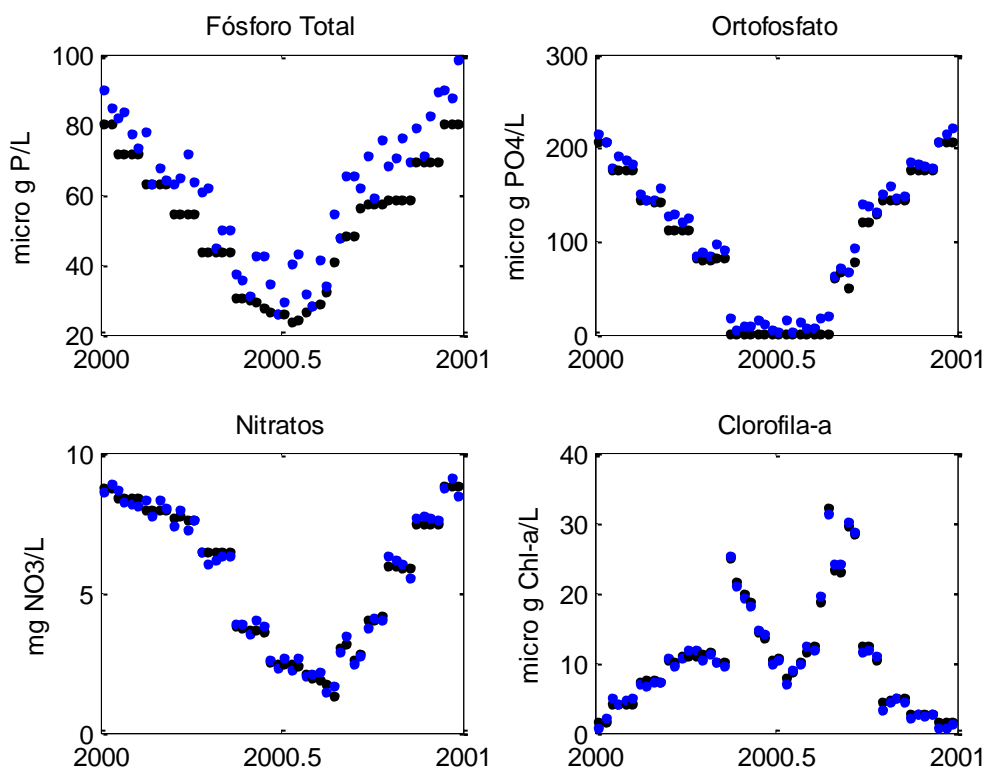


Figura 57 – Séries temporais à superfície de nutrientes e clorofila-a junto à barragem em ano húmido (2000).

A azul resultados da simulação com bombagem e a preto sem bombagem

Os resultados obtidos são apresentados de forma resumida nas figuras seguintes onde se procede igualmente ao enquadramento dos mesmos em função dos critérios de qualidade da água relevantes que se encontram em vigor.

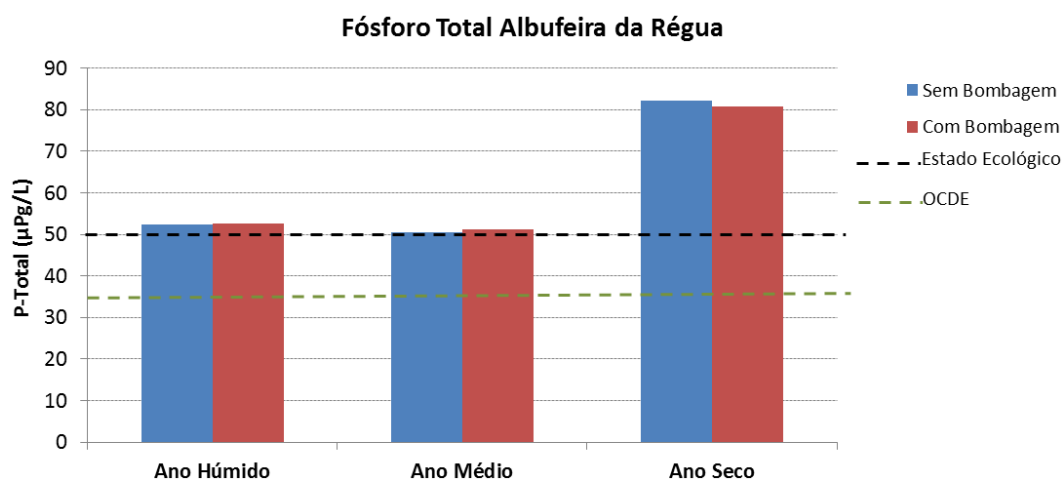


Figura 58 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira da Régua: P-Total (mgPO<sub>4</sub>/L). A tracejado encontram-se representados os limites associados ao critério de classificação para o potencial ecológico e para o estado trófico (OCDE)

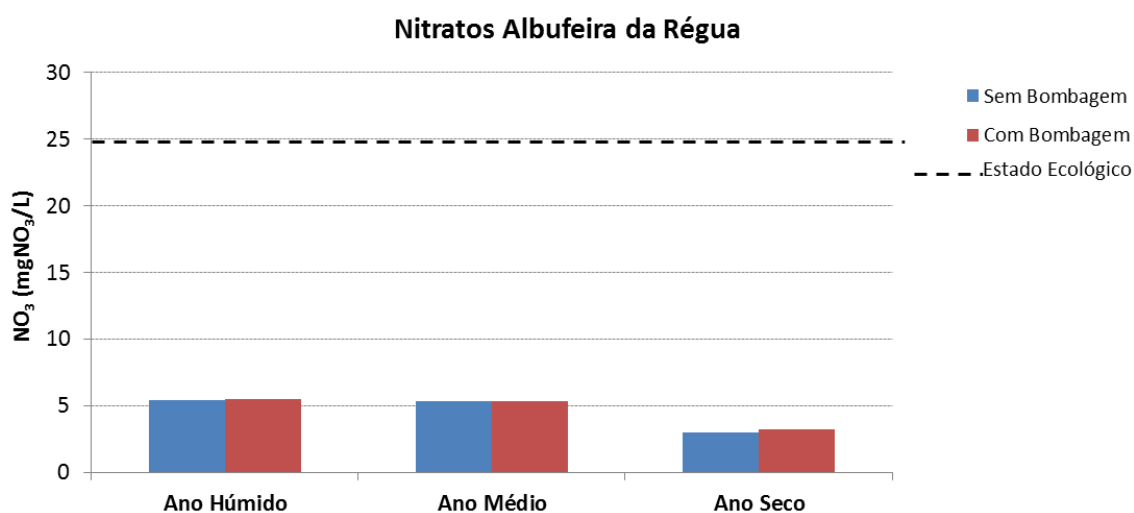


Figura 59 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira da Régua: Nitrato (mgNO<sub>3</sub>/L). A tracejado encontram-se representados os limites associados ao critério de classificação para o potencial ecológico

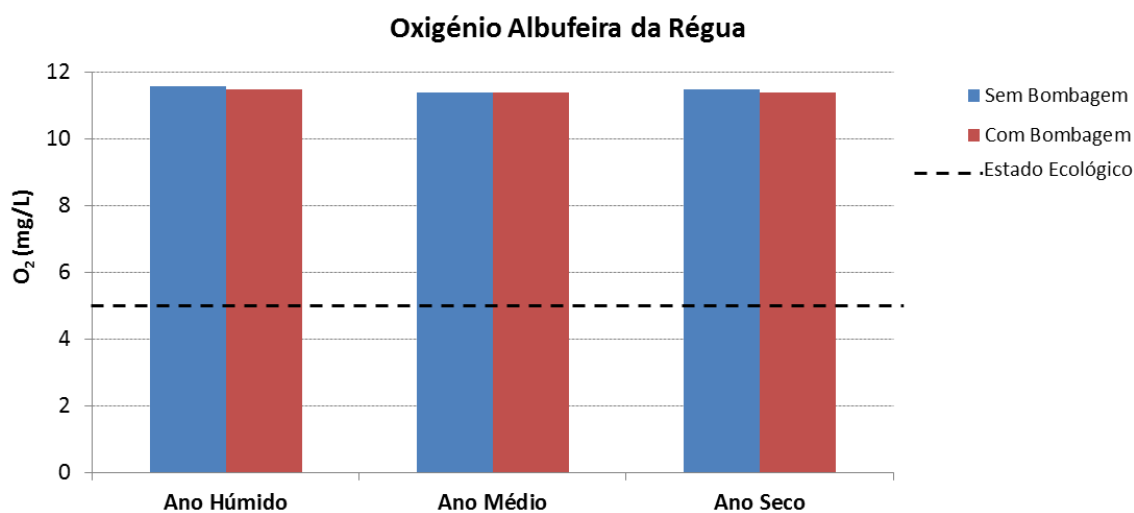


Figura 60 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira da Régua: Oxigénio Dissolvido. A tracejado encontram-se representados os limites associados ao critério de classificação para o potencial ecológico

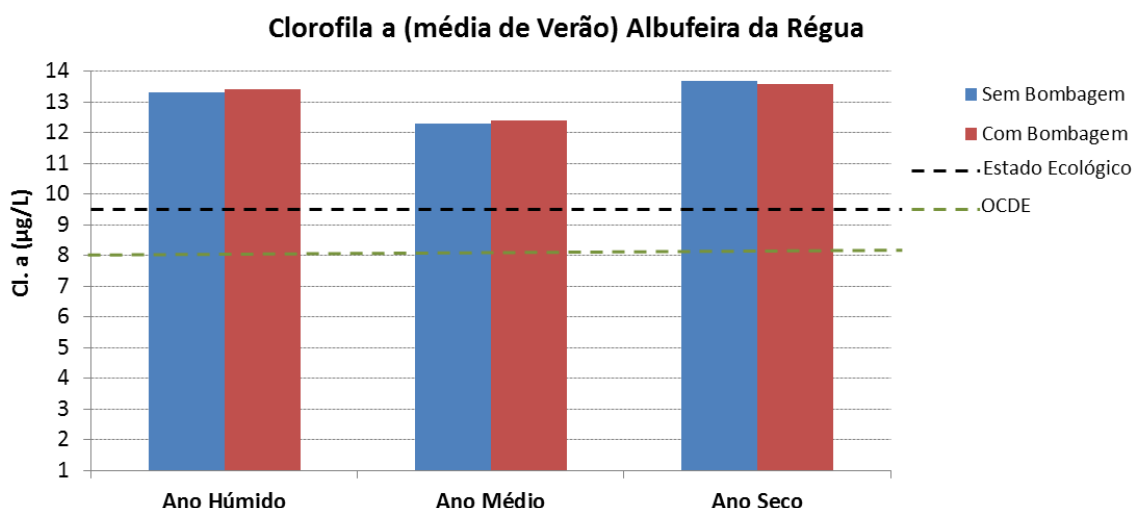


Figura 61 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira da Régua: Clorofila-a. A tracejado encontram-se representados os limites associados ao critério de classificação para o potencial ecológico e para o estado trófico (OCDE)

No que se refere à albufeira de Foz Tua o cenário é distinto, tendo os resultados da simulação mostrado que ocorrem algumas alterações que são seguidamente descritas e analisadas.

A turbinagem e a bombagem ocorrerão entre a cota 139 e a cota 150, isto é, entre 23 e 34 m de profundidade, considerando o NPA da albufeira de Foz Tua. Embora uma análise simplista levasse a considerar que a bombagem de água a partir da albufeira da Régua deveria ter um efeito significativo na albufeira de Foz Tua (porque as concentrações de nutrientes e matéria orgânica na Régua são mais elevadas), globalmente, em termos de classificação da massa de água, não ocorrerão alterações profundas comparativamente com o cenário sem bombagem (ver **Figura 62** a **Figura 67**). Importa no entanto perceber as causas de tal inalteração. Para tal foi desenvolvido um estudo detalhado da estrutura vertical da albufeira de Foz Tua na zona próxima da barragem, que adiante se apresenta.

De facto, em ano seco, considerando as alterações em termos de concentrações superficiais de todos os parâmetros, os impactes da bombagem serão reduzidos visto que as concentrações médias obtidas são semelhantes em ambas as simulações. O mesmo não acontece em ano médio e ano húmido, onde as concentrações médias de clorofila-a à superfície podem duplicar (mantendo-se no entanto abaixo do limiar de 9,5 µg/L) relativamente ao cenário de referência. Igualmente, as concentrações de fósforo (quer na forma de ortofosfato, quer no que respeita ao fósforo total) sofrerão aumentos substanciais que se podem comprovar no **Quadro 28** por comparação com o **Quadro 27**, onde constam os valores para o cenário de

referência. No **Capítulo 6** é feita uma comparação detalhada entre os valores obtidos para diferentes cenários com e sem bombagem e para diferentes cargas afluentes a Foz Tua. Apresentam-se nesse capítulo diversas figuras que auxiliam a comparação.

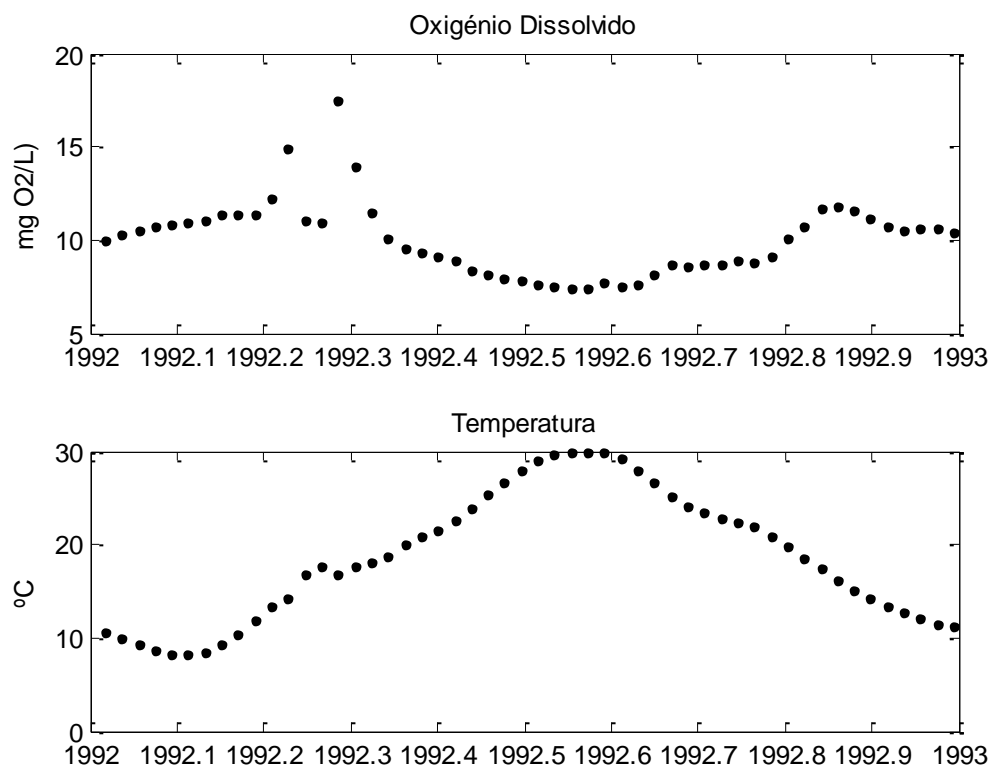


Figura 62 – Séries temporais à superfície de oxigénio dissolvido e temperatura junto à barragem em ano seco (1992)

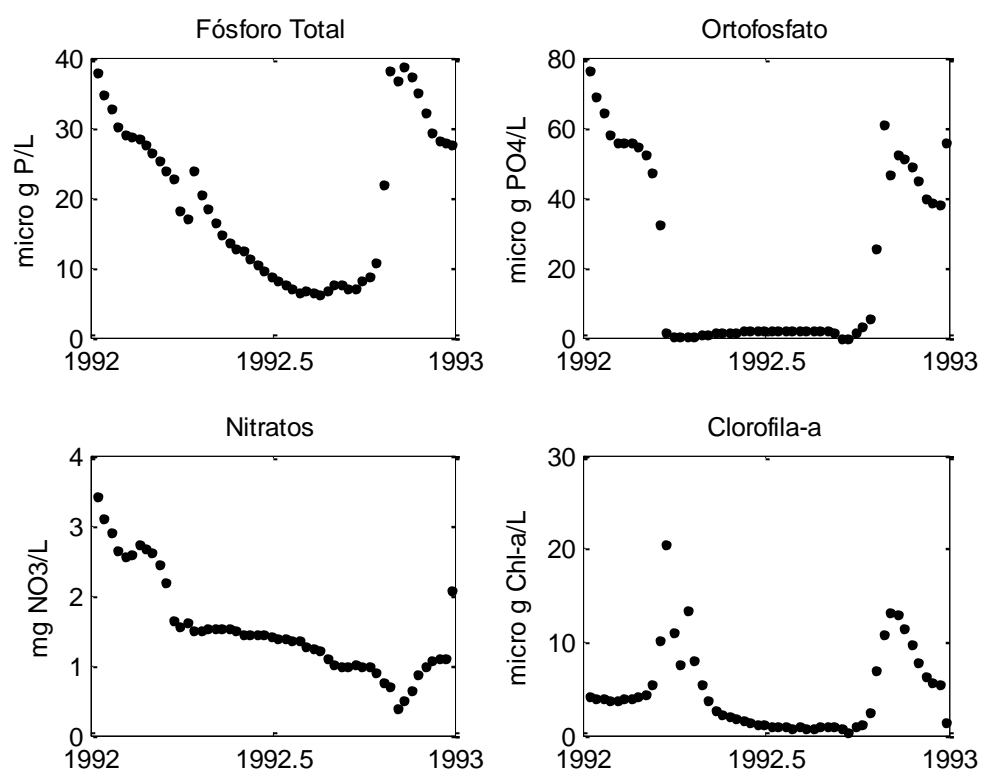


Figura 63 – Séries temporais à superfície de nutrientes e clorofila-a junto à barragem em ano seco (1992)



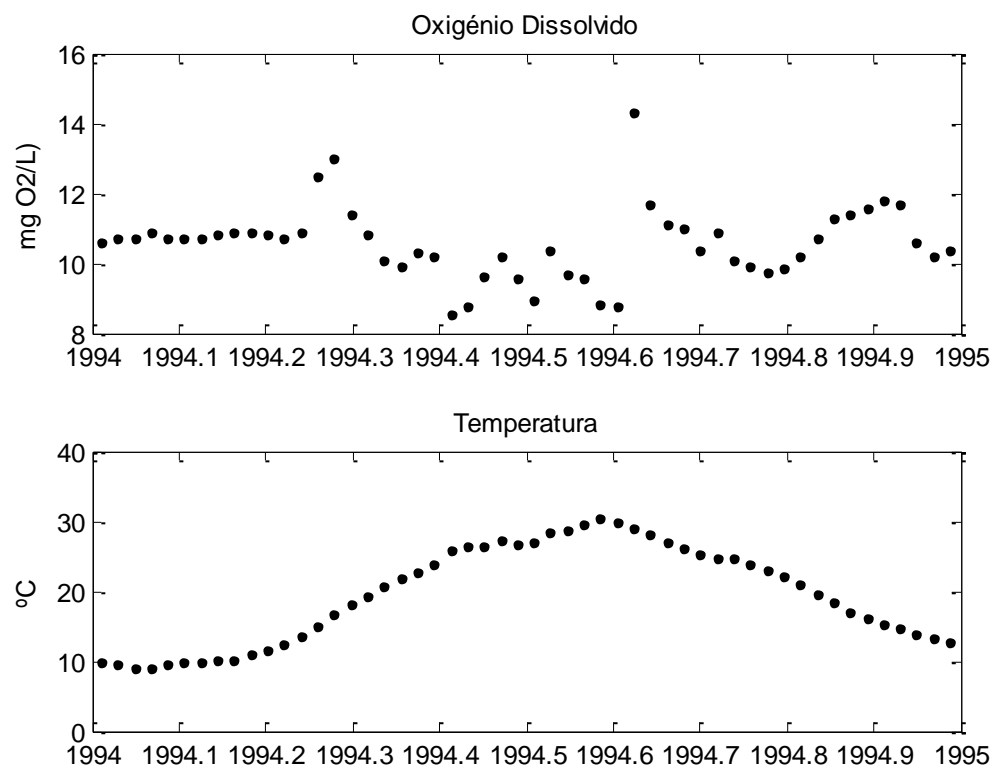


Figura 64 – Séries temporais à superfície de oxigénio dissolvido e temperatura junto à barragem em ano médio (1994)

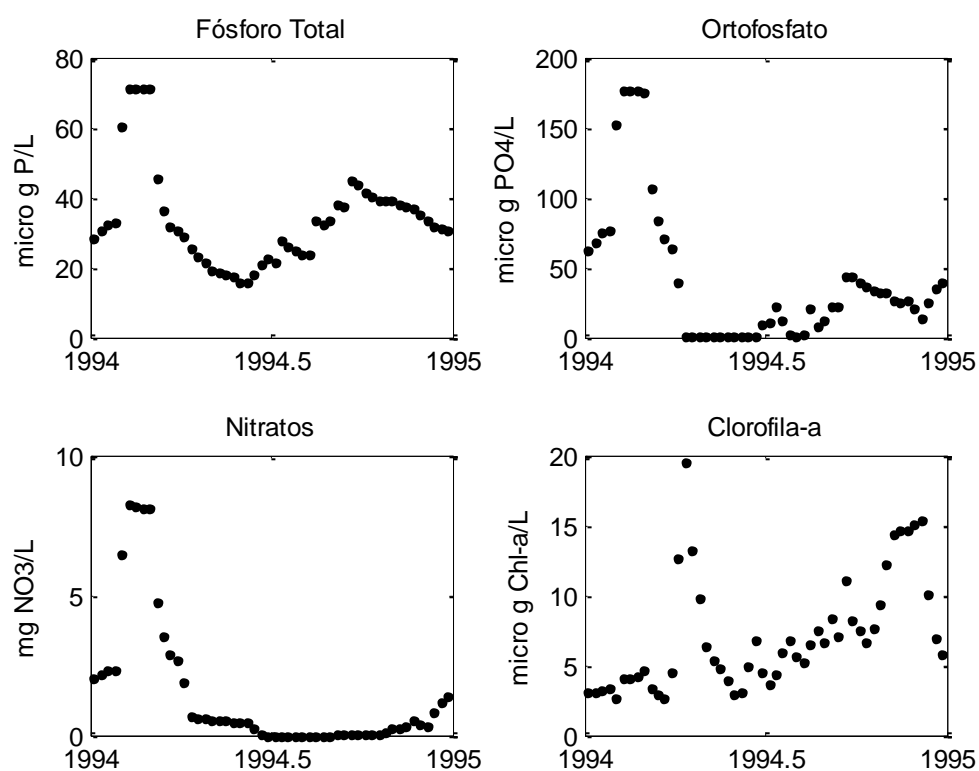


Figura 65 – Séries temporais à superfície de nutrientes e clorofila-a junto à barragem em ano médio (1994)

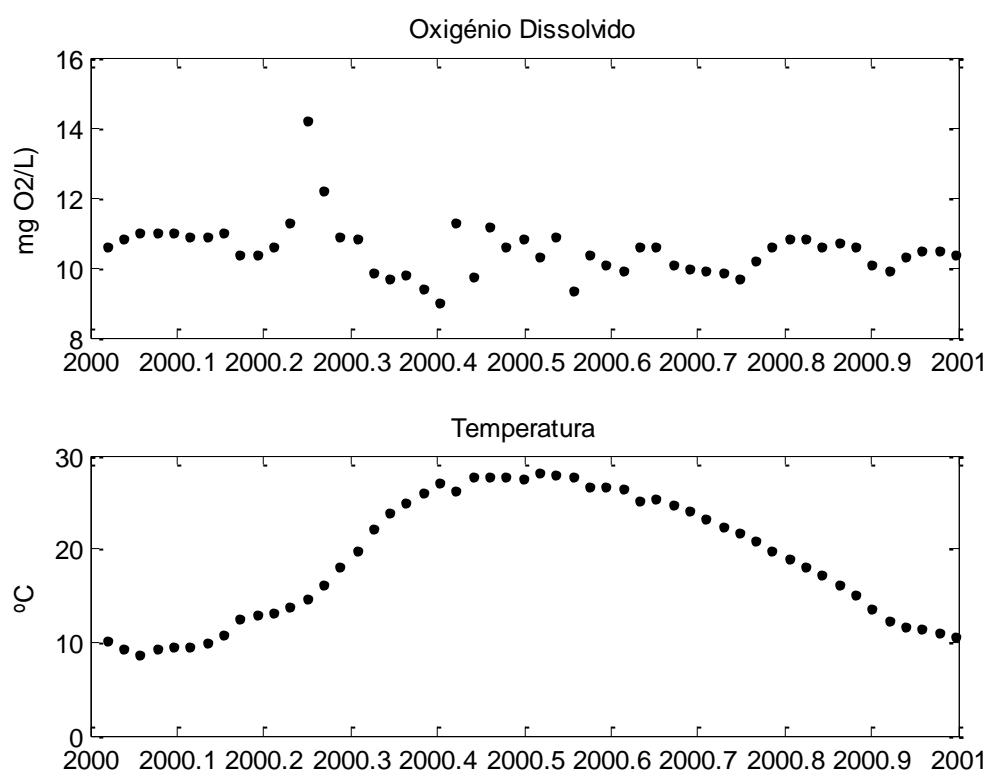


Figura 66 – Séries temporais à superfície de oxigénio dissolvido e temperatura junto à barragem em ano húmido (1991)

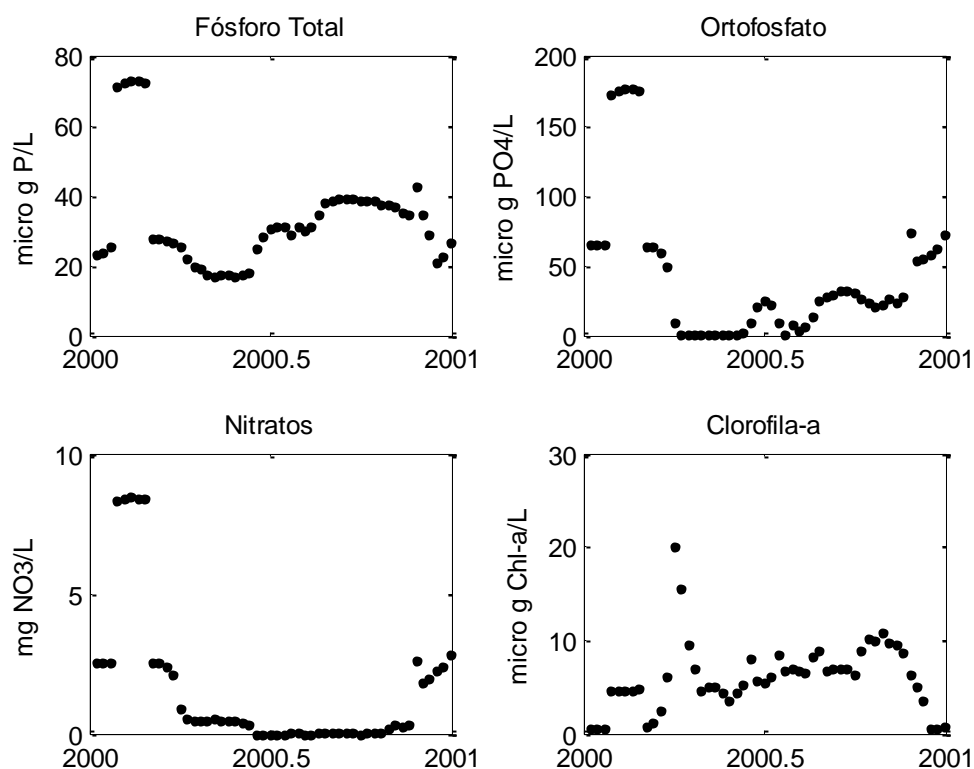


Figura 67 – Séries temporais à superfície de nutrientes e clorofila-a junto à barragem em ano húmido (1991)

Quadro 28 – Concentrações médias anuais na água superficial de nutrientes e clorofila-a (também calculada de verão, visto que se trata do valor relevante para as classificações quer quanto ao estado trófico, quer quanto ao Bom potencial ecológico)

	Foz Tua com bombagem - referência		
	1992 Ano Seco	1994 Ano Médio	2000 Ano Húmido
Chl-a (µg/L)	4,7	7,13	6,0
P Total (µgP/L)	19,6	33,9	33,1
PO <sub>4</sub> (µgPO <sub>4</sub> /L)	22,5	41	41,7
NO <sub>3</sub> (mg NO <sub>3</sub> /L)	1,5	1,4	1,5
Oxigénio (mg/L)	10	10,6	10,5
Chl-a verão (µg/L)	2,4	7,1	6,7

## 4.2. Análise comparativa da estrutura vertical em Foz Tua

Com o intuito de compreender o efeito dos processos físicos na qualidade da água compara-se a estrutura vertical da albufeira com e sem bombagem. A mistura vertical na albufeira será essencialmente função de 3 processos: trocas de calor com a atmosfera (e.g. radiação solar), turbulência induzida pelo vento e turbulência induzida pelo jacto da bombagem.

As trocas de calor com a atmosfera tendem a estabilizar e estratificar a coluna de água quando o balanço é positivo, isto é, quando há ganho de energia na albufeira. Por outro lado, em períodos em que a albufeira perde energia por perda de calor à superfície, a temperatura superficial tende a ser inferior à das camadas subjacentes, originando turbulência por convecção (é o que acontece em grande escala no outono, nos períodos designados por *turn-over*, ou em menor escala durante a noite quando há forte arrefecimento atmosférico).

O vento fornece quantidade de movimento provocando um aumento de velocidade à superfície, que por sua vez provoca mistura vertical naquilo que se designa “turbulência por efeito de corte”. A existência de um jacto de água para o interior da albufeira, no processo de bombagem, gera igualmente turbulência por efeito de corte.

A bombagem numa albufeira induz a ocorrência de dois efeitos hidrodinâmicos que resultam da geração de turbulência adicional no meio: por um lado, o jacto de água (em particular com os valores previstos para Foz Tua) tende a gerar mistura vertical por efeito de corte; por outro lado, a água bombada, quando introduzida em profundidade, poderá não estar em equilíbrio estático com a coluna de água (tipicamente a água bombada será mais quente que a água circundante). Nesse caso, gera-se convecção vertical que dá origem a mistura.

Enquanto os processos ligados às trocas de calor com a atmosfera e ao vento se distribuem uniformemente pela superfície da albufeira, o efeito do jacto da bombagem é pontual. Da aplicação do modelo CE-QUAL-W2 podem analisar-se os perfis verticais de temperatura (ver **Figura 68**) e verificar que modificações ocorrem na estratificação em períodos semelhantes. Deve ter-se em consideração que a bombagem deverá ser feita numa estrutura centrada à cota de 144,5 m e com base na cota 139 m (i.e. a estrutura estende-se entre a cota 139 e 150). Dos perfis apresentados resultam as seguintes conclusões:

- A água bombada, por ter uma temperatura superior à da água circundante, provoca um aumento substancial da temperatura entre as cotas 135 e 150 (de verão) – ver **Figura 68**;
- Além disso gera-se uma camada bem misturada nessa zona, onde existiria em condições sem bombagem uma termoclina (região com gradiente de temperatura elevado) acentuada. Por outras palavras, a termoclina existente entre a camada superficial localizada entre a cota 162 e

a cota 140 é parcialmente erodida, gerando-se aí uma camada bem misturada cuja diferença de temperatura relativamente à camada superficial é menor. Ambos os factos (erosão da termoclina e menor gradiente de temperatura) favorecem a mistura vertical no caso em que existe bombagem.

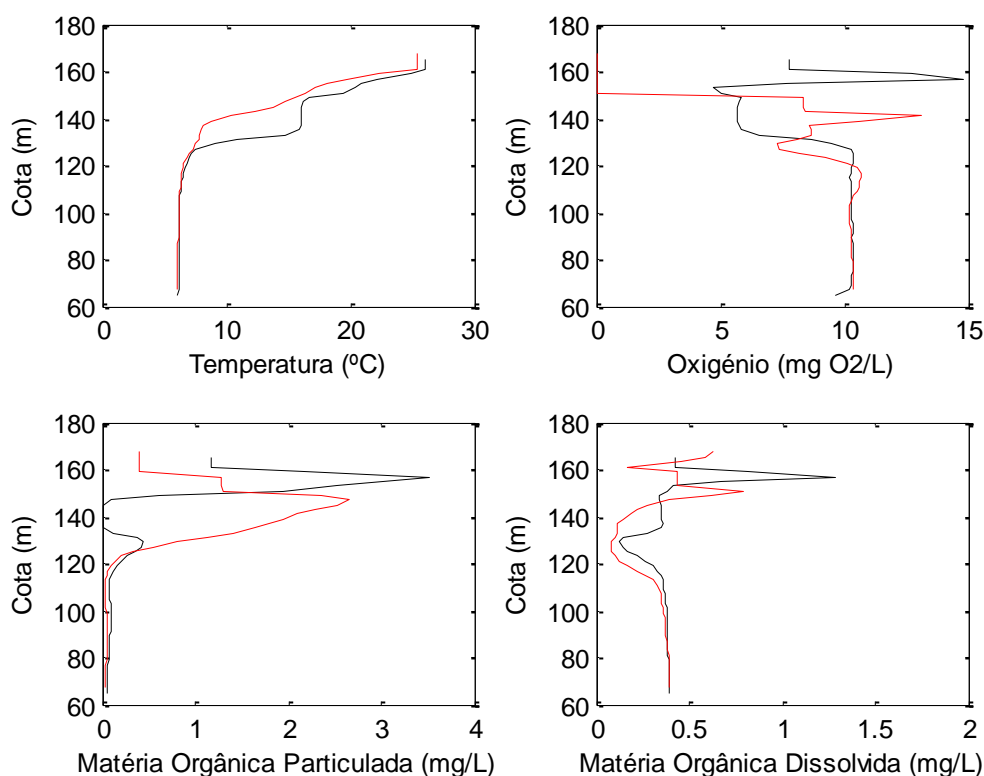


Figura 68 – Perfis de Temperatura, Oxigénio Dissolvido e Matéria Orgânica de verão para as simulações considerando a bombagem (preto) e num cenário apenas com turbinagem (vermelho)

Em consequência do descrito, observa-se nos perfis de nutrientes um aumento da concentração nas cotas a que ocorre a adução da bombagem que não afeta diretamente a camada superficial e, consequentemente, a produtividade da albufeira nessas cotas e nesse período de estratificação térmica (ver **Figura 69** e **Figura 70**). Deve no entanto notar-se que a albufeira é enriquecida em nutrientes e, portanto, quer a massa de fósforo, quer a massa de azoto, aumenta no cenário de bombagem. Esse aumento reflete-se num aumento da biomassa nas camadas sub-superficiais. Assim, pode afirmar-se que a camada superficial da albufeira é “protegida” do efeito de bombagem por dois fatores: (i) a termoclina superficial remanescente que impede a difusão do excesso de nutrientes até à superfície e (ii) a mistura vertical que ocorre abaixo dessa termoclina superficial que decorre do próprio jacto da bombagem e que provoca uma diminuição da concentração relativamente às características da água bombada.

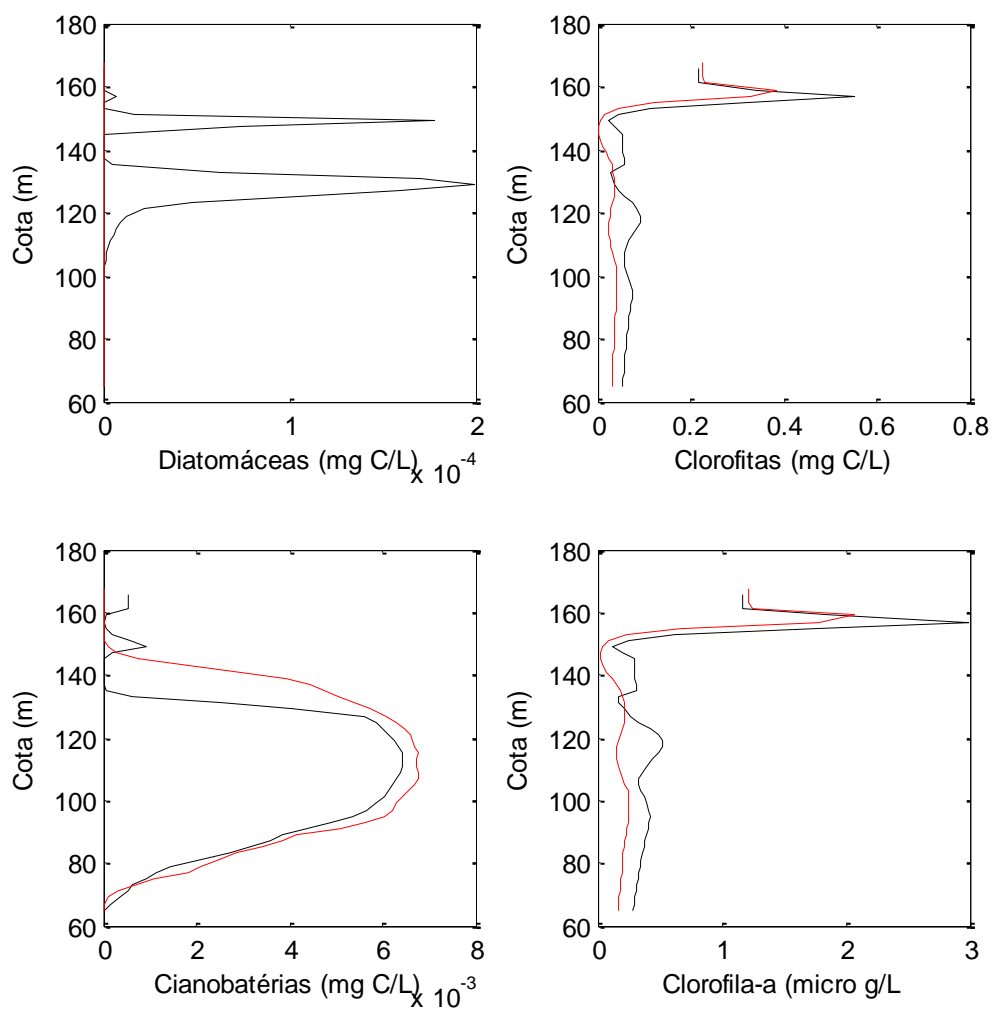


Figura 69 – Perfis verticais de biomassa no verão para as simulações considerando a bombagem (preto) e num cenário apenas com turbinagem (vermelho)

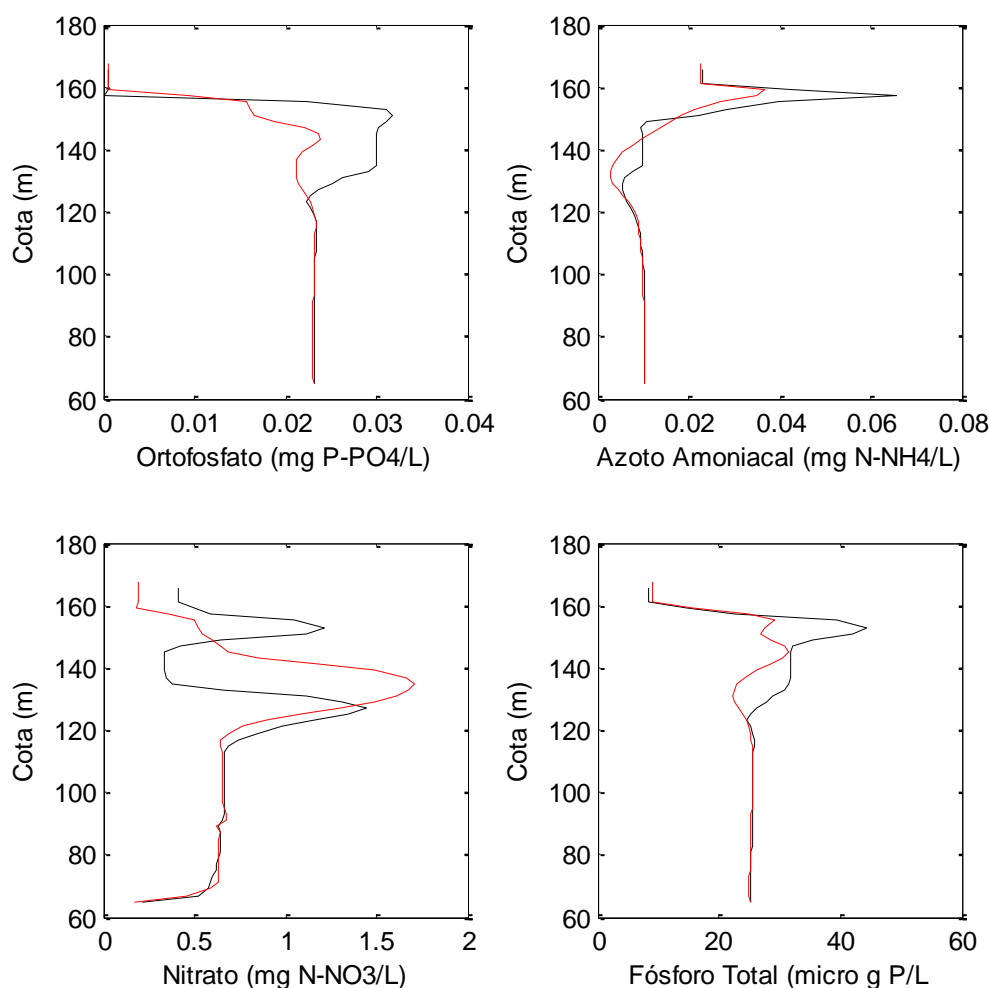


Figura 70 – Perfis verticais de nutrientes no verão para as simulações considerando a bombagem (preto) e num cenário apenas com turbinagem (vermelho)

Em situações em que a mistura vertical seja ampliada, quer porque aumenta a turbulência devida ao vento, quer porque existe convecção vertical induzida pelo arrefecimento das camadas superficiais, ou ainda pelo efeito conjugado dos dois fenómenos, é de esperar que a concentração de biomassa à superfície aumente. Nestas condições, os nutrientes “injetados” na albufeira pela bombagem, poderão difundir-se até à superfície e isso deverá ter como reflexo uma maior produtividade. Tal efeito é ilustrado na sequência de figuras (**Figura 71**, **Figura 72** e **Figura 73**) onde se representam os perfis verticais no início de dezembro. Em maior escala, este efeito deve fazer-se sentir em anos húmidos, comparativamente com anos médios ou secos, assim como em anos médios, comparativamente com anos secos. Isso explica o maior impacte detetado nas concentrações médias anuais em anos médios e anos húmidos, onde a mistura vertical deverá ser mais vigorosa. Deve salvaguardar-se a hipótese de existir um enriquecimento cumulativo da albufeira, isto é, de a



massa de nutrientes presente na albufeira aumentar progressivamente com o tempo. Esse aumento verificar-se-ia abaixo da zona eufótica e poderia, ocasionalmente, em períodos de mistura vigorosa, conduzir a um aumento das concentrações nas camadas superficiais. No período simulado (15 anos) tal não se verifica o que em parte deverá ser explicado pela elevada dinâmica do sistema. O aumento de carga originado pela bombagem de água a partir da albufeira da Régua é compensado pelo aumento da exportação de nutrientes com a turbinagem (deve notar-se que os volumes descarregados neste cenário de acoplamento das albufeiras é superior ao volume descarregado no cenário em que a turbinagem não existe).

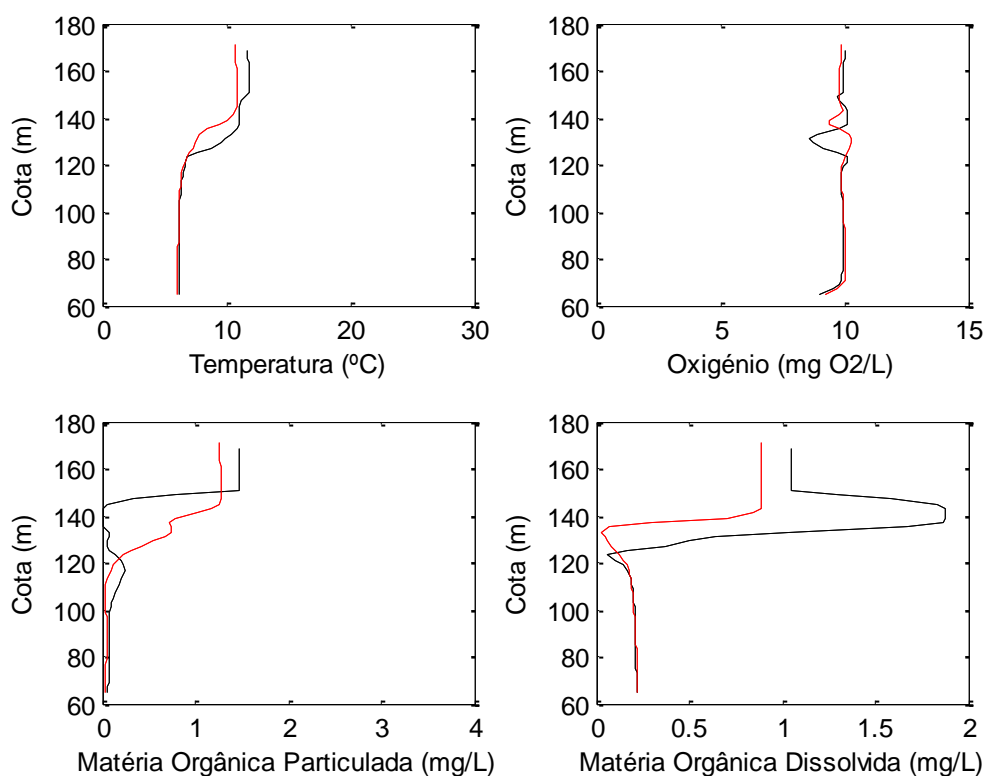


Figura 71 – Perfis de Temperatura, Oxigénio Dissolvido e Matéria Orgânica no início de dezembro para as simulações considerando a bombagem (preto) e num cenário apenas com turbinagem (vermelho)

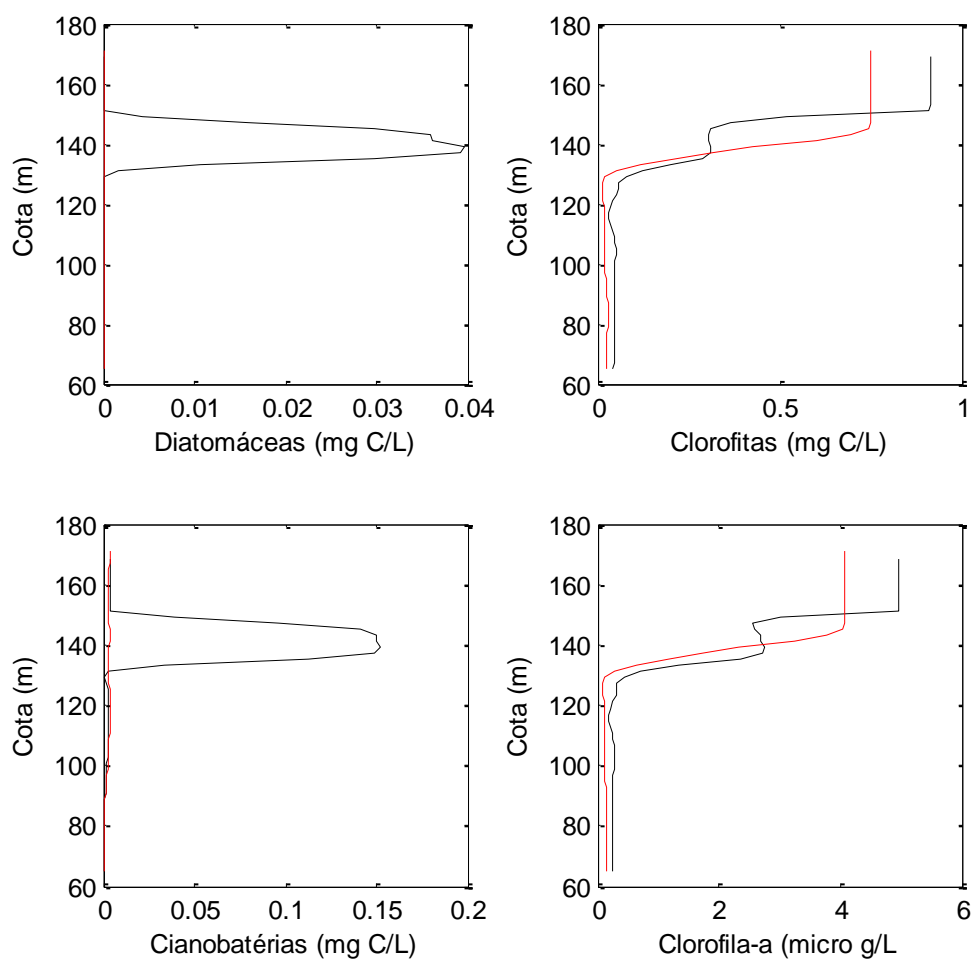


Figura 72 – Perfis verticais de biomassa no início de dezembro para as simulações considerando a bombagem (preto) e num cenário apenas com turbinagem (vermelho)

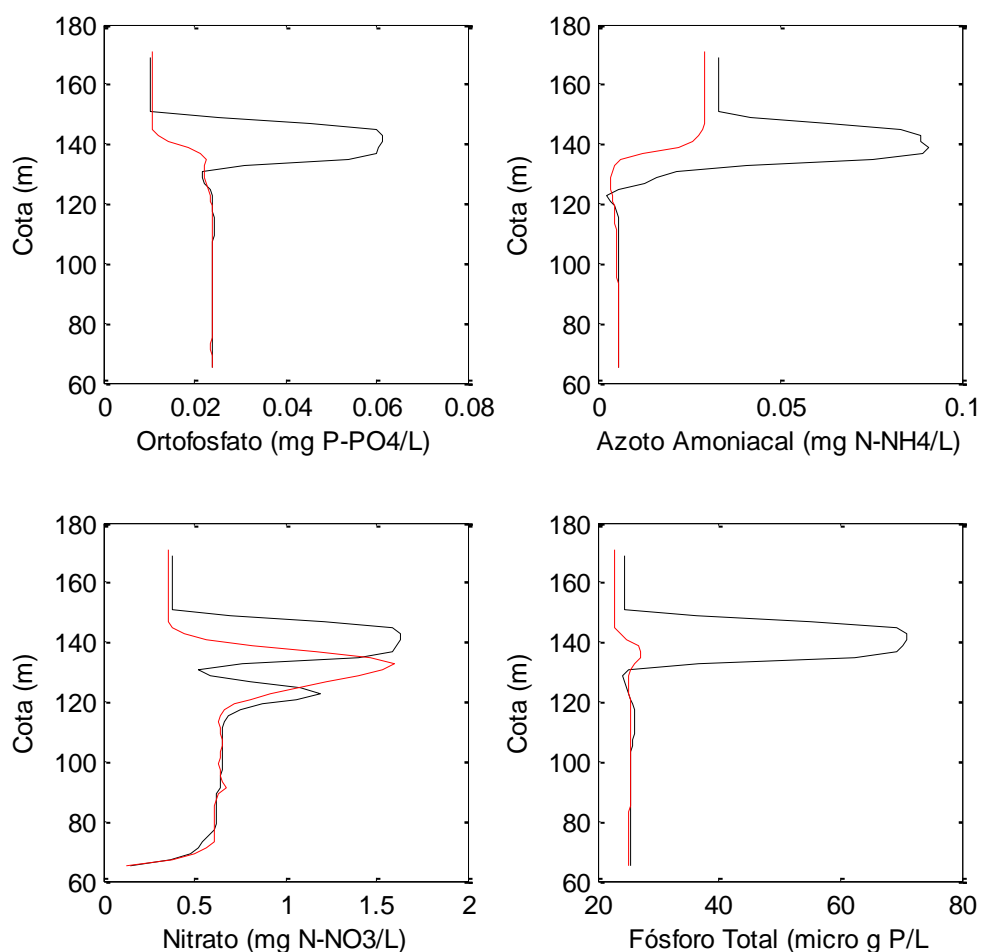


Figura 73 – Perfis verticais de nutrientes no início de dezembro para as simulações considerando a bombagem (preto) e num cenário apenas com turbinagem (vermelho)

### 4.3. Conclusões

Neste capítulo apresentou-se uma simulação do cenário de funcionamento acoplado das duas albufeiras. Os resultados mostram que na albufeira da Régua as alterações produzidas serão mínimas não produzindo qualquer efeito significativo na qualidade da água. Na albufeira de Foz Tua os resultados mostram que os impactos da bombagem serão igualmente reduzidos em termos globais. As causas do reduzido impacto da bombagem em Foz Tua, obtidos com o modelo CE-QUAL-W2, foram aprofundadas analisando em detalhe os processos que influem na estrutura vertical da albufeira. Foi possível explicar os processos de mistura que levam a que a água bombada da albufeira da Régua tenha pouco impacto na camada superficial de Foz Tua,

devido à estratificação existente na segunda e à cota a que são introduzidos os caudais. Refira-se que o processo de turbinagem/bombagem promove a mistura vertical de modo que a resposta em termos de produtividade primária relativamente ao aumento da carga de fósforo não é linear devido precisamente à diminuição de estabilidade. A diminuição da estabilidade significa que os nutrientes introduzidos pela bombagem são distribuídos por uma extensão significativa de coluna de água tendo como consequência a diminuição da sua concentração e o seu posicionamento abaixo da zona fótica, sendo que ambos os factores contribuem para a não linearidade da resposta em termos de produção primária.

As simulações do acoplamento entre as albufeiras de Foz-Tua e da Régua foram limitadas a um período de 15 anos devido à disponibilidade de dados. O enriquecimento em nutrientes de uma albufeira, que em última análise conduz à sua eutrofização, é um processo lento cuja escala temporal é seguramente maior do que o período de 15 anos considerado. Uma das formas de limitar o enriquecimento em nutrientes é promover a descarga frequente, em particular a descarga de água não superficial. No caso da albufeira de Foz-Tua, ao longo dos 15 anos de simulação, o processo de enriquecimento da albufeira não se faz notar no sentido de que os seus sintomas (por exemplo elevadas produtividades primárias e/ou o aumento consistente das mesmas) não são detectados. O enriquecimento em nutrientes, em especial fósforo, manifesta-se por exemplo através da deposição do mesmo nos sedimentos e subsequente mobilização em períodos de anoxia junto ao fundo. O processo de turbinagem/bombagem e a consequente mistura vertical induzida tem o efeito de diminuir a probabilidade de ocorrência de anoxia o que impede a libertação do fósforo acumulado. Por outro lado o processo reduz também a deposição de fósforo. Acresce ainda que a elevada profundidade da albufeira no seu troço final não permite que os eventuais aumentos da concentração de fósforo junto ao fundo se manifestem na zona fótica. Parece assim razoável concluir que os 15 anos de simulação permitem concluir que o efeito de enriquecimento da albufeira por via do processo de bombagem não deverá ser particularmente significativo.

## 5. Cenários a estudar

Para além do cenário de referência e da modelação conjunta das albufeiras de Foz Tua e da Régua, foram simulados outros cenários, com o objetivo de perceber uma possível evolução do sistema estudado em função da alteração de alguns fatores, em particular da albufeira de Foz Tua na qual se está a desenvolver o programa especial da albufeira. Estes cenários correspondem a variações das cargas de nutrientes, de matéria orgânica e da qualidade microbiológica, relativamente ao que foi considerado nos cenários de referência e de modelação conjunta das albufeiras da Régua e de Foz Tua, sendo identificados nos capítulos seguintes. É de notar que os cenários contemplam apenas alterações às cargas na bacia hidrográfica de Foz-Tua, não sendo consideradas possíveis modificações na bacia hidrográfica do Douro.

Inicialmente identificam-se as condições hidrológicas que serão consideradas nos cenários a estudar.

### 5.1. Hidrologia

As características dos anos hidrológicos a simular foram descritas anteriormente no **Capítulo 3.4.1**. O cenário a estudar em termos de hidrologia quando se considera a interação entre as duas albufeiras trata-se de uma reconstituição da série de aflúências por um período de 15 anos (entre 1990 e 2005), em que as aflúências a Foz Tua foram determinadas a partir da classificação de cada ano numa tipologia constituída por 8 anos tipo. Relativamente às aflúências do Douro, Távora e Pinhão mantiveram-se os valores reais da série usada na simulação da albufeira da Régua.

### 5.2. Cargas de nutrientes e matéria orgânica

Os cenários criados no PGRH da RH3 (Douro) (ARH Norte, 2012) preveem que a região do Douro atinja em 2027 um número de habitantes que se situa entre 2.027.400 e 2.139.200 representando um ganho entre 2.7% e 6.3%, respetivamente. Foram assim definidos os cenários base e otimista, sendo que no cenário pessimista se considera uma perda de população de 0,45%. As sub-bacias nas quais se prospectavam crescimento demográfico são a do Tâmega, do Douro e as Costeiras entre Douro e Vouga.

No que diz respeito ao regadio, o PGRH prevê uma tendência decrescente em todos os cenários, com taxas de decréscimo de 5,6%, 2,4% e 1,9%, nos cenários pessimista, base e otimista, respetivamente. A tendência é geral em todas as sub-bacias, sendo que as menores perdas de regadio se devem registar no Tâmega, Tua e Sabor onde alguns aproveitamentos hidroagrícolas deverão aumentar as áreas de regadio.

Na atividade pecuária o panorama é muito distinto. No cenário pessimista prevê-se uma perda de 29% dos efetivos, em contraste com os cenários base e otimista, onde se registam crescimentos de 14 e 32%, respetivamente. De notar que as sub-bacias do Rabaçal/Tuela e do Tua (além de outras) registam tendência para a perda de efetivos em todos os cenários.

Finalmente, no que respeita à indústria transformadora, prevê-se uma diminuição do número de pessoal ao serviço, entre 4.1% e 0.05% ao ano até 2027, consoante se trate do cenário pessimista ou otimista.

Assim, pode concluir-se que para as bacias do Tuela/Rabaçal e Tua a previsão é de que exista efetivamente uma diminuição da carga de nutrientes e matéria orgânica, visto que não é previsto o crescimento da população e existirão perdas na área regada, na pecuária e na indústria. Se a esse facto se juntar uma progressiva melhoria ao nível do saneamento básico, é de esperar que venha a existir uma redução nas fontes de poluição.

Tendo em consideração as tendências de evolução previstas no PGRH considera-se pertinente a simulação de um cenário de redução de cargas de nutrientes e de matéria orgânica, que possa dar indicações sobre qual a evolução esperada nesse caso.

Apesar de um cenário de aumento de cargas não ser expectável, tendo em conta os cenários de evolução previstos no PGRH, é importante ter alguma sensibilidade sobre esta possibilidade, uma vez que o Programa Especial da Albufeira de Foz Tua poderá condicionar atividades que se possam desenvolver no plano de água da albufeira e na sua envolvente direta, caso se verifique que as mesmas podem ter consequências para a qualidade da água da albufeira. Neste contexto, considera-se relevante a simulação de cenários de aumento de cargas de nutrientes e de matéria orgânica provenientes da bacia drenante para a albufeira de Foz Tua.

Tendo em conta o exposto, são simulados os seguintes cenários relativamente ao cenário de referência e ao cenário de modelação conjunta das albufeiras de Foz Tua e da Régua:

- Cenário de redução de 30% das cargas de nutrientes e de matéria orgânica;
- Cenário de aumento de 20% das cargas de nutrientes e de matéria orgânica;
- Cenário de aumento de 5% das cargas de nutrientes e de matéria orgânica.

O conjunto de cenários estudados no PEAFT é referenciado no **Quadro 29**.

Quadro 29 – Conjunto de cenários estudados no PEAF

Simulações	Observações
Foz Tua sem bombagem referência	Simulado
Foz Tua sem bombagem e aumento de 20% das cargas	Simulado
Foz Tua sem bombagem e redução de 30% das cargas	Simulado
Foz Tua com bombagem referência	Simulado
Foz Tua com bombagem e aumento de 20% das cargas	Simulado
Foz Tua com bombagem e redução de 30% das cargas	Simulado
Foz Tua com bombagem e aumento de 5% das cargas	Estimado

### 5.3. Qualidade microbiológica

Tendo em atenção os requisitos quer do Anexo I do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de agosto, relativos à produção de água para consumo humano, quer ainda do Decreto-Lei n.º 135/2009, de 3 de junho, relativo à qualidade da água balnear, foram feitas simulações do transporte e decaimento de 2 parâmetros microbiológicos (Coliforme fecais e *Escherichia coli*).

As simulações consistem em assumir que a concentração no rio Tua é de 105 ufc/100 mL, o que é sinónimo do não funcionamento dos sistemas de tratamento de efluentes urbanos durante o período de 1 ano e de “recolher amostras” quinzenais nessas condições. Entende-se por “recolher amostras” fazer outputs do modelo em 2 pontos, um junto à barragem e outro na zona de montante do regolfo da albufeira. Deste modo pretende-se simular um cenário de acidente, que necessariamente terá uma probabilidade de ocorrência baixa.





## 6. Classificação da qualidade da água nos diferentes cenários

Tendo por base todos os cenários estudados no âmbito do presente trabalho, de cargas de nutrientes e matéria orgânica e de qualidade microbiológica, apresentam-se seguidamente os resultados obtidos relativamente à classificação da qualidade da água.

### 6.1. Cenários de cargas de nutrientes e matéria orgânica

Os resultados obtidos na simulação efetuada para o cenário de referência, que não considera bombagem (descrito em detalhe no **Capítulo 3.6**), permitiram concluir que a albufeira de Foz Tua apresentaria em geral boa classificação da massa de água, quer no que diz respeito ao estado trófico, quer no que diz respeito ao Bom Potencial Ecológico, tal como ficou demonstrado no **Quadro 27**. Relativamente ao cenário de modelação conjunta das albufeiras de Foz Tua e da Régua, os resultados obtidos permitiram concluir que:

- Na albufeira da Régua os impactes da entrada em funcionamento de Foz Tua serão desprezáveis;
- Na albufeira de Foz Tua a bombagem terá efeitos quer nos nutrientes quer na produtividade, embora estes sejam mais pronunciados abaixo da camada superficial, não alterando as classificações obtidas.

No **Quadro 30**, no **Quadro 31** e no **Quadro 32** apresenta-se a comparação, para ano seco, médio e húmido, respetivamente, das concentrações obtidas para os cenários simulados para as albufeiras de Foz Tua e Régua. No cenário com bombagem (descrito detalhadamente no **Capítulo 4.1** e o de maior probabilidade de ocorrência), as maiores alterações, por comparação com o cenário sem bombagem (cenário de referência descrito no **Capítulo 3.6**) ocorrerão em profundidade. À superfície, a massa de água sofrerá poucas alterações e a sua classificação em termos de Bom Potencial Ecológico e Estado Trófico, manter-se-á (ver **Quadro 28**, **Quadro 30**, **Quadro 31** e **Quadro 32**). Somente nos cenários de aumento de carga com bombagem se verificam concentrações de fósforo total que violam o critério de eutrofização de OCDE.

Um cenário de aumento de 20% da carga afluente a Foz Tua produz um pequeno efeito nos parâmetros relevantes que não afeta em definitivo a classificação da albufeira, como se pode verificar no **Quadro 30**, no **Quadro 31** e no **Quadro 32**. Seria expectável que um aumento de carga afluente produzisse um aumento da concentração de nutrientes na albufeira e conseqüentemente um aumento da produtividade. Tal é verificado, mas os aumentos nas concentrações não implicam alterações significativas na classificação obtida. Por maioria de razão, o mesmo pode afirmar-se para o aumento de carga de 5% também estimada.

De igual modo, a simulação de redução da carga em 30% não produz efeitos significativos na albufeira de Foz Tua (**Quadro 30**, **Quadro 31** e **Quadro 32**). Neste caso seria de esperar uma redução das concentrações de nutrientes e consequentemente da produtividade primária, o que efetivamente é verificado. Tal como no cenário de aumento de carga, a classificação da albufeira não sofre qualquer alteração.

As tendências gerais encontradas são semelhantes em ano seco, médio e húmido. De uma forma geral os aumentos de carga produzem concentrações mais elevadas, como seria de esperar, e as reduções concentrações mais baixas. Em ano seco (**Quadro 30**) isso é particularmente evidente, sendo os impactos do aumento de carga relativamente reduzidos.

Em ano médio e em ano húmido (**Quadro 31** e **Quadro 32**), as tendências encontradas para ano seco mantêm-se, devendo apenas notar-se, no que diz respeito às classificações, que a concentração de fósforo total excede ligeiramente o valor limite da mesotrofia (35 mg/m<sup>3</sup>) imposto pelo critério de estado trófico da OCDE, quando se considera o aumento de carga de 20%. Apresenta-se ainda, no **Quadro 33**, o valor médio calculado para a globalidade da simulação, que compara muito bem com os valores obtidos para ano médio. As figuras seguintes resumem o que foi descrito em termos de classificação da albufeira segundo os diferentes critérios.

Quadro 30 – Comparação de concentrações médias anuais, para um ano seco (1992), de nutrientes, oxigénio dissolvido e clorofila-a (média anual e média de verão)

Cenários de cargas afluentes do Rio Tua	Sem Bombagem			Com Bombagem			
	Cenário de base	Aumento de 20% da carga	Redução de 30% da carga	Cenário de base	Aumento de 5% da carga	Aumento de 20% da carga	Redução de 30% da carga
Chl-a (µg/L)	5,3	5,4	4,3	4,7	4,8	5,2	3,8
P Total (µgP/L)	22,8	25,8	18,8	19,6	20,4	22,7	15,3
PO <sub>4</sub> (µgPO <sub>4</sub> /L)	22,9	26	20,9	22,5	23,4	26,0	17,5
NO <sub>3</sub> (mg NO <sub>3</sub> /L)	0,7	0,8	0,5	1,5	1,6	1,7	1,2
Oxigénio (mg/L)	11	10,9	11,1	10,0	10,0	10,1	9,9
Chl-a verão (µg/L)	2,5	3,5	2,1	2,4	2,6	3,1	1,7

Quadro 31 – Comparação de concentrações médias anuais, para um ano médio (1994), de nutrientes, oxigénio dissolvido e clorofila-a (média anual e média de verão)

	Sem Bombagem	Com Bombagem
--	--------------	--------------

Cenários de cargas afluentes do Rio Tua	Cenário de base	Aumento de 20% da carga	Redução de 30% da carga	Cenário de base	Aumento de 5% da carga	Aumento de 20% da carga	Redução de 30% da carga
Chl-a (µg/L)	3.7	4.3	2.9	7.1	7.3	7.9	5.5
P Total (µgP/L)	16.5	19.5	15.5	33.9	35.1	38.5	27.1
PO <sub>4</sub> (µgPO <sub>4</sub> /L)	16.9	19.8	14.9	41.0	43.0	48.8	33.9
NO <sub>3</sub> (mg NO <sub>3</sub> /L)	1.2	1.3	1.0	1.4	1.4	1.5	1.3
Oxigénio (mg/L)	9.5	9.3	9.7	10.6	10.6	10.6	10.2
Chl-a verão (µg/L)	7.9	8.9	5.9	7.1	7.4	8.3	4.9

Quadro 32 – Comparação de concentrações médias anuais, para um ano húmido (2000 – com e sem bombagem), de nutrientes, oxigénio dissolvido e clorofila-a (média anual e média de verão)

Cenários de cargas afluentes do Rio Tua	Sem Bombagem			Com Bombagem			
	Cenário de base	Aumento de 20% da carga	Redução de 30% da carga	Cenário de base	Aumento de 5% da carga	Aumento de 20% da carga	Redução de 30% da carga
Chl-a (µg/L)	4,1	3,4	2,3	6,7	6,8	8,0	4,9
P Total (µgP/L)	17,0	17,5	14	33,1	34,2	38,5	26
PO <sub>4</sub> (µgPO <sub>4</sub> /L)	23.5	31	22	41,7	43	49	29,3
NO <sub>3</sub> (mg NO <sub>3</sub> /L)	1,9	1,8	1,4	1,5	1,5	1,6	1,3
Oxigénio (mg/L)	9,8	9,6	9,8	10,4	10,2	10,3	10,5
Chl-a verão (µg/L)	5,2	5,9	4,4	6,7	6,8	7,9	5,1

Quadro 33 – Comparação de concentrações médias anuais, para a globalidade da simulação, de nutrientes, oxigénio dissolvido e clorofila-a (média anual e média de verão)

Cenários de cargas afluentes do Rio Tua	Sem Bombagem			Com Bombagem			
	Cenário de base	Aumento de 20% da carga	Redução de 30% da carga	Cenário de base	Aumento de 5% da carga	Aumento de 20% da carga	Redução de 30% da carga
Chl-a (µg/L)	3.9	4.6	3.0	7.4	7.5	8.0	5.6
P Total (µgP/L)	17	19.8	16.2	34	35.2	39.1	27.3
PO <sub>4</sub> (µgPO <sub>4</sub> /L)	17.2	20.1	15.1	41.2	41.5	49.2	34.3
NO <sub>3</sub> (mg NO <sub>3</sub> /L)	1.2	1.3	1.0	1.4	1.5	1.5	1.3
Oxigénio (mg/L)	9.4	9.3	9.8	10.2	10.5	10.5	10.2
Chl-a verão (µg/L)	8.2	9.0	6.2	7.4	7.7	8.6	5.0

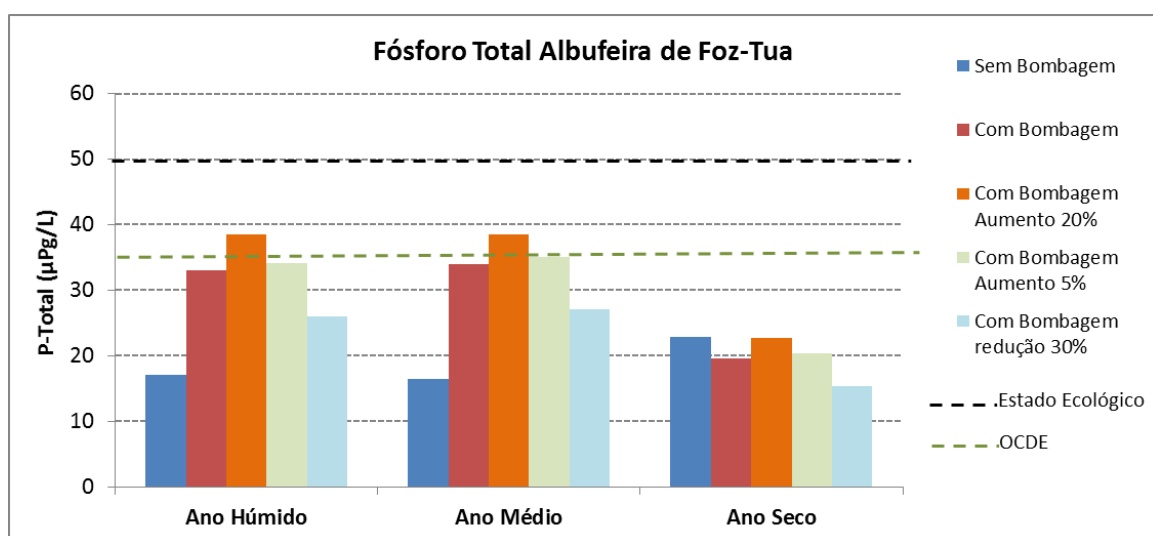


Figura 74 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira de Foz-Tua: P-Total. A tracejado encontram-se representados os limites associados ao critério de classificação para o potencial ecológico e para o estado trófico (OCDE)

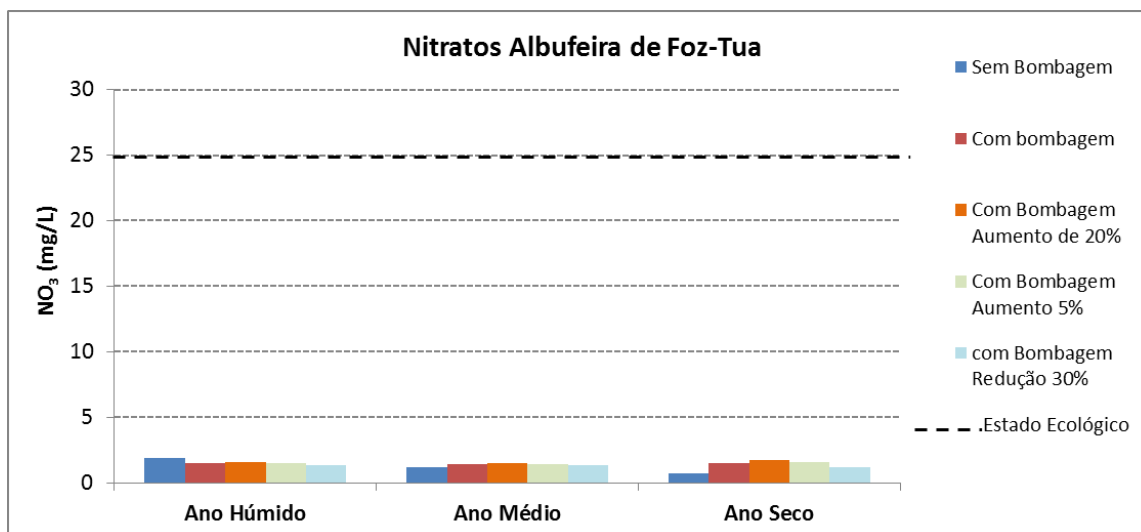


Figura 75 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira de Foz-Tua: NO3. A tracejado encontra-se representado o limite associado ao critério de classificação para o potencial ecológico

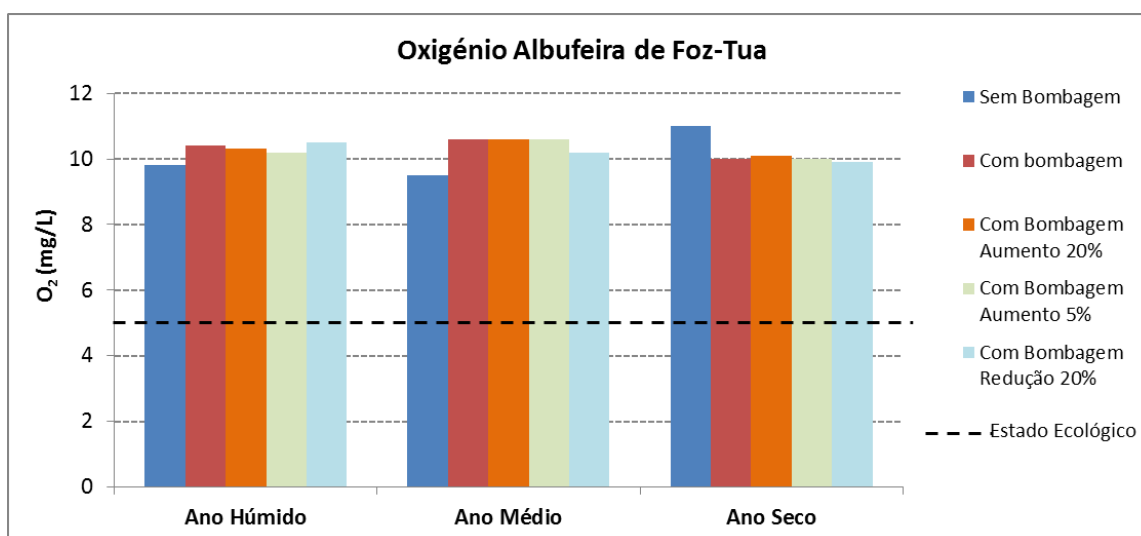


Figura 76 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira de Foz-Tua: Oxigénio Dissolvido. A tracejado encontra-se representado o limite associado ao critério de classificação para o potencial ecológico

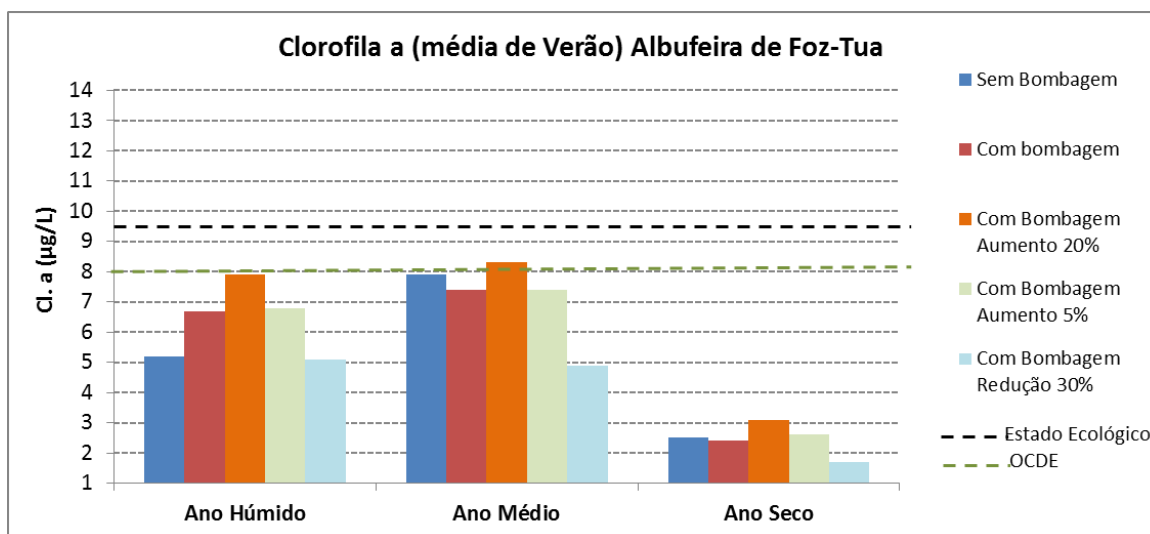


Figura 77 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira de Foz-Tua: Clorofila a – Média de Verão. A tracejado encontram-se representados os limites associados ao critério de classificação para o potencial ecológico ainda em vigor e os critérios estabelecidos durante a 2ª fase do Exercício de Intercalibração (ainda não integrados no sistema de classificação nacional)

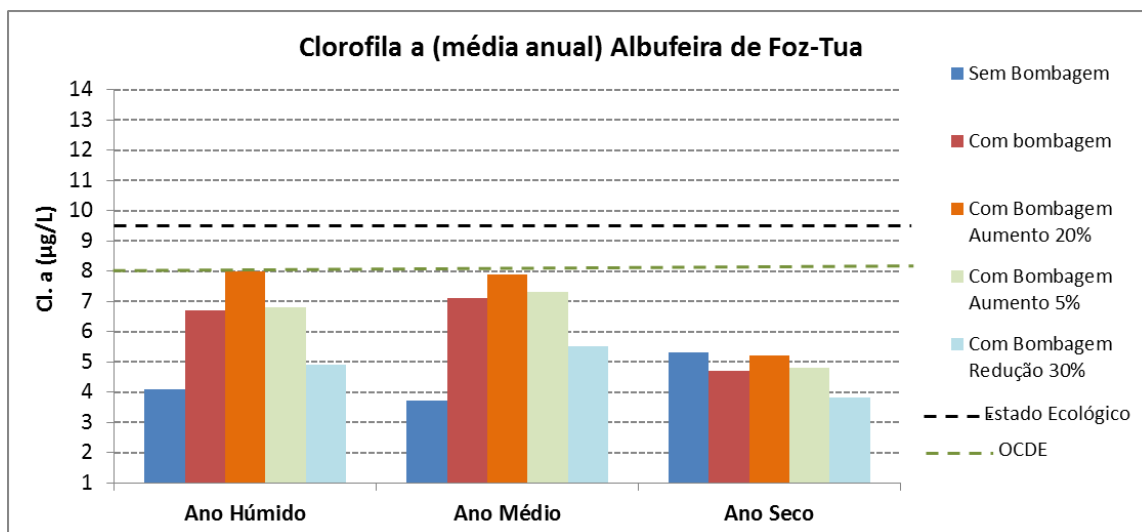


Figura 78 – Resultados da modelação da qualidade da água para a albufeira de Foz-Tua: Clorofila a – Média Anual. A tracejado encontra-se representado o limite associado ao critério de classificação para o estado trófico (OCDE)

## 6.2. Qualidade microbiológica

Tendo em consideração os requisitos do Anexo I do Decreto-Lei 236/98, relativos à produção de água para consumo humano, e do Decreto-Lei 135/2009, relativos à qualidade da água balnear, foram feitas simulações do transporte e decaimento de 2 parâmetros microbiológicos (*Coliforme fecais* e *Escherichia coli*). As simulações consistiram em assumir que a concentração no rio é de  $10^5$  ufc/100 mL, o que significa assumir que os sistemas de tratamento de efluentes urbanos não se encontram em funcionamento, e “recolher amostras” quinzenais durante um período de 1 ano nessas condições. Entende-se por “recolher amostras” fazer *outputs* do modelo em 2 pontos, um junto à barragem e outro na zona de montante da albufeira de Foz Tua. Está-se assim a tratar de um cenário de acidente.

Quanto à qualidade das águas doces destinadas à produção de água para consumo humano, de acordo com o Anexo I do Decreto-Lei n.º 236/98, os resultados do modelo são apresentados em termos de probabilidade de ocorrência de um estado: 41% das “amostras” são classificadas como A1 na cabeceira, percentagem que sobe para 58% junto à barragem; são classificadas como A2, 32% das “amostras” na cabeceira e 35% junto à Barragem; São A3 27% das “amostras” na cabeceira e 7% junto à Barragem.

Estes são os valores obtidos nas condições da simulação descritas, isto é, supondo que existe permanentemente uma descarga de águas residuais no rio à entrada da albufeira. A probabilidade real é dada, de acordo com o descrito, por:

$$P_{efectiva} = P_{Contaminação\ do\ rio} \times P_{Contaminação\ da\ albufeira}$$

Assim, num cenário acidental de falha nos sistemas de tratamento das águas residuais, a probabilidade de se ter má qualidade de acordo com qualquer um dos critérios é a que se apresenta no **Quadro 34**.

Quadro 34 – Probabilidade de ocorrência de má qualidade da água em termos de concentração de coliformes fecais na albufeira de Foz Tua, de acordo com a legislação em vigor

	Barragem	Cabeceira
Água balnear	<1%	<1%
Consumo Humano	0,5%	2%

Finalmente, de acordo com o Decreto-Lei 135/2009, relativo à qualidade da água balnear, os resultados obtidos para o parâmetro *Escherichia coli* revelam que junto à Barragem 17% das amostras têm concentrações acima de 500 ufc/100 mL, e 15% das amostras estão acima dos 1000 ufc/100 mL. Já na cabeceira da albufeira 55% das amostras estão acima das 500 ufc/100 mL e 44% estão acima das 1000 ufc/100 mL. O que está previsto no Decreto-Lei 135/2009 é que uma água seja considerada excelente se a

concentração de estiver abaixo das 500 ufc/100 mL com base numa avaliação do percentil 95. A água deve ser considerada boa se a concentração de *Escherichia coli* estiver entre 500 e 1000 com base numa avaliação do percentil 95 e aceitável se estiver abaixo de 900 ufc/100 mL com base no percentil 90. Nenhuma destas condições se verifica nas condições em que a simulação foi feita. Mais uma vez os resultados desta simulação ganham algum realismo se as probabilidades obtidas forem multiplicadas pela probabilidade de ocorrência de má qualidade no rio que como já foi referido é praticamente nula. Assim sendo, devemos considerar que a probabilidade de se ter água de má qualidade para uso balnear é inferior a 1%.

O funcionamento correto dos sistemas de tratamento de águas residuais na bacia afluente a Foz Tua impedirá qualquer tipo de contaminação fecal significativa.

### **6.3. Conclusões**

Neste capítulo apresentaram-se os resultados das simulações de cenários alternativos aos cenários de base previamente estabelecidos. Do ponto de vista da dinâmica biogeoquímica, contemplaram-se cenários de aumento e redução de carga. Em ambos os casos ficou demonstrado que as alterações que ocorrem devido à variação da carga na bacia do Tua têm impacte limitado na qualidade da água da albufeira. Faz-se notar que o cenário de redução de carga é o mais plausível de acordo com as perspetivas de evolução da bacia hidrográfica. Por medida de precaução foi simulado um cenário de aumento de carga de 20% que revelou não ter efeitos significativos na albufeira. Dos resultados obtidos fica também claro que um cenário de 5% de aumento na carga afluente a Foz Tua não terá impactes significativos na albufeira.

Igualmente compatíveis com cenários de exploração da área de intervenção do PEAFI são os cenários de contaminação microbiológica. Embora tenham sido simulados estes cenários, não é expectável a ocorrência de contaminação na albufeira proveniente da bacia hidrográfica. O cumprimento da legislação em vigor deverá evitar a possibilidade de contaminação direta da albufeira de modo que é de esperar que a albufeira apresente boa qualidade também a este nível.



## 7. Discussão, conclusões e recomendações

O presente trabalho teve como objetivo a aplicação de um modelo de hidrodinâmica e qualidade da água às albufeiras de Foz Tua e Régua, com o objetivo final de determinar a previsível qualidade da água, no futuro, em ambas as albufeiras.

A modelação matemática foi realizada utilizando o modelo CE-QUAL-W2, que incluiu a simulação do efeito da bombagem a partir da albufeira da Régua na albufeira de Foz Tua.

O trabalho de modelação da qualidade da água das albufeiras de Foz Tua e da Régua foi antecedido de uma compilação e análise da informação de base disponível e de uma estimativa das cargas de nutrientes e matéria orgânica produzidas nas respetivas bacias de drenagem.

A modelação das albufeiras de Foz Tua e da Régua foi inicialmente desenvolvida isoladamente, num cenário sem bombagem (cenário de referência) e posteriormente acopladas as duas albufeiras, considerando o turbinamento em Foz Tua e a bombagem a partir da Régua.

Para além do cenário de referência e da modelação conjunta das albufeiras de Foz Tua e da Régua, foram simulados outros cenários, com o objetivo de perceber uma possível evolução do sistema estudado em função da alteração de alguns fatores. Estes cenários correspondem a variações das cargas de nutrientes, de matéria orgânica e da qualidade microbiológica, relativamente ao que foi considerado nos cenários de referência e de modelação conjunta das albufeiras da Régua e de Foz Tua. Foram abordados os seguintes cenários:

- Cenário de redução de 30% das cargas de nutrientes e de matéria orgânica;
- Cenário de aumento de 20% das cargas de nutrientes e de matéria orgânica;
- Cenário de aumento de 5% das cargas de nutrientes e de matéria orgânica;
- Cenários de simulação de um cenário de acidente no que se refere à qualidade microbiológica.

Para que a aplicação dos modelos fosse possível, foi necessário determinar as cargas de nutrientes e matéria orgânica afluentes a cada albufeira. No caso da albufeira da Régua, as cargas são relativamente simples de determinar visto que a albufeira se encontra inserida na cascata de albufeiras do Douro que é bem monitorizada quer em termos de qualidade quer em termos de quantidade.

Para o Rio Tua, os valores obtidos foram confirmados com diferentes metodologias, utilizando conjuntos de dados medidos em locais distintos e disponibilizados no SNIRH, por um lado, e outros mais recentes provenientes do Plano de Monitorização do Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua. As cargas aqui calculadas resultaram assim de dados medidos nas linhas de água.

Da análise dos dados de monitorização da albufeira da Régua, resultou a conclusão de que a mesma é monomictica quente e deve ser classificada como eutrófica. A aplicação do modelo à albufeira da Régua confirmou esta conclusão, visto que a concordância obtida entre os dados e o modelo foi muito boa. Relativamente ao potencial ecológico, não existe critério para este tipo de albufeira, visto que ela pertence ao tipo Curso Principal.

As simulações da albufeira de Foz Tua sem bombagem conduzem à conclusão de que a mesma, a funcionar nessas condições, apresentaria boa qualidade da água, sendo monomictica quente, mesotrófica e com Bom potencial ecológico. As avaliações dos parâmetros microbiológicos revelaram não haver qualquer preocupação relativamente a este aspeto.

A simulação do sistema acoplado com turbinagem em Foz Tua e reposição parcial desses caudais por meio de bombagem a partir da Régua mostrou que, no caso da albufeira da Régua, os impactes são praticamente nulos. Em Foz Tua, o peso relativo das cargas adicionais provenientes da bombagem, quando comparado com as cargas naturalmente afluentes do Rio Tua, é maior. No entanto, existindo esse maior impacte, o mesmo é minimizado pelo facto de a bombagem erodir parcialmente a termoclina permitindo uma diluição das cargas na coluna de água numa zona subsuperficial, mas mantendo uma termoclina superficial que impede a difusão de nutrientes e matéria orgânica até à superfície. Só em períodos de mistura vertical mais vigorosa os efeitos da bombagem se farão sentir próximo da superfície. Resulta assim que, em termos de classificação da massa de água, mesmo no caso da existência de bombagem, a albufeira de Foz Tua manterá a classificação obtida para o cenário sem bombagem.

Foram ainda estudados cenários de redução (em 30%) e aumento (em 5 e 20%) das cargas afluentes a Foz Tua. Nestes cenários a classificação obtida para Foz Tua manteve-se quase inalterada. Há apenas a registar uma diferença na classificação relativa ao critério de eutrofização da OCDE quanto ao parâmetro fósforo total.

Recomenda-se a monitorização das concentrações de nutrientes e matéria orgânica afluentes à albufeira bem como o respetivo caudal, de forma a tornar possível uma correta estimativa das cargas afluentes a Foz Tua.

Relativamente ao programa especial da albufeira, recomenda-se alguma contenção nos usos quer da massa de água quer da área circundante, no sentido de não aumentar as cargas diretas na albufeira, quer de nutrientes quer de matéria orgânica. No entanto, dada a boa qualidade da água obtida nas simulações, parece razoável exigir que futuros licenciamentos possibilitem o aumento de cargas de nutrientes em valores da ordem de 5% da carga atual. De qualquer forma, este valor deve ser definido tendo em conta os cenários de evolução das cargas em toda a bacia hidrográfica da albufeira de Foz Tua.

Assumindo os 5% da carga atual como valor razoável de aumento de carga, chega-se a valores aproximados de:

- 3.0 ton/ano de Fósforo inorgânico
- 55.4 ton/ano de Azoto inorgânico
- 87.9 ton/ano de BOD5

Estas cargas correspondem a cerca de 3000 a 4000 habitantes equivalentes, utilizando as capitações disponíveis na literatura (utilizou-se Henze et al., 2002).

Fazendo uma extrapolação também para cabeças de gado, os valores máximos que resultam para bovinos, suínos e ovinos são da ordem de 200, 340 e 760 cabeças. Utilizou-se como referência o Código de Boas Práticas Agrícolas publicado em 1997 pelo Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas. Deve, no entanto, recomendar-se a interdição de usos de pecuária e pastorícia, em particular os intensivos, na zona do Plano.

Será importante a monitorização das cargas afluentes à albufeira, de forma que se possa ir confirmando a estimativa de cargas aqui apresentada.



## 8. Bibliografia

ARH NORTE (2012). *Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Norte*.

CHAMBEL-LEITÃO P., NEVES R. (2006). *Aplicação das HARP-NUT Guidelines (OSPAR) na bacia de Pracana. Eutrofização. A Eutrofização em Sistemas Aquáticos*. Sessão Técnica - 29 de junho de 2006. INAG.

DILLON, P. E F. RIGLER (1975). *A simple method for predicting the capacity of a lake for development based on lake trophic status*. J. Fish. Res. Board Can. 32. 1519-1531.

EDP (2012) *Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua. Projeto. Aditamento. Central e Circuito Hidráulico. Planta Geral*. Abril 2012. DPI – Direção Projetos e Investimentos. EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A.

HENZE M., HARREMOËS P., LA COUR JANSEN J. AND ARVIN E. (2002). *Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes*. 3rd ed. Springer-Verlag. Berlin.

INAG (2001). *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Douro*.

INAG (2011). *Modelação matemática da qualidade da água em albufeiras com planos de ordenamento*. I – Albufeira de Castelo de Bode.

OECD (1982). *Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control*. OECD. Paris.

OSPAR (2001) *Annex 5: Draft Common Assessment Criteria and their Application within the Comprehensive Procedure of the Common Procedure. Meeting of the Eutrophication Task Group (Etg)*. London (Secretariat). 9-11 October 2001. OSPAR Convention for the Protection of the Marine Environment of The North-East Atlantic.

PROFICO AMBIENTE (2008) *Estudo de Impacte Ambiental do Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua*.

SMITH, V. H. (1982). *The nitrogen and phosphorous dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis*. Limnology and Oceanography 27. 1101-1112

THE COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, DIRECTORATE GENERAL FOR AGRICULTURE, COORDINATION OF AGRICULTURAL RESEARCH (1985) *Soil Map of the European Communities at 1:1 000 000*. The Office for Official Publications of the European Communities, ISBN 92-825-5427-9, L-2985 Luxembourg, 124 pages.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA (2000). *Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservoirs*. 1<sup>st</sup> edition. Office of Water. Office of Science and Technology. EPA-822-B00-002. Washington, DC.

VOLLENWEIDER, R.A. (1976). *Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication*. Mem. Ist. Ital. Idrobiol. 33. 53-83.

WETZEL, R.G. (2001). *Limnology of Lake and River Ecosystems*. Third Edition. Academic Press, San Diego, CA. 1006 pp.