



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

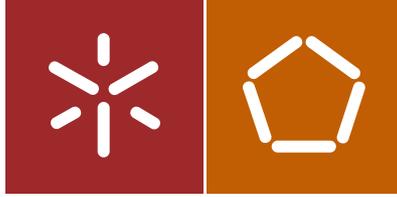
Alexandre Gomes Zenha

Previsão de cheias em Barcelos

Alexandre Gomes Zenha Previsão de cheias em Barcelos

UMinho | 2015

dezembro de 2015



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Alexandre Gomes Zenha

Previsão de cheias em Barcelos

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor José Manuel Pereira Vieira

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças a várias pessoas, a quem gostaria de deixar o meu sincero agradecimento por todo o apoio, confiança e colaboração ao longo deste período.

Ao Professor José Vieira por toda a disponibilidade e dedicação com que sempre me orientou ao longo da execução deste trabalho.

Aproveito também para agradecer em particular ao Professor José Pinho e a todos os docentes e colegas do mestrado Integrado em Engenharia Civil que colaboraram de forma direta ou indireta na elaboração deste trabalho, assim como todos aqueles que demonstraram o seu apoio na sua realização.

Um agradecimento especial à Sofia Miranda, ao João Botelho e ao João Pinhão pelo apoio, motivação e transmissão de conhecimentos.

Aos meus pais, que sempre me apoiaram e incentivaram, dedico a felicidade que sinto no final de mais uma etapa.

RESUMO

As cheias são um fenómeno que se traduz pelo aumento temporário dos caudais num curso de água, originando o aumento da velocidade da corrente e a subida do nível das águas, o que provoca o transbordamento do leito normal desse curso de água e conseqüente inundação dos terrenos adjacentes. Por se tratar de um fenómeno intenso e inconstante não pode ser eliminado, mas os seus danos podem ser reduzidos através de um estudo das bacias hidrográficas e respetivas linhas de água para implementação de medidas de prevenção.

A presente dissertação tem como objetivo principal a construção de um modelo hidrológico a partir de um modelo hidrodinâmico para simulação de caudais e alturas de água na cidade de Barcelos.

A elaboração do projeto consiste na introdução da componente hidrológica, que assenta no modelo de *Sacramento*, a um modelo hidrodinâmico de escoamento da rede fluvial da bacia hidrográfica do rio Cávado, construído no *software SOBEK*. No desenvolvimento da componente hidrológica foram considerados dados históricos de caudais, precipitações e evaporação recolhidos através do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH). Com base nos dados de precipitação e auxílio da ferramenta *ArcGIS* foi aplicado o método *Thiessen* para obter as precipitações para cada sub-bacia integrante da bacia hidrográfica do rio Cávado. Posteriormente, recorreu-se ao *RRL* para calibração do modelo, onde foram introduzidos os dados de precipitação, evaporação e caudal, tendo-se obtido os parâmetros de *Sacramento* necessários para inclusão no modelo hidrológico em *SOBEK*. Após a introdução dos parâmetros de *Sacramento*, das áreas de cada sub-bacia e do caudal efluente na barragem da Caniçada, realizou-se a validação do modelo através da comparação, em Barcelos, dos caudais simulados no modelo com caudais reais observados para verificar a sua aptidão à previsão de caudais. Foi, ainda, utilizada a ferramenta *AutoCAD* para auxílio na introdução da ponte medieval de Barcelos no modelo hidrodinâmico. Face à inexistência de dados relativos a cheias foram simulados cenários de cheia para diferentes períodos de retorno para tentar estimar a partir de que caudal existe ocorrência de cheias e quais os caudais que originaram as cheias históricas de acordo com a altura da água na Ponte medieval.

Palavras-chave: previsão de cheias; hidrodinâmica; hidrologia; modelação; Cávado

ABSTRACT

Floods are a phenomenon consisting in the temporary increase of streamflow in a watercourse, resulting an increased current speed and rise of water levels, which causes the overflow of the normal stream bed of the watercourse and consequent flooding of adjacent land. Due to their intense and unstable nature, floods are a phenomenon that cannot be eliminated, nevertheless the damage can be reduced using a study of hydrographic basins and respective water lines for implementation of preventive measures.

This dissertation aims to develop a hydrodynamic and hydrological modeling system to simulate water flow and water level in the city of Barcelos.

The project design consists in the introduction of the hydrological component, based on the Sacramento model, to an existing hydrodynamic model of the network flow of the river Cávado basin area, built in the software SOBEK. In the development of the hydrological component historical data of flow rates, precipitation and evaporation, collected through The National Information System of Water Resources (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos - SNIRH), were considered. Based on the precipitation data and the use of the ArcGIS tool, the Thiessen method was applied to obtain the precipitation for each sub-basin of the Cávado River basin. Posteriorly, RRL was used for the model's calibration, where the precipitation, evaporation and flow data were inserted, thereby obtaining the necessary Sacramento parameters for inclusion of the hydrological model in SOBEK. After inserting the Sacramento parameters, each sub-basin areas and the outflow in Caniçada dam, the validation of the model was performed by comparing, in Barcelos, simulated streamflow in the model with historical flows data to verify their ability to forecast flow rates. The AutoCAD tool was also used to aid in the introduction of the Barcelos medieval bridge into the hydrodynamic model. Given the lack of data on floods, flood scenarios were simulated for different return periods to estimate which flow there are occurrence of floods and which flow rates gave rise to historical floods according to the water level in the medieval bridge.

Keywords: flood forecasting; hydrodynamics; hydrology; modeling; Cávado

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo.....	iii
Abstract	v
Índice de figuras	ix
Índice de quadros.....	xii
Acrónimos	xiii
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos do trabalho.....	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2. Estudo das cheias e inundações.....	5
2.1 Considerações gerais.....	5
2.2 Classificação das precipitações	5
2.3 Tipos de cheias	6
2.4 Fatores que influenciam as cheias	7
2.4.1 Fatores Naturais	7
2.4.2 Fatores Antrópicos	8
2.5 Indicadores de probabilidades de ocorrência de cheias.....	8
2.6 Avaliação e gestão dos riscos de inundações.....	11
2.7 Avaliação preliminar e identificação das zonas de risco de inundação	12
2.8 Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos.....	13
3. Modelação matemática	15
3.1 Generalidades	15
3.2 Tipos e seleção de modelos	15
3.3 Formulação matemática do modelo utilizado	16
3.3.1 Modelos hidrodinâmicos e hidrológicos unidimensionais.....	17
3.4 <i>Softwares</i> de modelação hidrodinâmica e hidrológica	19
3.4.1 <i>MIKE</i>	19
3.4.2 <i>HEC</i>	21
3.4.3 <i>Delft FEWS</i>	22
3.4.4 <i>RMA2</i>	23
3.4.5 <i>RRL</i>	24

3.4.6 <i>SOBEK</i>	29
3.4.6.1 Modelo hidrológico de <i>Sacramento</i>	32
3.5 <i>Softwares</i> de modelação geográfica	40
3.5.1 <i>ArcGIS</i>	40
4. Caraterização da área de estudo.....	45
4.1 Barcelos e bacia hidrográfica do rio Cávado	45
4.1.1 Hidrologia	47
4.1.2 Clima.....	48
4.1.3 Paisagem	50
4.1.4 Usos do solo	50
4.2 Cheias em Barcelos	51
5. Modelo unidimensional da bacia hidrográfica do baixo cávado.....	57
5.1 Modelo hidrodinâmico da bacia do Cávado.....	57
5.2 Modelo hidrológico da bacia do Cávado.....	59
5.3 Parâmetros de calibração do modelo hidrológico	70
5.4 Ponte medieval de Barcelos	74
5.5 Sistema de previsão de cheias	78
6. Análise e discussão dos resultados	81
6.1 Resultados da calibração do modelo	81
6.2 Resultados das simulações em <i>SOBEK</i>	87
6.3 Simulação de cenários de cheia	93
7. Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	105
7.1 Conclusões.....	105
7.2 Desenvolvimentos futuros	107
Bibliografia	109
Anexo A	113
Anexo B	121

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 3 – MODELAÇÃO MATEMÁTICA

Figura 3.1: Variáveis intervenientes na equação da energia (Cardoso, 1998).....	18
Figura 3.2: Seleção do modelo hidrológico a utilizar, <i>RRL</i>	26
Figura 3.3: Introdução dos dados diários de precipitação, evaporação e caudal, <i>RRL</i>	27
Figura 3.4: Seleção dos métodos de optimizadores e funções objetivo, <i>RRL</i>	27
Figura 3.5: Display de entrada no <i>SOBEK</i>	30
Figura 3.6: Janela de gestão de casos, <i>SOBEK</i>	30
Figura 3.7: Janela de gestão de casos após abrir/criar um novo caso, <i>SOBEK</i>	31
Figura 3.8: Esquema conceptual do modelo de <i>Sacramento</i> (adaptado de Pinho & Vieira 2006).....	34
Figura 3.9: Exemplo de implementação do modelo RR (P. M. F. Martins, 2013)	35
Figura 3.10: Componentes de um SIG (adaptado de Santos et al. 2014)	42

CAPÍTULO 4 – CARATERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Figura 4.1: Localização da bacia a nível nacional (José L. S. Pinho, Brito, & Costa, 2008)	46
Figura 4.2: Bacia hidrográfica do Cávado e seus afluentes (J. Pinho, Vieira, Pinho, & Araújo, 2011) ..	47
Figura 4.3: escoamento na bacia hidrográfica do rio Cávado (Jesus, 2012)	48
Figura 4.4: Variação da altura de precipitação na bacia hidrográfica do rio Cávado (Jesus, 2012).....	49
Figura 4.5: Temperatura na bacia hidrográfica do rio Cávado (Jesus, 2012).....	50
Figura 4.6: Cheias junto à ponte de Barcelinhos em 1962 (A. A. A. da C. L. Martins, 2007).....	52
Figura 4.7: a) Confluência do ribeiro de Vila com o rio Cávado (canto superior direito) b) Barcelinhos (A. A. A. da C. L. Martins, 2007).....	52
Figura 4.8: Cheias em Barcelos no ano de 2000/2001 a) Habitação (Gomes, 2008) b) Piscinas Municipais (A. A. A. da C. L. Martins, 2007)	53
Figura 4.9: Comparação do caudal durante as cheias do ano de 2001 (a) e num dia normal (b)	53
Figura 4.10: Cheias em Barcelos no ano de 2000/2001 (A. A. A. da C. L. Martins, 2007).....	54
Figura 4.11: Precipitações e caudais médios diários no ano de 2000/2001 (INAG)	54

CAPÍTULO 5 – MODELO UNIDIMENSIONAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO BAIXO CÁVADO

Figura 5.1: Modelo hidrodinâmico da bacia do rio Cávado na ferramenta <i>SOBEK</i>	57
Figura 5.2: Secção transversal definida de forma simplificada (J. L. S. Pinho, 2013).....	58
Figura 5.3: Construção do modelo hidrodinâmico na ferramenta <i>SOBEK</i>	59
Figura 5.4: Transformação dos pontos centrais das sub-bacias (<i>ArcMap</i>) em nós de <i>Sacramento</i> (<i>SOBEK</i>).....	60
Figura 5.5: Gráfico com dados disponíveis entre 1955 e 2004	61
Figura 5.6: Gráfico com dados disponíveis entre 1998 e 2002	61
Figura 5.7: Gráfico com dados disponíveis entre 06/04/2001 e 25/05/2002.....	62
Figura 5.8: Precipitação diária nas estações	63
Figura 5.9: Evaporação média diária (mm)	65
Figura 5.10: Rede de estações hidrométricas, meteorológicas e pontos centrais das sub-bacias, <i>ArcGIS</i>	66

Figura 5.11: Exemplo de aplicação do método de Thiessen (Ferret, 2013).....	67
Figura 5.12: Aplicação do método de <i>Thiessen</i> à bacia do Cávado no <i>ArcGIS</i>	68
Figura 5.13: Obtenção das áreas parcelares das sub-bacias, <i>ArcMap</i>	68
Figura 5.14: Criação de novo evento de precipitação e introdução das estações, <i>SOBEK</i>	69
Figura 5.15: Definição da duração do evento de precipitação, <i>SOBEK</i>	70
Figura 5.16: Precipitação diária na sub-bacia correspondente a Covas (mm).....	71
Figura 5.17: Evaporação média diária (mm).....	71
Figura 5.18: Caudal médio diário em Covas (m ³ /s).....	72
Figura 5.19: Modelo em <i>SOBEK</i>	73
Figura 5.20: Caudal resultante (Q') para calibração em Barcelos (m ³ /s).....	74
Figura 5.21: Precipitação resultante (P') para calibração em Barcelos (mm).....	74
Figura 5.22: Ponte medieval de Barcelos.....	75
Figura 5.23: Levantamento topográfico da Ponte medieval (Planta).....	75
Figura 5.24: Levantamento topográfico da Ponte medieval (Alçado).....	76
Figura 5.25: Arcos da Ponte medieval, <i>Excel</i>	76
Figura 5.26: Introdução da Ponte medieval em <i>SOBEK</i>	77
Figura 5.27: Rede de distribuição do trecho principal para introdução dos 5 arcos, <i>SOBEK</i>	77
Figura 5.28: Introdução da geometria dos arcos da Ponte medieval, <i>SOBEK</i>	78
Figura 5.29: Esquema sintético do funcionamento do sistema de previsão de cheias.....	79

CAPÍTULO 6 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Figura 6.1: Gráfico do caudal observado e do caudal resultante da calibração para Covas (<i>RRL</i>).....	82
Figura 6.2: Gráfico dos valores observados vs valores calculados, diariamente, Covas (<i>RRL</i>).....	82
Figura 6.3: Gráfico dos valores observados vs valores calculados, mensalmente, Covas (<i>RRL</i>).....	83
Figura 6.4: Gráfico representativo da diferença entre o caudal observado e o caudal calculado, Covas (<i>RRL</i>).....	83
Figura 6.5: Curva “Caudal-Frequência”, Covas (<i>RRL</i>).....	84
Figura 6.6: Gráfico do caudal observado e do caudal resultante da calibração para Barcelos (<i>RRL</i>)...	85
Figura 6.7: Gráfico dos valores observados vs valores calculados, diariamente, Barcelos (<i>RRL</i>).....	85
Figura 6.8: Gráfico dos valores observados vs valores calculados, mensalmente, Barcelos (<i>RRL</i>).....	86
Figura 6.9: Gráfico representativo da diferença entre caudal observado e caudal calculado, Barcelos (<i>RRL</i>).....	86
Figura 6.10: Curva “Caudal-Frequência”, Barcelos (<i>RRL</i>).....	87
Figura 6.11: Introdução dos parâmetros nos nós de <i>Sacramento</i> , <i>SOBEK</i>	88
Figura 6.12: Capacidades dos reservatórios e taxas de drenagem utilizadas nos nós de <i>Sacramento</i> , <i>SOBEK</i>	89
Figura 6.13: Caudal observado vs caudal simulado em Barcelos (m ³ /s), <i>SOBEK</i>	90
Figura 6.14: Caudal observado vs caudal simulado em Barcelos (m ³ /s), <i>SOBEK</i>	91
Figura 6.15: Relação caudal (m ³ /s) - altura de água (m) na Ponte medieval de Barcelos.....	91
Figura 6.16: Comparação do caudal efluente na barragem da Caniçada e o caudal em Barcelos (m ³ /s).....	92
Figura 6.17: Comparação da altura de água na Ponte medieval com existência de precipitação e sem precipitação (m).....	93
Figura 6.18: Cenário 3.....	97

Figura 6.19: Cenário 6	97
Figura 6.20: Cenário 9	98
Figura 6.21: Cenário 12	98
Figura 6.22: Caudais simulados para os diferentes períodos de retorno (m^3/s)	99
Figura 6.23: Alturas de água na Ponte medieval para os diferentes períodos de retorno (m)	99
Figura 6.24: Relação caudal (m^3/s) – altura de água na Ponte medieval (m) resultante da simulação do cenário 13.....	100
Figura 6.25: Cheias em Barcelos em 1962	101
Figura 6.26: Alçado da ponte com a altura da água a uma cota de 17 metros (representada a vermelho), cheias de 1962	101
Figura 6.27: Cheias em Março de 2001, Barcelos	102
Figura 6.28: Alçado da ponte com a altura da água a uma cota de 12 metros (representada a vermelho), cheias de Março de 2001.....	102
Figura 6.29: Altura da água na Ponte medieval em Novembro de 1960, (Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho)	103

ÍNDICE DE QUADROS

CAPÍTULO 3 – MODELAÇÃO MATEMÁTICA

Tabela 3.1: Variáveis de estado do modelo Sacramento (L. M. V. Vieira & Pinho, 2014)	35
Tabela 3.2: Parâmetros do modelo de Sacramento e intervalos de variação (L. M. V. Vieira & Pinho, 2014)	36

CAPÍTULO 4 – CARATERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Tabela 4.1: Caudal médio diário descarregado na barragem da Caniçada (m^3/s), (SNIRH)	55
Tabela 4.2: Caudal médio descarregado na barragem da Caniçada no mês de Março de 2001 (m^3/s), (SNIRH)	55

CAPÍTULO 5 – MODELO UNIDIMENSIONAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO BAIXO CÁVADO

Tabela 5.1: Percentagens utilizadas para preencher as falhas de dados das estações	64
Tabela 5.2: Estações Meteorológicas (SNIRH, 2015)	65
Tabela 5.3: Estações Hidrométricas (SNIRH, 2015)	66

CAPÍTULO 6 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Tabela 6.1: Parâmetros de <i>Sacramento</i> , Covas	81
Tabela 6.2: Parâmetros de <i>Sacramento</i> , Barcelos	84
Tabela 6.3: Valores utilizados para avaliação dos resultados em Barcelos	90
Tabela 6.4: Caudal de ponta de cheia na barragem da Caniçada para diferentes períodos de retorno, (Agência Portuguesa do Ambiente, 2012)	94
Tabela 6.5: Precipitações associadas a diversas durações e períodos de retorno, (Brandão et al., 1998)	95
Tabela 6.6: Cenários de cheia definidos e resultados obtidos	96
Tabela 6.7: Cenário 13	100

ACRÓNIMOS

ARH – Administração da Região Hidrográfica

CE – Comissão Europeia

DAGRI - Diretiva 2007/60/CE relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações

Delft-FEWS – WL | Delft Hydraulics' Flood Warning System

DHI – *Danish Hydraulic Institute*

ESRI - *Environmental Systems Research Institute*

GIS – *Geographic Information System*

HEC – *Hydrologic Engineering Center*

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

SVARH - Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos

PMOT – Plano Municipal de Ordenamento do Território

RAN - Rede Agrícola Nacional

RAS – *River Analysis System*

REN - Rede Ecológica Nacional

RR – *Rainfall Runoff*

RRL – *Rainfall Runoff Library*

SIG – Sistema de Informação Geográfica

USACE – *U.S. Army Corps of Engineers*

1 . INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

As cheias são um fenómeno natural que sempre existiu, porém, a atenção dedicada a este tema tem sido crescente ao longo dos últimos anos.

O Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de Outubro, relativo à avaliação e gestão dos riscos das inundações, refere as inundações como “um fenómeno natural que não pode ser evitado, mas que pode pôr em causa a segurança de pessoas, de bens e do ambiente, podendo provocar desalojados e a perda de vidas humanas, e ser responsável por impactos socioeconómicos relevantes. É, no entanto, possível e desejável reduzir o risco e as consequências prejudiciais que lhes estão associadas, especialmente para a saúde e a vida humanas, o ambiente, o património cultural, as atividades económicas e as infraestruturas” (Ministério do Ambiente e Ordenamento de Território, 2010).

As cheias são um fenómeno que ocorre devido à eventual simultaneidade de diversos fatores meteorológicos, porém, o uso e ocupação pelo Homem da bacia hidrográfica tem identicamente um impacto na severidade e consequências desses eventos. A expansão urbana e progressiva impermeabilização dos solos, associada à desflorestação, geram um escoamento superficial excessivo, promovendo a probabilidade de ocorrência de cheias.

Ao longo de vários anos, a resposta às situações de cheia caminhou pela edificação de grandes projetos de controlo de cheia – reservatórios, barragens, diques – as consideradas soluções estruturais. Estas soluções tiveram como resultado uma ocupação excessiva e gradual dos locais de cheia, havendo um aumento do nível de proteção aos riscos de cheia, com investimentos consequentemente maiores, tendo ocorrido num ciclo de proteção de cheia/desenvolvimento. O impacto das cheias a nível socioeconómico e psicológico na atividade humana e o impacto no ambiente levaram às soluções não-estruturais – medidas preventivas e de emergência, planos de gestão de cheias e sistemas de alerta e previsão (Maia & Ribeiro, 1998).

A Lei da Água, aprovada pela Lei n.º 58/2005, de 29 de Dezembro, no que concerne às medidas de proteção contra cheias e inundações, estabelece a obrigação da elaboração de

planos de gestão das bacias hidrográficas, por forma a garantir a eficácia das medidas de redução dos riscos de inundações. Com o objetivo de reforçar a legislação em vigor surge, no âmbito do fenómeno das inundações, a diretiva 2007/60/CE relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações (DAGRI), trazendo medidas acrescidas de avaliação, gestão e mitigação de riscos de inundações.

Nesse contexto surge a necessidade da introdução de novas abordagens e ferramentas e é aí que entra a modelação matemática associada ao suporte informático para previsão de cheias. Este processo é de extrema complexidade, tanto devido à indeterminação relacionada com os caudais de cheia afluentes aquando o desenvolvimento da onda de cheia, como à inconstância das características geométricas dos leitos de cheia (António Sampaio Duarte, Pinho, Ramísio, & Vieira, 2001), estando, portanto, sujeito a erros. O escoamento é quantificado através de dois modelos continuamente conectados: um modelo hidrodinâmico para propagação do caudal em redes de condutas e canais, e um modelo hidrológico para conversão da precipitação em escoamento superficial. Os modelos de previsões são considerados extremamente importantes no estudo e compreensão do comportamento dos sistemas hídricos, sendo essenciais no auxílio de tomadas de decisões.

1.2 Objetivos do trabalho

A presente dissertação tem como objetivo principal contribuir como suporte na tomada de decisões no contexto do planeamento, gestão e previsão de cheias na cidade de Barcelos. Com esse intuito, recorrendo a *software* de modelação hidrológica e hidrodinâmica, pretende-se realizar simulações de caudais e alturas de água em Barcelos, tornando possível a previsão e alerta em caso de cheias e inundações. A elaboração do projeto foi fundamentada no emprego de instrumentos de modelação matemática, usando um modelo hidrodinâmico existente de escoamento da rede fluvial da bacia hidrográfica do rio Cávado, disponibilizado pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, ao qual foi acrescentada a componente hidrológica. O modelo hidrológico foi criado através da consideração de dados hidrológicos de eventos de precipitação da bacia do rio Cávado essenciais para a simulação de cenários de escoamento, calibrando-se e validando-se o modelo com dados históricos de caudal, precipitação e evaporação. Todos os dados foram recolhidos através do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH).

Dentro deste objetivo principal expõem-se alguns fins mais específicos:

- Análise dos instrumentos de modelação hidrodinâmica e hidrológica;
- Apreciação de séries de dados históricos e recolha de dados de campo;
- Implementação, com apoio de um *software GIS*, de um modelo hidrológico no *software SOBEK* baseado no modelo de *Sacramento*;
- Simulações hidrológicas e hidrodinâmicas com vista a estimar as condições de escoamento durante a ocorrência de uma cheia com base em dados de precipitações;
- Procurar seleccionar medidas de controlo das cheias a partir dos resultados do modelo.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos.

O capítulo 1 apresenta uma introdução ao tema a que se dedica esta dissertação, bem como a justificativa, objetivos e disposição da mesma.

O capítulo 2 explica a questão das cheias e inundações, expondo quais os fatores que influenciam este fenómeno, quais as suas consequências na sociedade e como esta pode reduzir os seus efeitos.

O capítulo 3 contém uma análise geral de diversos programas de modelação hidrodinâmica, hidrológica e de modelação geográfica de possível utilização.

O capítulo 4 caracteriza a zona de estudo, apresentando uma pequena resenha histórica de cheias. É descrito o modelo hidrodinâmico e o processo de construção do modelo hidrológico.

O capítulo 5 abrange todo o processo realizado para desenvolvimento do modelo hidrológico e hidrodinâmico no programa *SOBEK*. É, ainda, apresentada a calibração do modelo com a ferramenta *RRL* e a descrição do funcionamento do sistema de previsão de cheias.

O capítulo 6 descreve e aprecia os resultados das simulações efetuadas no projeto, tal como a calibração e verificação do modelo hidrológico e a simulação de cenários de cheia para diferentes períodos de retorno.

O capítulo 7 traduz-se na conclusão da dissertação, indicando dificuldades encontradas, comentários acerca do *software* aplicado, conclusões e possíveis desenvolvimentos futuros relativos ao modelo criado.

2 . ESTUDO DAS CHEIAS E INUNDAÇÕES

2.1 Considerações gerais

Uma cheia é um fenómeno hidrológico intenso e inconstante, que consiste no transbordo de um curso de água, relativamente ao seu leito comum, gerando a inundação de terrenos marginais (Ramos, 2013). As inundações são igualmente fenómenos hidrológicos, de frequência variável, de origem natural ou humana, que são designadas pela “cobertura temporária por água de uma terra normalmente não coberta por água” (UE, 2007).

Estes acontecimentos podem ter consequências negativas, tais como a morte de seres humanos e outros seres vivos, a destruição de bens materiais como habitações e estradas e danos no meio ambiente, na economia e na riqueza cultural. Existe, portanto, uma grande necessidade de desenvolver medidas de prevenção por forma a evitar a ocorrência dos mesmos. As cheias não podem ser evitadas, mas os seus prejuízos podem ser reduzidos. Apesar de ser um fenómeno natural, há várias atividades humanas que contribuem para o seu agravamento, como a urbanização de planícies aluviais, a desflorestação e a impermeabilização dos solos. No quadro legal cada vez são mais as medidas efetivas para prever as cheias, limitar as consequências, e promover uma utilização mais sustentável do solo.

2.2 Classificação das precipitações

A precipitação consiste na totalidade da água meteórica com origem no vapor de água da atmosfera que atinge a superfície terrestre. Água meteórica é constituinte da chuva, chuvisco, aguaceiro, neve, granizo, orvalho e geadas. A chuva é o género de precipitação mais relevante, devido à sua importância no gerar do escoamento (Rodrigues, Moreira, & Guimarães, 2011).

A classificação das precipitações está relacionada com o modo como se dá a ascensão do ar húmido até às camadas mais gélidas da atmosfera, podendo estas ser qualificadas em convectivas, orográficas e frontais ou ciclónicas.

Precipitações convectivas são originadas pelo arrefecimento direto de uma massa de ar. Dá-se uma brusca subida de ar menos denso que atinge a sua temperatura de condensação,

originando a formação de nuvens e, geralmente, causando precipitação. Normalmente são geradas chuvas de grande intensidade e reduzida duração, conduzindo a inundações nas bacias hidrográficas de área diminuta.

Precipitações orográficas advêm de uma massa de ar, induzida pela ação do vento, que ao encontrar uma cadeia montanhosa é forçada a deslizar progressivamente sobre as vertentes até arrefecer aquém do instante de saturação, formando as nuvens e depois precipitação. A precipitação traduz-se por chuvadas de pouca intensidade mas com a possibilidade de prevalecer durante vastos períodos de tempo.

Precipitações frontais ou ciclónicas estão relacionadas com a transição de perturbações ciclónicas podendo a elevação do ar ser fomentada por uma baixa de pressão ou pelo toque de duas massas de ar, uma quente e outra fria. As chuvas originadas são de grandes períodos de tempo, com intensidades moderadas, mas atingem grandes superfícies, podendo provocar cheias em bacias com amplas áreas.

2.3 Tipos de cheias

Existem diversos tipos de cheias. Em Portugal, usualmente, destacam-se três tipos principais de cheias: as cheias rápidas, as cheias progressivas e as inundações urbanas (Gonçalves, 2012).

As cheias rápidas são as mais imprevisíveis, sendo por isso as mais destrutivas. São caracterizadas por precipitações intensas durante períodos de tempo curtos. A sua previsão consiste num processo extremamente complexo dado as suas características meteorológicas muito específicas, maioritariamente de origem convectiva. Todavia, a variação deste fenómeno não se relaciona apenas com fatores meteorológicos, esta também está ligada a fatores morfológicos (altitude, declives), a usos do solo e à pressão antrópica sobre o meio físico (Bateira, Pereira, Martins, & Santos, 2007).

As cheias progressivas são provenientes de períodos chuvosos de longa duração que causam a subida dos níveis de água nos rios de forma crescente. Estas possuem a particularidade de se desenvolverem em áreas extensas. A intensa precipitação durante grandes períodos de tempo causa a saturação dos solos e, conseqüentemente, a perda da sua capacidade de

armazenamento de água. Porém, há que salientar que estas cheias são menos gravosas que as cheias rápidas, porque sendo o acréscimo de caudal gradual, o fator de imprevisibilidade é menor, dando tempo à população para se defender e prevenir danos maiores.

2.4 Fatores que influenciam as cheias

Os fatores que contribuem para a alteração das condições das cheias podem ser divididos em naturais e antrópicos. Relativamente aos fatores naturais estes podem ser organizados em fisiográficos, climatológicos e distribuição temporal e espacial da precipitação.

2.4.1 Fatores Naturais

Os **fatores fisiográficos** são diversos, mas os mais importantes englobam a área, forma, relevo, cobertura vegetal, e natureza geológica da bacia hidrográfica, assim como as características do canal fluvial.

A área da bacia tem influência na medida em que quanto maior for, maior é a quantidade de água que alimenta os cursos de água, dando origem a caudais superiores.

A forma da bacia influencia o escoamento pelo impacto que tem sobre a intensidade dos fluxos e sobre o tempo médio de condução da água desde o ponto de impacto até ao de saída. Nas bacias circulares, os afluentes geralmente fluem para o centro da bacia, aumentando a descarga e a concentração do escoamento. Contrariamente, nas bacias de forma alongada, os caudais afluentes tendem a ser mais distribuídos ao longo do rio principal, gerando um menor aumento de caudal comparativamente às bacias circulares.

O relevo determina de modo significativo a quantidade e a velocidade do escoamento para os cursos de água. Isto porque quanto mais elevado for o declive da vertente, maior será a velocidade de escoamento superficial, permitindo que o caudal de cheia aconteça mais rapidamente.

A cobertura vegetal e natureza geológica da bacia hidrográfica determinam o potencial e a velocidade de infiltração da água. Uma bacia com mais cobertura vegetal vai ter maior capacidade de retenção de água, sendo por isso mais permeável, o que atrasa o escoamento

superficial, trabalhando como uma barreira para o aumento do caudal de cheia. O seu efeito é semelhante ao que o relevo da bacia exerce. Uma bacia com grande inclinação e bastante impermeável é muito propícia à ocorrência de cheias.

Os **fatores climatológicos** englobam a temperatura, humidade do ar e humidade do solo. Quanto mais saturado estiver o solo, menor a capacidade de armazenamento de água.

A **distribuição temporal e espacial da precipitação** dita as características das tempestades. Quanto mais intenso for o período de precipitação, bem como a sua dimensão, maior vai ser a probabilidade de ocorrência de uma cheia.

2.4.2 Fatores Antrópicos

Existem inúmeros fatores relacionados com a atividade humana que propiciam a ocorrência de cheias, tais como as alterações no uso do solo na bacia hidrográfica, a desflorestação, impossibilitando a infiltração das águas pluviais. Também a existência de pontes e outros obstáculos provoca o estrangulamento do leito do rio, dificultando a passagem da água.

A crescente urbanização de zonas naturalmente inundáveis obstrui os leitos de cheia, provocando um aumento dos caudais de ponta de cheia e das cotas que definem regiões propensas a alagamentos, contribuindo também para uma diminuição da capacidade de vazão dos cursos de água (S. Santos, Monteiro, Mourato, & Fernandez, 2006).

A deficiente conceção das redes de drenagem das águas pluviais e a regularização das linhas de água, através da construção de pontes e diques, que provocam o estrangulamento dos canais, são outros fatores relevantes no acontecimento de cheias.

2.5 Indicadores de probabilidades de ocorrência de cheias

A partir da forma da bacia hidrográfica é possível calcular determinados índices que traduzem a sua suscetibilidade a concentrar o escoamento superficial resultante de precipitações intensas.

O **índice de compacidade** ou **índice de Gravelius**, K_c , é a relação entre o perímetro da bacia, P , e o perímetro de uma bacia circular de igual área, A , de raio r . A área e o perímetro da bacia circular serão respetivamente:

$$A = \pi r^2 \quad (1)$$

$$P = 2\pi r \quad (2)$$

sendo,

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (3)$$

logo,

$$K_c = \frac{P_b}{2\pi r} \quad (4)$$

ou seja,

$$K_c = 0.28 \frac{P_b}{\sqrt{A}} \quad (5)$$

em que as variáveis assumem o seguinte significado:

P_b é o perímetro da bacia em estudo [km];

A é a área da bacia [km^2].

Se este fator for igual a 1 significa que a bacia em estudo é circular. Portanto, e em igualdade dos restantes parâmetros, uma bacia com índice de compacidade próximo da unidade vai ter mais tendência para grandes cheias.

O **fator de forma**, K_f , traduz a relação entre a largura média, l , e o comprimento da bacia, L . A largura média da bacia define-se pela razão entre a área da bacia, A , e o seu comprimento. Assim, K_f será:

$$K_f = \frac{l}{L} = \frac{A}{L^2} \quad (6)$$

Quanto menor o fator de forma menor a suscetibilidade da bacia à ocorrência de cheias comparativamente a outra de igual tamanho, mas com um fator de forma mais elevado. Isto porque na bacia estreita e longa, a probabilidade de ocorrência de precipitação intensa que cubra simultaneamente toda a extensão da bacia é baixa. De salientar também que a contribuição dos afluentes na bacia alongada atinge o rio principal em vários pontos ao longo do mesmo, enquanto que na bacia circular dá-se a concentração de todo o caudal da bacia num só ponto.

A **densidade de drenagem**, D_d , consiste na relação entre o comprimento total dos cursos de água de uma bacia e a sua área total.

$$D_d = \frac{L}{A} \quad (7)$$

sendo:

L , o comprimento total dos cursos de água [km];

A , a área da bacia [km^2].

Este parâmetro fornece uma boa indicação da drenagem natural da bacia, expressa-se em km/km^2 e varia de $0,5 km/km^2$ para bacias com drenagem pobre a $3,5 km/km^2$ para bacias devidamente drenadas. As bacias com maior densidade de drenagem estão mais propensas a cheias do que as com menor densidade de drenagem.

2.6 Avaliação e gestão dos riscos de inundações

O regulamento das áreas inundáveis é uma prioridade, pois a exposição ao risco de inundação é cada vez mais elevada e preocupante. Como tal, um preciso planeamento do solo com advertência das restrições e limitações à construção urbana será uma medida de prevenção das consequências das inundações.

É crucial entender os processos que causam as inundações e as suas consequências. A prática evidenciou que o modo mais seguro baseia-se na instituição de programas de gestão dos riscos de inundação que envolvam os seguintes princípios: prevenção, proteção, preparação, solução de emergência e restabelecimento e experiência obtida (Teles, 2010).

Em 2007 a União Europeia considerou legítimos os riscos aliados a este fenómeno e validou a Diretiva 2007/60/CE relativa à gestão do risco de inundações, que tem como objetivo avaliar e reduzir o risco e os efeitos nocivos das inundações no território da União Europeia. Por conseguinte, objetiva-se que a gestão do risco ultrapasse as fronteiras nacionais e atenda ajustes necessários, clarificando e incentivando a envolvimento dos cidadãos. Os Estados-Membro ficam com a incumbência de apresentar medidas que reduzam o risco, tendo que elaborar cartas das zonas inundáveis, cartas de risco e realizar planos de gestão para essas zonas. Ficam assim os municípios incumbidos de incluir nos Planos Municipais de Ordenamento do Território (PMOT) a delimitação das zonas inundáveis nas plantas síntese e estabelecer as restrições necessárias para fazer face aos riscos de inundação. Se assim cumprirem, será feito um importante caminho no sentido da prevenção do risco de inundação.

Em Portugal, o quadro legislativo existente é cada vez mais abrangente. A diretiva referida anteriormente foi mais tarde transposta pelo Decreto-Lei nº115/2010 de 22 de Outubro, que estabelece um quadro para avaliação e gestão do risco de inundações e prevê que os procedimentos e verificação dos planos municipais de ordenamento do território sejam cumpridos em conformidade com o panorama legal em vigor, no sentido de demarcação das áreas alagáveis, das zonas ameaçadas pelas cheias e zonas ameaçadas pelo mar (Gonçalves, 2012).

A Reserva Ecológica Nacional (REN), numa ótica conservadora, declarou as zonas ameaçadas pelas cheias como áreas de perigo, às quais agregou áreas ainda livres de

ocupação, passando estas a constituir uma restrição de utilidade pública. A REN foi criada pelo Decreto-Lei n.º 321/83, de 5 de Julho, cujo regulamento foi examinado pelo Decreto -Lei n.º 93/90, de 19 de Março, e depois examinado pelo Decreto -Lei n.º 166/2008, de 22 de Agosto.

Os municípios são obrigados pelo Decreto-Lei nº364/98 de 21 de Novembro, a executar mapas de zonas inundáveis, tendo, portanto, que conter registos de cheias que afetaram as regiões metropolitanas, desde o ano de 1967, no mínimo, para serem capazes de seguidamente delimitarem os perímetros de inundação e determinar normas de limitação à construção.

O artigo nº26 do Decreto-Lei nº54/2005 de 24 de Novembro refere que nas zonas adjacentes às áreas ameaçadas por cheias é possível, ao decreto que executa a nomenclatura, definir áreas de ocupação edificada interdita e ou áreas de ocupação condicionada.

É essencial compreender os processos que causam as inundações e as suas consequências. Tendo isso em conta, os planos de gestão do risco de inundações devem atender às características específicas de cada região e expor soluções em conformidade com as carências e primazias dessas zonas, para assim ser possível a proteção dos bens e vidas das pessoas.

2.7 Avaliação preliminar e identificação das zonas de risco de inundação

O objetivo da avaliação preliminar dos riscos de inundações é viabilizar uma avaliação dos potenciais riscos e terá que ser realizada com o fundamento em informações disponíveis, tais como dados e registos, disponíveis e legítimos, sobre a evolução a longo prazo do impacto das alterações climáticas nos episódios de inundações.

Segundo o Decreto-Lei nº115/2010, de 22 de Outubro, a avaliação preliminar dos potenciais riscos de inundações e identificação de zonas de risco potencial deve conter, pelo menos, os seguintes elementos:

- Cartas da região hidrográfica em grandeza adequada, contendo os limites das bacias e sub-bacias hidrográficas, assim como das zonas costeiras, com denotação dos dados topográficos e de uso do solo;

- Testemunhos históricos de inundações ocorridas no passado e que tenham causado elevados impactos e das ocorrências com probabilidade de se voltarem a realizar no futuro, contendo, pormenorizadamente, as dimensões das inundações, os percursos preferíveis de escoamento e uma análise qualitativa dos danos causados;
- Análise de informação hidrometeorológica, designadamente marcas de cheias, caudais e precipitações relacionadas com acontecimentos intensos;
- Uma ponderação, tendo em consideração as características da região, dos danos que possam ocorrer futuramente devido a inundações, com incidência na saúde humana, meio ambiente, nos bens culturais, infraestruturas e funcionamento económico.

2.8 Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos

A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) é a estrutura com a responsabilidade de propor, auxiliar e certificar a realização e cumprimento das Políticas Nacionais que determinam o setor dos recursos hídricos, executando a Lei da Água mas também um gerenciamento sustentado da mesma.

O Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos (SVARH) constitui um sistema de previsão e segurança de pessoas e bens e é coordenado pelo INAG em articulação com as ARH. O SVARH tem a capacidade de fornecer em tempo-útil informações das características hidrológicas dos rios e albufeiras do país (alturas de água, caudais e volumes armazenados) e dados meteorológicos importantes. O sistema é suportado por uma rede de estações automáticas com teletransmissão, pertencentes às redes meteorológica, hidrométrica e de qualidade de água, e por uma ferramenta informática para arquivamento e transmissão da informação. As estações estão localizadas criteriosamente em locais críticos na vigilância de cheias, secas e acidentes de poluição. Os dados adquiridos podem ser consultados pelo público geral através do *site* do SNIRH. Este sistema é constituído por três módulos: aquisição; armazenamento e simulação; disponibilização (situação atual e previsões). A informação guardada encontra-se disponível através da aplicação RIOS que, de um modo claro e simples, exhibe os dados imediatos e as previsões obtidas nos modelos de simulação.

O SVARH tem como subsistema o Sistema de Vigilância e Alerta de Cheias, que permite a realização de previsões hidrológicas e hidráulicas através da previsão da precipitação, da mensuração dos seus eventos e do progresso do estado de humidade dos solos. As previsões são determinadas para pontos críticos, como montante de albufeiras (caudais), núcleos urbanos (cotas) e estações hidrométricas da rede de vigilância (caudal e cota). Realizadas as previsões, os seus dados são comunicados ao Serviço Nacional de Bombeiros e Proteção Civil através do programa RIOS. As previsões refletem igualmente as zonas inundáveis devido à ligação de modelos hidráulicos e sistemas de Informação Geográfica.

É da competência das estruturas de Proteção Civil territorialmente competentes a coordenação da problemática ligada à prevenção, proteção, preparação, previsão e resposta, no que concerne aos riscos de inundações.

3 . MODELAÇÃO MATEMÁTICA

3.1 Generalidades

A modelação matemática é um método de simular acontecimentos inerentes à realidade na qual estamos introduzidos.

A modelação matemática aplicada à resolução de problemas hidráulicos permite a produção de informação de apoio à decisão, auxiliando na gestão dos recursos hídricos. Através da construção de possíveis cenários de cheias, é possível antecipar acontecimentos futuros ou mesmo fornecer possíveis soluções baseadas nesses mesmos cenários.

A linguagem matemática é a base da formulação dos problemas. Sendo esta uma linguagem clara e precisa, poderá facultar um alto nível de segurança nos resultados.

Contudo, não se pode afirmar que a modelação matemática também seja precisa, pois está associada a diversas variáveis e, dependendo da visão de cada um da realidade, vão ser produzidos diferentes resultados, porém igualmente válidos. A variabilidade de modelos e resultados específicos também se deve à enorme complexidade dos fenómenos naturais que nos rodeiam e que, por esse motivo, implicam, nas diversas fases de desenvolvimento do modelo, a adoção de vários critérios. Salientam-se a verificação e definição das variáveis mais relevantes no processo a desenvolver, as equações empregadas e o modo de as decifrar.

A previsão dos acontecimentos envolvidos no ciclo hidrológico tem proporcionado inúmeros desafios devido à sua elevada complexidade que, acompanhados com o desenvolvimento da linguagem matemática, dos sistemas de resolução e aumento das capacidades de computação, levou à criação e aperfeiçoamento de diversos instrumentos para modelação dos recursos hídricos (Araújo, 2011).

3.2 Tipos e seleção de modelos

É essencial um estudo intenso de um problema para a sua formulação ou resolução. A classificação dos modelos disponíveis para se executar é relevante, pois fornece características convenientes acerca do problema. Os modelos podem ser classificados como

determinísticos, os quais desprezam a variabilidade casual dos dados e, portanto, fornecem soluções iguais para os mesmos elementos iniciais; e como **estocásticos**, com origem em eventos aleatórios e inúmeros resultados possíveis.

É possível dividir os modelos para previsão de caudais de cheias em **empíricos**, **estatísticos** e **cinemáticos**. Esta distinção relaciona-se com o modo como o modelo descreve os acontecimentos naturais que procura caracterizar. Os modelos empíricos surgem da experiência adquirida através da manipulação de dados e devido a métodos de tentativa/erro, desprezando as probabilidades estatísticas de ocorrência. Os modelos cinemáticos entendem os fenómenos da natureza através do estudo e conhecimento do movimento da água na bacia hidrográfica. Os métodos estatísticos são aplicados apenas quando existem dados históricos de caudais de cheia, havendo um risco inerente à fiabilidade dos dados.

É importante que o tipo de modelo escolhido esteja em conformidade com os objetivos definidos e com as simulações a executar. O tipo de informação disponível utilizada no desenvolvimento de um determinado modelo é essencial e o desempenho do modelo é dependente da informação recolhida. Em qualquer modelo é fulcral uma precisa informação geométrica para uma correta simulação dos sistemas a modelar. Nos modelos hidrológicos é essencial possuir modelos digitais do terreno para a totalidade das bacias hidrográficas; levantamentos batimétricos (perfis longitudinais e transversais) das linhas de água e canais nos modelos hidrodinâmicos (Araújo, 2011).

Conjuntamente, é imprescindível a informação hidrométrica e meteorológica, sendo necessária aquando da definição dos dados de entrada do modelo (caudais nos modelos hidrodinâmicos e precipitação nos modelos hidrológicos, por exemplo), na determinação das condições de fronteira (níveis de água e caudais) e igualmente importante na fase de verificação e calibração do modelo, possibilitando a comparação dos resultados obtidos com valores reais.

3.3 Formulação matemática do modelo utilizado

Para uma correta simulação dos processos é necessário o conhecimento da formulação matemática em que se baseiam os modelos.

Os sistemas modelados neste trabalho são designados unidimensionais, pois apenas consideram as variações de velocidade no sentido do escoamento, desprezando a distribuição da velocidade nas restantes direções. A formulação matemática de escoamentos unidimensionais em superfície livre apoia-se nas equações da energia, da conservação da quantidade de movimento e da continuidade. As equações da continuidade e da quantidade de movimento são geralmente designadas por equações de *Saint-Venant*.

A hidrodinâmica consiste na caracterização dos fluxos de água referentes a canais (naturais ou artificiais) ou de albufeiras, e a hidrologia na caracterização de todas as propriedades e fenómenos relacionados com a água, representando a natureza da bacia hidrográfica.

3.3.1 Modelos hidrodinâmicos e hidrológicos unidimensionais

A equação da energia, também designada como equação de *Bernoulli*, utilizada para escoamentos permanentes de líquidos perfeitos ao longo de uma trajetória, exprime a energia mecânica total por unidade de peso do fluido, sob a forma de:

$$\frac{p}{\gamma} + y + \frac{u^2}{2g} = \text{const.} \quad (9)$$

sendo,

p , pressão do fluido em qualquer ponto da trajetória [$N/m^2 = Pa$];

γ , peso volúmico da água [N/m^3];

y , cota geométrica relativamente a um plano horizontal de referência [m];

u , velocidade [m/s];

g , aceleração da gravidade [m/s^2];

Nos escoamentos de fluidos perfeitos, a energia total mantém-se constante ao longo da trajetória. Quando o escoamento exhibe efeitos relevantes de viscosidade, o líquido designa-se por “real”, ao invés de perfeito. Para o estudo de escoamentos de líquidos reais ao longo de tubos de fluxo, é necessário modificar a equação (8) de modo a considerar as perdas de energia e a forma da distribuição de velocidades.

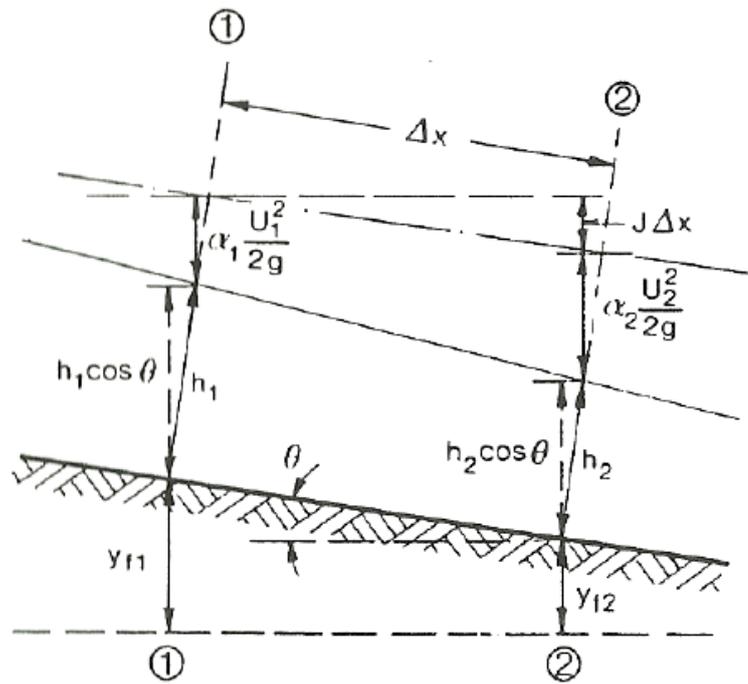


Figura 3.1: Variáveis intervenientes na equação da energia (Cardoso, 1998)

Para escoamentos em superfície livre, permanentes gradualmente variados, em canais pouco inclinados ($\cos \theta \approx 1$, sendo θ o ângulo do fundo com a horizontal), a equação da energia passa a ser:

$$h_1 + y_{f1} + \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} = h_2 + y_{f2} + \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} + J\Delta x \quad (9)$$

em que,

1 e 2, são índices referentes às secções 1 e 2 ;

y_f , é a cota de fundo da secção;

J , perda de carga unitária média entre secções;

α , coeficientes de *Coriolis*;

U , velocidade média do escoamento na secção [m/s];

Δx , comprimento do volume de controle [m].

Os coeficientes de *Coriolis* exprimem a forma da distribuição da velocidade numa secção transversal.

As equações de continuidade e de conservação da quantidade de movimento, apresentam a seguinte forma:

$$\frac{\partial A_f}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat} \quad (10)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_f} \right) + g A_f \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{g Q |Q|}{C^2 R A_f} - W_f \frac{\tau_{wi}}{\rho_w} = 0 \quad (11)$$

em que,

Q , é o caudal [m^3/s];

t , é o tempo [s];

x , é a coordenada unidimensional [m];

A_f , é a área da secção molhada [m^2];

g , é a aceleração da gravidade [m/s^2];

h , é a altura do escoamento [m];

C , é o coeficiente de Chézy [$m^{1/2}/s$];

R , é o raio hidráulico [m];

W_f , é a largura superficial [m];

q_{lat} , é o caudal lateral unitário [m^2/s];

τ_{wi} , é a tensão tangencial devida ao vento [N/m^2];

ρ_w , é a massa volúmica da água [kg/m^3].

3.4 Software de modelação hidrodinâmica e hidrológica

3.4.1 MIKE

A ferramenta *MIKE* foi desenvolvida pelo *DHI* (Instituto Dinamarquês de Hidráulica), organização que atua no domínio das questões relacionadas com a gestão da água a nível mundial (DHI, 2014).

Em termos de gestão de recursos hídricos possibilita integrar as seguintes componentes: transporte de sedimentos, ecologia, rios e reservatórios, cheias, alterações climáticas, qualidade, gestão e distribuição da água, água superficial e subterrânea, fluxos em meios porosos.

A ferramenta é de ampla versatilidade, tendo componentes para modelação aplicada a:

- Cidades (*MIKE URBAN* e *WEST*);
- Zonas costeiras e oceanos (*MIKE C-MAP*, *LITPACK*, *MIKE 21*, *MIKE ANIMATOR PLUS* e *MIKE 3*);
- Águas subterrâneas (*FEFLOW 6.2*, *NETLM 5.1* e *FEFLOW DEMO Data*);
- Recursos hídricos (*MIKE FLOOD*, *MIKE HYDRO Basin*, *MIKE SHE* e *MIKE 11*).

Tanto o *MIKE 11* como o *MIKE 21* são ferramentas de fácil utilização que apoiam nas tomadas de decisões. O *MIKE 11* permite simular problemas relacionados com cheias, qualidade da água, previsões, transporte de sedimentos, ou combinações destes e outros tópicos de engenharia fluvial. É composto por um simulador hidrodinâmico (HD) em 1D para rios e canais a céu aberto e um simulador hidrológico, que inclui uma vasta gama de módulos possíveis de ser adicionados, como por exemplo o modelo *Rainfall Runoff*.

O *MIKE FLOOD* consiste num sistema bastante amplo para modelação de inundações. Efetua as simulações em 1D e 2D, sendo possível a modelação da quase totalidade dos problemas de inundações abrangendo rios, planícies aluviais, ruas inundadas, redes de drenagem, zonas costeiras, rutura de barragens e diques, ou qualquer combinação destes.

O *MIKE FLOOD* possui uma série de aplicações:

- Avaliações rápidas de inundações;
- Mapeamento de áreas de risco de inundações;

- Análise de riscos de inundações

- Planeamento de medidas para inundações

- Estudo do impacto de alterações climáticas;

- Análise de falhas de medidas contra inundações;

- Modelação integrada de inundações relativas a drenagem urbana, rios e áreas costeiras;

- Gestão de enchentes.

3.4.2 HEC

O *HEC (Hydrologic Engineering Center)* da *USACE (US Army Corps of Engineers)* tem vindo a desenvolver uma gama de modelos que permitem a gestão de dados acerca dos fenómenos ambientais que condicionam o controlo dos recursos hídricos, instrumentos úteis no apoio ao planeamento.

O modelo hidráulico *HEC-RAS* consiste num dos modelos hidráulicos mais conhecidos na delimitação das zonas inundáveis fluviais, é constituído por um modelo 1D que resolve as equações de *Saint-Venant* completas, através do método de diferenças finitas, capacitando a simulação do escoamento em superfície livre em regime permanente e em regime variável. A delimitação da zona inundada é realizada através do cálculo das alturas de água nas secções do escoamento. A região inundada é limitada pelo cruzamento da topografia do terreno com a superfície livre em cada secção e o resultado da interpolação entre os perfis das secções transversais. É possível a integração do modelo com um SIG através da ferramenta *HECGeoRAS*. Devido ao seu carácter unidimensional, o modelo não é adequado se as secções transversais do canal exibirem grandes irregularidades, em virtude de o modelo manter a cota da superfície livre constante na secção transversal.

O modelo hidrológico *HEC-HMS* adota a bacia hidrográfica como um conjunto de sub-bacias hidrográficas nas quais os fenómenos hidrológicos são simulados com base em parâmetros que refletem as condições médias na área. Os processos consistem, sequencialmente, na

precipitação, na interceção, na infiltração e no escoamento superficial na área de drenagem e o escoamento e a propagação da onda de cheia na rede hidrográfica. Os resultados finais do processo de simulação são os hidrogramas de cheia nas secções de referência das sub-bacias e na secção de referência da bacia hidrográfica estudada. O modelo hidrológico *HEC-HMS* permite uma integração com os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), através do *software HEC-GeoHMS* (Fernandez, Mourato, & Moreira, 2013).

3.4.3 Delft FEWS

O *Delft-FEWS* é um sistema sofisticado composto por um conjunto de módulos passíveis de serem utilizados sequencialmente com o objetivo de criar um sistema funcional de controlo de recursos hídricos adequado às exigências individuais de cada organização (Pinto, Gibertoni, Rego, Schwanenberg, & Reis, 2013). O sistema foi elaborado pela *DELTARES* e possibilita a manipulação e a ligação de inúmeros dados hidrometeorológicos, tanto monitorizados como previstos, bem como modelos hidrológicos e hidráulicos. É uma ferramenta valiosa no que concerne a tomadas de decisões ambientais estratégicas, pois atua em tempo real.

O sistema *Delft-FEWS* disponibiliza um *software* através do qual o sistema de previsão pode ser concebido segundo condições específicas, fornecendo assim os dados de entrada e parâmetros. Seguidamente, executa o modelo (hidrológico e/ou hidrodinâmico) e lê os resultados.

Os elementos do sistema encontram-se interligados por uma base de dados central que obriga a que, tanto a obtenção como o armazenamento dos dados, sejam efetuados por um módulo de acesso. Toda a gestão e operação dos vários módulos é feita através de uma interface *WEB*, o que permite que o sistema seja independente de uma implementação física de uma base de dados (Pinto et al., 2013). O *Delft-FEWS* contém um módulo de importação de dados onde é possível a gestão de dados em inúmeros formatos distintos através de uma classificação em *JAVA* desenvolvida para formato de dados.

Os aplicativos do sistema incluem: controle de qualidade dos dados de precipitação importados da base de dados hidrológicos em tempo real, agregação dos dados em intervalos horários, interpolação dos dados utilizando polígonos de *Thiessen*, obtenção de taxa de precipitação através de imagens de radar, obtenção de dados através do *grid* numérico,

correção do hidrograma gerado pelo modelo hidrológico através do algoritmo de correção de erro (*ARMA*), entre outros (José L. S. Pinho & Vieira, 2006).

Os resultados da previsão são obtidos na forma de gráficos e tabelas podem ser emitidos num sistema de alerta, sendo passíveis de se incluir em mapas para visualização geográfica de dados relevantes.

3.4.4 RMA2

O programa *RMA2* foi originalmente desenvolvido por *Norton, Orlob e Ian King* (1973) e consiste num modelo hidrodinâmico 1D/2D que utiliza o método dos elementos finitos para calcular níveis de água e velocidades de escoamentos subcríticos e de superfície livre (Donnell, Letter, McAnally, & Thomas, 2006).

A ferramenta soluciona problemas relacionados com regimes permanentes e variáveis.

Tem vindo a ser utilizada desde meados da década de 1970 sendo, por isso, um dos primeiros motores da hidrodinâmica multidimensional bastante utilizado em aplicações ribeirinhas e estuarinas (L. M. V. Vieira, 2013).

O programa *RMA2*, baseado no método dos elementos finitos, permite a obtenção de soluções em regime permanente ou variável, com o estabelecimento de condições de fronteira variáveis ao longo do tempo. As soluções são obtidas num determinado número de instantes, nos pontos nodais da malha de elementos finitos (José L. S. Pinho, 2000).

A aplicação é geralmente utilizada para calcular os níveis de água e distribuição do escoamento em redor de ilhas e na contração e expansão de trechos. É, também, utilizada no cálculo dos níveis e padrões de escoamento geral em rios, reservatórios e estuários.

O *software* despreza as acelerações verticais e considera que os vetores da velocidade geralmente apontam para a mesma direção ao longo de toda a profundidade da coluna de água em qualquer instante do tempo. Devido a este facto, o programa limita-se a problemas de escoamento com superfície livre bidimensionais no plano horizontal.

Devido às suas limitações, já anteriormente referidas, o programa não se adequa ao solucionamento de problemas onde vórtices, vibrações ou acelerações verticais são de interesse relevante. Escoamentos não homogêneos verticalmente ultrapassam as competências do *RMA2*. Problemas mais complexos em que as variações verticais sejam fundamentais deverão ser resolvidos recorrendo a um modelo tridimensional como o *RMA10*.

3.4.5 RRL

O *RRL (Rainfall Runoff Library)* utiliza dados diários de precipitação e de evaporação e a área da sub-bacia para gerar escoamento diário. Foi desenvolvido pelo *CRC (Catchment Hydrology's Predicting Catchment Behaviour Research Program)* em 2002.

O *RRL* dispõe de 5 modelos hidrológicos, 7 métodos de otimização, 8 funções objetivo primárias e 3 funções objetivo secundárias.

Os 5 modelos hidrológicos são:

- *AWBM*;
- *Sacramento*;
- *SimHyd*;
- *SMAR*;
- *TANK*.

Os 7 métodos de otimização disponibilizados pelo *RRL* são:

- *Genetic Algorithm*;
- *Pattern Search Multi-Start*;
- *Uniform Random Sampling*;

- *Rosenbrock Multi-Start Optimiser;*
- *Rosenbrock Single Start;*
- *SCE-UA;*
- *Pattern Search.*

As 8 funções objetivo primárias são:

- *Nash-Sutcliffe Criterion;*
- *Sum of squares of errors;*
- *RMSE;*
- *RMS difference about bias;*
- *Absolute value of bias;*
- *Sum of square roots;*
- *Sum of squares of difference of square roots;*
- *Sum of difference of logs.*

E por fim, as 3 funções objetivo secundárias são:

- *Runoff difference in %;*
- *Flow Duration Curve;*
- *Base Flow Method 2.*

Após selecionar o modelo hidrológico a utilizar (Figura 3.2) e introduzir a área da sub-bacia a calibrar e os dados diários de evaporação, precipitação e caudal (Figura 3.3), o utilizador tem a possibilidade de variar entre estas 18 opções distintas, combinando funções e métodos optimizadores (Figura 3.4).

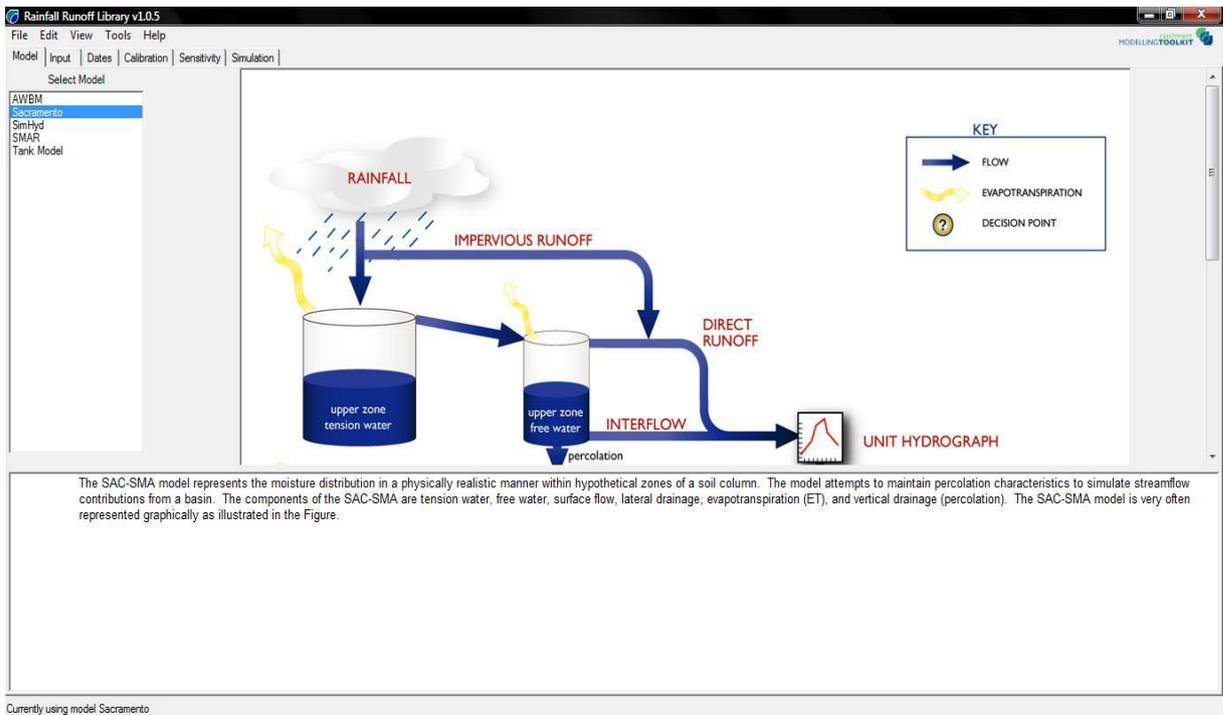


Figura 3.2: Seleção do modelo hidrológico a utilizar, *RRL*

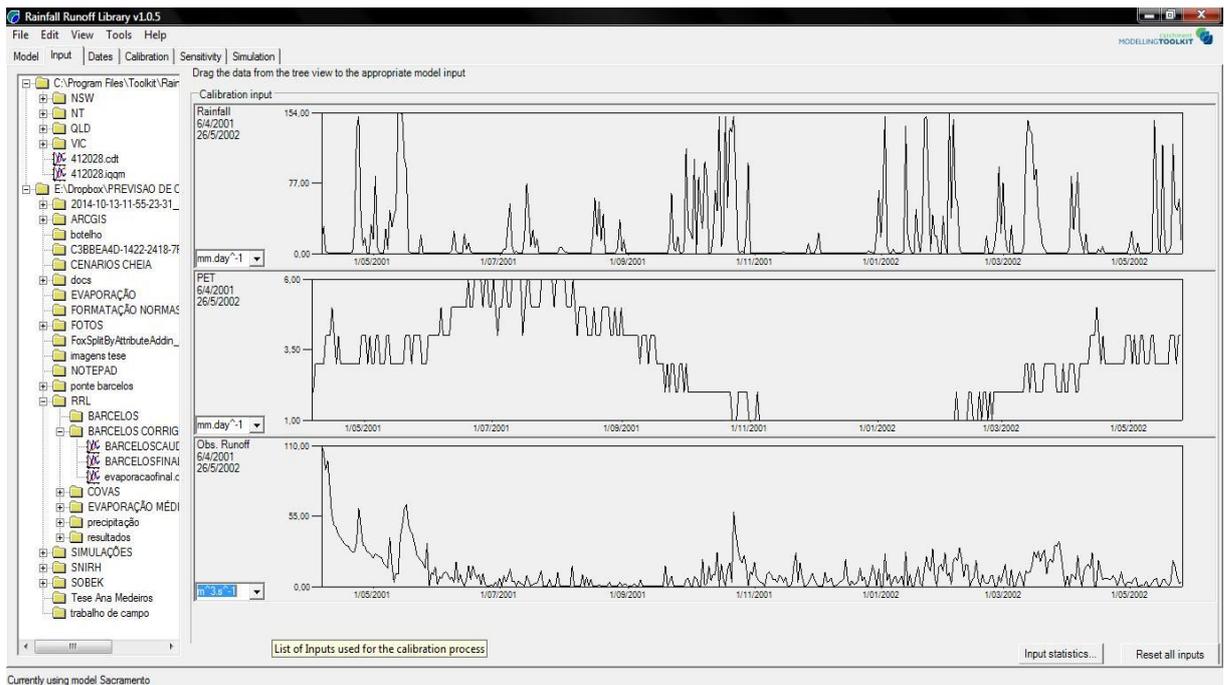


Figura 3.3: Introdução dos dados diários de precipitação, evaporação e caudal, RRL

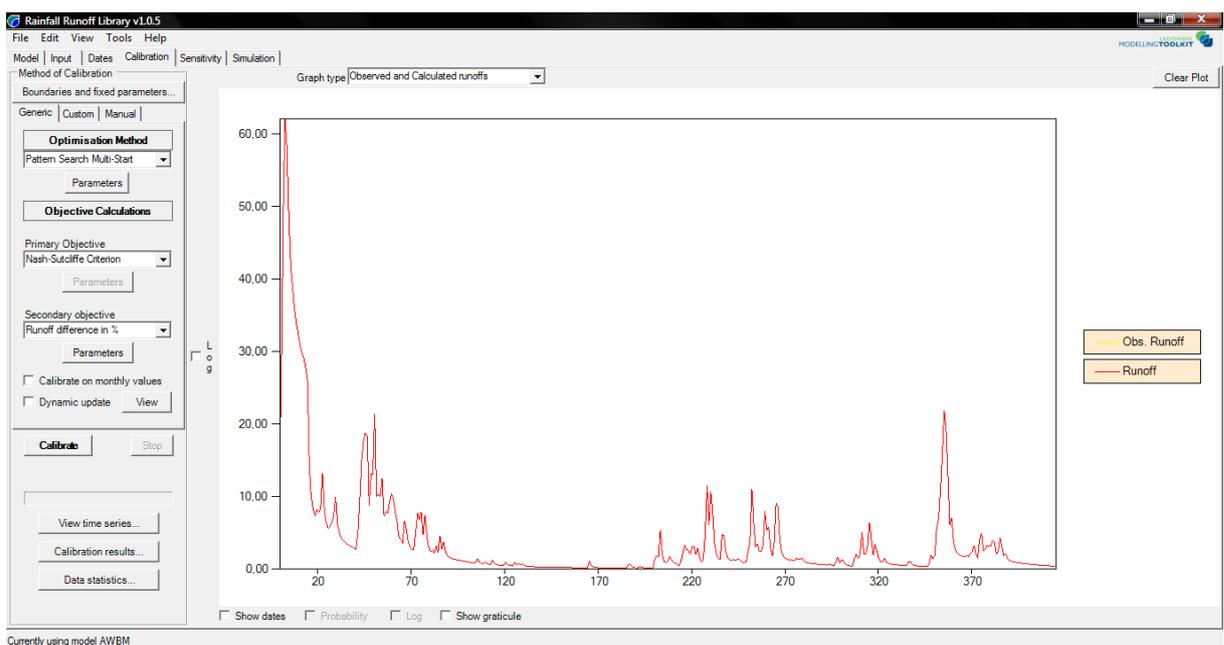


Figura 3.4: Seleção dos métodos de optimizadores e funções objetivo, RRL

A otimização traduz-se na procura do valor de uma variável ou de múltiplas variáveis que propicie o melhor resultado para uma função dependente dessas variáveis, representando o objetivo desejado, a denominada função objetivo (Celeste & Chaves, 2014).

A escolha da função objetivo e do algoritmo de otimização é uma etapa fundamental para que o modelo tenha um bom desempenho. O objetivo da função objetivo é aproximar os valores de caudal calculados e observados, minorando ao máximo a diferença entre eles.

No presente trabalho foi utilizada como função objetivo o critério de *Nash-Sutcliffe*. A eficiência E é calculada por:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (12)$$

Em que $Q_{obs}(t)$ e $Q_{sim}(t)$ são, respetivamente, os caudais observados e simulados no período de tempo t , e \bar{Q}_{obs} é o caudal médio observado ao longo do horizonte $t = 1, \dots, T$.

A eficiência pode variar entre $-\infty$ e 1, em que o valor de 1 corresponde a um ajuste perfeito dos dados de caudal simulados e observados e o valor de 0 significa que as previsões do modelo são tao exatas como a média dos dados observados. Quando a eficiência é menor do que zero quer dizer que a média observada é um indicador melhor do que o modelo (Celeste & Chaves, 2014).

Os métodos de otimização geralmente são divididos em locais e globais. Os métodos locais garantem no mínimo uma solução ótima local (que pode ser global) e são, normalmente, rápidos. Os métodos globais apesar de convergirem para um ótimo global exigem bastante mais tempo de processamento. Neste trabalho foi utilizado o Algoritmo Genético, método que aplica regras heurísticas na procura de um mínimo global de funções objetivo em problemas de otimização. Começa por procurar um conjunto de soluções aleatórias que são avaliadas segundo certos parâmetros, em que a partir das melhores soluções e transformação de algumas delas é gerado outro conjunto de soluções. Após sucessivas iterações o método converge para a solução ótima.

Como dados de saída, o *RRL* fornece a série de caudais simulados, os valores dos parâmetros encontrados, os coeficientes de correlação e eficiência, os gráficos de dispersão dos caudais

diários e mensais e os gráficos de comparação entre os valores de caudais observados e simulados.

3.4.6 SOBEK

No plano do presente trabalho, tendo em conta os objetivos finais, foi selecionado o programa *SOBEK* (*Delft Hydraulics, 2005*) para a modelação hidrodinâmica e hidrológica.

A ferramenta *SOBEK* é utilizada em diferentes casos e estudos: hidrologia, hidrodinâmica (em canais e rios), redes de águas residuais, controlo em tempo real, qualidade da água e previsão das áreas inundáveis. É possível utilizar vários módulos do programa em simultâneo, fornecendo soluções para simulações de sistemas mais complexos.

O escoamento unidimensional é modelado com suporte nas equações de continuidade e de conservação da quantidade de movimento (Eq.10 e Eq.11). Conjuntamente a estas equações são ainda empregadas outras expressões para o cálculo das características do escoamento em estruturas como: passagens hidráulicas, pontes, sifões invertidos, orifícios, bombas, sifões e descarregadores. O escoamento nestes sistemas é dependente dos níveis a montante e a jusante da estrutura, das características geométricas e de determinadas propriedades específicas de cada uma delas.

Para modelação unidimensional utiliza-se *SOBEK-Rural*, *SOBEK-Urban* e *SOBEK-River* e para modelação 2D utiliza-se o *SOBEK Overland Flow*. A modelação em 3D também é possível recorrendo ao *DELFT3D*.

A utilização do *SOBEK* é bastante acessível e clara, sendo necessário apenas o conhecimento de algumas regras de funcionamento.

Quando se inicia o *software* é apresentada a imagem da figura 3.5. Aqui o utilizador pode começar um novo projeto, abrir ou apagar um projeto existente, analisar casos intrínsecos a um projeto ou aceder ao bloco de notas do modelador.

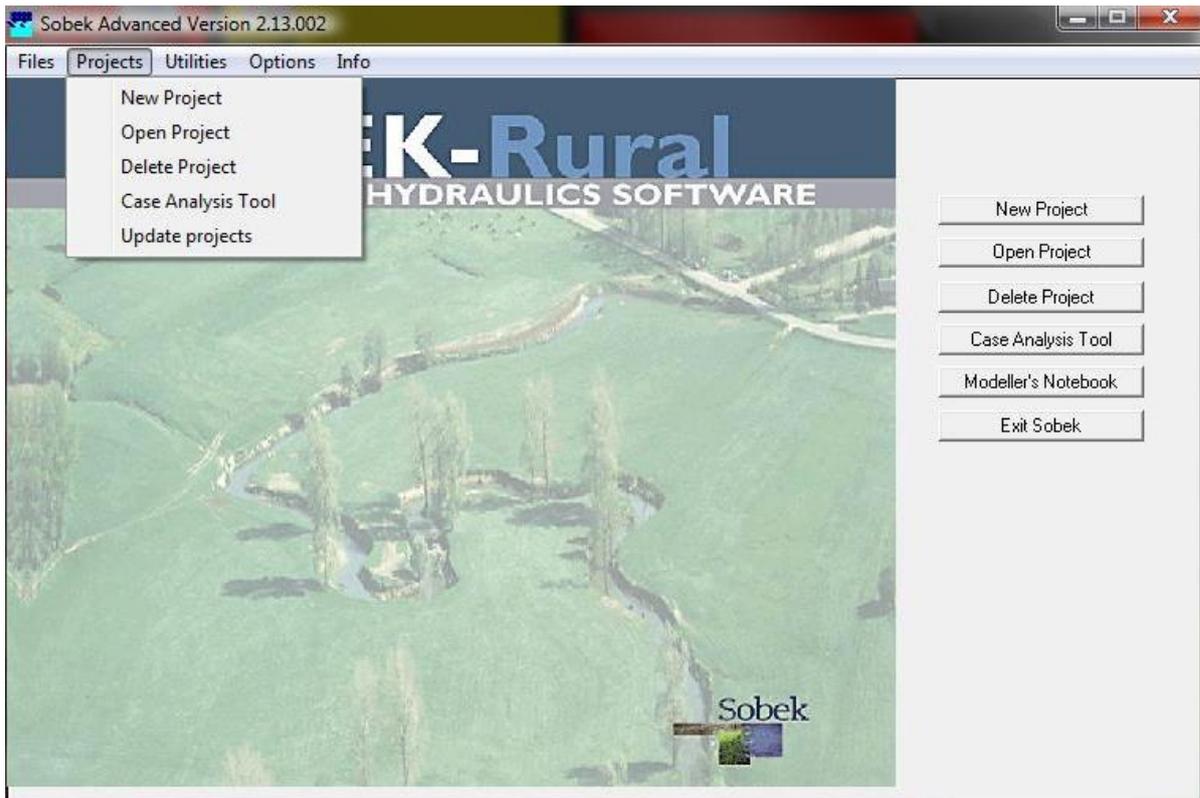


Figura 3.5: Display de entrada no *SOBEK*

Depois de o utilizador começar um novo projeto ou continuar um projeto anterior aparece a janela de gestão de casos (Figura 3.6).

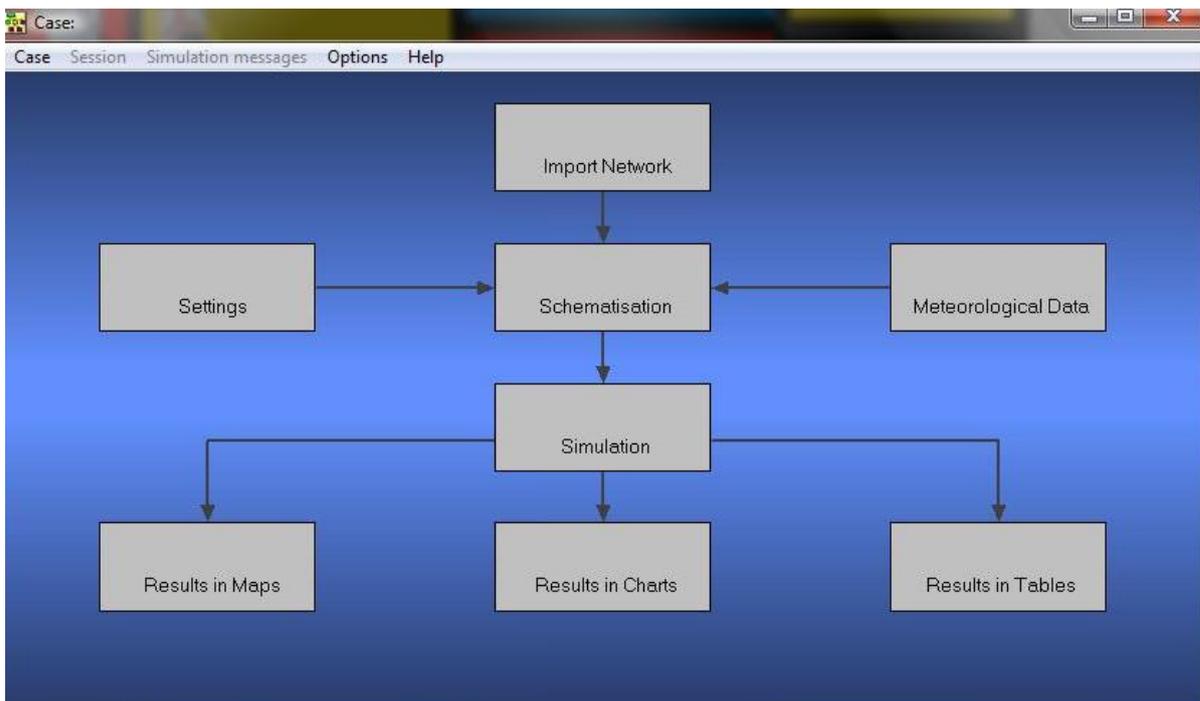


Figura 3.6: Janela de gestão de casos, *SOBEK*

Aqui o utilizador tem a possibilidade de gerir os vários casos em que está a trabalhar no projeto. Cada caso tem diferentes características, podendo o utilizador definir diversas condições de fronteira, condições iniciais e tempos de simulação, entre outras propriedades, para o mesmo projeto, ficando com um leque de opções.

Cada bloco tem uma função e uma sequência na realização da modelação, não sendo possível executar uma tarefa sem ter terminado a anterior. As ligações apontam quais as tarefas a ser realizadas primeiramente e quais as tarefas a executar em seguida. Nesta janela o utilizador pode criar, abrir, copiar ou apagar variados casos dentro do mesmo projeto. Para tal, necessita apenas de selecionar a opção *Case*; após isso, os blocos das tarefas mudam de aspeto, como se constata na figura 3.7.

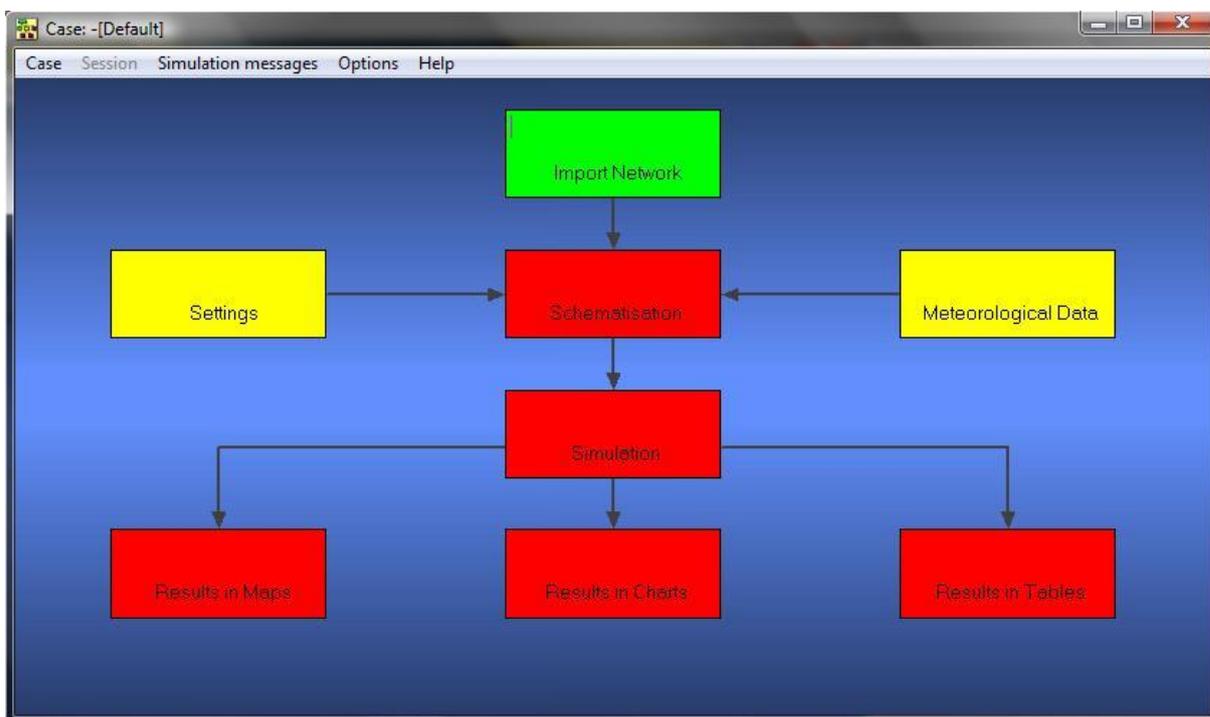


Figura 3.7: Janela de gestão de casos após abrir/criar um novo caso, *SOBEK*

A partir da figura 3.6 e 3.7 observa-se que os blocos das tarefas mudaram de cor, passando de cinzentos a amarelos, vermelhos e um deles a verde. A cor cinzenta indica que nenhuma tarefa foi selecionada e a cor verde indica que a tarefa está concluída e que se pode passar à execução da(s) seguinte(s), apresentada(s) a amarelo. Quando uma tarefa está a ser processada

o seu bloco encontra-se na cor roxa e quando está na cor vermelha significa a obrigatoriedade de realizar primeiro as tarefas anteriores, a amarelo.

A primeira tarefa *Import Network* serve para importar ficheiros ou modelos de outros programas compatíveis com o *SOBEK*. Na opção *Settings* é permitido ao utilizador definir quais os diferentes módulos, já referidos anteriormente, que deseja executar, simultaneamente ou sequencialmente, e definir as condições de simulação. A opção *Meteorological Data* permite a introdução de dados meteorológicos como o vento e a precipitação. Para inserir ou editar o modelo e as suas várias componentes (canais, secções, estruturas, etc.) existe o *Schematization*, constituindo uma das tarefas mais relevantes na modelação do projeto. O *Simulation* executa a simulação do modelo a partir dos dados introduzidos e os demais blocos, *Results in Maps*, *Results in Charts* e *Results in Tables* apresentam todos os resultados das simulações.

3.4.6.1 Modelo hidrológico de Sacramento

O modelo de *Sacramento* é um dos módulos de hidrologia do *SOBEK*. Utilizando a precipitação média na bacia e a evapotranspiração potencial como dados de entrada, este modelo possibilita o cálculo do escoamento instantâneo total (José L. S. Pinho & Vieira, 2006). Neste modelo o solo é dividido em duas camadas fundamentais:

- A camada superior onde se verificam os processos de evaporação, percolação e escoamento superficial e escoamento subsuperficial;
- A camada inferior onde ocorrem os processos de transpiração, recarga do aquífero e escoamento de base.

O modelo considera subzonas nas camadas, em que a água pode estar sob efeito da tensão superficial (capilaridade) ou sob o efeito da pressão hidrostática (água livre). No modelo, a água é primariamente depositada numa determinada fração da coluna do solo como água sob tensão superficial, até que se atinga a capacidade deste reservatório. Desde esse momento, qualquer água acrescentada ao sistema será armazenada como água livre. Apenas ocorre diminuição do volume de água sob tensão superficial devido à evaporação ou transpiração, sofrendo também a água livre um decréscimo correspondente à percolação da camada

superior para a camada inferior, escoamento subsuperficial, escoamento de base e recarga do aquífero (José L. S. Pinho & Vieira, 2006).

O caudal instantâneo é constituído pelos fluxos resultantes dos processos decorrentes nas subzonas de água livre nas duas camadas:

- Escoamento direto: resultante da precipitação que cai sobre a superfície impermeabilizada da bacia;
- Escoamento superficial: proveniente da chuva quando a camada superior do solo se apresenta saturada;
- Escoamento subsuperficial: deriva do estado de saturação parcial da subzona de água livre da camada superior;
- Escoamento de base primário: resultante da subzona de água livre primária da camada inferior;
- Escoamento de base suplementar: resultante da subzona de água livre suplementar da camada inferior.

O modelo tem como objetivo simular as capacidades de armazenamento do solo, sendo constituído por uma série de reservatórios com volumes pré-definidos, interligados por sistemas que possibilitam determinar as condições de humidade do solo, as quais definem a geração do escoamento fluvial. O preenchimento dos reservatórios acontece devido à precipitação e a diminuição da sua capacidade ocorre devido aos fenómenos de percolação, evaporação e drenagem lateral. A bacia é dividida em áreas permeáveis e áreas impermeáveis.

O solo é passível de ser subdividido em inúmeras camadas porém, o modelo considera apenas um número de camadas mínimo capaz de descrever o sistema, camada superior e camada inferior, que possuem quer água livre quer água sob tensão superficial, fatores essenciais do modelo de *Sacramento*. A água sob tensão superficial corresponde ao volume de água possível de se adicionar ao solo até que existam moléculas de água livre, isto é, que o solo não absorva mais água. Após atingida a capacidade máxima de água sob tensão superficial, todas

as moléculas de água acrescentadas permanecerão livres, dando origem ao escoamento subsuperficial.

São então estabelecidos quatro reservatórios de armazenamento de água no solo distintos: água sob tensão superficial da camada superior, água livre da camada superior, água sob tensão superficial da camada inferior e água livre da camada inferior.

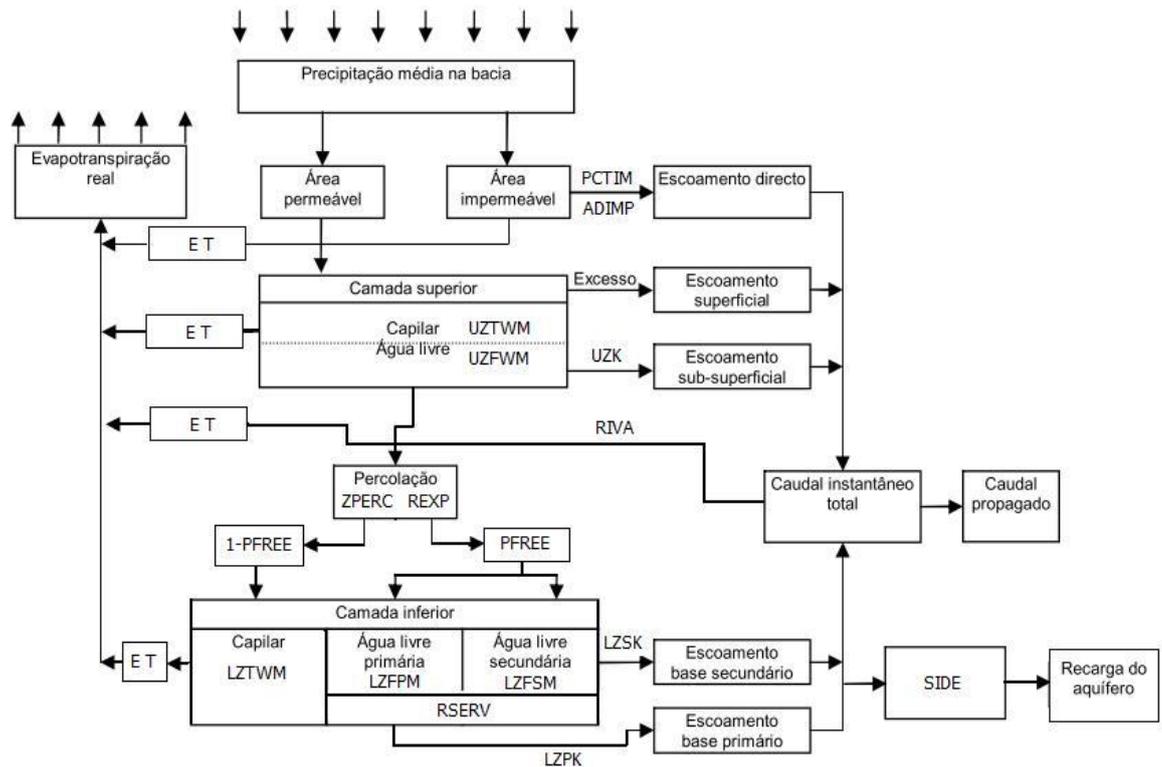


Figura 3.8: Esquema conceptual do modelo de Sacramento (adaptado de Pinho & Vieira 2006)

O modelo *Rainfall Runoff* consiste num modelo determinístico que, a partir da precipitação, possibilita a simulação do comportamento do solo e dos cursos de água. Os resultados do modelo estão sujeitos a erros devido a diversos fatores, tais como, a incorreta previsão da precipitação ou má formulação do modelo, o que poderá originar erros na previsão dos caudais.

No modelo existem diferentes coletores interligados por um canal. A precipitação é transformada em escoamento em cada segmento, dentro deste a precipitação é considerada homogénea assim como as características da bacia hidrográfica.

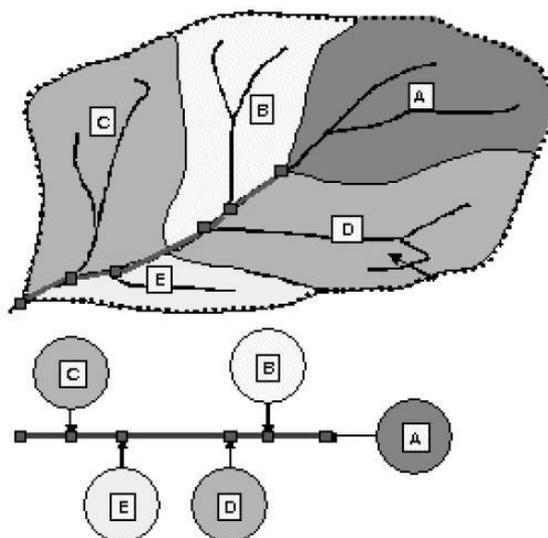


Figura 3.9: Exemplo de implementação do modelo RR (P. M. F. Martins, 2013)

Através da variabilidade dos limites das propriedades de solos e com base na experiência de calibração, geraram-se seis variáveis de estado (Tabela 3.1) e um intervalo de valores aceitáveis para onze dos parâmetros de *Sacramento*, apresentados na Tabela 3.2 (L. M. V. Vieira & Pinho, 2014).

Variáveis de estado	Definição
ADIMC	Capacidade de água sob tensão da área ADIMP (mm)
UZTWC	Capacidade de água sob tensão da zona superior (mm)
UZFWC	Capacidade de água livre na zona superior (mm)
LZTWC	Capacidade de água sob tensão da zona inferior (mm)
LZFSC	Capacidade de água livre secundária da zona inferior (mm)
LZFPC	Capacidade de água livre primária da zona inferior (mm)

Tabela 3.1: Variáveis de estado do modelo Sacramento (L. M. V. Vieira & Pinho, 2014)

Parâmetro	Definição	Intervalo de valores
UZTWM	Capacidade máxima de armazenamento de água sob tensão superficial na camada superior (mm)	[10,300]
UZFWM	Capacidade máxima de armazenamento de água livre na camada superior (mm)	[5,150]
UZK	Coefficiente de drenagem lateral na zona superior de água livre (dia ⁻¹)	[0.10,0.75]

ZPERC	Taxa de percolação mínima e máxima	[5,350]
REXP	Parâmetro de forma da curva de percolação	[1,5]
LZTWM	Capacidade máxima de armazenamento de água sob tensão superficial na camada inferior (mm)	[10,500]
LZFSM	Capacidade máxima de armazenamento de água livre secundária na camada inferior (mm)	[5,400]
LZFPM	Capacidade máxima de armazenamento de água livre primária na camada inferior (mm)	[10,1000]
LZSK	Coefficiente de drenagem lateral na zona inferior de água livre secundária (dia ⁻¹)	[0.01,0.35]
LZPK	Coefficiente de drenagem lateral na zona inferior de água livre primária (dia ⁻¹)	[0.001,0.05]
PFREE	Fração da água percolada da zona superior que vai direta para a zona de água livre inferior	[0.0,0.8]
PCTIM	Fração de área constantemente impermeável na bacia	
ADIMP	Fração máxima de uma área impermeável adicional devido a saturação	
RIVA	Fração de área coberta por mata ciliar na bacia	
SIDE	Taxa de percolação das camadas inferiores de água livre	
RESERV	Fração da água livre na zona inferior que não é transferível para a zona de água de tensão superficial	

Tabela 3.2: Parâmetros do modelo de Sacramento e intervalos de variação (L. M. V. Vieira & Pinho, 2014)

O modelo de *Sacramento* representa o estado do solo através de uma série de aproximações e hipóteses simplificadoras, podendo ser descrito como um sistema com duas variáveis de entrada, duas variáveis de saída e seis estados não negativos (L. M. V. Vieira, 2013).

Os estados do sistema são definidos como se segue:

x_1 , água sob tensão superficial da camada superior [mm];

x_2 , água livre na camada superior [mm];

x_3 , água sob tensão superficial na camada inferior [mm];

x_4 , água livre primária na camada inferior [mm];
 x_5 , água livre secundária na camada inferior [mm];
 x_6 , armazenamento adicional impermeabilizado [mm].

As variáveis de entrada no sistema:

u_p , precipitação média na bacia [mm/h];
 u_e , evapotranspiração potencial [mm/h].

As variáveis de saída do sistema são:

u_c , caudal instantâneo total [mm/h];
 u_{er} , evapotranspiração real [mm/h].

O modelo de *Sacramento* é constituído pelas seguintes equações:

Equação de estado de água sob tensão superficial da camada superior:

$$\frac{d_{x_1}}{d_t} = \left[1 - \left(\frac{x_1}{x_1^0} \right)^{m_1} \right] \times u_p - u_e \times \left(\frac{x_1}{x_1^0} \right) \quad (13)$$

Equação de estado de água livre na camada superior:

$$\frac{d_{x_2}}{d_t} = \left(\frac{x_1}{x_1^0} \right)^{m_1} \times u_p \times \left[1 - \left(\frac{x_2}{x_2^0} \right)^{m_2} \right] - d_u x_2 - C_1 \times (1 + \varepsilon \times y^{\theta_c}) \times \left(\frac{x_2}{x_2^0} \right) \quad (14)$$

Equação de estado de água sob tensão superficial na camada inferior:

$$\begin{aligned} \frac{d_{x_3}}{d_t} = & C_1 \times (1 + \varepsilon \times y^{\theta_c}) \times \left(\frac{x_2}{x_2^0} \right) \times (1 - p_f) \times \left[1 - \left(\frac{x_3}{x_3^0} \right)^{m_3} \right] - u_e \\ & \times \left(1 - \left(\frac{x_1}{x_1^0} \right) \right) \times \left(\frac{x_3}{x_1^0 + x_3^0} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

Equação de estado de água livre primária na camada inferior:

$$\begin{aligned} \frac{d_{x_4}}{d_t} = & C_1 \times (1 + \varepsilon \times y^{\theta_c}) \times \left(\frac{x_2}{x_2^0}\right) \times \left[1 - (1 - p_f) \times \left[1 - \left(\frac{x_3}{x_3^0}\right)^{m_3}\right]\right] \\ & \times \left[\left(C_2 \times \left(\frac{x_5}{x_5^0}\right) - 1\right) \times \left(\frac{x_4}{x_4^0}\right) + 1\right] - d'_1 x_4 \end{aligned} \quad (16)$$

Equação de estado de água livre secundária na camada inferior:

$$\begin{aligned} \frac{d_{x_5}}{d_t} = & C_1 \times (1 + \varepsilon \times y^{\theta_c}) \times \left(\frac{x_2}{x_2^0}\right) \times \left[1 - (1 - p_f) \times \left[1 - \left(\frac{x_3}{x_3^0}\right)^{m_3}\right]\right] \\ & \times \left(1 - C_2 \times \left(\frac{x_5}{x_5^0}\right)\right) \times \left(\frac{x_4}{x_4^0}\right) - d''_1 x_5 \end{aligned} \quad (17)$$

Equação de estado da água na área impermeabilizada:

$$\begin{aligned} \frac{d_{x_6}}{d_t} = & \left[1 - \left(\frac{x_6}{x_3^0}\right)^2\right] \times \left[1 - \left(\frac{x_2}{x_2^0}\right)^{m_2}\right] \times \left(\frac{x_1}{x_1^0}\right)^{m_1} \times u_p - u_e \times \left(1 - \left(\frac{x_1}{x_1^0}\right)\right) \\ & \times \left(\frac{x_6}{(x_3^0 + x_1^0)}\right) \end{aligned} \quad (18)$$

Equação do escoamento fluvial por unidade de tempo:

$$\begin{aligned} u_c = & \left(d_u x_2 + \frac{d'_1 x_4 + d''_1 x_5}{1 + \mu}\right) \times (1 - \beta_1 - \beta_2) + u_p \beta_2 + \left(\frac{x_6 - x_1}{x_3^0}\right) \times u_p \\ & \times \left(\frac{x_1}{x_1^0}\right)^{m_1} \times \beta_1 + u_p \times \left(\frac{x_1}{x_1^0}\right)^{m_1} \times \left(\frac{x_2}{x_2^0}\right)^{m_2} (1 - \beta_1 - \beta_2) \\ & + \left[1 - \left(\frac{x_6}{x_3^0}\right)^2\right] \times \left(\frac{x_2}{x_2^0}\right)^{m_2} \left(\frac{x_1}{x_1^0}\right)^{m_1} \times u_p \times \beta_1 \end{aligned} \quad (19)$$

Equação da evapotranspiração real:

$$u_{er} = u_e \times \left(\frac{x_1}{x_1^0} \right) + u_e \times \left(1 - \left(\frac{x_1}{x_1^0} \right) \right) \times \left(\frac{x_3}{x_1^0 + x_3^0} \right) + u_e \times \left(1 - \left(\frac{x_1}{x_1^0} \right) \right) \times \left(\frac{x_6}{(x_3^0 + x_1^0)} \right) \quad (20)$$

onde,

x_1^0 , capacidade de armazenamento da subzona de capilaridade da camada superior [mm];

x_2^0 , capacidade de armazenamento da subzona de água livre na camada superior [mm];

x_3^0 , capacidade de armazenamento da subzona de capilaridade na camada inferior [mm];

x_4^0 , capacidade de armazenamento da subzona de água livre primária na camada inferior [mm];

x_5^0 , capacidade de armazenamento da subzona de água livre secundária na camada inferior [mm];

d_u , taxa de drenagem instantânea da camada superior [h^{-1}];

d'_1 , taxa de drenagem instantânea primária da camada inferior [h^{-1}];

d''_1 , taxa de drenagem instantânea secundária da camada inferior [h^{-1}];

ε , coeficiente da função de percolação;

θ_c , expoente da função de percolação;

μ , fração de fluxo base que não aparece no rio, constituindo recarga do aquífero;

β_1 , fração da bacia que se torna impermeável quando a capacidade de capilaridade for atingida;

β_2 , fração da bacia permanentemente impermeabilizada;

m_1 , expoente da função da subzona de capilaridade da camada superior;

m_2 , expoente da função da subzona de água livre da camada superior;

m_3 , expoente da função da subzona de capilaridade da camada inferior.

Sendo ainda definidas as seguintes variáveis auxiliares (y , C_1 e C_2):

$$y = 1 - \frac{x_3 + x_4 + x_5}{x_3^0 + x_4^0 + x_5^0} \quad (21)$$

$$C_1 = d'_1 x_4^0 + d'_1 x_5^0 \quad (22)$$

$$C_2 = \frac{d'_1 x_4^0}{C_1} \quad (23)$$

onde,

y , deficit de água da camada inferior;

C_1 , taxa limite inferior da percolação;

C_2 , percentagem de percolação destinada ao reservatório de água livre da camada inferior.

3.5 Software de modelação geográfica

3.5.1 ArcGIS

O programa utilizado na presente dissertação foi o *ArcGIS* desenvolvido pela *ESRI* (*Environmental Systems Research Institute*).

O *ArcGIS* possui inúmeras aplicações em diferentes áreas do conhecimento, possibilitando o uso de ferramentas específicas para cada atividade a ser executada, ajustando-se, portanto, às diferentes necessidades de cada utilizador.

Para uma correta utilização do *ArcGIS* é conveniente, primeiramente, entender e interpretar corretamente alguns conceitos relacionados com o SIG (Sistema de Informações Geográficas). Um SIG é um conjunto de técnicas empregadas na integração e análise de dados provenientes das mais diversas fontes, como imagens fornecidas por satélites, mapas, cartas climatológicas, censos e outros (A. R. dos Santos et al., 2014).

O SIG é um sistema auxiliado por computador para adquirir, armazenar e analisar dados geográficos. Atualmente existem várias ferramentas disponíveis para sustentar esta atividade.

Geralmente considera-se um SIG como uma ferramenta para mapear e indicar respostas às várias questões sobre planeamento urbano e regional, meio rural e levantamento dos recursos renováveis, descrevendo os mecanismos das mudanças que operam no meio ambiente e auxiliando no planeamento e manuseamento dos recursos naturais de regiões específicas (A. R. dos Santos et al., 2014).

A utilização de técnicas provenientes de um SIG demonstra ser um instrumento com bastante capacidade no estabelecimento de planos integrados de conservação do solo e da água. Nesse âmbito, um SIG constitui uma ferramenta adequada na manipulação das funções que exprimem os fenómenos ambientais em variadas regiões de um modo simples e eficaz, possibilitando economia de recursos e tempo. A integração de um SIG com um modelo de simulação dos processos de evaporação, precipitação e escoamento possibilita a previsão do escoamento superficial e, simultaneamente, analisar a sua distribuição espacial na bacia hidrográfica (Medeiros, 2014).

Num contexto geral, podem-se identificar os seguintes componentes num SIG (Figura 3.11):

- Interface com usuário;
- Entrada e integração de dados;
- Consulta, análise espacial e processamento de imagens;
- Visualização e impressão;
- Armazenamento e recuperação de dados (organizados sob a forma de um banco de dados geográficos).

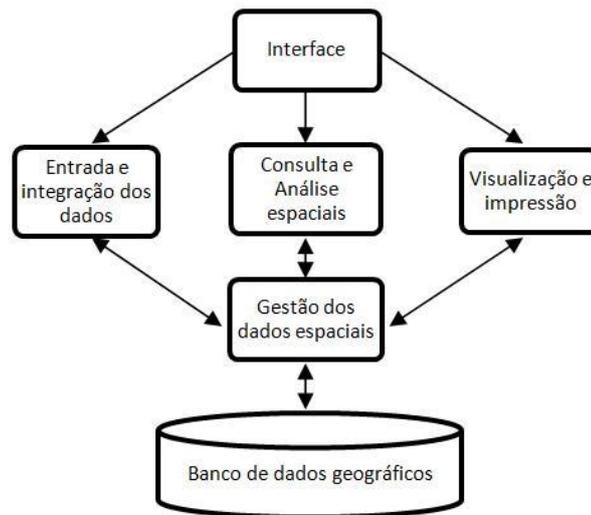


Figura 3.10: Componentes de um SIG (adaptado de Santos et al. 2014)

Os objetivos suplementares de um SIG são:

- Produzir mapas de uma forma mais rápida e mais económica;
- Proporcionar uma melhor e mais fácil utilização de mapas;
- Produzir mapas mais elaborados;
- Viabilizar a atualização e revisão automática;
- Inovar a análise quantitativa de dados espaciais.

O *ArcGIS* é composto por algumas aplicações relevantes como o *ArcMap*, *ArcCatalog* e *ArcToolbox*.

ArcMap

O *ArcMap* trata-se de um aplicativo com o objetivo de conceber mapas e interagir com os mesmos. Através da análise dos mapas o utilizador tem a capacidade de resolver questões geográficas e a criação de gráficos e relatórios para comunicação com outros ramos menos

especializados. O *ArcMap* facilita a criação de mapas em diversos formatos, incluindo *shapefiles*, tabelas e desenhos *CAD*.

ArcCatalog

O *ArcCatalog* permite ao utilizador organizar, editar e gerir dados geográficos em *workspaces* e *geodatabases*. *Workspaces* são pastas no disco que são utilizados para guardar os dados geográficos (mapas, documentos, imagens, modelos, *layers*, *geodatabases*, etc.). *Geodatabases* são ficheiros onde se armazenam dados espaciais, de atributo e relacionamentos que existem entre eles. Resumindo, a ferramenta permite ao utilizador a procura, organização e gestão dos vários documentos e conjuntos de dados do *ArcGIS*.

ArcToolbox

O *ArcToolbox* proporciona um ambiente para execução de operações de geoprocessamento (operações que envolvem alteração ou extração de informação).

4 . CARATERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 Barcelos e bacia hidrográfica do rio Cávado

O concelho de Barcelos, localizado a Noroeste de Portugal, tem uma área de aproximadamente 378,9 km² e é composto por 89 freguesias, localizando-se 43 delas na margem norte do Cávado e as restantes 46 na margem sul. Segundo os censos de 2011, o concelho possui uma população de 120391 habitantes. Em linha reta localiza-se a uma distância de 15 km da linha de costa, é limitado a norte pelos municípios de Viana do Castelo e Ponte de Lima, a leste por Vila Verde e Braga, a sudeste por Vila Nova de Famalicão, a sudoeste pela Póvoa do Varzim e a oeste por Esposende (A. A. A. da C. L. Martins, 2007).

A cidade de Barcelos localiza-se numa posição quase central do seu território, onde se dispõem três bacias hidrográficas: Neiva, Este e Cávado. A bacia hidrográfica do rio Cávado (Figura 4.1) abrange 9 concelhos, tem uma superfície de aproximadamente 1600 km², limitada a norte pela bacia hidrográfica do rio Neiva e do rio Lima e, a este e sul, pelas bacias do rio Douro e rio Ave. A altitude média da bacia é de 564 m, excedendo os 1500 m em determinados locais. A bacia apresenta uma superfície de configuração alongada, com 100 km de comprimento e uma largura média de 16 km. (J. M. P. Vieira, Duarte, & Pinho, 1998).

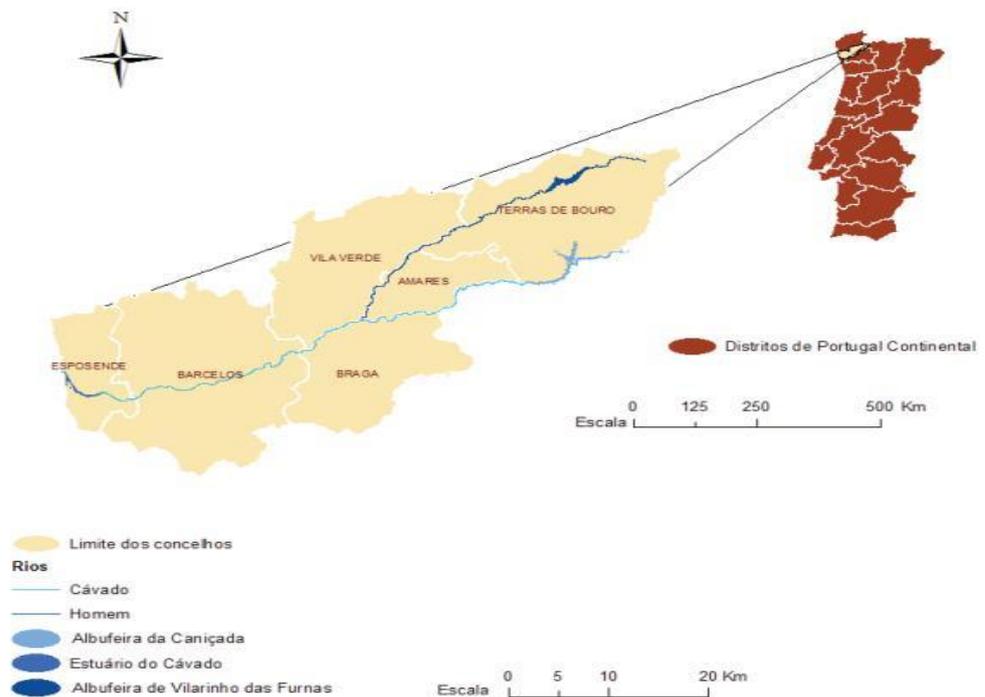


Figura 4.1: Localização da bacia a nível nacional (José L. S. Pinho, Brito, & Costa, 2008)

O rio Cávado consiste num elemento catalisador de todo o concelho de Barcelos, com origem na Serra do Larouco, situada em Trás-os-Montes, no concelho de Montalegre, distrito de Vila Real, tem uma extensão de 135 km e desagua no oceano Atlântico, próximo de Esposende (A. A. da C. L. Martins, 2007). Os afluentes mais relevantes são o rio Homem na margem direita e o rio Rabagão na margem esquerda. A bacia apresentava em 2013 uma densidade populacional média de aproximadamente 328 habitantes/km², encontrando-se um mínimo 25 habitantes/km² em Terras de Bouro e um máximo de 992 habitantes/km² em Braga.



Figura 4.2: Bacia hidrográfica do Cávado e seus afluentes (J. Pinho, Vieira, Pinho, & Araújo, 2011)

A bacia do Cávado possui diversas barragens, tais como Alto Rabagão, Venda Nova, Salamonde, Paradela e Penide, sendo de salientar as barragens da Caniçada e de Vilarinho das Furnas enquanto componentes estruturantes e delineadores da paisagem da área de estudo.

A barragem da Caniçada localiza-se no concelho de Terras de Bouro, Vieira do Minho, é alimentada pelo rio Cávado e tem como objetivo principal a produção de energia elétrica. A barragem de Vilarinho das Furnas situa-se no concelho de Terras de Bouro e é alimentada pelo rio Homem.

4.1.1 Hidrologia

A bacia do Cávado possui 36 estações meteorológicas que registam inúmeros parâmetros, disponibilizados pelo SNIRH.

A região abrangida pelo Plano de Gestão da Região Hidrográfica do rio Cávado apresenta valores da precipitação média anual que variam entre 1002 e 3716 mm. Há uma diminuição das precipitações de montante para jusante, apresentando valores inferiores a 1500 mm anuais na zona litoral (Agência Portuguesa do Ambiente, 2012). Na foz do rio Cávado, o escoamento anual é cerca de 2125 hm³. Verifica-se a ocorrência de uma precipitação média anual de 2200 mm, mais concentrada no inverno, nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro,

correspondendo a 3500 hm^3 . Desta totalidade de água, 1375 hm^3 são perdidos por evaporação e 1755 hm^3 contribuem para a recarga dos aquíferos, através da infiltração, o que resulta num escoamento superficial de 370 hm^3 . Porém, a quantidade de água infiltrada volta à superfície totalizando um escoamento superficial total de 2125 hm^3 (Jesus, 2012).

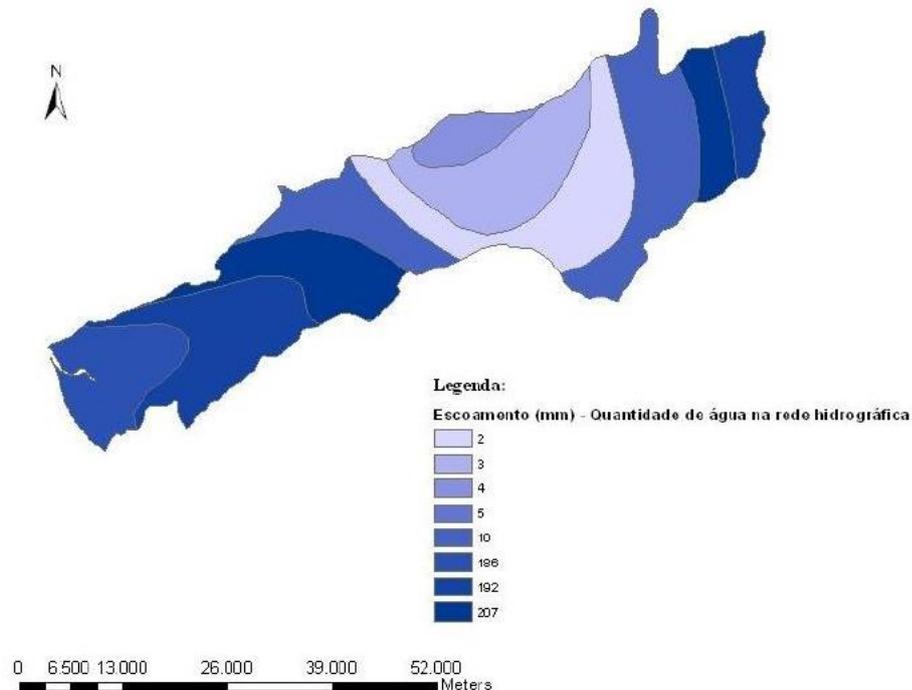


Figura 4.3: Escoamento na bacia hidrográfica do rio Cávado (Jesus, 2012)

4.1.2 Clima

A região do Cávado caracteriza-se por um clima atlântico e disposição montanhosa, sendo considerada a zona mais chuvosa de Portugal. O relevo influencia bastante as diferenças pluviométricas regionais. Fazendo uma comparação entre o mapa das precipitações e um mapa hipsométrico, conclui-se que a pluviosidade é mais elevada nas regiões montanhosas e elevadas do Norte, mais especificamente nas voltadas a oeste. As várias serras do Norte (serra do Gerês, Peneda, etc), devido à sua disposição paralela à linha de costa, funcionam como uma barreira à penetração dos ventos húmidos oriundos do Atlântico. Os ventos ao chegarem às regiões montanhosas sobem as encostas voltadas a oeste originando precipitações (Bateira, Pereira, Martins, & Santos, 2007).

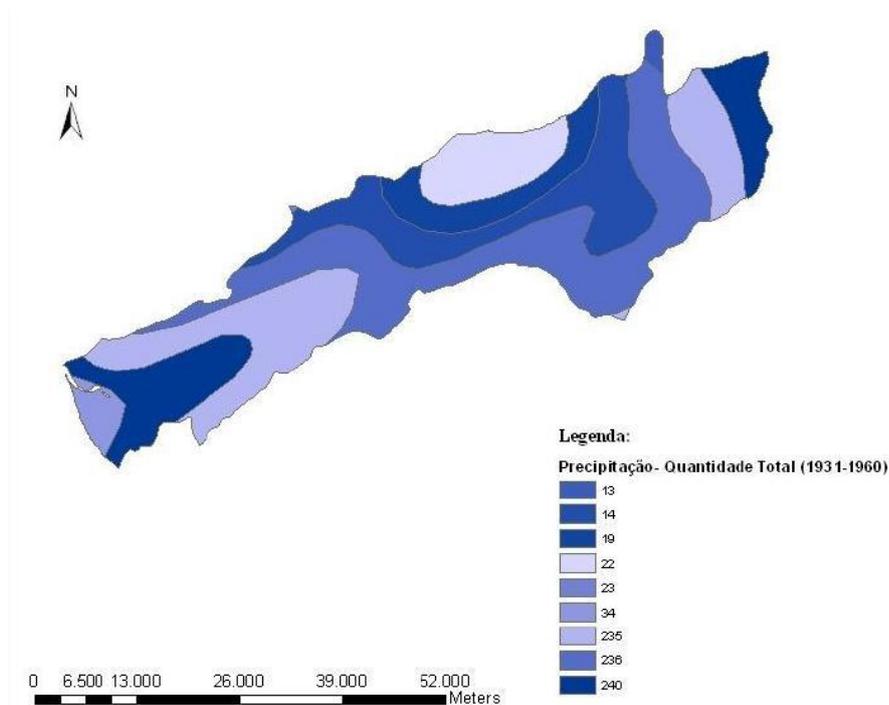


Figura 4.4: Variação da altura de precipitação na bacia hidrográfica do rio Cávado (Jesus, 2012)

Geralmente o mês com menos precipitação é o mês de Julho e o mês de Janeiro é o que apresenta maior precipitação.

A variação da evapotranspiração anual média na bacia é entre 600 mm e 725 mm, sendo o seu valor máximo na zona litoral.

Relativamente ao clima, este varia de montante para jusante. A montante caracteriza-se por fresco, húmido e muito chuvoso e a jusante temperado, húmido e chuvoso.

O clima é um fator relevante na ocorrência de situações de risco para as populações e para o território, tendo um papel importante no potenciamento da maioria dos fenómenos naturais.

Portugal apresenta uma irregularidade temporal na precipitação e na temperatura.

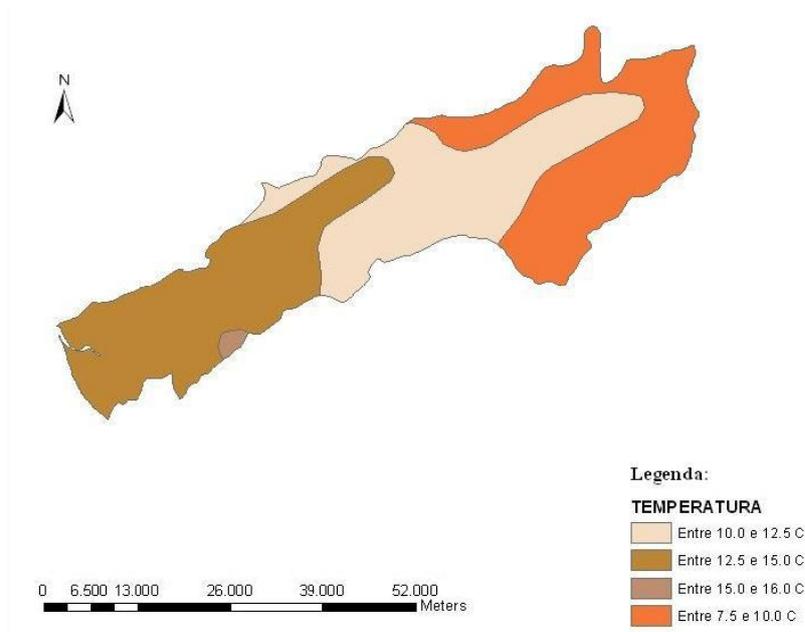


Figura 4.5: Temperatura na bacia hidrográfica do rio Cávado (Jesus, 2012)

4.1.3 Paisagem

Segundo um estudo realizado por José L. S. Pinho (2008) o rio apresenta três diferentes cenários geomorfológicos de montante para jusante, sendo eles:

- Um rio de montanha, estreito, com relevo muito irregular de geologia granítica, com habitantes mais concentrados, baixa densidade populacional, malhas compridas e bem delimitadas de ocupação do solo;
- Um Cávado intermédio, possuindo um leito mais largo e curvas mais amplas, de relevo mais plano, com população dispersa e zonas predominantemente rurais e de baixa densidade populacional;
- Um troço final reduzido, relativo à zona litoral, de grandes horizontes, relevo plano a irregular, com um leito largo, elevada sinuosidade e alta dispersão e densidade populacional.

4.1.4 Usos do solo

Após análise da Carta *Corine Land Cover*, que fornece a distribuição dos vários tipos de usos do solo ao longo da Bacia hidrográfica do rio Cávado, constata-se nas margens dos rios a

presença de espaços urbanos, constituindo cerca de 30% da área total. As zonas urbanas são mais incidentes em Esposende, Barcelos e, principalmente, em Braga, representando expressivos acréscimos potenciais de solo urbano.

Relativamente às zonas industriais, estas são diminutas e distribuem-se pela metade jusante do Cávado. As cidades que apresentam mais áreas industriais são Braga e Barcelos.

As áreas agrícolas localizam-se, especialmente, a montante e contêm alguns pontos urbanos pouco relevantes e zonas florestais no seu interior. Os espaços agrícolas são bastantes até aos concelhos de Amares e Póvoa de Lanhoso, existindo daí para jusante uma atenuação dos mesmos.

Braga, Vila Verde e Amares são os concelhos com mais áreas classificadas como RAN. Já as áreas classificadas como REN têm maior incidência nos concelhos de Terras de Bouro e Vila Verde e representam 27% da área do Vale do Cávado (Jesus, 2012).

4.2 Cheias em Barcelos

Segundo o *Decreto Regulamentar nº17/2002 de 15 de Março do Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território*, a zona central da bacia do rio Cávado caracteriza-se pela ocorrência de grandes precipitações e pelo seu potencial em produzir escoamento superficial, sendo, portanto, o escoamento desta localização, o fator que mais influencia a ocorrência de cheias naturais excepcionais.

Na bacia do rio Cávado nas zonas intermédias dos rios onde os vales são relativamente mais amplos e planos, as inundações originadas possuem maior dimensão, provocando, em geral, danos relevantes.

No que concerne a Barcelos, constata-se que a zona populacional mais crítica é a da Ponte de Barcelinhos e a zona agrícola mais crítica são os campos marginais ao rio Cávado desde a Ponte do Bico até ao seu estuário.

Existem, ainda, as cheias originadas por precipitações abundantes e concentradas que se verificam, principalmente, em pequenas linhas de água, normalmente, de bacias de pequena

dimensão, com pouco potencial de escoamento e leitos esguios. A exponente construção urbana favorece a ocorrência deste fenómeno.

Os registos de cheias em Barcelos são escassos, porém, são de salientar as cheias de 1962 e 2000/2001, consideradas as mais importantes (Gomes, 2008). Em Março de 1962 a ponte de Barcelinhos tornou-se intransitável devido às cheias, chegando a água a encontrar-se a cerca de meio metro do tabuleiro da ponte.

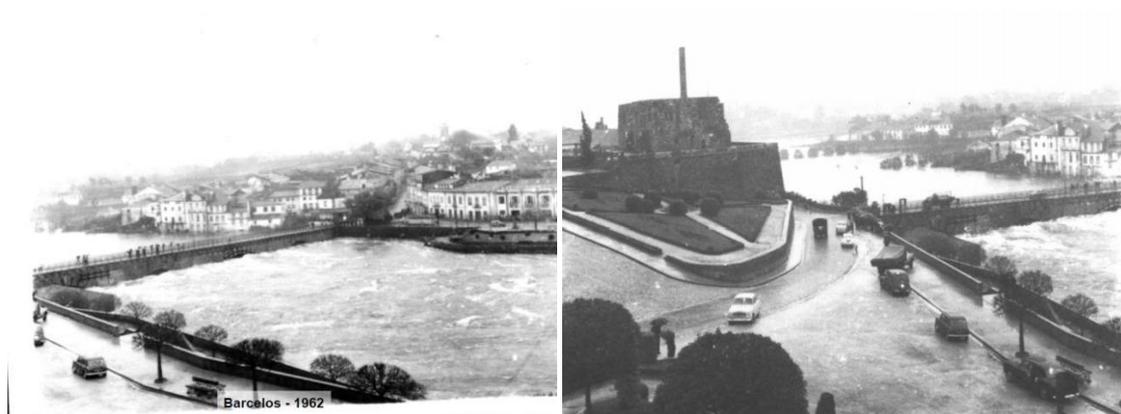


Figura 4.6: Cheias junto à ponte de Barcelinhos em 1962 (A. A. A. da C. L. Martins, 2007)



Figura 4.7: a) Confluência do ribeiro de Vila com o rio Cávado (canto superior direito) b) Barcelinhos (A. A. A. da C. L. Martins, 2007)

Nos meses do Outono de 2000 e o do Inverno de 2000 e 2001 ocorreu bastante precipitação, durante alguns dias consecutivos, o que provocou a saturação dos solos e originou, rapidamente e sem aviso, inúmeras inundações.

A 7 de Dezembro de 2000, após fortes chuvadas, deu-se o primeiro pico de cheia, originando inundações de dimensão atribuível a um período de retorno centenário em todas as zonas ribeirinhas com pouca declividade longitudinal (Teles, 2010).



Figura 4.8: Cheias em Barcelos no ano de 2000/2001 a) Habitação (Gomes, 2008) b) Piscinas Municipais (A. A. A. da C. L. Martins, 2007)

Com a subida dos caudais afluentes às albufeiras verificaram-se as primeiras descargas realizadas nas barragens. Após a análise da evolução do caudal e da quantidade de precipitação, Teles & A (2010) constatou a existência de uma relação direta entre a precipitação e o caudal médio diário descarregado na barragem da Caniçada. Com a diminuição da capacidade das albufeiras *“a cada “pico” pluviométrico corresponde um “pico” hidrométrico”*.

Em Março de 2001, após ocorrência de uma precipitação intensa, a altura do caudal do rio quase chegou a trespassar a superfície da ponte de Barcelinhos (Figura 4.9).



Figura 4.9: Comparação do caudal durante as cheias do ano de 2001 (a) e num dia normal (b)

Verificaram-se também cortes de diversas vias de comunicação e alguns deslizamentos de terra.



Figura 4.10: Cheias em Barcelos no ano de 2000/2001 (A. A. A. da C. L. Martins, 2007)

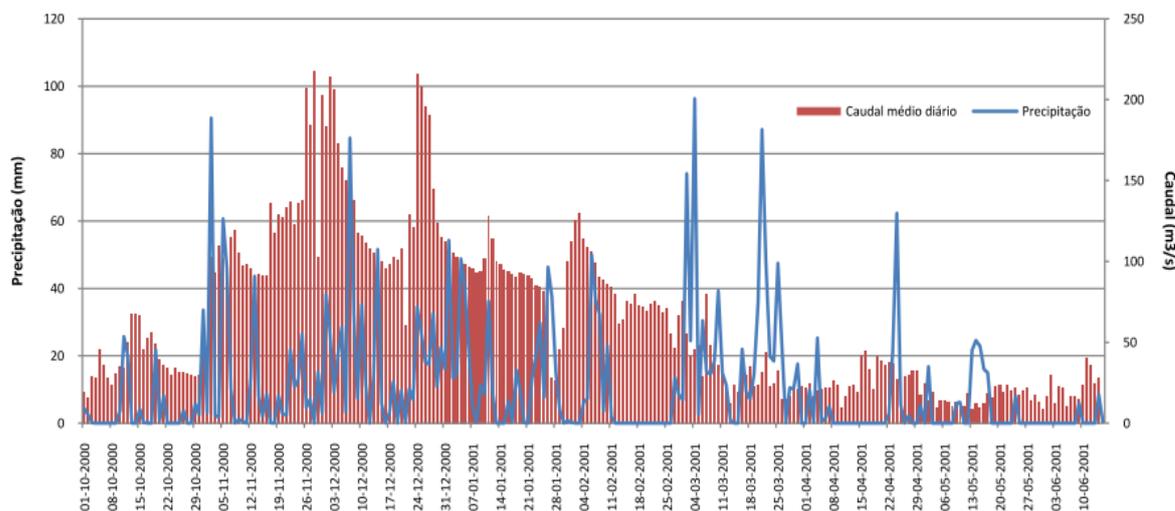


Figura 4.11: Precipitações e caudais médios diários no ano de 2000/2001 (INAG)

No gráfico da figura 4.11 é possível analisar a relação precipitação-caudal desde Outubro de 2000 a Junho de 2001 na estação de hidrométrica de Barcelos. Ao comparar os valores de precipitação com os de caudal conclui-se que não há uma relação direta entre os valores, o que à partida seria expectável, numa bacia com características como a do Cávado, com relevo acentuado, permeabilidade reduzida a média e cobertura vegetal descontínua. Os picos de precipitação não coincidem com os picos de caudal, o que traduz a influência que as barragens possuem no fluxo do rio, dando origem a um regime artificial.

Porém, entre o mês de Novembro e final do mês de Fevereiro evidenciam-se os elevados caudais registados, espelhando os acontecimentos chuvosos e a urgência de descarga das barragens capitais.

DATA	CANIÇADA
07-12-2000	472,71
09-12-2000	271,64
10-12-2000	274,42
31-12-2000	283,02
01-01-2001	293,67
03-01-2001	372,38
04-01-2001	404,01
05-01-2001	665,74

Tabela 4.1: Caudal médio diário descarregado na barragem da Caniçada (m^3/s), (SNIRH)

Relativamente às intensas cheias de Março de 2001, os valores de caudal consequentes das violentas chuvadas não se verificam no gráfico da Figura 4.11 mas é possível constatar os eventos extremos ocorridos na Figura 4.9 a). A ocorrência dessas cheias é traduzida não só pelas precipitações intensas ocorridas mas também pelo caudal extremo descarregado nesse mês na barragem da Caniçada.

DATA	CANIÇADA
21-03-2001	1296,7
22-03-2001	1024,38
23-03-2001	536,49
24-03-2001	477,04

Tabela 4.2: Caudal médio descarregado na barragem da Caniçada no mês de Março de 2001 (m^3/s), (SNIRH)

Nos dias 21 e 22 de Março a descarga de caudal efetuada na barragem da Caniçada foi o dobro da máxima descarga verificada nos meses anteriores. Após esta análise concluiu-se que apesar da influência da precipitação e do caudal relativo aos afluentes do rio Cávado, as

descargas urgentes de caudal efetuadas na barragem da Caniçada são o fator com mais importância do desencadeamento das cheias em Barcelos.

Nos anos de seguintes voltaram a suceder-se os mesmos acontecimentos em várias freguesias do concelho de Barcelos, sendo, portanto, crucial a previsão destes fenómenos com vista à diminuição dos prejuízos adjacentes ao mesmo.

5 . MODELO UNIDIMENSIONAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO BAIXO CÁVADO

5.1 Modelo hidrodinâmico da bacia do Cávado

Na presente dissertação o modelo hidrodinâmico da bacia hidrográfica do rio Cávado utilizado foi elaborado pelo Campo de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. O modelo constitui apenas uma parcela da bacia hidrográfica (Figura 5.1), que vai desde a barragem da Caniçada até à foz do rio Cávado, em Esposende. Inclui, também, a representação a norte do rio Homem e da ribeira Tojal, da ribeira de Febros e do rio Pontes, e a sul, do rio Covo, ribeiro Milhazes e ribeiro Caveiro.

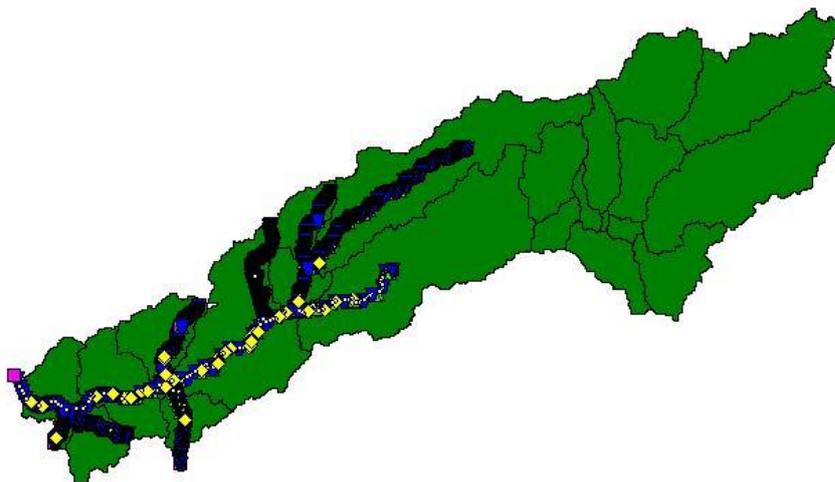


Figura 5.1: Modelo hidrodinâmico da bacia do rio Cávado na ferramenta *SOBEK*

Para construção de um modelo hidrodinâmico é necessário um conjunto de procedimentos. O primeiro passo consiste na obtenção de informação geográfica planimétrica para definição do eixo das linhas de água através de um modelo digital de terreno que será importado para a ferramenta *SOBEK*. O *SOBEK* realiza automaticamente a discretização espacial do modelo, assim como a numeração dos nós e trechos. De seguida, devem ser definidas todas as secções transversais e respeitantes cotas topográficas do talvegue, assim como as estruturas hidráulicas (barragens, pontes, açudes), por forma a representar a geometria do canal o mais exatamente possível. Esta tarefa é de alguma dificuldade devido à falta de informação, podendo existir a necessidade de efetuar levantamentos batimétricos. Contudo, quando o levantamento não é possível de se efetuar, opta-se, geralmente, pela definição simplificada

das características geométricas do leito menor (retangular ou trapezoidal) dos canais, complementando-se depois, com a cota do leito e sua largura, obtidos, respetivamente, através de estruturas hidráulicas existentes e de ortofotomapas ou cartografia disponível. A definição da secção transversal termina com a definição das características do leito maior, usualmente disponível.

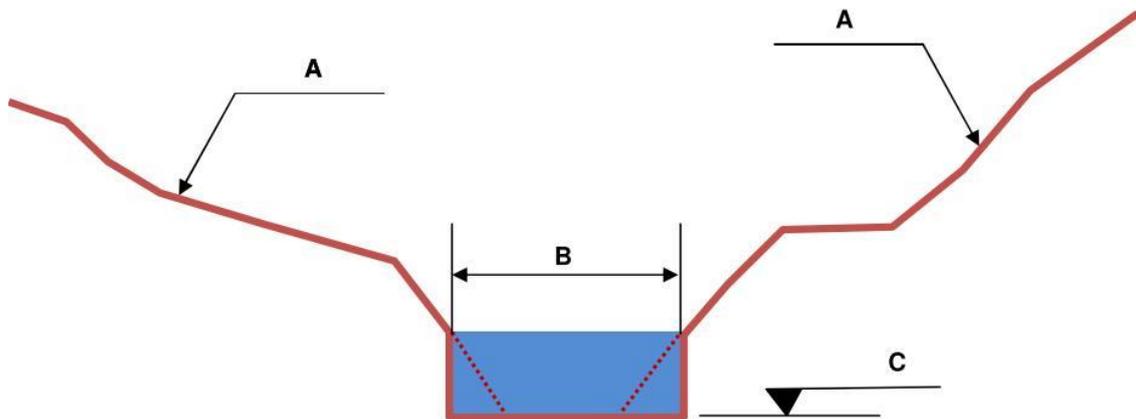


Figura 5.2: Secção transversal definida de forma simplificada (J. L. S. Pinho, 2013)

De seguida realiza-se a determinação das condições de fronteira do modelo hidrodinâmico. Geralmente, em modelos hidrodinâmicos de canais fluviais, utiliza-se como condição de fronteira na extremidade aberta a montante o caudal e a jusante impõe-se a altura da água. Usualmente realiza-se a extensão do modelo até pontos onde estes parâmetros sejam conhecidos (barragens, oceano) ou possam ser estimados, para que seja possível impor condições de fronteira ao modelo.

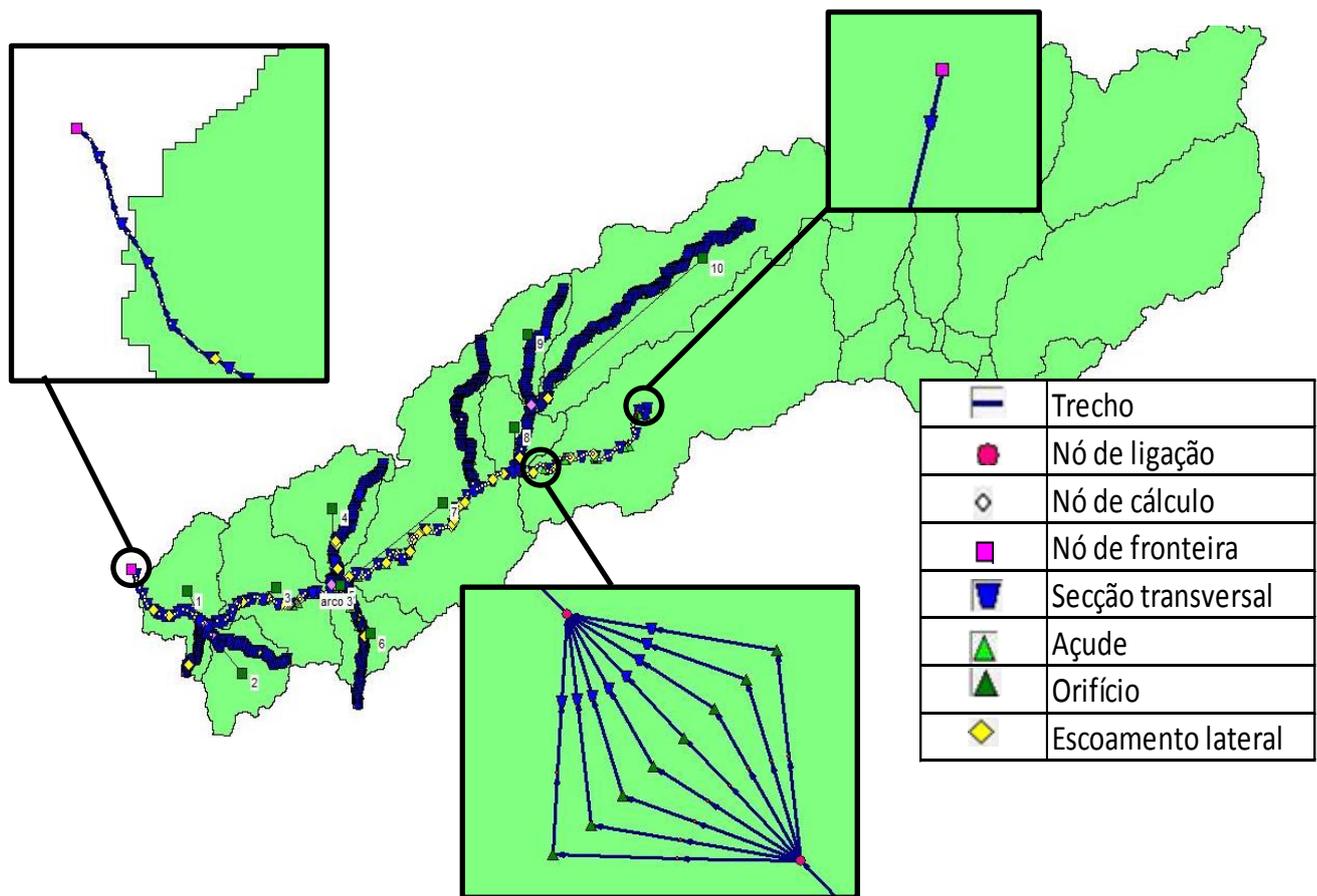


Figura 5.3: Construção do modelo hidrodinâmico na ferramenta *SOBEK*

5.2 Modelo hidrológico da bacia do Cávado

A construção do modelo hidrológico consiste na adição de nós de *Sacramento* ao modelo hidrodinâmico existente para que, através da introdução de eventos de precipitação nos nós, seja possível simular o caudal originado pelos mesmos.

No modelo existem 10 sub-bacias a jusante da barragem da Caniçada, portanto foi introduzido um nó de *Sacramento* correspondente a cada sub-bacia hidrográfica. Nesta primeira fase da construção do modelo utiliza-se a ferramenta *ArcGIS* para definição do ponto central de cada sub-bacia. Começa-se por definir e projetar o sistema de coordenadas geográficas do modelo para o mesmo sistema de coordenadas utilizado no *SOBEK*, que consiste na *Lisboa Hayford Gauss IGeoE*. Para tal, recorre-se à função “*Data management Tools*Projections and Transformations*Raster*Define Projection*” para definir o sistema de coordenadas e utiliza-se

a função “*Data Management Tools*Projections and Transformations*Feature*” para projetar o modelo no sistema de coordenadas definido.

Após definição do sistema de coordenadas geográficas cria-se uma layer com os pontos centrais de cada sub-bacia utilizando a opção “*Arctoolbox*Data management tools*Features*Features to point*”. Esta layer é exportada do ArcGIS como um *shapefile* usando a opção “*Data*Export Data*” e importada no *SOBEK* como pontos de *Sacramento* utilizando a função “*File*Import*Model*Rainfall Runoff*Node type*RR-Sacramento*” (Figura 5.4).

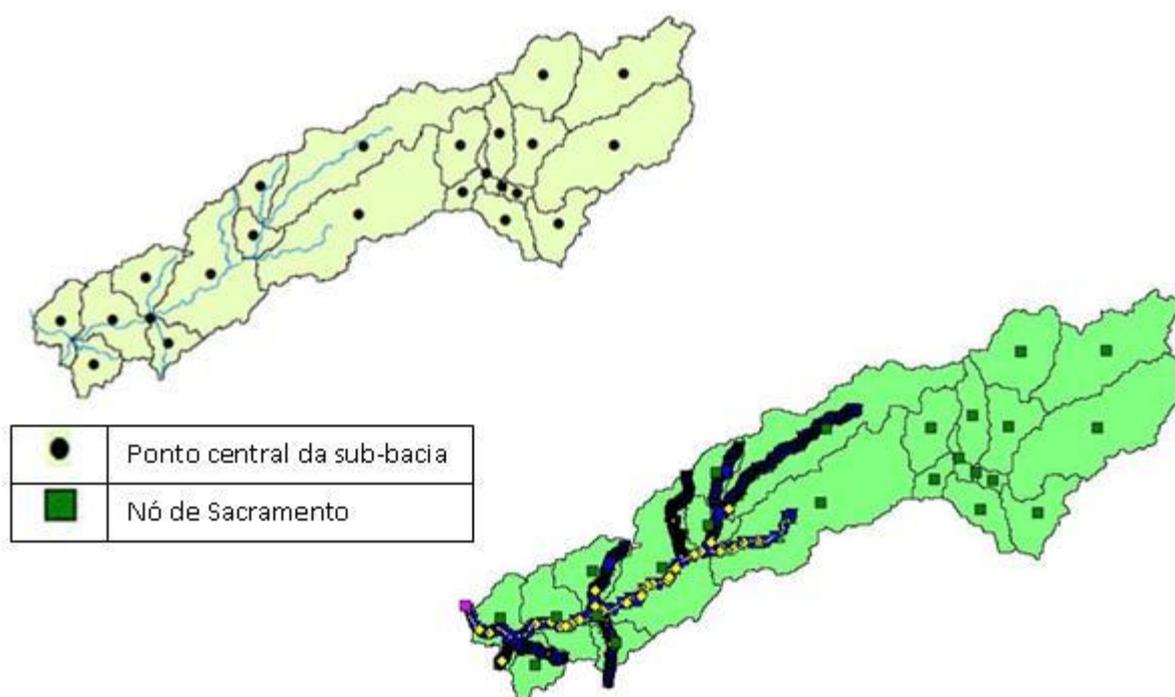


Figura 5.4: Transformação dos pontos centrais das sub-bacias (*ArcMap*) em nós de *Sacramento* (*SOBEK*)

No *SOBEK* é fundamental introduzir o caudal efluente da Barragem da Caniçada, que funciona como condição de fronteira, a evaporação diária e em cada nó de *Sacramento* é necessária a introdução da precipitação e área da sub-bacia correspondente, assim como os parâmetros de *Sacramento*.

O passo seguinte passa pela seleção do intervalo de tempo para calibração do modelo com base na quantidade de informação disponível e assim decidir quais as estações a utilizar.

Procedeu-se a uma pesquisa e recolha de dados históricos, recorrendo ao SNIRH, de eventos de precipitação, evaporação diária e de caudais a partir da rede de estações meteorológicas e hidrométricas disponíveis.

Começou-se analisar os dados disponíveis de caudais médios diários na estação hidrométrica de Barcelos e Covas e de caudal efluente na barragem da Caniçada entre o ano de 1955 até 2004 (Figura 5.5). Salienta-se que a estação de Barcelos está inativa desde Junho de 2002, não sendo possível trabalhar com períodos de tempo posteriores a essa data.

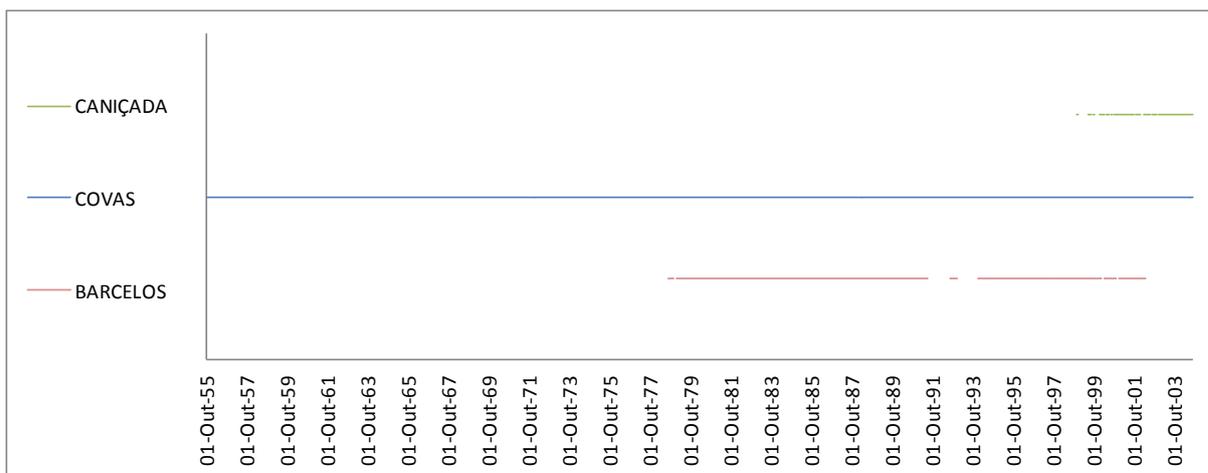


Figura 5.5: Gráfico com dados disponíveis entre 1955 e 2004

No gráfico acima é possível constatar que o período com maior quantidade de dados situa-se entre o ano de 1998 e 2002.

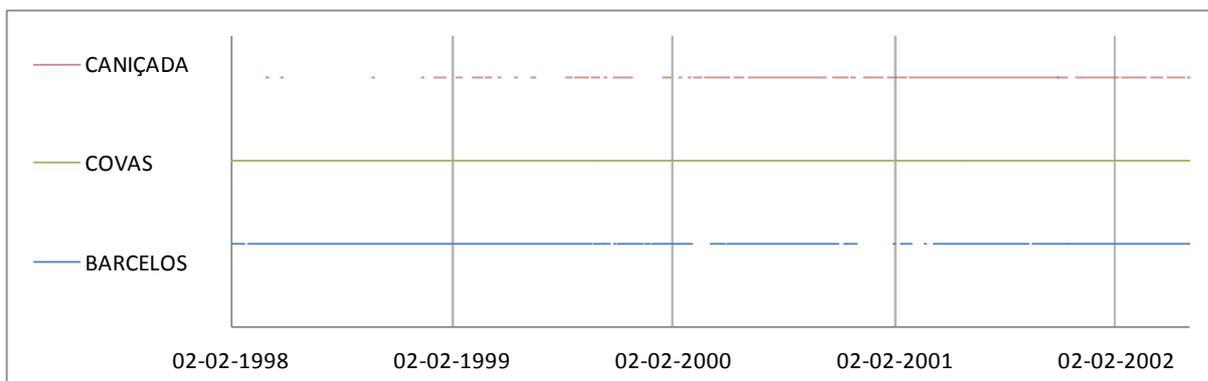


Figura 5.6: Gráfico com dados disponíveis entre 1998 e 2002

Feita uma análise mais pormenorizada ao gráfico supracitado, e tendo como premissa a inclusão de no mínimo um ano completo, definiu-se o período de tempo entre 6 de Abril de

2001 e 26 de Maio de 2002 para calibração do modelo, visto ser o intervalo com maior número de dados disponíveis (Figura 5.7). Para colmatar as falhas de dados existentes, nos casos em que existia uma falha de um dia, considerou-se a média entre o dia anterior e o dia seguinte. Nos casos em que a falha era superior a um dia, considerou-se uma função linear entre o último valor registado e o valor seguinte.

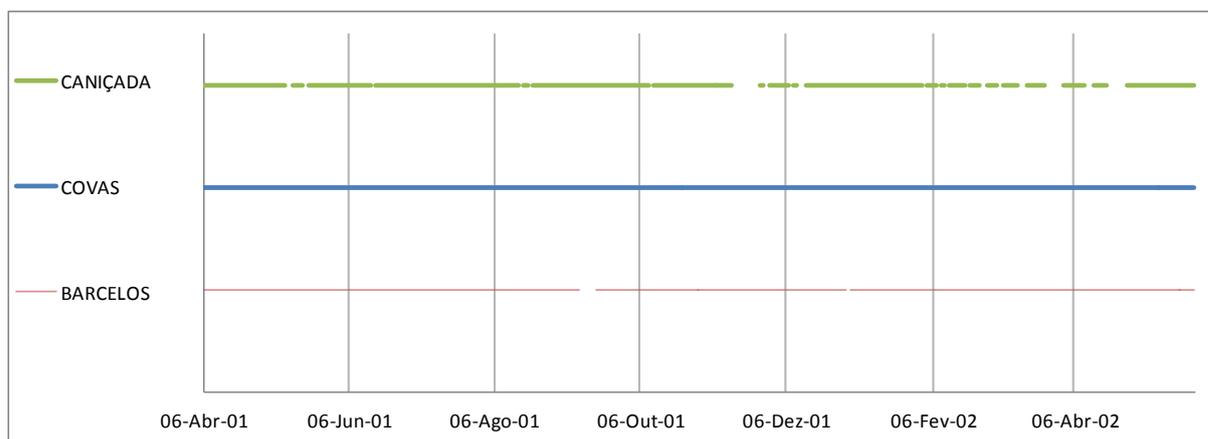


Figura 5.7: Gráfico com dados disponíveis entre 06/04/2001 e 25/05/2002

Posteriormente à seleção do período de tempo procede-se à recolha dos dados relativos à precipitação e evaporação diária.

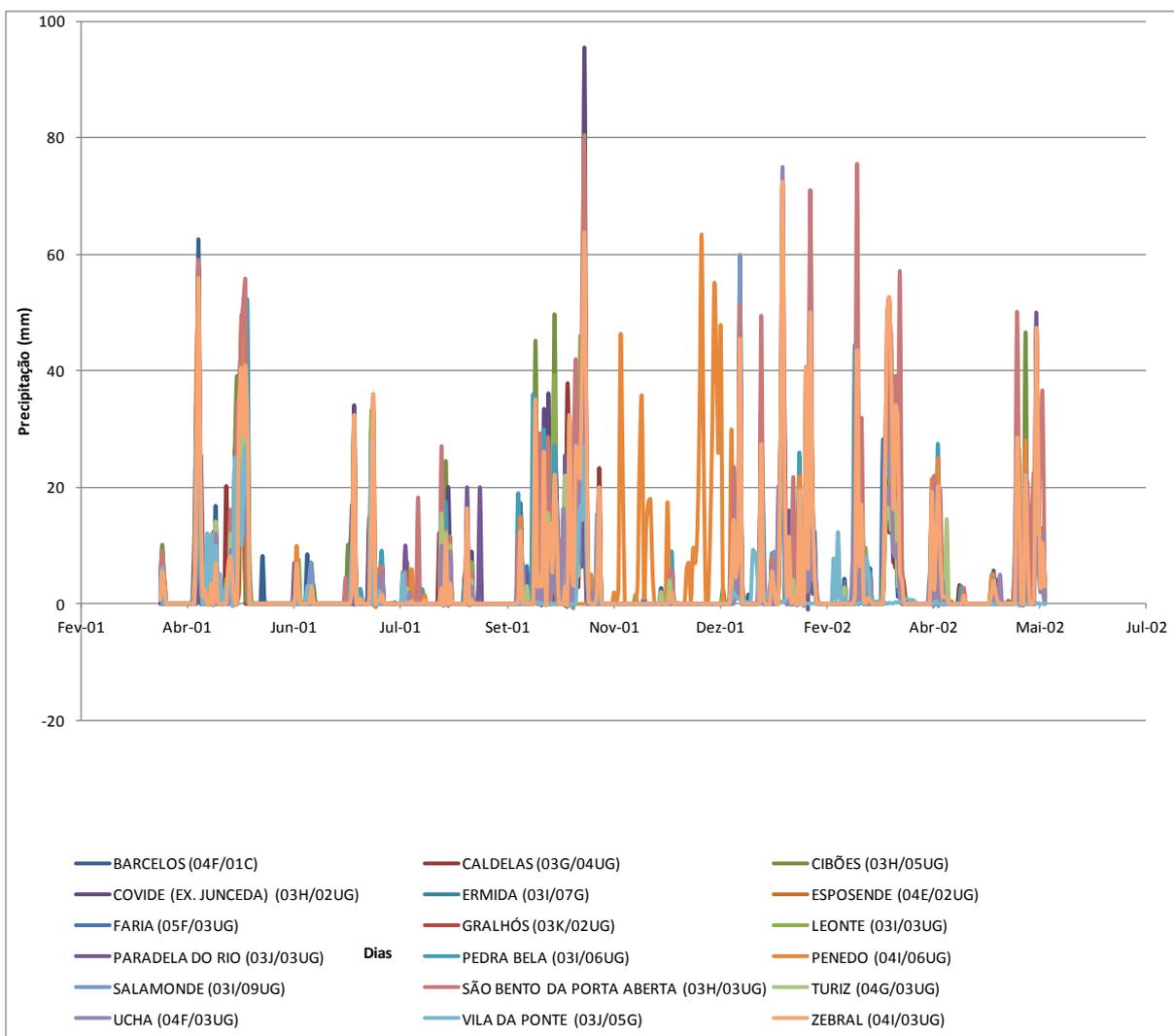


Figura 5.8: Precipitação diária nas estações

Algumas estações apresentavam falta de dados em certos períodos de tempo, sendo necessário, portanto, preencher essas falhas. Partindo do suposto que as estações mais próximas das estações com dados em falta têm valores de precipitação semelhantes, os registos que faltavam foram completados através da realização de uma média ponderada das estações mais próximas da estação com falta de dados. O peso de cada uma dessas estações foi calculado em função sua distância até à estação com falta de registos.

POSTOS COM FALHAS NOS REGISTOS	POSTOS CIRCUNDANTES	PESO
COVIDE	CIBÕES	0,2
	LEONTE	0,3
	PEDRA BELA	0,25
	SÃO BENTO DA PORTA ABERTA	0,25
ESPOSENDE	FARIA	0,6
	BARCELOS	0,4
LEONTE	COVIDE	0,35
	PEDRA BELA	0,3
	ERMIDA	0,25
	PARADELA DO RIO	0,1
ERMIDA	PENEDO	0,25
	PEDRA BELA	0,35
	SALAMONDE	0,3
	PARADELA DO RIO	0,1
PEDRA BELA	ERMIDA	0,3
	PENEDO	0,2
	SÃO BENTO DA PORTA ABERTA	0,2
	COVIDE	0,2
	LEONTE	0,1

Tabela 5.1: Percentagens utilizadas para preencher as falhas de dados das estações

No que diz respeito à evaporação diária, devido à falta de dados no período de tempo selecionado, optou-se por realizar uma média diária de valores dos últimos 18 anos em Barcelos e Gondizalves, sendo essa a evaporação considerada no período escolhido (Figura 5.9).

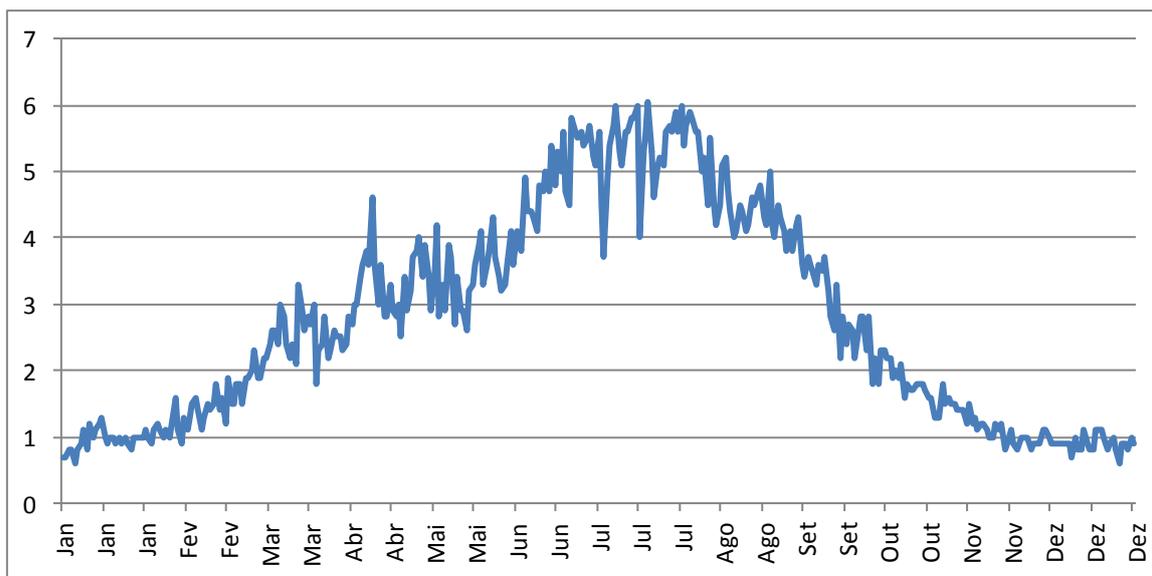


Figura 5.9: Evaporação média diária (mm)

NOME	X	Y	Z	BACIA	DISTRITO	CONCELHO	FREGUESIA
BARCELOS	159004	506433	36	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	BRAGA	BARCELOS	BARCELINHOS
CALDELAS	179274	521969	93	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	BRAGA	AMARES	CALDELAS
CIBÕES	187387	531052	531	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	BRAGA	TERRAS DE BOURO	CIBÕES
COVIDE (EX. JUNCEDA)	196975	530425	895	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	BRAGA	TERRAS DE BOURO	VILAR DA VEIGA
ERMIDA	201251	525488	337	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	BRAGA	TERRAS DE BOURO	VILAR DA VEIGA
ESPOSENDE	146310	507021	6	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	BRAGA	ESPOSENDE	ESPOSENDE
FARIA	155408	501067	65	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	BRAGA	BARCELOS	FARIA
GRALHÓS	232886	534974	910	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	VILA REAL	MONTALEG RE	CHÃ
LEONTE	198824	532892	874	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	BRAGA	TERRAS DE BOURO	VILAR DA VEIGA
PARADELA DO RIO	215688	532293	834	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	VILA REAL	MONTALEG RE	PARADELA
PEDRA BELA	199863	526722	714	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	BRAGA	TERRAS DE BOURO	VILAR DA VEIGA
PENEDO	197474	521338	536	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	BRAGA	VIEIRA DO MINHO	VENTOSA
SALAMONDE	203564	523329	600	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	BRAGA	VIEIRA DO MINHO	SALAMONDE
SÃO BENTO DA PORTA ABERTA	193706	525190	357	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	BRAGA	TERRAS DE BOURO	RIO CALDO
TURIZ	173983	517575	70	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	BRAGA	VILA VERDE	TURIZ
UCHA	167939	511860	52	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	BRAGA	BARCELOS	UCHA
VILA DA PONTE	219743	527520	745	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	VILA REAL	MONTALEG RE	VILA DA PONTE
ZEBRAL	209002	521174	857	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	BRAGA	VIEIRA DO MINHO	RUIVÃES

Tabela 5.2: Estações Meteorológicas (SNIRH, 2015)

NOME	X	Y	Z	BACIA	RIO	ÁREA	DISTRITO	CONCELHO	FREGUESIA
------	---	---	---	-------	-----	------	----------	----------	-----------

						DRENADA (KM ²)			
BARCELOS	159109	506596	11	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	RIO CÁVADO	1434,3	BRAGA	BARCELOS	BARCELOS
CANIÇADA (EDP)	191809	520355	123	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	RIO CÁVADO	774,66	BRAGA	VIEIRA DO MINHO	PARADA DO BOURO
COVAS	186264	528263	99	CÁVADO/RIBEIRAS COSTEIRAS	RIO HOMEM	118,15	BRAGA	TERRAS DE BOURO	MOIMENTA

Tabela 5.3: Estações Hidrométricas (SNIRH, 2015)

Após selecionado o período de tempo e quais as estações a utilizar recorre-se novamente ao *ArcGIS* para introduzir a rede de estações. Este processo é realizado no *ArcMap* utilizando a opção “*Add Data*”, a partir da qual introduzimos uma folha *Excel* com as coordenadas geográficas das estações. Porém, para que seja possível proceder à representação das coordenadas, o ficheiro que as contém tem que estar no formato *shapefiles*. Para tal, utiliza-se a função “*Data*Export Data*Browse*Save as type*dBase table*” e escolhe-se trabalhar com esse ficheiro no presente modelo. Após isso, já é possível ser feita a representação das coordenadas das estações através da opção “*Display XY Data*” (Figura 5.10).

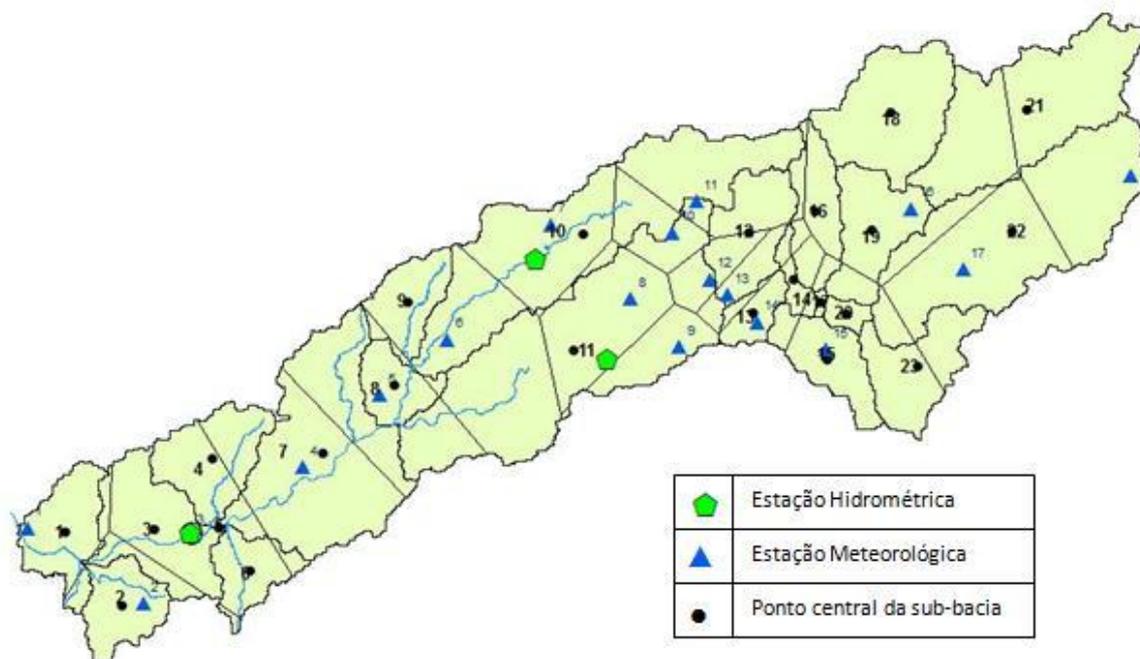


Figura 5.10: Rede de estações hidrométricas, meteorológicas e pontos centrais das sub-bacias, *ArcGIS*

Seguidamente, aplicou-se o método de *Thiessen* para saber qual a precipitação a introduzir em cada nó de *Sacramento*. Realizou-se este processo devido ao facto das estações meteorológicas não coincidirem com os pontos centrais de cada sub-bacia.

Este método é também designado por método das áreas de influência, partindo do pressuposto que cada posto udométrico representa a precipitação média sobre uma área parcelar da bacia.

A sua aplicação é realizada através da delimitação da área de influência da respetiva estação, através das perpendiculares a meio das distâncias entre a estação em causa e as estações circundantes mais próximas. Para tal, começa-se por unir através de segmentos de reta auxiliares todas as estações vizinhas formando áreas triangulares entre elas. Depois, no ponto intermédio de cada segmento de reta desenha-se uma perpendicular e, após isso, intersecta-se as perpendiculares dos 3 segmentos de reta num ponto interior do triângulo.

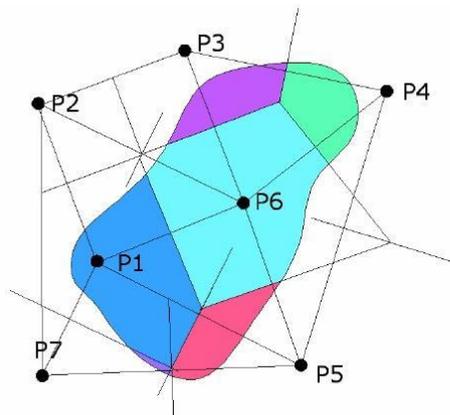


Figura 5.11: Exemplo de aplicação do método de Thiessen (Ferret, 2013)

A precipitação média é dada pela média pesada das precipitações dos postos udométricos.

$$H_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i h_i}{\sum A_i} \quad (24)$$

em que,

A_i , é a área de influência de cada posto udométrico (i);

h_i , é o registo da precipitação do posto udométrico (i);

n , é o número de postos udométricos.

A aplicação deste método foi realizada no *software ArcGIS*. No *ArcMap* utilizou-se a opção “*ArcToolBoxes*Analysis Tools*Proximity*Create Thiessen Polygons*”.

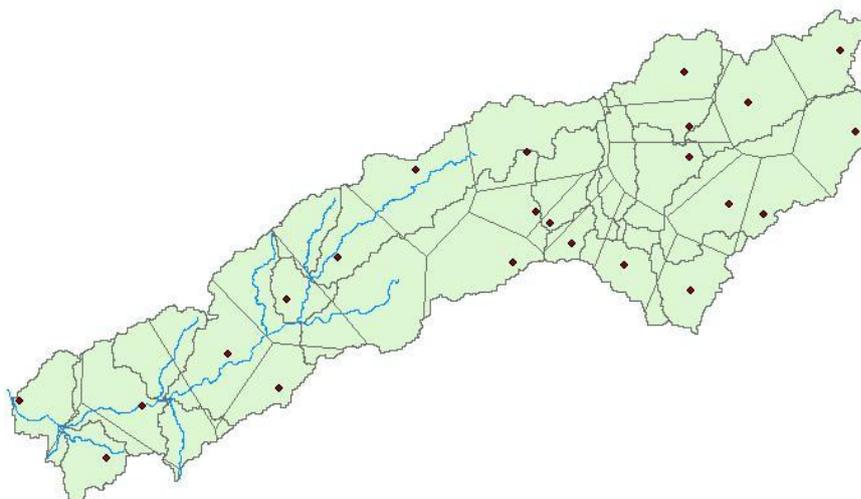


Figura 5.12: Aplicação do método de *Thiessen* à bacia do Cávado no ArcGIS

Para facilitar a obtenção das percentagens da precipitação de cada posto udométrico intersetaram-se as sub-bacias com os polígonos *Thiessen* através da opção “ArcToolBoxes*Analysis Tools*Overlay*Intersect”. Assim, recorrendo à ferramenta “Identify”, é possível obter a informação de cada parcela da área de influência dos postos udométricos relativa a cada sub-bacia.

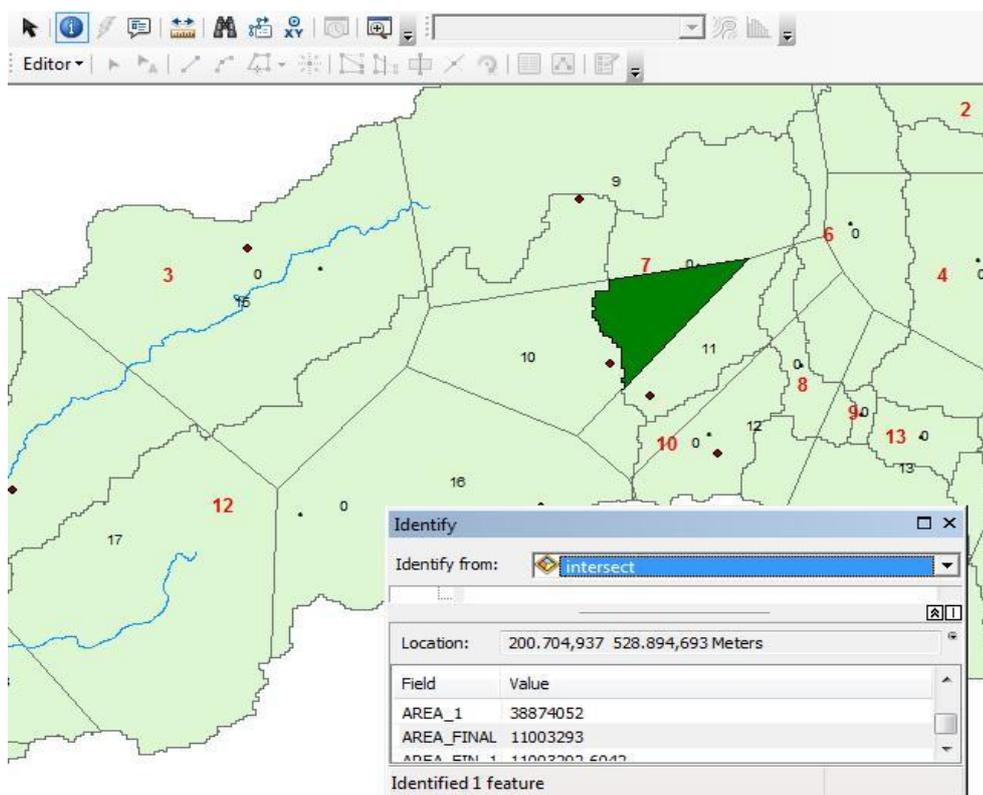


Figura 5.13: Obtenção das áreas parcelares das sub-bacias, ArcMap

Com esta função obteve-se identicamente os valores das áreas de cada sub-bacia para posterior calibração do modelo e introdução nos nós de *Sacramento* no *SOBEK*.

No anexo A encontra-se a tabela com o cálculo da precipitação média a inserir em cada nó de *Sacramento*, assim como a área de influência de cada estação que contribuiu para esse cálculo.

O último passo da elaboração do modelo trata-se da importação dos valores de precipitação para o *SOBEK*. Para tal, recorre-se ao ícone do menu “*Meteorological Data*”, de seguida “*Precipitacion*New Event*”, define-se o número de estações a utilizar (Figura 5.14), sendo (10) no presente caso, que representam os pontos centrais de cada sub-bacia, e a data de início e fim do evento (Figura 5.15).

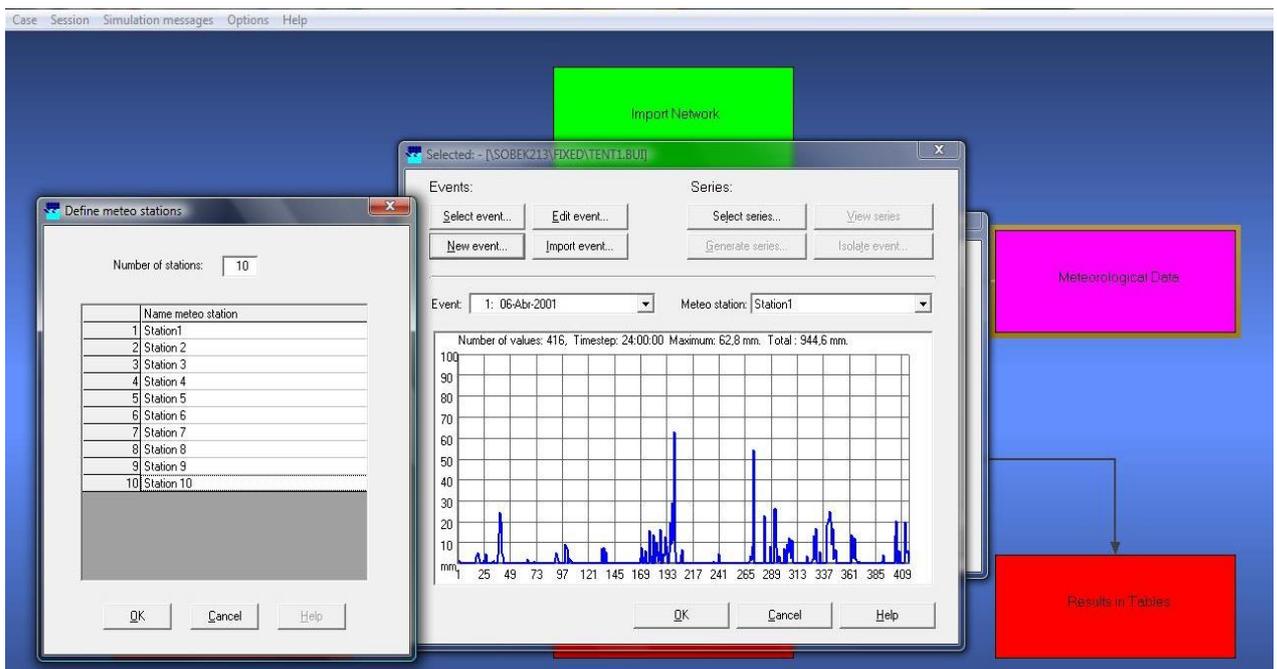


Figura 5.14: Criação de novo evento de precipitação e introdução das estações, *SOBEK*

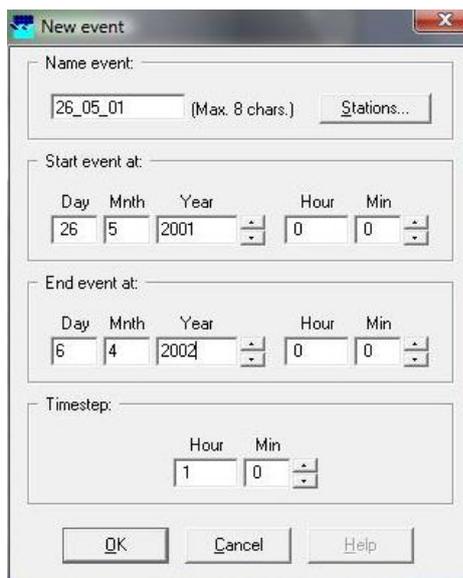


Figura 5.15: Definição da duração do evento de precipitação, *SOBEK*

Os dados de precipitação são importados para o *SOBEK* realizando *copy-paste* das folhas de cálculo do *Excel*. Ao terminar a introdução dos dados é criado um ficheiro com a extensão *.bui* correspondente a um evento de precipitação. Relativamente ao caudal efluente da Caniçada selecciona-se o respetivo nó de fronteira e é feito similarmente *copy-paste* das folhas de *Excel*.

5.3 Parâmetros de calibração do modelo hidrológico

Os parâmetros de *Sacramento* a inserir no *SOBEK* foram obtidos através do *software Rainfall Runoff Library (RRL)*.

O modelo foi calibrado para a sub-bacia correspondente à localização de Barcelos e a sub-bacia correspondente à zona de Covas, sendo estes os locais com dados suficientes para realização do processo de calibração.

Os parâmetros de *Sacramento* resultantes da calibração com os dados de Covas foram inseridos nos 3 nós de *Sacramento* mais a montante do modelo devido ao facto de serem os pontos mais próximos da estação de Covas. Os parâmetros obtidos através da calibração com os dados de Barcelos foram inseridos nos restantes nós de *Sacramento*. Foi escolhida esta distribuição dos parâmetros pelos nós, pois foi a que melhores resultados obteve nas simulações em *SOBEK*.

Para ambas as calibrações foram utilizados valores diários de precipitação, evaporação e caudal para o período de 6 de Abril de 2001 a 26 de Maio de 2002.

Seguidamente, apresentam-se os gráficos com os dados introduzidos no *RRL* para a calibração da sub-bacia correspondente à localidade de Covas.

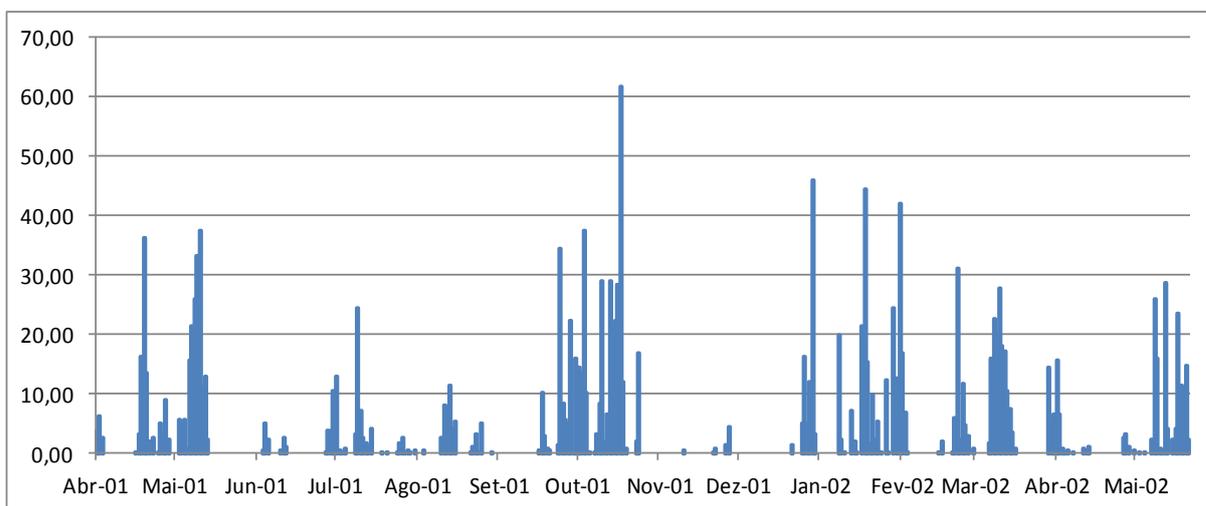


Figura 5.16: Precipitação diária na sub-bacia correspondente a Covas (mm)

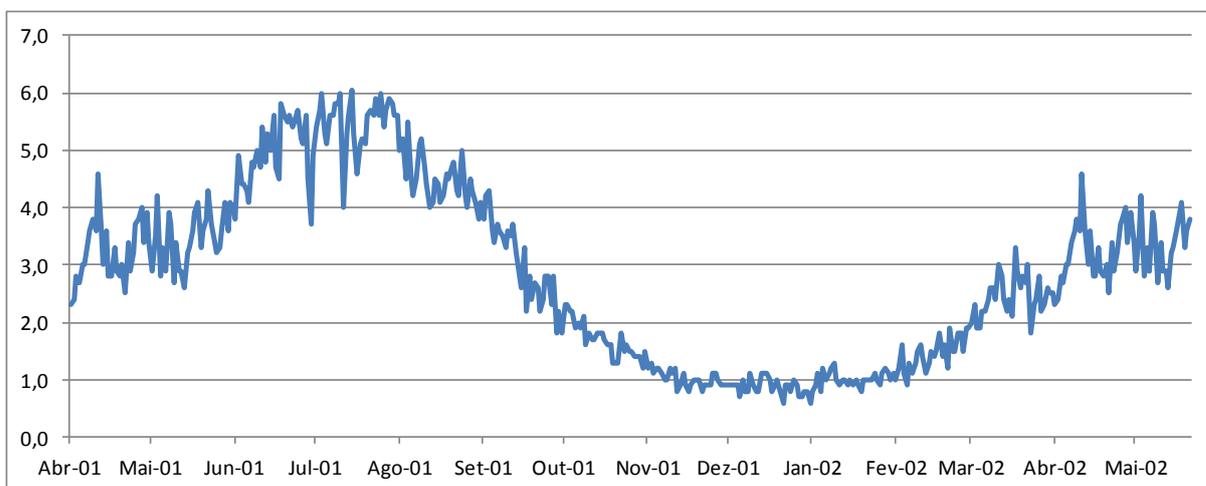


Figura 5.17: Evaporação média diária (mm)

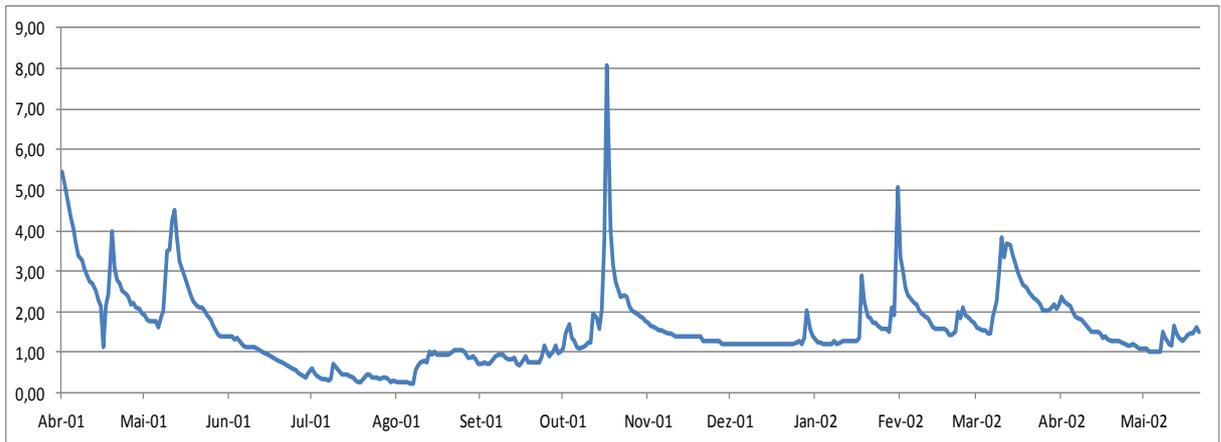


Figura 5.18: Caudal médio diário em Covas (m^3/s)

Relativamente à calibração de Barcelos foi adotado o procedimento de Medeiros (2014). O modelo de *SOBEK* tem como condição de fronteira a montante a barragem da Caniçada sendo, por isso, importante realizar alguns ajustamentos para obter o melhor resultado possível.

A soma das precipitações diárias (P') e das Áreas (A') relativas às sub-bacias a montante da sub-bacia correspondente a Barcelos controlam o caudal (Q') obtido da subtração do caudal observado em Barcelos pelo caudal efluente na barragem da Caniçada. No que respeita à evaporação (E), foi aplicada a mesma da calibração de Covas.

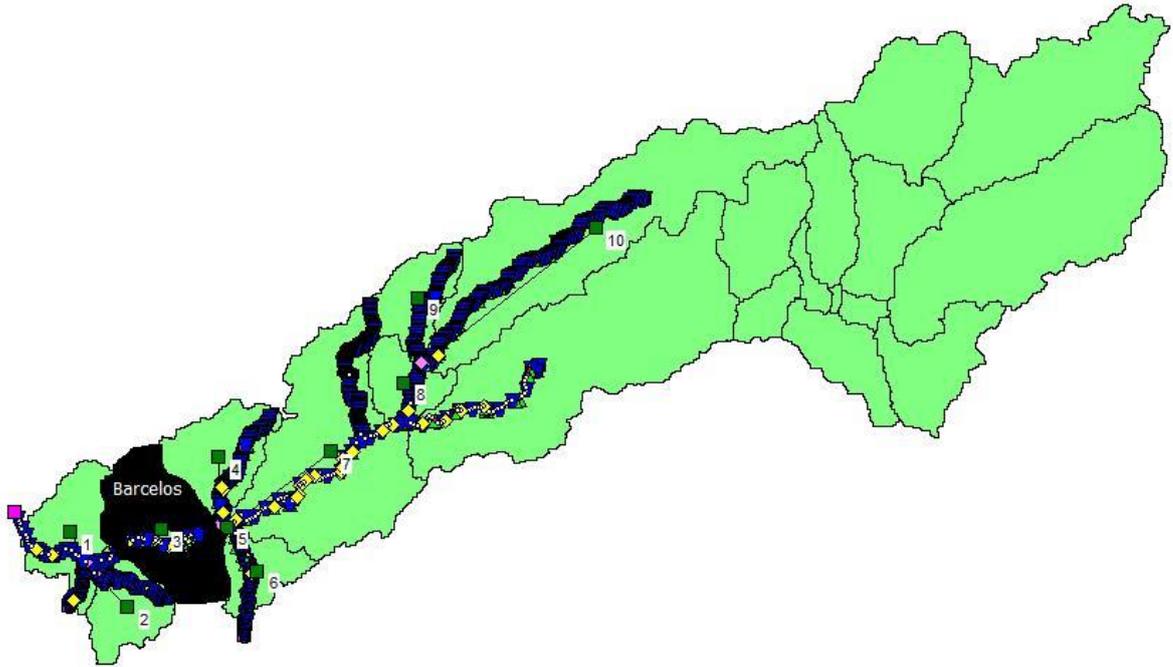


Figura 5.19: Modelo em SOBEK

$$P' = P_{10} + P_9 + P_8 + P_7 + P_6 + P_5 + P_4 \quad (25)$$

$$A' = A_{10} + A_9 + A_8 + A_7 + A_6 + A_5 + A_4 \quad (26)$$

$$Q_{real\ Barcelos} = Q' + Q_{efluente\ Caniçada} \quad (27)$$

$$Q' \in \{P'; A'; E\} \quad (28)$$

Durante o processo de cálculo, nas situações em que o caudal registado em Barcelos fosse inferior ao caudal efluente na Caniçada, o caudal resultante era considerado nulo. Certas situações em que Q' representava valores irrealis, o mesmo era analisado e corrigido para que não induzisse em erro o processo.

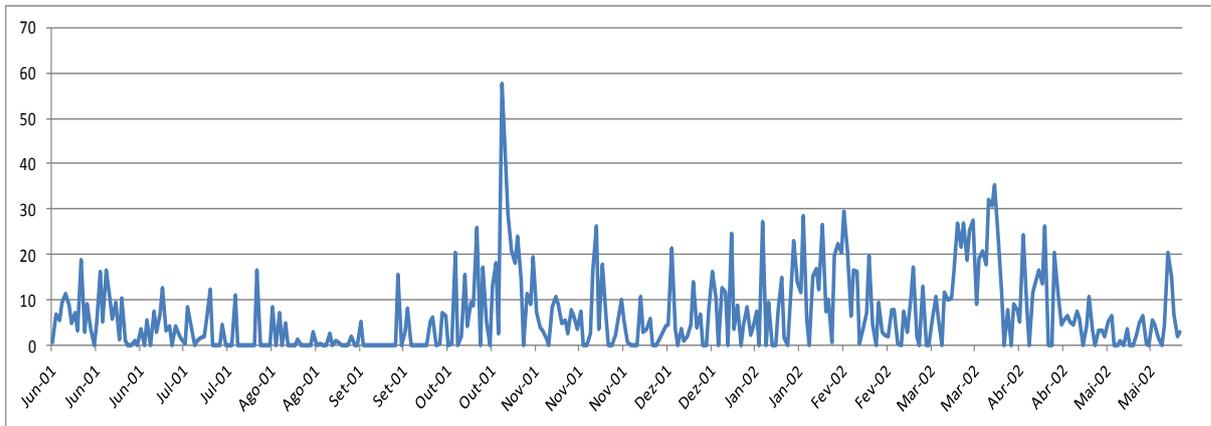


Figura 5.20: Caudal resultante (Q') para calibração em Barcelos (m³/s)

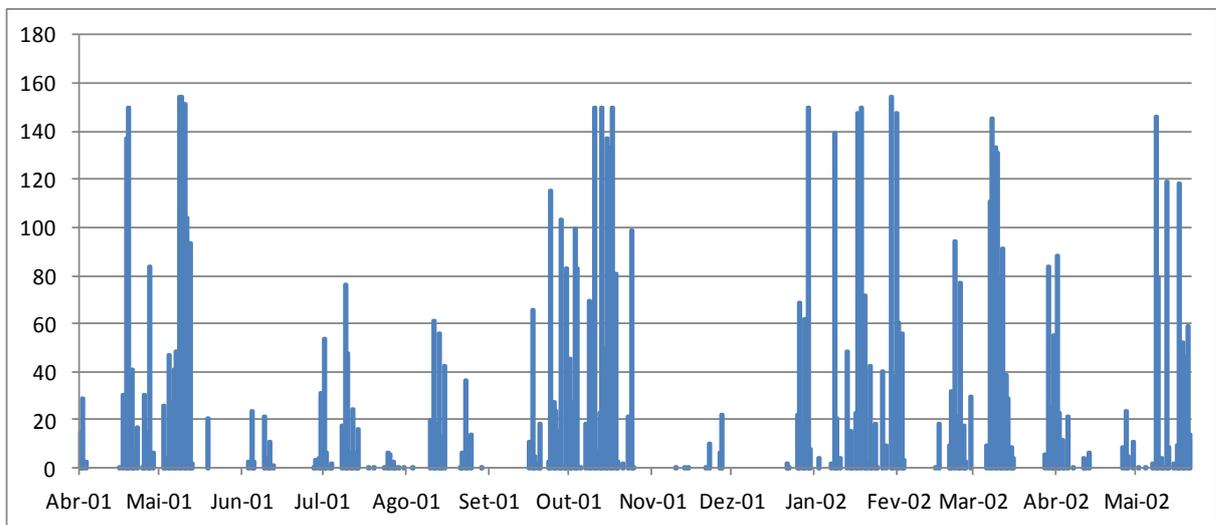


Figura 5.21: Precipitação resultante (P') para calibração em Barcelos (mm)

5.4 Ponte medieval de Barcelos

A ponte medieval de Barcelos é o ponto mais crítico quando ocorrem cheias e inundações. Esta zona foi estudada com mais pormenor por ser o ponto mais importante do modelo de alerta de cheias, pois é na área circundante à ponte que se localiza a estação hidrométrica de Barcelos, utilizada não só para calibração do modelo mas também para a sua verificação.



Figura 5.22: Ponte medieval de Barcelos

O levantamento topográfico da ponte (Figura 5.23 e 5.24) foi cedido pela Câmara Municipal de Barcelos. Posteriormente procedeu-se à sua introdução no *SOBEK* para simulação de alturas de água e caudais na ponte.

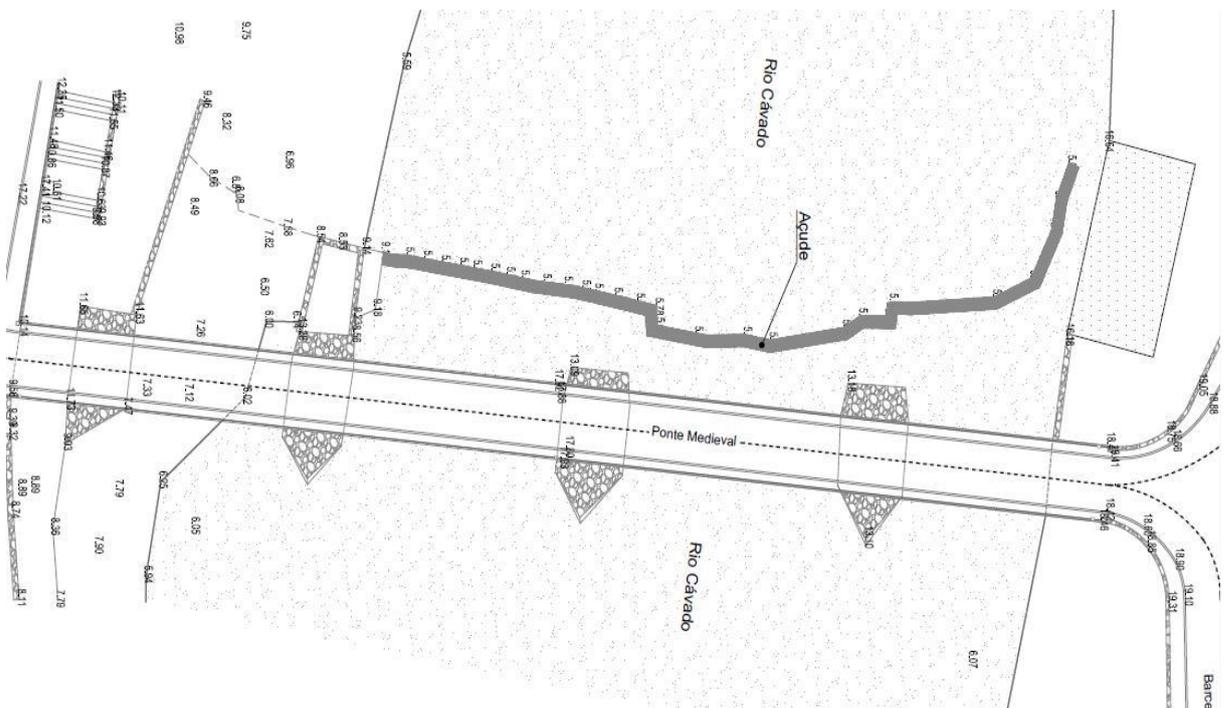


Figura 5.23: Levantamento topográfico da Ponte medieval (Planta)

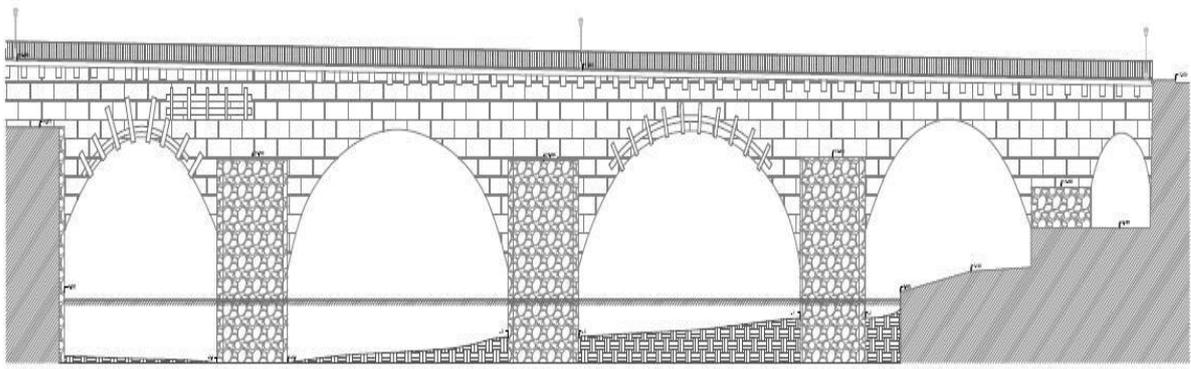


Figura 5.24: Levantamento topográfico da Ponte medieval (Alçado)

Foi utilizado o *AutoCAD* para analisar os ficheiros e proceder à exportação para o *Excel* dos dados necessários para introdução da ponte no *SOBEK*. A ponte é constituída por 5 arcos desiguais, muito altos e largos (Figura 5.25). A cota de inserção do tabuleiro da ponte no Jardim da Igreja Matriz de Barcelos é de 18,46 metros e, no Largo Guilherme Gomes Fernandes, em Barcelinhos, é de 17,4 metros. O leito normal do rio tem uma cota máxima de aproximadamente 6 metros. Caso essa cota seja ultrapassada num evento de cheia irão ocorrer inundações nas zonas ribeirinhas.

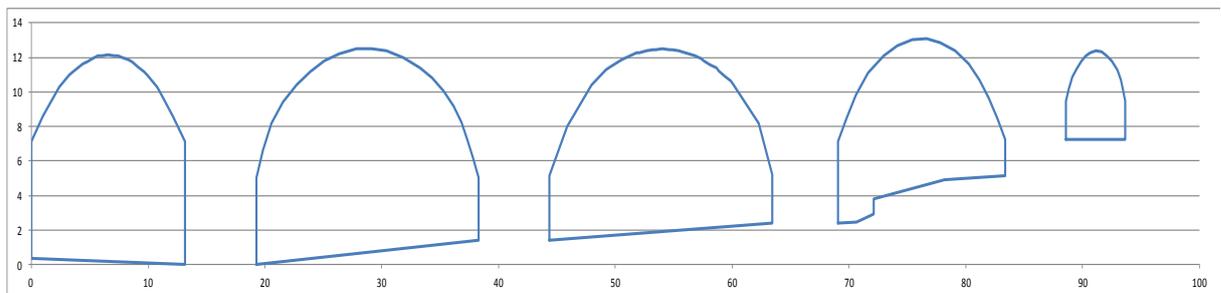


Figura 5.25: Arcos da Ponte medieval, Excel

No *SOBEK* escolheu-se o tipo de ponte “*Abutment*”, que consiste numa ponte de pilares, em que é necessária a definição da sua cota de fundo, do seu comprimento na direção do escoamento, dos coeficientes de perda de entrada e de saída e a definição da direção do escoamento (Figura 5.26).

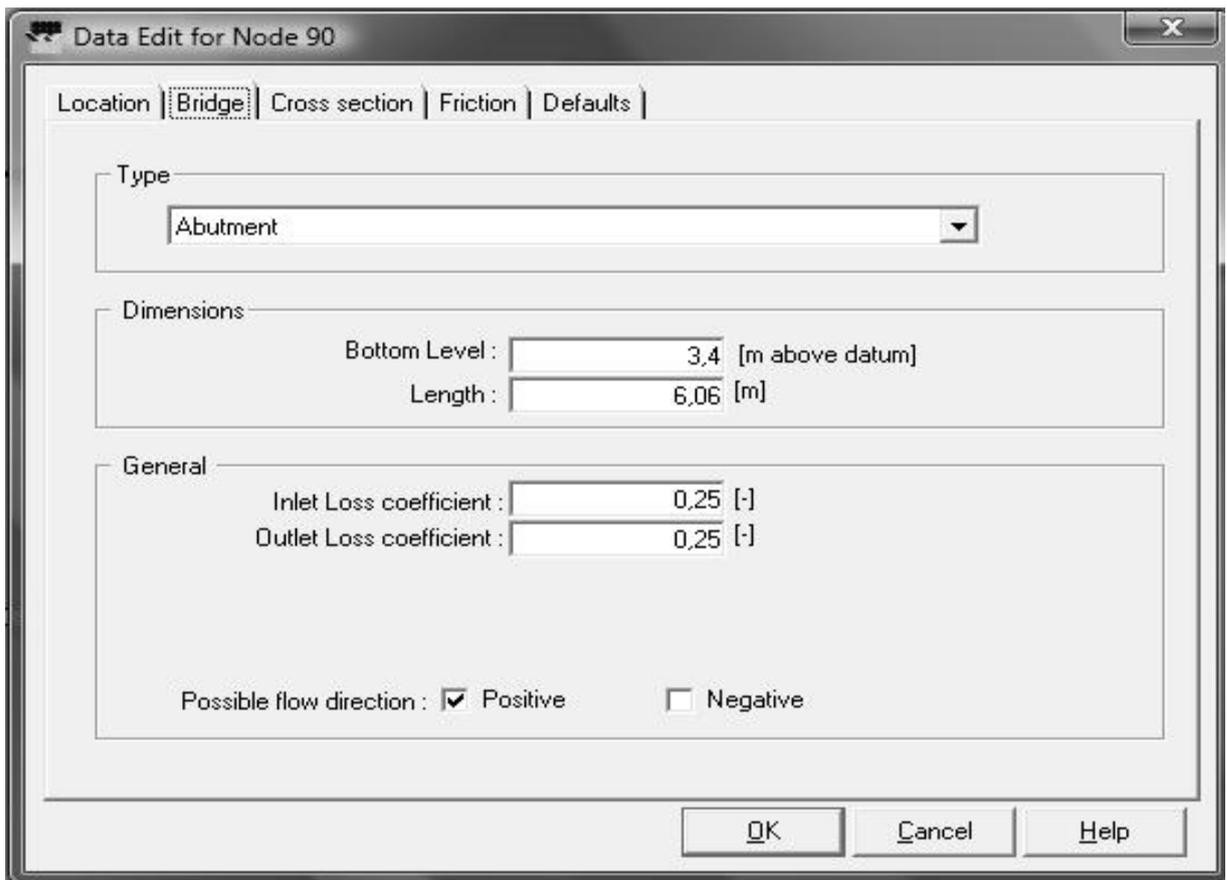


Figura 5.26: Introdução da Ponte medieval em SOBEK

O *SOBEK* apenas permite a introdução de um arco por cada nó de ponte, portanto, teve que ser executada uma distribuição de 5 trechos na zona da ponte medieval para introdução dos 5 nós de estrutura “*bridge*” (triângulos cinzentos apresentados na figura 5.27).

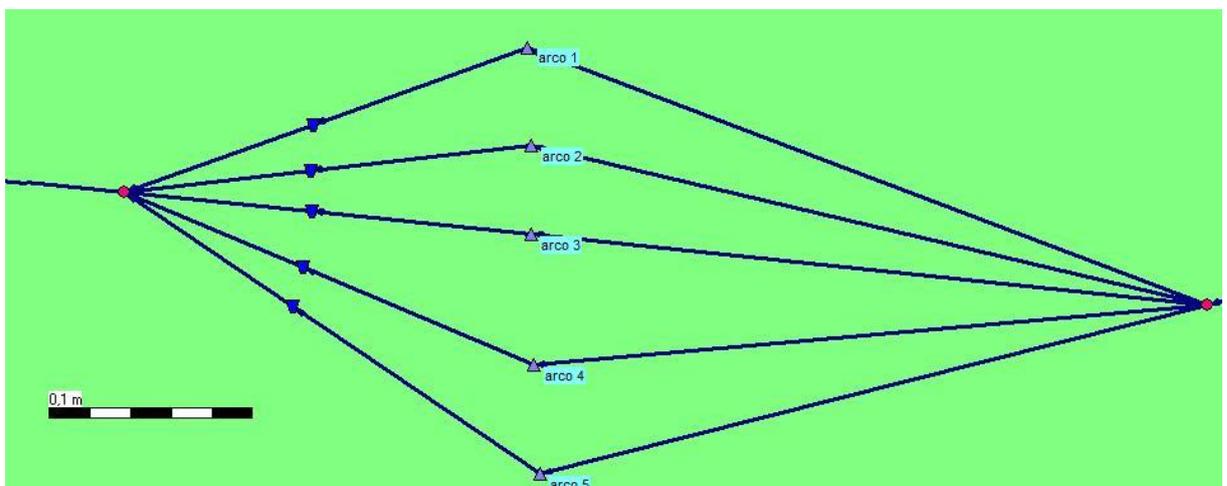


Figura 5.27: Rede de distribuição do trecho principal para introdução dos 5 arcos, SOBEK

A introdução da tabela preparada em *Excel* relativa à geometria de cada arco foi introduzida escolhendo o tipo de secção “*Tabulated*”.

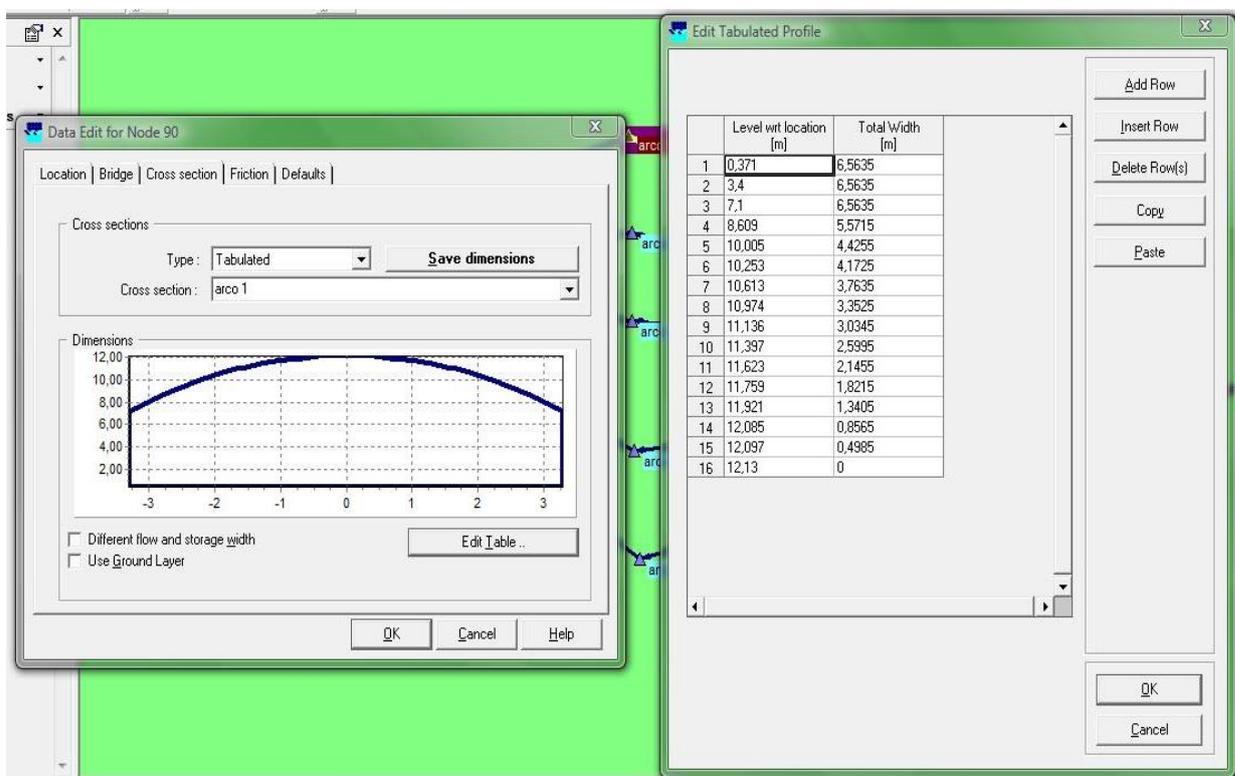


Figura 5.28: Introdução da geometria dos arcos da Ponte medieval, SOBEK

5.5 Sistema de previsão de cheias

Um sistema de previsão de cheias é essencial para que seja possível existir um alerta antecipado para que as autoridades competentes possam tomar as medidas necessárias e alertar a população do possível extravasamento das margens do rio, para que os danos causados por esse acontecimento sejam minorados o máximo possível.

O sistema de previsão de cheias é constituído por uma série de funções que devem ser executadas sequencialmente. Para o funcionamento do sistema de previsão são utilizadas ferramentas como o *Weather Underground* e o *Ugrib*.

O *Ugrib* é utilizado para prever precipitações com vista a perceber se as mesmas podem originar cheias, possibilitando, ainda, a exportação de valores para o *SOBEK*.

Recorrendo ao *Weather Underground* é possível obter dados diários ou mensais de precipitação e fazer a sua exportação para o *SOBEK* por forma a tornar o modelo o mais preciso e real no começo da previsão.

Para manter o modelo funcional é necessária uma constante atualização dos seus dados recorrendo ao *Weather Underground*.

A verificação do modelo é realizada recorrendo aos dados da estação hidrométrica de Barcelos.

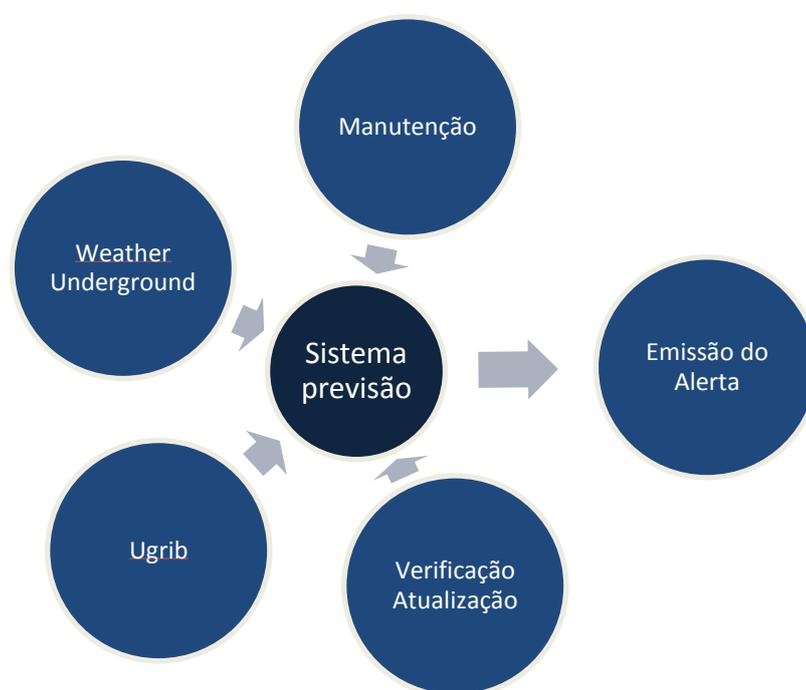


Figura 5.29: Esquema sintético do funcionamento do sistema de previsão de cheias

A partir do *site Weather Underground* é possível exportar para o *SOBEK* os dados históricos de precipitação das estações disponíveis na bacia do Cávado, permitindo uma atualização constante do modelo para o início de uma previsão/simulação.

Para o sistema funcionar corretamente é necessária uma constante manutenção, que passa pela atualização dos dados de precipitação obtidos através do *Wunderground*.

O *Ugrib* é utilizado para recolher dados de previsões de precipitação e, através do modelo *SOBEK*, é possível analisar o escoamento e prever se irá dar origem a fenómenos de cheias.

Grib é um formato utilizado mundialmente pelos institutos de meteorologia para partilhar e manusear informação.

Na presente dissertação a validação/verificação do modelo não foi possível devido ao facto de não ter sucedido nenhum evento de precipitação extremo no período de tempo selecionado nem existir informação suficiente para aferir a credibilidade do sistema noutra período. Além da falta de dados, relativos à estação hidrométrica de Barcelos até ao ano de 2002, a estação permanece inativa desde então, não sendo possível obter valores reais de caudal para verificar o sistema de previsão.

6 . ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Resultados da calibração do modelo

Posteriormente à introdução dos dados no *RRL* foi realizada uma análise de sensibilidade através da execução de várias simulações para todos os métodos de otimização e funções objetivo primárias e secundárias, variando os seus diversos parâmetros para concluir qual a combinação que reproduzia melhores resultados.

Após múltiplas calibrações obteve-se, para Covas, um R^2 de 0,87 e um coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* de 0,695 (NSE). Foi utilizado o método de otimização “*Genetic Algorithm*” com 500 iterações e 200 pontos, tendo como função objetivo primária aproximar o “*Nash-Sutcliffe Criterion*” de 1 e como função objetivo secundária o “*Base Flow Method 2*”.

Adimp	0
Lzfp	949,5294118
Lzfs	209,4705882
Lzpk	0,004796078
Lzsk	0,071333333
Lztw	490,3921569
Pctim	0
Pfree	0,363921569
Rexp	1
Rserv	0,232156863
Sarva	0,01
Side	0
Ssout	0,001
Uzfw	109,627451
Uzk	0,612352941
Uztw	83,92156863
Zperc	61,82352941

Tabela 6.1: Parâmetros de *Sacramento*, Covas

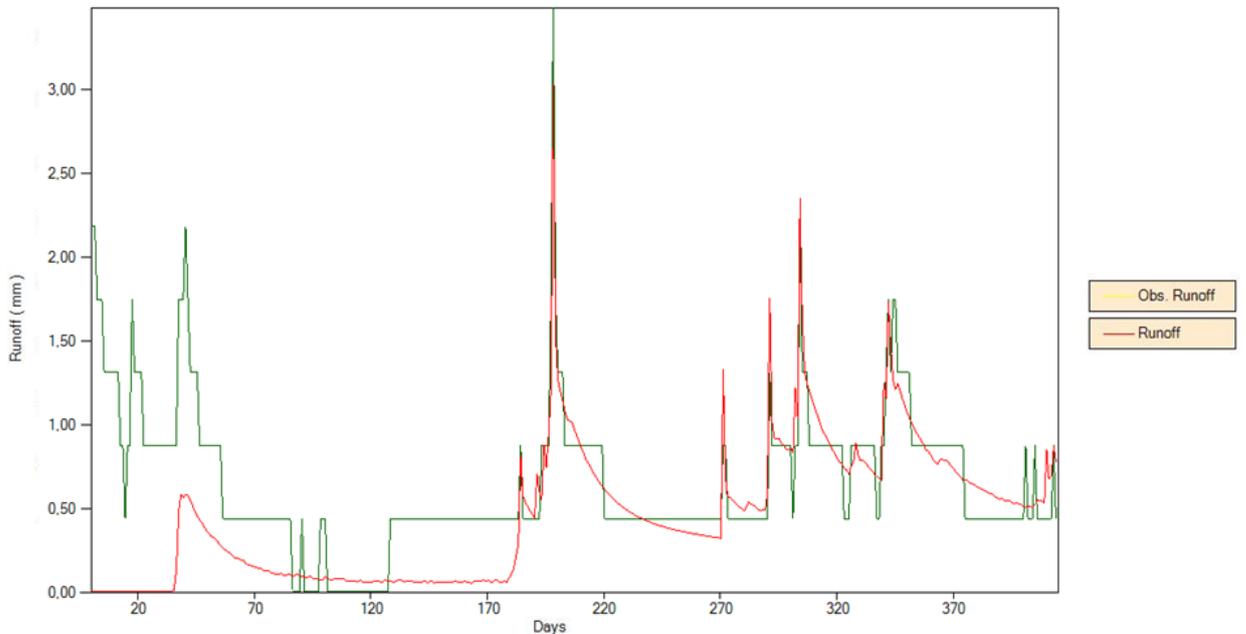


Figura 6.1: Gráfico do caudal observado e do caudal resultante da calibração para Covas (RRL)

No gráfico apresentado na figura anterior, o eixo horizontal representa o tempo desde o início até ao fim da calibração e o eixo vertical representa o caudal em m^3/s .

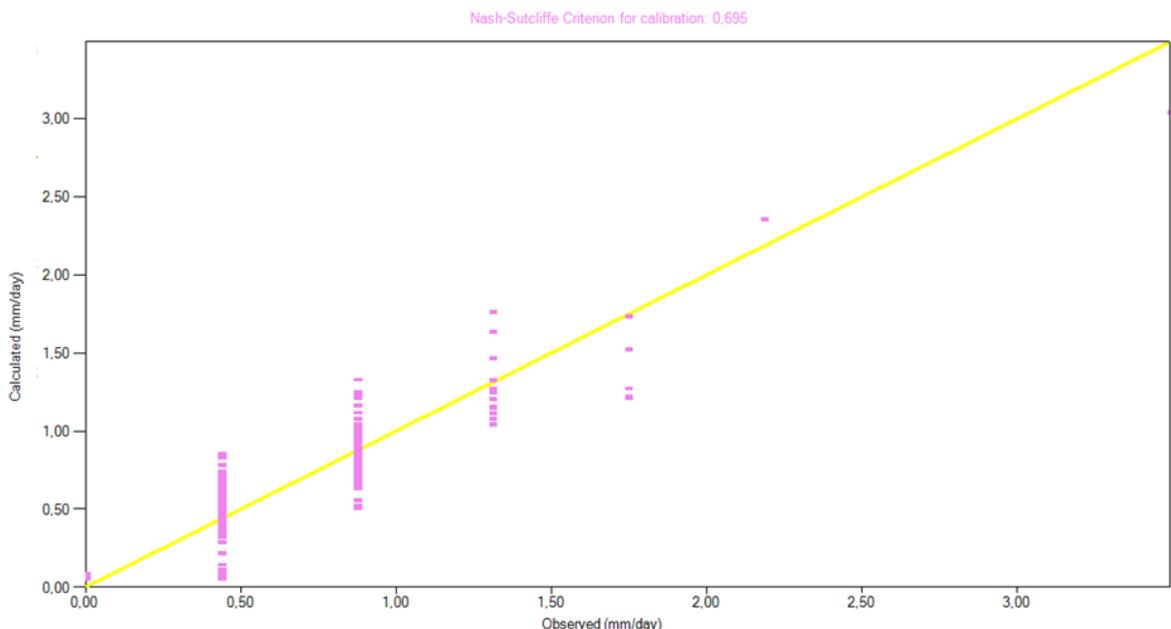


Figura 6.2: Gráfico dos valores observados vs valores calculados, diariamente, Covas (RRL)

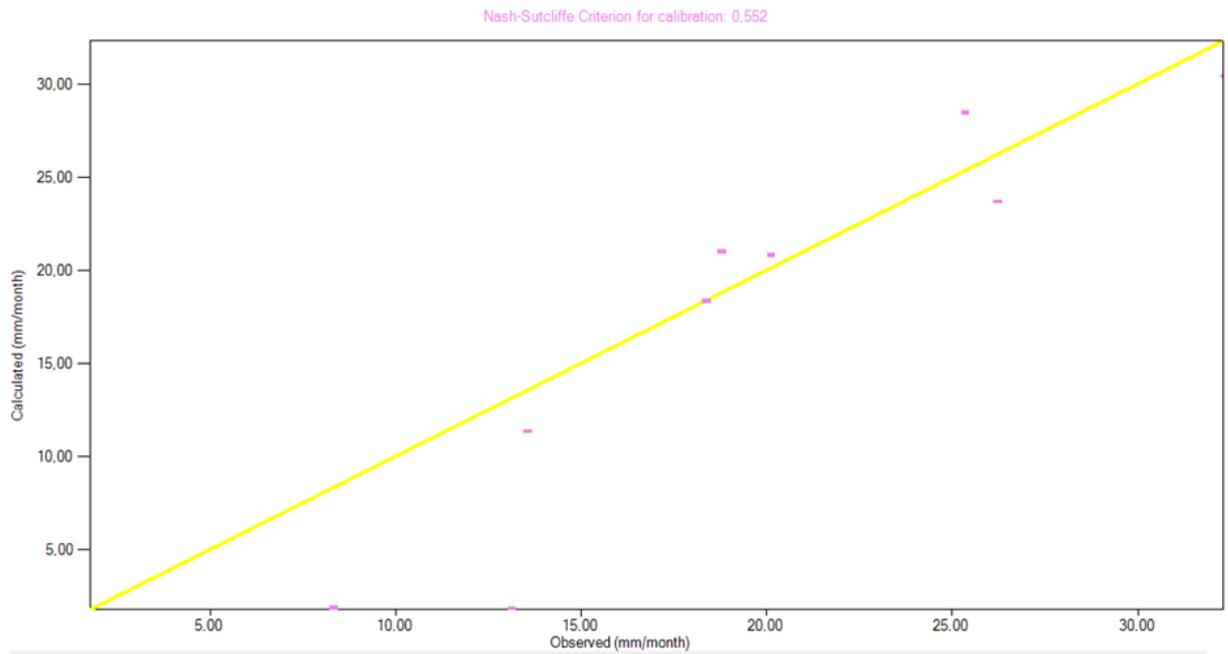


Figura 6.3: Gráfico dos valores observados vs valores calculados, mensalmente, Covas (*RRL*)

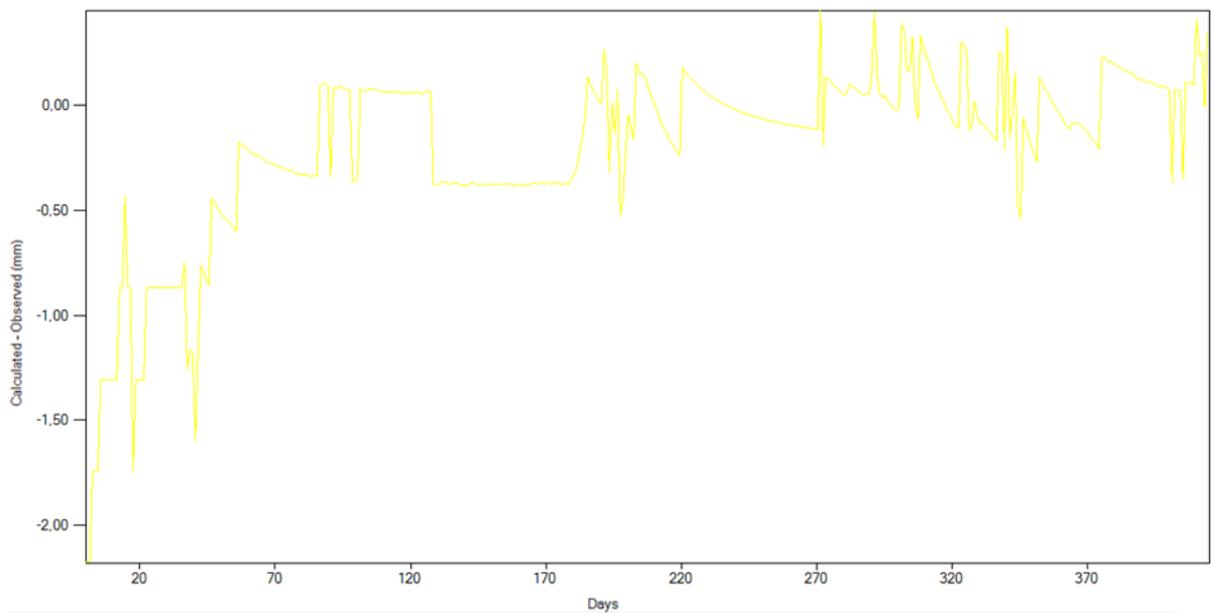


Figura 6.4: Gráfico representativo da diferença entre o caudal observado e o caudal calculado, Covas (*RRL*)

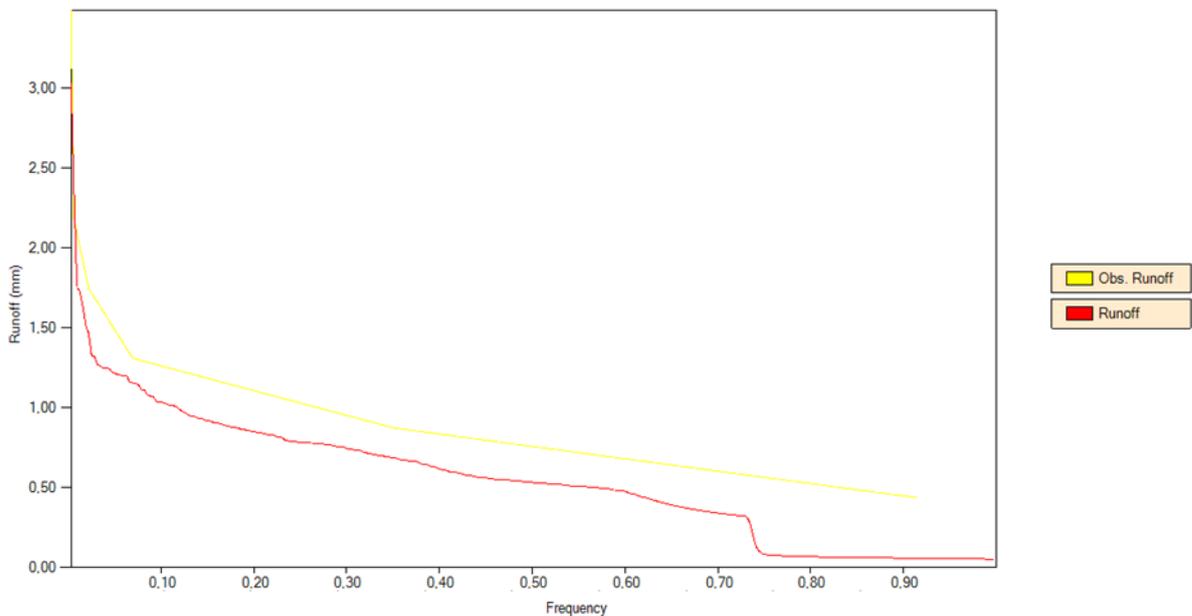


Figura 6.5: Curva “Caudal-Frequência”, Covas (RRL)

Seguidamente, foi efetuada a calibração para Barcelos. Após realizada a mesma análise de sensibilidade, obteve-se um R^2 de 0,678 e um coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* de 0,452 (NSE). Foi utilizado o método de otimização “*Genetic Algorithm*” com 500 iterações e 20 pontos, como função objetivo primária aproximar o “*Nash-Sutcliffe Criterion*” de 1 e como função objetivo secundária o “*Base Flow Method 2*”.

Adimp	0,039215686
Lzfp	192,4705882
Lzfs	263,6862745
Lzpk	0,008878431
Lzsk	0,055333333
Lztw	394,3137255
Pctim	0
Pfree	0,778039216
Rexp	2,380392157
Rserv	0,304313725
Sarva	0,078431373
Side	1,254901961
Ssout	0
Uzfw	144,3137255
Uzk	0,1
Uztw	277,254902
Zperc	348,6470588

Tabela 6.2: Parâmetros de Sacramento, Barcelos

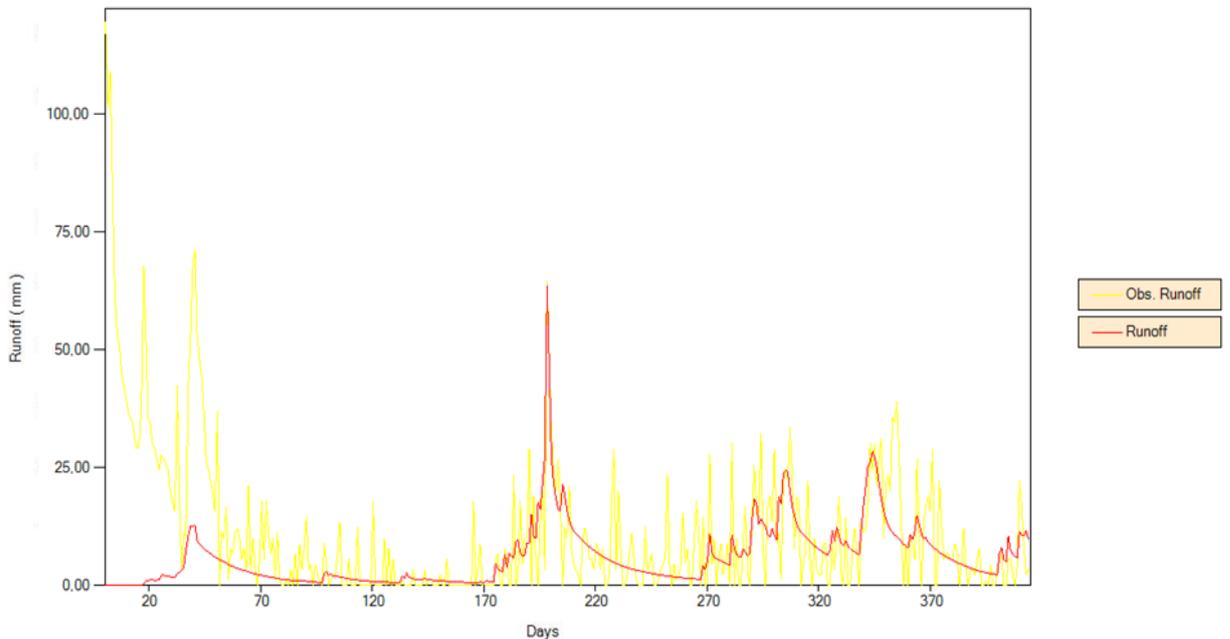


Figura 6.6: Gráfico do caudal observado e do caudal resultante da calibração para Barcelos (RRL)

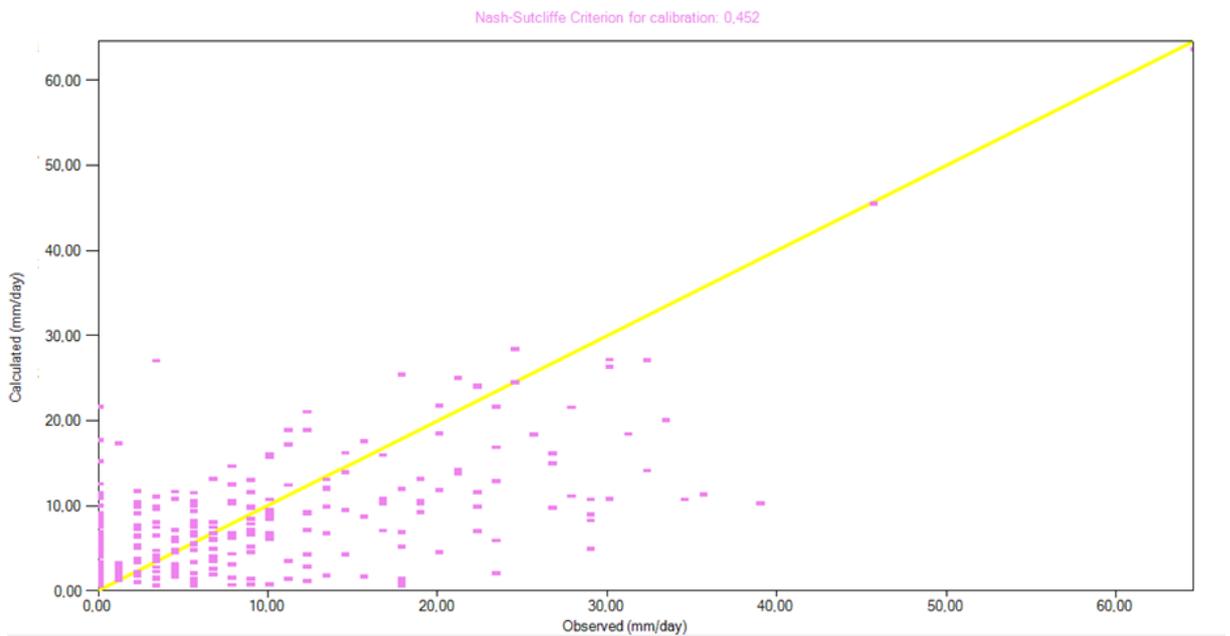


Figura 6.7: Gráfico dos valores observados vs valores calculados, diariamente, Barcelos (RRL)

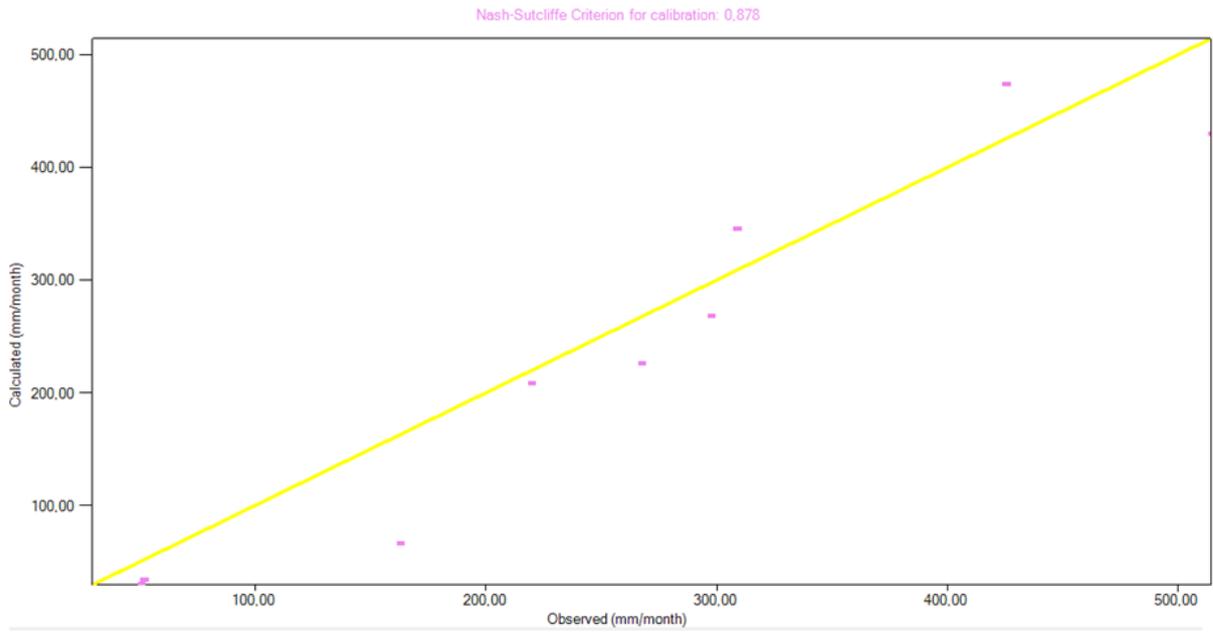


Figura 6.8: Gráfico dos valores observados vs valores calculados, mensalmente, Barcelos (RRL)

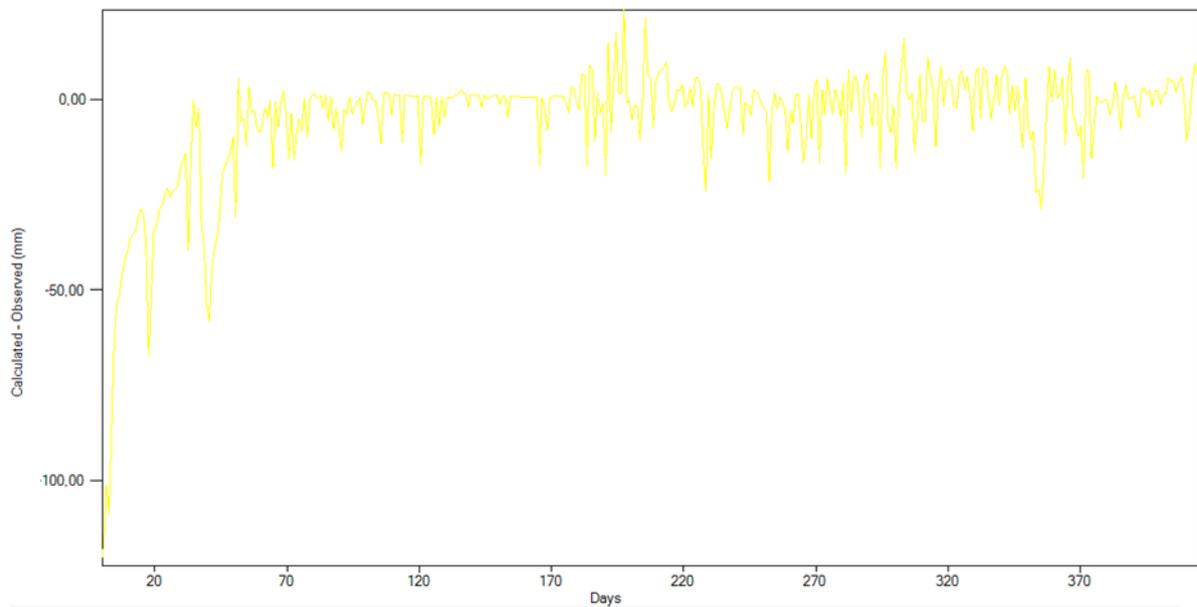


Figura 6.9: Gráfico representativo da diferença entre caudal observado e caudal calculado, Barcelos (RRL)

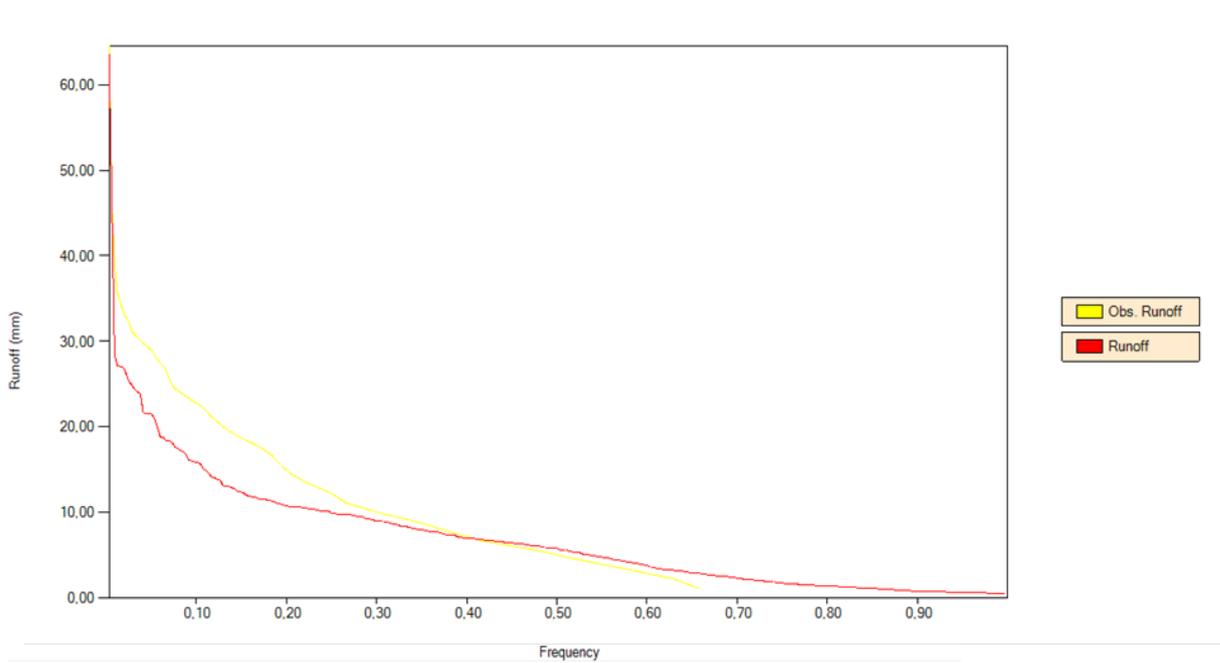


Figura 6.10: Curva “Caudal-Frequência”, Barcelos (RRL)

6.2 Resultados das simulações em *SOBEK*

Feita a calibração do modelo, foram introduzidos os parâmetros de *Sacramento* obtidos no *RRL* nos nós de *Sacramento* no *SOBEK* (Figura 6.11 e 6.12).

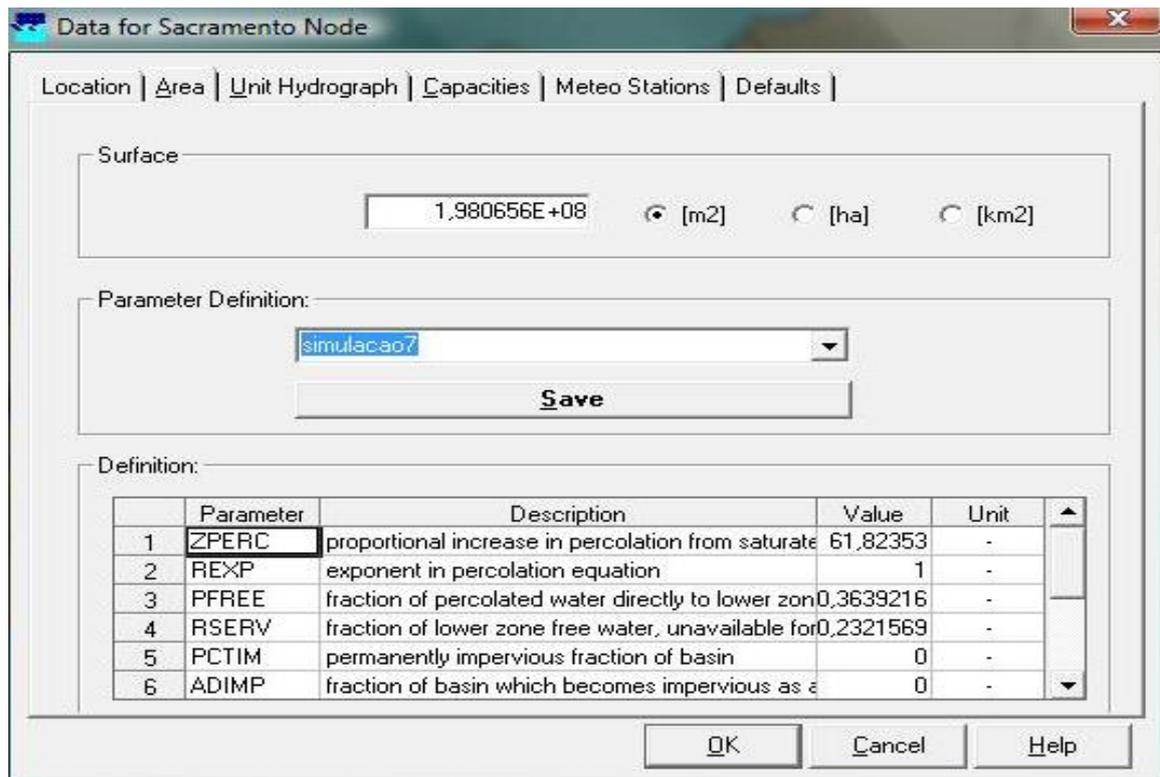


Figura 6.11: Introdução dos parâmetros nos nós de *Sacramento*, *SOBEK*

Foram realizadas diversas simulações para se perceber qual a distribuição dos parâmetros pelos nós que resultaria na melhor aproximação do modelo à realidade. Foi tomada a decisão de introduzir os parâmetros obtidos na calibração para Covas nos nós de *Sacramento* 8, 9 e 10, pela sua proximidade de Covas. Os parâmetros de *Sacramento* obtidos na calibração realizada para Barcelos foram introduzidos nos restantes nós de *Sacramento* do modelo. As capacidades iniciais dos reservatórios não são obtidas na calibração do modelo no *RRL*, portanto foram feitas várias simulações variando as capacidades iniciais dos reservatórios (superior e inferior) (Figura 6.12).

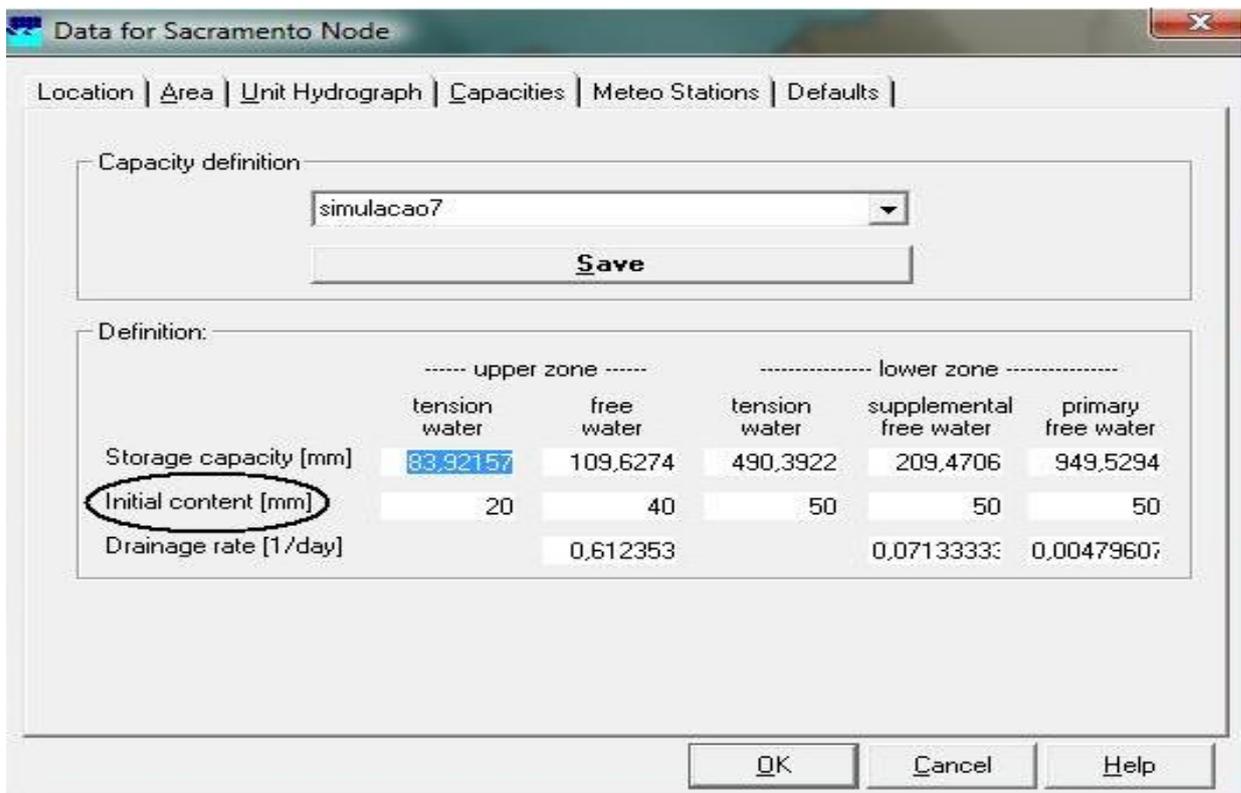


Figura 6.12: Capacidades dos reservatórios e taxas de drenagem utilizadas nos nós de Sacramento, SOBEK

O intervalo de tempo de simulação foi definido para 1 hora e os resultados em intervalos de tempo de 24 horas. A curva de caudais simulados é exportada para o *Excel* e comparada com a curva de caudais real. Na figura 6.13 é apresentado o gráfico em que apresenta a comparação entre a melhor curva obtida de caudais simulados e a curva de caudais reais observados em Barcelos.

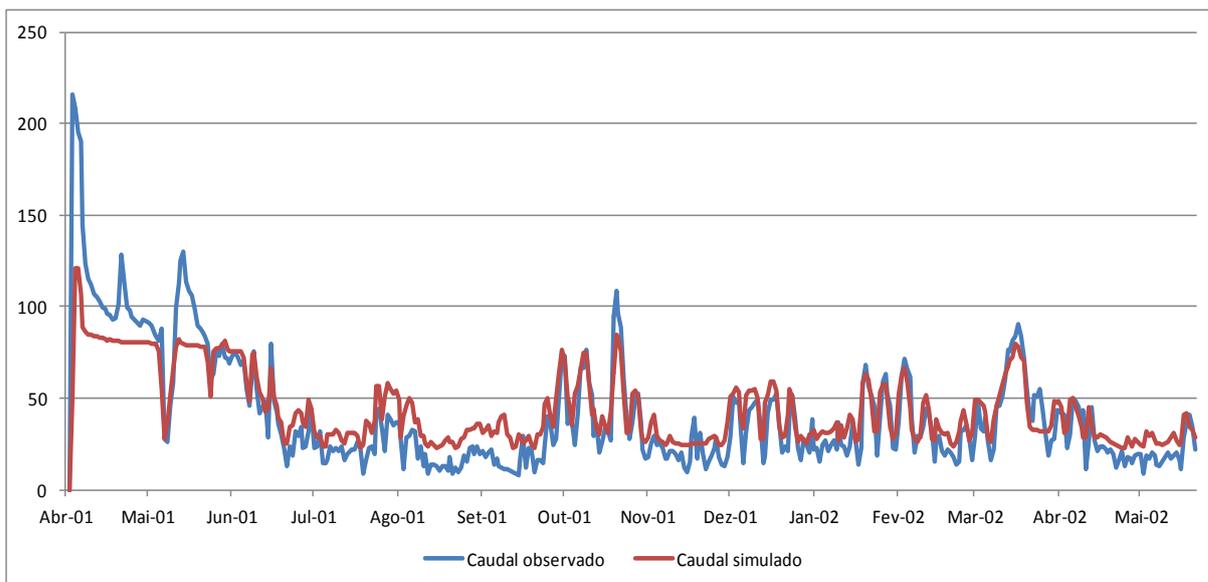


Figura 6.13: Caudal observado vs caudal simulado em Barcelos (m³/s), SOBEK

Para o período de tempo selecionado obtiveram-se os resultados abaixo apresentados (Tabela 6.3).

R^2	0,9256
Média do caudal observado (m ³ /s)	40,68
Média do caudal simulado (m ³ /s)	44,11

Tabela 6.3: Valores utilizados para avaliação dos resultados em Barcelos

Após análise dos resultados obtidos conclui-se que o modelo representa bem a realidade. O coeficiente de correlação obtido é bastante próximo de 1, sendo considerado quase perfeito. A diferença entre a média de valores simulados e observados é de 3,43 m³/s e a diferença média entre valores simulados e observados é 11,27 m³/s.

No gráfico da figura 6.13 é possível observar a proximidade entre as duas curvas e que quando existe uma subida ou descida do caudal observado, o mesmo se constata para o caudal simulado.

Na figura abaixo apresentada pode-se ver o gráfico das curvas de caudais num intervalo de tempo reduzido por forma a ser possível observá-lo mais pormenorizadamente.

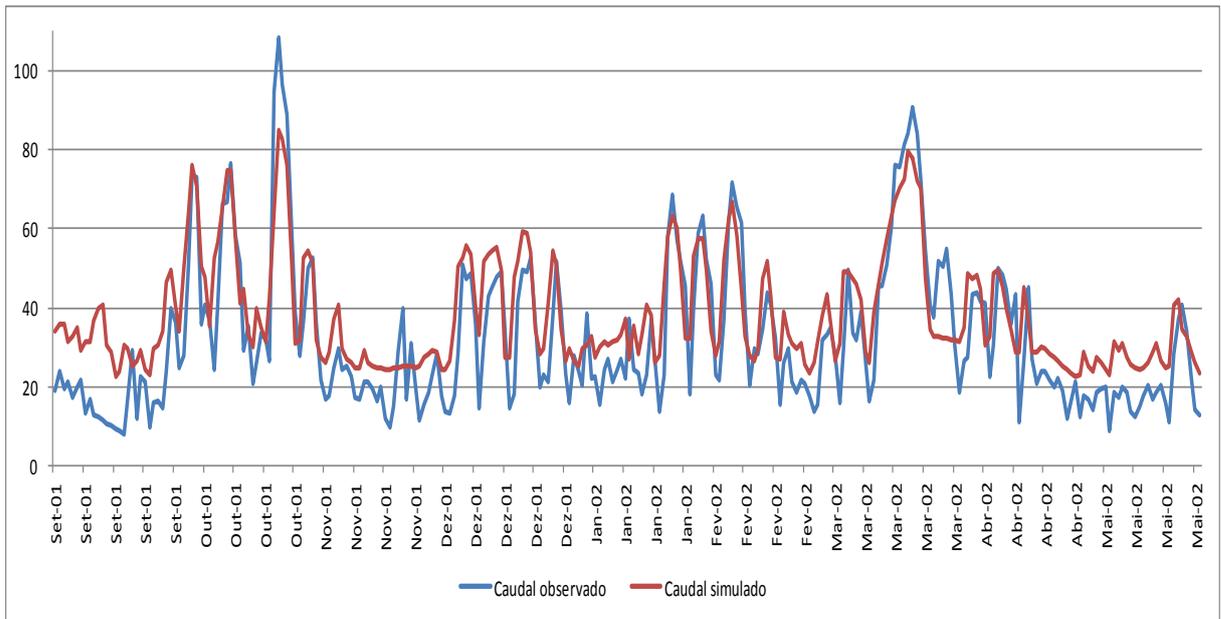


Figura 6.14: Caudal observado vs caudal simulado em Barcelos (m³/s), SOBEK

Na figura 6.15 é apresentada a relação caudal-altura de água na ponte medieval de Barcelos. A altura na ponte atinge um máximo de aproximadamente 5 metros, não existindo risco de transbordamento nem inundação das zonas ribeirinhas.

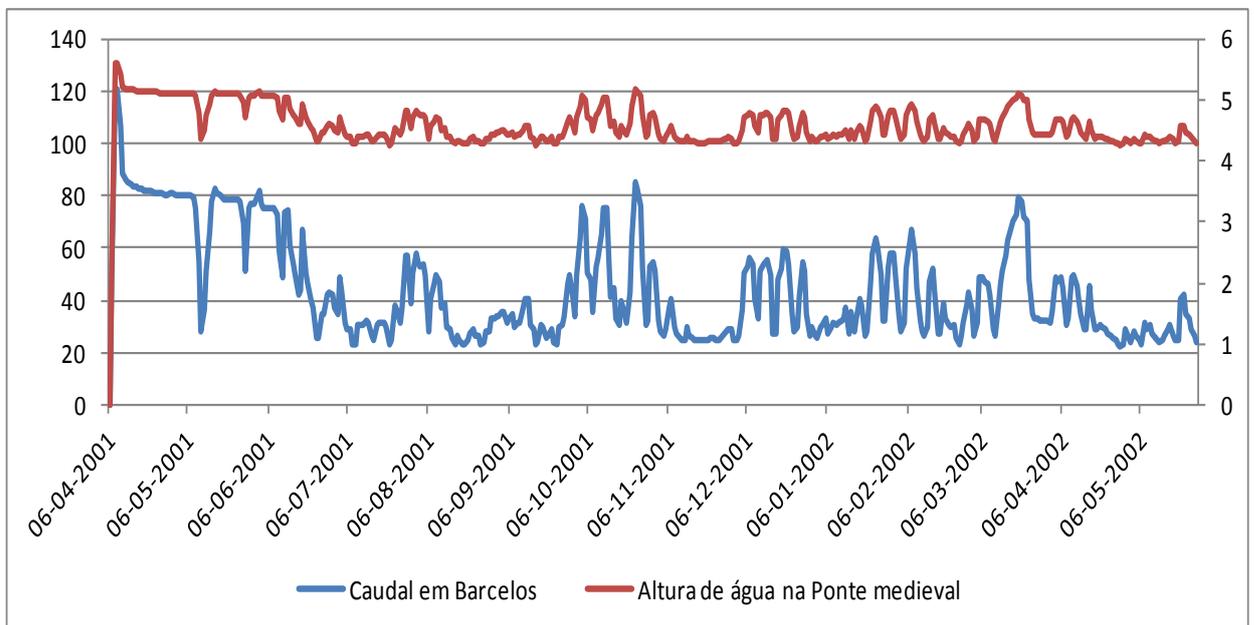


Figura 6.15: Relação caudal (m³/s) - altura de água (m) na Ponte medieval de Barcelos

Para tentar perceber qual a influência da precipitação no volume de caudal em Barcelos durante este período de tempo, foi realizada uma comparação do caudal na Caniçada com o caudal em Barcelos (Figura 6.16).

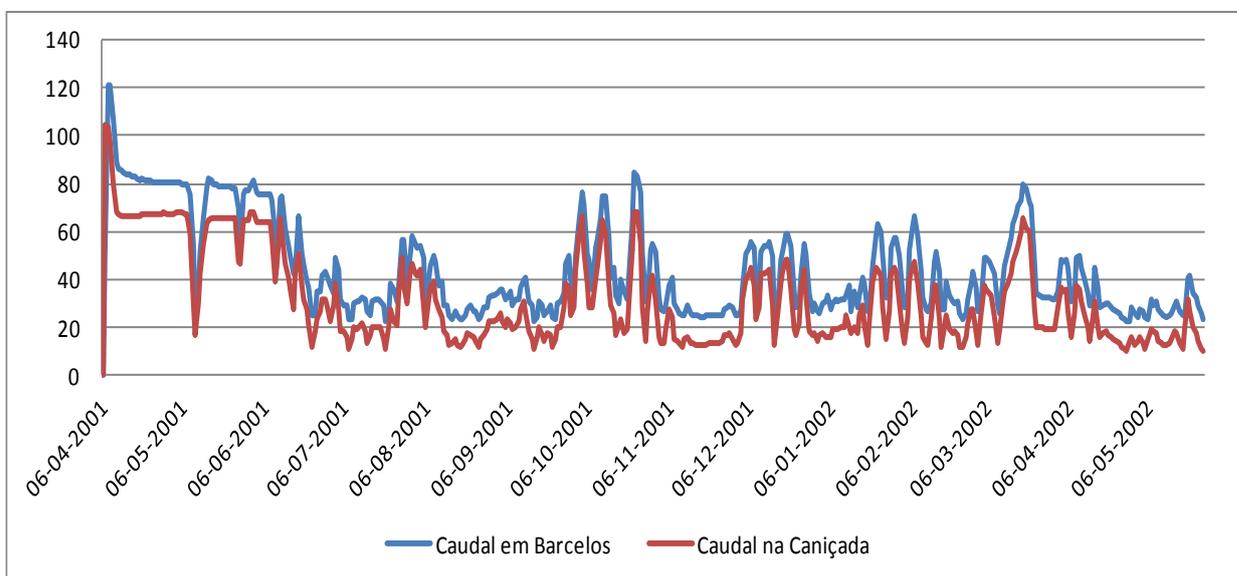


Figura 6.16: Comparação do caudal efluente na barragem da Caniçada e o caudal em Barcelos (m^3/s)

Após análise do gráfico verificou-se que neste período de tempo, em que não ocorreram eventos de cheias, a precipitação não tem muita influência na variação do caudal em Barcelos, existindo uma diferença média de caudal de 12,4 m^3/s , entre a barragem da Caniçada e Barcelos. Ainda menor foi a variação da altura de água na Ponte medieval, mantendo-se a mesma praticamente inalterável, quando simulado o modelo sem a componente hidrológica (Figura 6.17).

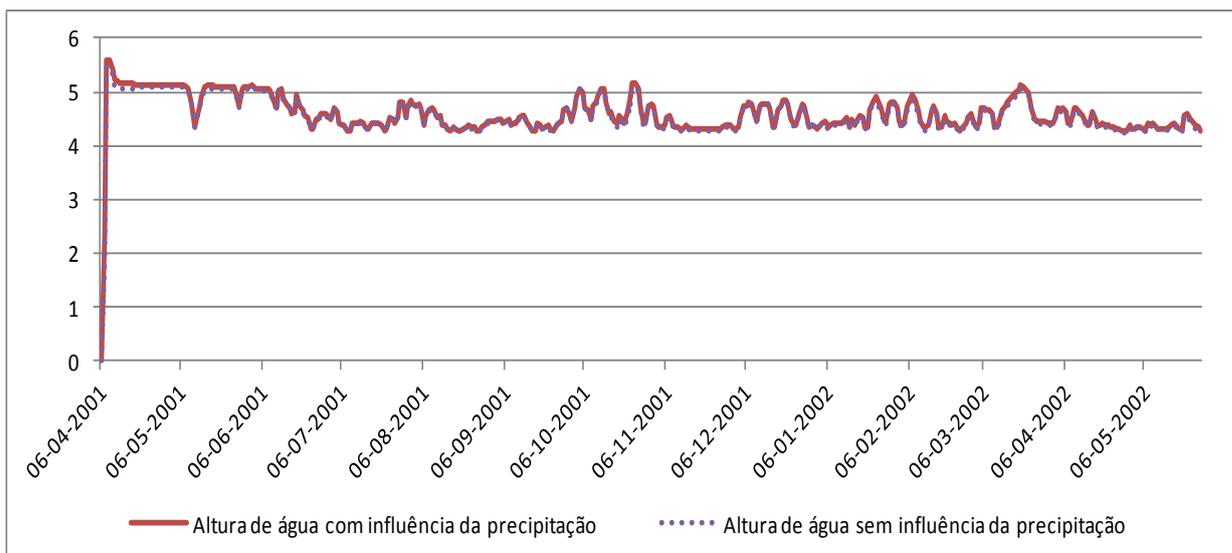


Figura 6.17: Comparação da altura de água na Ponte medieval com existência de precipitação e sem precipitação (m)

Portanto, é perceptível que o volume de água dos afluentes do rio Cávado, juntamente com a precipitação na bacia, não tem importância relevante no escoamento em Barcelos, comparativamente ao caudal efluente da Caniçada.

Devido à inexistência de eventos de cheia de maior importância, não foi possível verificar a credibilidade do modelo em tais situações. Como tal, procedeu-se à simulação de cenários de cheia para diferentes períodos de retorno.

6.3 Simulação de cenários de cheia

Com o objetivo de tentar perceber qual o comportamento do modelo em situações correspondentes a eventos de cheias extremas, foram realizadas simulações de cenários de cheia relativos a diferentes períodos de retorno.

A perigosidade e o risco de inundação são normalmente associados a um determinado período de retorno, que é tanto maior, e conseqüente mais danoso, quanto maior for esse período de retorno, ou seja, será de esperar valores mais extremos de caudal num período de retorno longo.

$$T = \frac{1}{P} \quad (29)$$

T: período de retorno (anos);

P: probabilidade de ocorrência (%).

A definição dos cenários de simulação decorreu diretamente da análise bibliográfica e da informação de base disponível. Como já referido anteriormente, não existem séries de caudais e precipitação relativos a períodos com ocorrência de cheias.

Para obtenção dos caudais de ponta de cheia na barragem da Caniçada para diversos períodos de retorno recorreu-se ao Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Cávado (Tabela 6.4). Foram recolhidos caudais para diferentes probabilidades de ocorrência e períodos de retorno. Os períodos de retorno maiores, devido à precipitação mais intensa associada, resultam, geralmente, em volumes de cheia mais elevados. Recolheram-se também os caudais de ponta de cheios relativos a Esposende para uma melhor análise dos caudais obtidos em Barcelos.

Período de retorno T (anos)	Caudal de ponta de cheia na Caniçada (m ³ /s)	Caudal de ponta de cheia em Esposende (m ³ /s)
2	321	546
10	292	378
50	519	585
100	737	799

Tabela 6.4: Caudal de ponta de cheia na barragem da Caniçada para diferentes períodos de retorno, (Agência Portuguesa do Ambiente, 2012)

A precipitação foi recolhida através do relatório de Brandão, Joaquim, & Costa (1998) *Análise de fenómenos extremos precipitações intensas em Portugal continental* (tabela 6.5). De salientar que não foram encontradas precipitações relativas a Barcelos, portanto, foram utilizadas precipitações alusivas a Viana do Castelo, com diferentes durações e períodos de retorno.

Período de retorno T (anos)	Duração	Precipitação
2	15min	12,2
	3h	33
	24h	68,5
10	15min	21,6
	3h	48,4
	24h	98,5
50	15min	29,9
	3h	61,7
	24h	124,8
100	15min	33,4
	3h	67,4
	24h	135,9

Tabela 6.5: Precipitações associadas a diversas durações e períodos de retorno, (Brandão et al., 1998)

Com todos os dados necessários recolhidos foram definidos os seguintes cenários de cheia. Na tabela seguinte apresentam-se os cenários escolhidos.

Dados de entrada							Resultados	
Cenário	T	P (%)	Q_{ponta} Caniçada (m³/s)	Precipitação (mm)	Duração	Q_{ponta} Esposende (m³/s)	Q_{max}	H_{max}
							simulado Barcelos (m³/s)	Ponte medieval (m)
1				12,2	15min		341,3463	6,453341
2	2	50	321	33	3h	546	341,2493	6,452783
3				68,5	24h		341,2493	6,452783
4				21,6	15min		312,4345	6,283316
5	10	10	292	48,4	3h	378	312,2298	6,282108
6				98,5	24h		312,2298	6,282108
7				29,9	15min		535,205	7,505563
8	50	2	519	61,7	3h	585	535,4155	7,506637
9				124,8	24h		536,3581	7,511444

10				33,4	15min		748,6092	8,535497
11	100	1	737	67,4	3h	799	748,8109	8,536433
12				135,9	24h		749,9211	8,541587

Tabela 6.6: Cenários de cheia definidos e resultados obtidos

Para além dos cenários de simulação referidos no quadro foram realizadas outras simulações com o objetivo de definir e testar parâmetros do modelo e efetuar uma análise de sensibilidade dos resultados a variações de alguns desses parâmetros (por exemplo: variações da rugosidade da ponte medieval e coeficientes de perda de carga).

A análise efetuada baseou-se na previsão de caudais e alturas de água resultantes da simulação de diferentes cenários de cheia. Verificou-se que tanto o caudal como a altura de água na ponte referentes ao mesmo período de retorno permaneceram quase inalteráveis face à variação da precipitação e duração da mesma. A variação do caudal e da altura da água para os diferentes períodos de retorno foi bem mais relevante, como seria de esperar. A relação entre o caudal de ponta de cheia em Esposende e o caudal simulado em Barcelos foi considerada satisfatória. Os caudais simulados em Barcelos são similares aos de Esposende, apresentando um pequeno défice pelo facto de o caudal em Esposende ser maior devido à sua localização mais a jusante e perto da foz. De seguida apresentam-se os gráficos com os resultados dos cenários de cheia referentes a precipitações com duração de 24 horas para os vários períodos de retorno.

Observou-se que as alturas de água são bem superiores às do período de tempo utilizado anteriormente na calibração do modelo, em que a cota máxima pouco passava dos 5 metros. Em todos os períodos de retorno a altura da água na Ponte medieval ultrapassou os 6 metros, o que, à partida, indica que já são originadas inundações nas zonas ribeirinhas. Contudo, a altura da água na ponte não passou dos 9 metros para o período de retorno de 100 anos (Figura 6.21), mantendo-se bastante inferior à cota do tabuleiro da ponte.

Apesar de geralmente estarem associados caudais superiores a períodos de retorno mais longos, verificou-se através dos dados recolhidos que o caudal de ponta para o período de retorno de 10 anos é inferior ao caudal de cheia do período de retorno de 2 anos, sendo os caudais e alturas de água simulados expectavelmente menores.

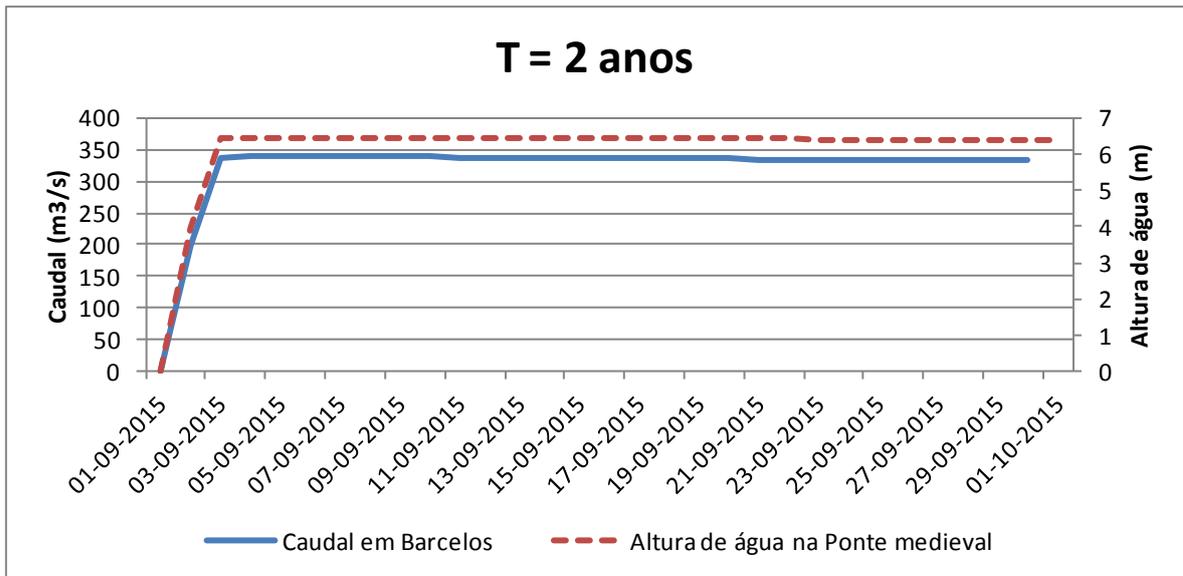


Figura 6.18: Cenário 3

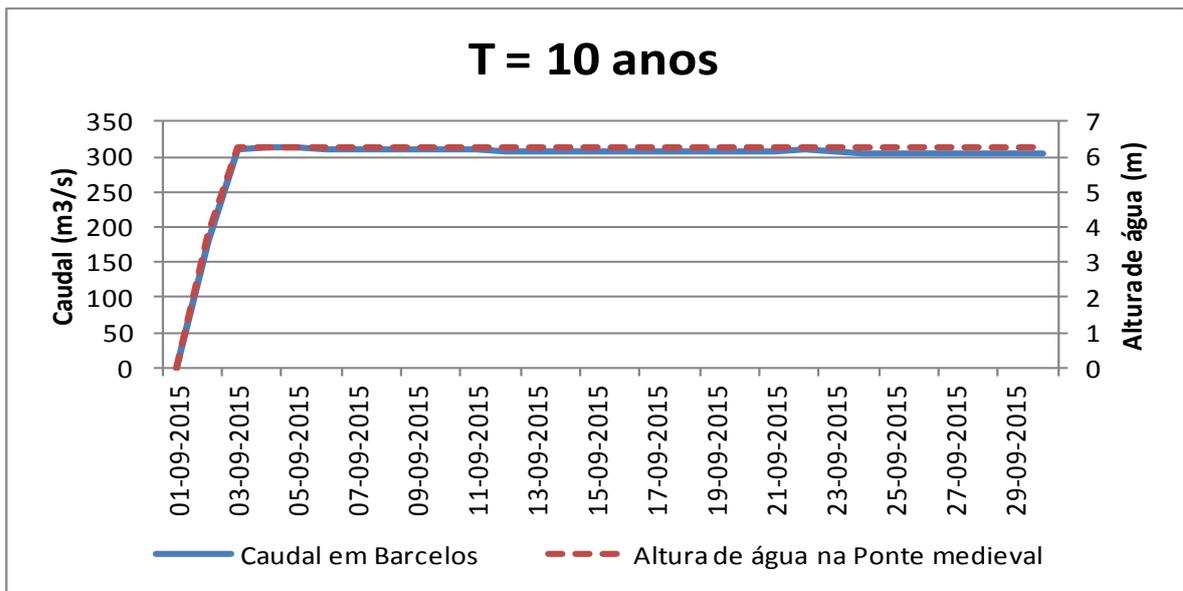


Figura 6.19: Cenário 6

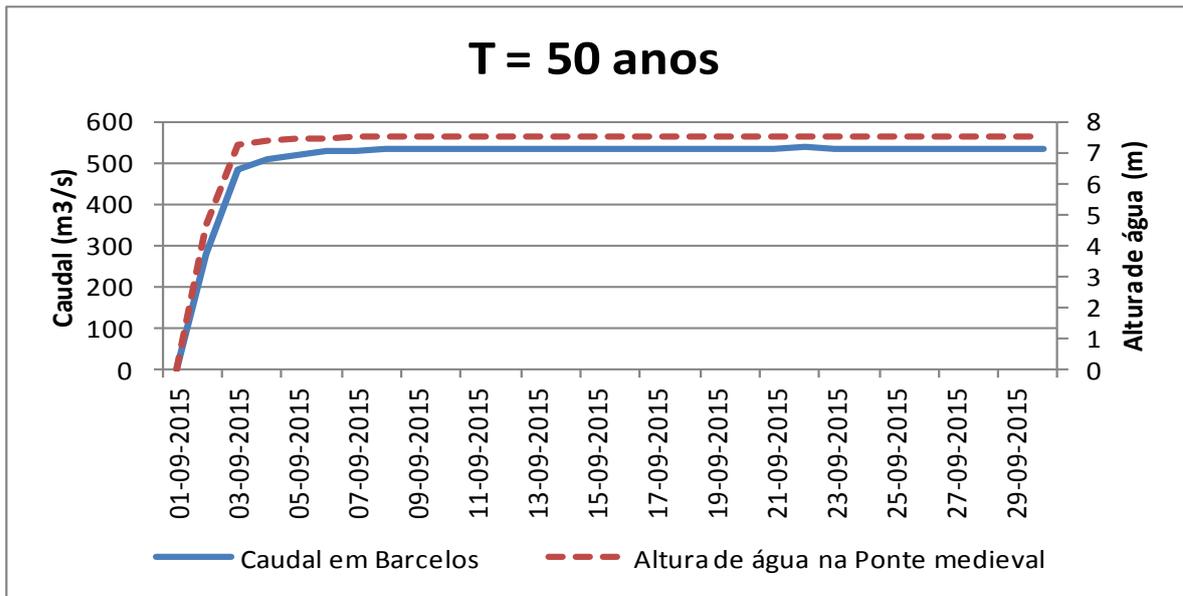


Figura 6.20: Cenário 9

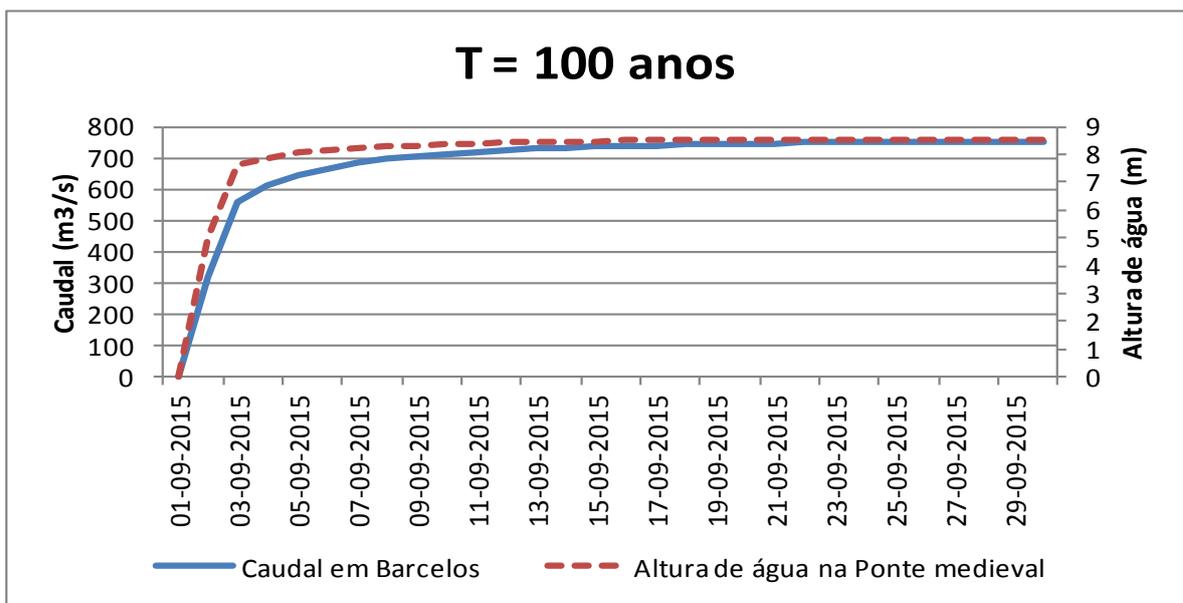


Figura 6.21: Cenário 12

No gráfico da figura seguinte é perceptível a variação de caudal para os vários períodos de retorno, existindo uma diferença de mais de 400 m³/s entre o caudal para o período de retorno de 10 anos e o caudal para o período de retorno de 100 anos.

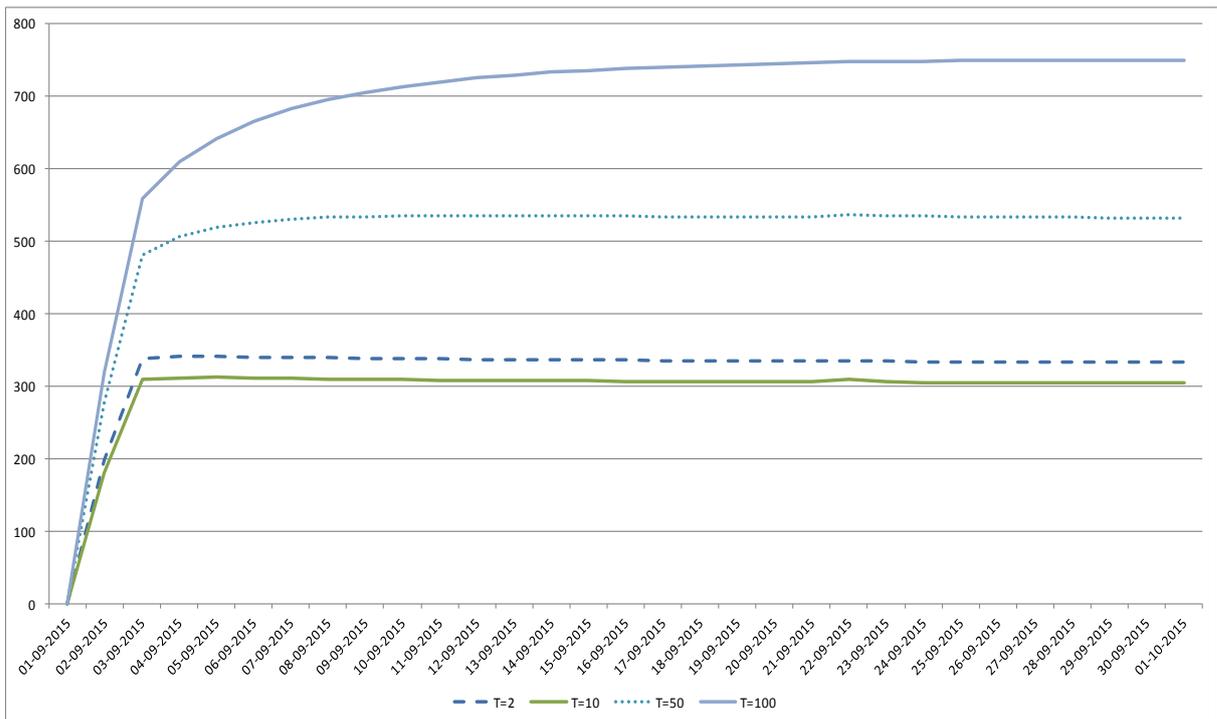


Figura 6.22: Caudais simulados para os diferentes períodos de retorno (m³/s)

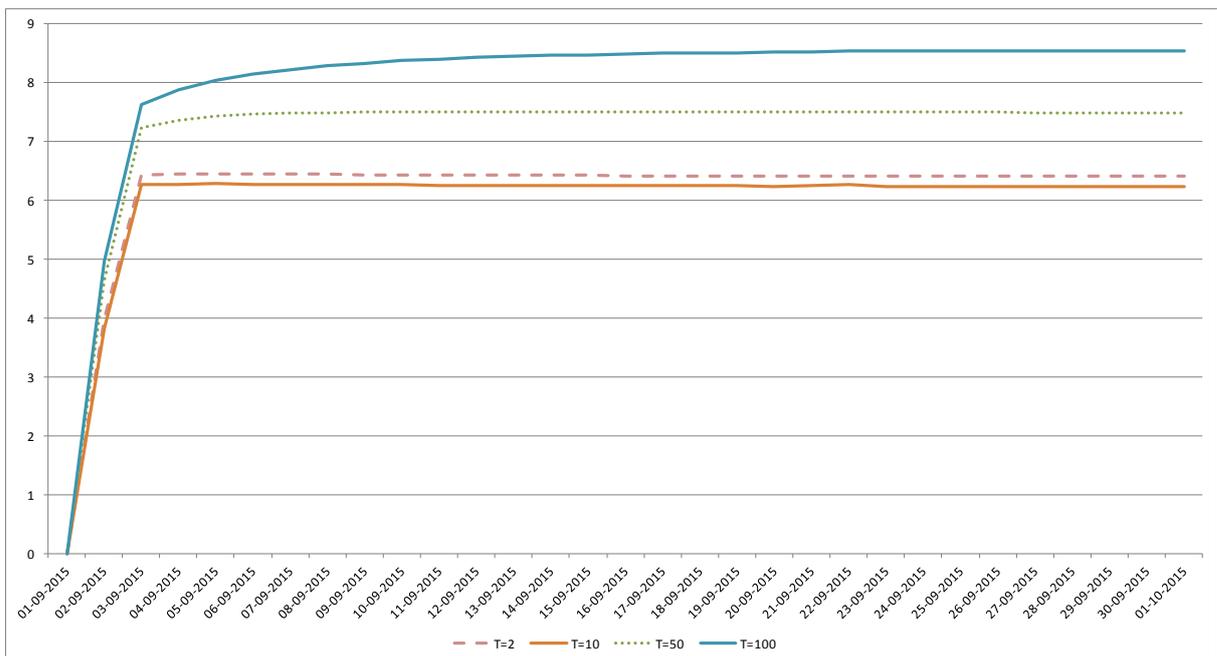


Figura 6.23: Alturas de água na Ponte medieval para os diferentes períodos de retorno (m)

Na figura 6.23 é possível observar que existiu uma subida da altura da água de mais de 2 metros. A altura máxima simulada na Ponte foi de aproximadamente 8,5 metros, ficando esta a uma distância de 9 metros da cota do tabuleiro da ponte do lado de Barcelinhos.

Como tentativa de se estimar qual o caudal necessário para a inundação do tabuleiro da ponte e quais os caudais ocorridos nas cheias verificadas em 1962 e Março de 2001 foi definido um novo cenário.

Cenário	Caudal Caniçada (m ³ /s)	Precipitação (mm)	Duração (h)
13	5000	135,9	24

Tabela 6.7: Cenário 13

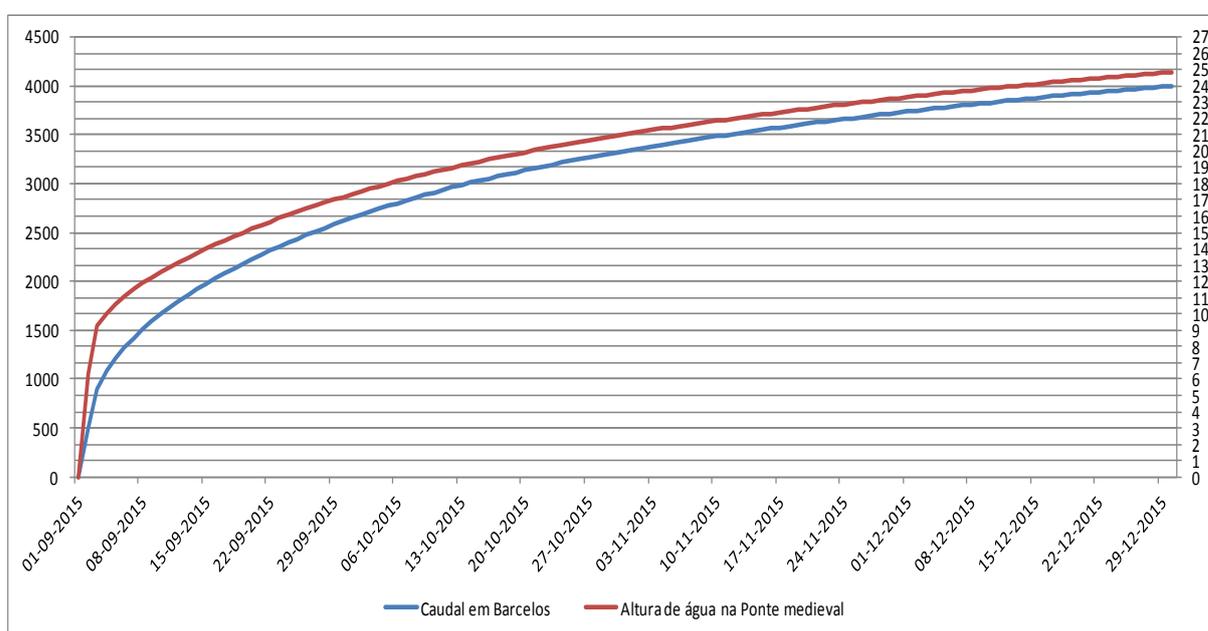


Figura 6.24: Relação caudal (m³/s) – altura de água na Ponte medieval (m) resultante da simulação do cenário 13

Feita a análise do gráfico da Figura 6.24 concluiu-se que, para a altura da água na ponte atingir a cota de 17,4 metros (cota do tabuleiro da ponte no Largo Guilherme Gomes Fernandes, em Barcelinhos), é necessário existir um caudal de aproximadamente 2660 m³/s e, para atingir a cota de 18,46 metros (cota do tabuleiro da ponte no Jardim da Igreja Matriz de Barcelos), é necessário um caudal de 2883 m³/s.

Na foto da Figura 6.25 relativa às cheias ocorridas em 1962, a altura da água apresenta-se a cerca de 12 metros de altura, porém, segundo relatos, a altura da água chegou a estar a aproximadamente 0,5 metros do tabuleiro da ponte, correspondendo a uma altura de água na

ponte de 17 metros (Figura 6.26). Segundo os resultados obtidos através da simulação no modelo do cenário 13, o escoamento na altura dessa ocorrência era de aproximadamente 2582 m³/s.



Figura 6.25: Cheias em Barcelos em 1962

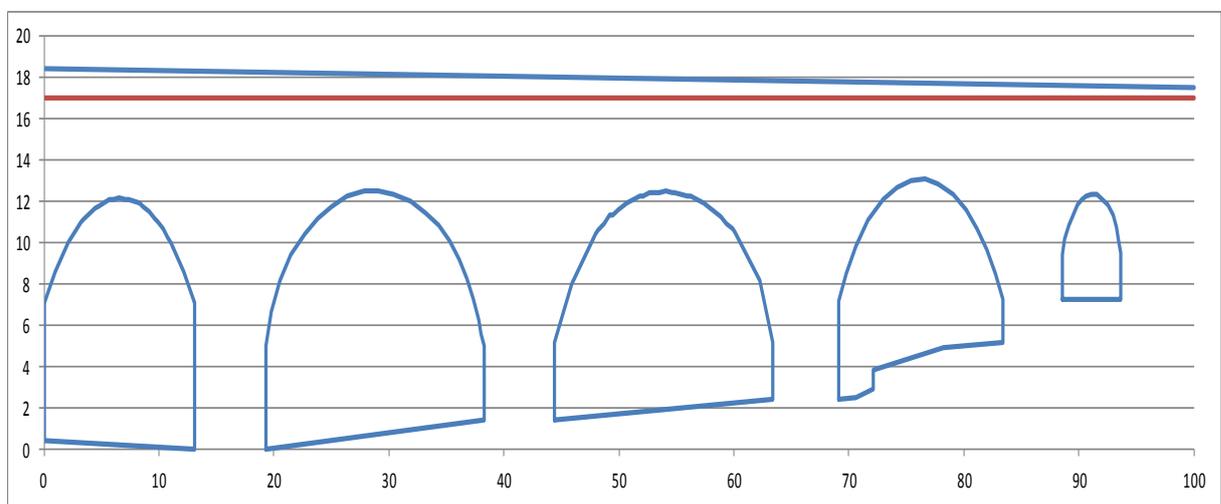


Figura 6.26: Alçado da ponte com a altura da água a uma cota de 17 metros (representada a vermelho), cheias de 1962

Após análise da foto da Figura 6.27 relativa às cheias ocorridas em Março de 2001 constatou-se que a água se encontrava a uma altura próxima dos 12 metros. O escoamento necessário para originar esta altura de água foi de 1537,5 m³/s, encontrando-se a água a uma distância de aproximadamente 5,5 metros do tabuleiro da ponte (Figura 6.28).



Figura 6.27: Cheias em Março de 2001, Barcelos

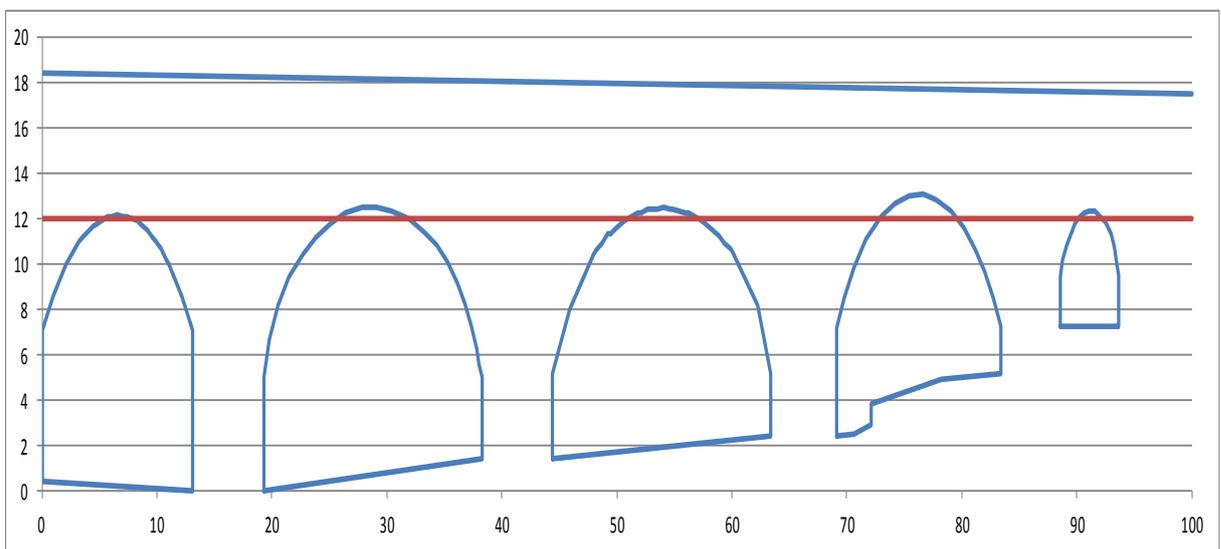


Figura 6.28: Alçado da ponte com a altura da água a uma cota de 12 metros (representada a vermelho), cheias de Março de 2001

Por fim foi analisada uma figura obtida através do *site* do Laboratório de Informática da Universidade do Minho (Figura 6.29). A figura é referente à data de Novembro de 1960 e indica que a água na ponte se encontrava a uma altura de 11,16 metros.

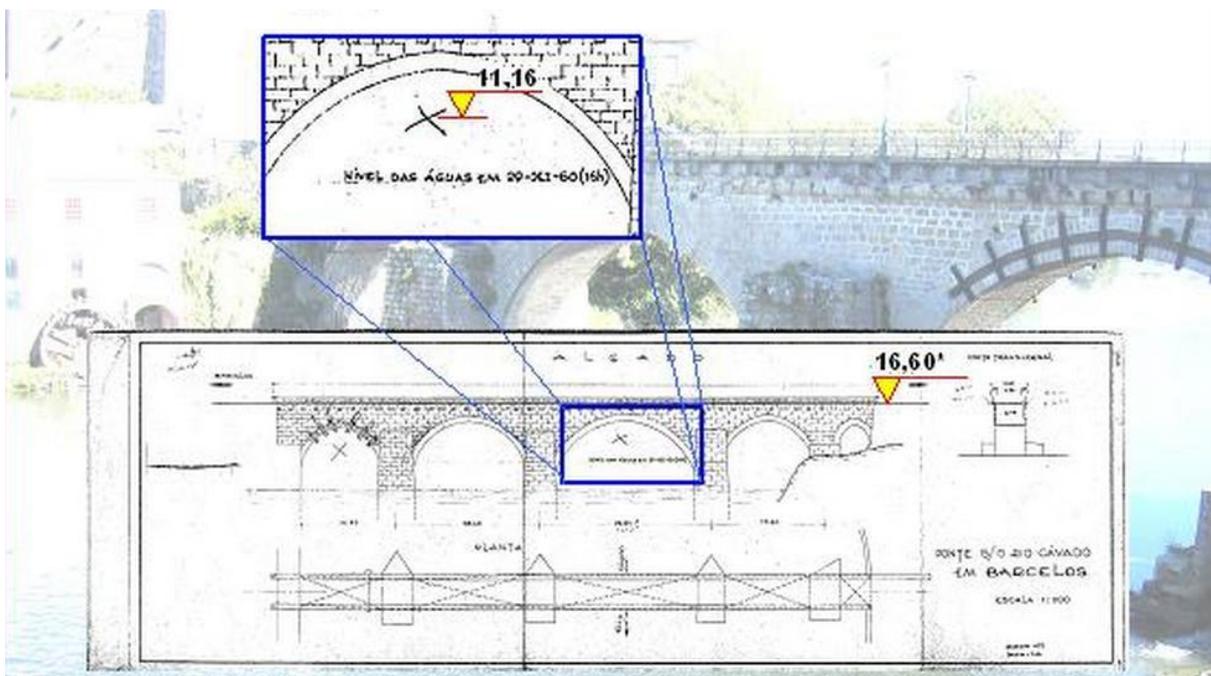


Figura 6.29: Altura da água na Ponte medieval em Novembro de 1960, (Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho)

Para esta altura de água o caudal na Ponte medieval foi de aproximadamente $1342 \text{ m}^3/\text{s}$.

Os resultados das simulações de cenários de cheias aparentam estar corretos e próximos da realidade. De seguida é apresentada a Tabela 6.8 com todos os resultados obtidos a partir da simulação do cenário 13.

Cenário 13		
	Altura da água na Ponte Medieval	Caudal (m^3/s)
1960	11,16	1342
1962	17	2582
2001	12	1537,5
Cota do tabuleiro da ponte em Barcelinhos	17,4	2660
Cota do tabuleiro da ponte em Barcelos	18,46	2883

7 . CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1 Conclusões

O principal objetivo da presente dissertação era a construção de um modelo com o programa *SOBEK* que possibilitasse a simulação de caudais o mais próximo possível dos caudais reais observados, especificamente na localidade de Barcelos, através da introdução de dados de precipitação, evaporação e valores das áreas das sub-bacias, ou seja, um modelo representativo da realidade.

Outro dos objetivos era a obtenção de novos conhecimentos de ferramentas computacionais que agilisassem todo o processo de construção do modelo. Dessas ferramentas utilizadas salientam-se o:

- *ArcGIS*;
- *RRL*;
- *SOBEK*.

O *ArcGIS* foi usado para facilitar a aplicação do método de *Thiessen* que consiste no cálculo da precipitação média para cada sub-bacia a partir da precipitação registadas nas estações meteorológicas. A obtenção dos pontos centrais de cada sub-bacia, assim como as áreas das mesmas, foi também realizada no *ArcGIS*. A ferramenta possui uma *interface* amigável, possuindo um leque de ferramentas muito úteis no processamento da metodologia desenvolvida, o que agilizou todo o processo tornando-o bastante mais rápido e eficiente, tendo sido, por isso, uma mais-valia.

O modelo hidrológico foi calibrado com recurso ao *RRL*, *software* bastante eficiente e intuitivo, em que se obteve parâmetros de *Sacramento* bastante satisfatórios.

O *RRL* apresenta como principais vantagens:

- Os vários métodos de otimização e funções objetivo, o que permite ao utilizador efetuar diversas simulações combinando todas as funções e optimizadores;
- A rapidez com que o programa permite efetuar as simulações;
- A interface gráfica do programa que apresenta os resultados de uma forma clara e completa, o que proporciona ao utilizador uma fácil análise sendo, por isso, um apoio enorme na tomada de decisão final.

Como desvantagens o programa possui:

- A impossibilidade de executar uma nova calibração a partir dos resultados de uma calibração anterior. O programa obriga a realizar uma nova simulação, não é possível voltar à anterior, sendo, portanto, necessário guardar os resultados obtidos em cada simulação que se faz;
- O programa exige que os dados sejam introduzidos em extensões específicas, o que obriga à preparação dos mesmos e conseqüente utilização de outras ferramentas. Este processo de alteração do formato dos dados pode dar origem a modificações dos mesmos e, portanto, a erros nos resultados.

Por último, foi utilizada a ferramenta *SOBEK* onde, a partir do modelo hidrodinâmico existente, foi acrescentada a componente hidrológica. Os pontos centrais de cada sub-bacia importados do *ArcGIS* foram transformados em nós de *Sacramento* onde se inseriram as áreas das sub-bacias também obtidas no *ArcGIS* e os parâmetros de *Sacramento* resultantes da calibração com o *RRL*. O *SOBEK* comprovou ser uma ferramenta com grande capacidade para solucionar problemas concretos relativos a simulação de caudais de ponta de cheia. Ainda assim, trabalhar com este *software* exige algum conhecimento técnico. A precisão dos resultados está diretamente relacionada com a precisão dos dados de entrada no modelo e com a capacidade de calibração do mesmo.

Os coeficientes de correlação e parâmetros de comparação mostram que os resultados obtidos são bastante aceitáveis, mesmo considerando os erros que possam ter ocorrido aquando a

construção do modelo. O caudal simulado é similar ao caudal observado, sendo a diferença média de caudais observados e simulados de 3,43 m³/s e o R² de 0,9256.

A simulação dos cenários para os diferentes períodos de retorno originou resultados interessantes, apesar de não poderem ser verificados, dando uma ideia do caudal a partir do qual há ocorrência de cheias e quais as alturas de água correspondentes na Ponte Medieval de Barcelos. Em todos os cenários simulados foi obtida uma altura de água na ponte superior a 6 metros o que se traduz na ocorrência de inundações nas zonas ribeirinhas. Com último cenário foi possível obter os caudais das cheias históricas a partir da comparação com alturas de água na ponte obtidas através de fotografias das cheias.

Através da análise das cheias ocorridas em Barcelos e da simulação dos cenários no modelo concluiu-se que o caudal descarregado na Caniçada é o fator com maior peso na ocorrência de eventos de cheias em Barcelos.

De certo modo, a inexistência ou indisponibilidade dos dados hidrométricos e hidrológicos necessários, dificultou a produção de resultados finais mais completos do que aqueles que se conseguiram apurar.

Conclui-se, portanto, que os objetivos da dissertação foram atingidos, desenvolvendo-se ainda o conhecimento na aplicação das ferramentas, na capacidade de análise e tomada de decisão e competências de trabalho.

7.2 Desenvolvimentos futuros

Como desenvolvimentos futuros sugere-se a construção de um modelo hidrodinâmico bidimensional da bacia (2D-H). Assim, através da simulação de diferentes cenários de cheia poderá ser realizada uma análise baseada na previsão de alturas de água e, recorrendo a técnicas dos Sistemas de Informação Geográfica integradas no ambiente hidrodinâmico utilizado, obter a delimitação das áreas inundadas.

Seria interessante exportação do modelo hidrológico de previsão de cheias elaborado na presente dissertação para uma plataforma *WEB*, como por exemplo o *DelftFews*, sendo assim, possível haver um controlo e previsão automático com vista à prevenção de cheias.

No que concerne à zona de Barcelos poder-se-ia realizar simulações com base em dados de cheias dos dias de hoje para se poder verificar a capacidade do modelo para previsão de cheias atuais.

Além de a estação de Barcelos estar, particularmente, inativa desde Junho de 2002, existem bastantes falhas de dados na rede de estações hidrométricas e meteorológicas da bacia hidrográfica do rio Cávado até essa data. Seria, assim, interessante o melhoramento e aperfeiçoamento da rede hidrométrica e meteorológica existente e, posteriormente, a realização de estudos anuais que registassem valores de caudais, precipitações e evaporação. Desta forma, os resultados da presente dissertação poderiam ser otimizados e também seria útil para a realização de futuras dissertações com incidência na bacia do Cávado.

BIBLIOGRAFIA

- Agência Portuguesa do Ambiente. (2015). SNIRH - Sistema Nacional de Recursos Hídricos. Retrieved April 20, 2011, from <http://snirh.apambiente.pt/>
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2012). *Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Cávado, Ave e Leça RH2 Relatório de Base Parte 2 - Caracterização e diagnóstico da região hidrográfica*. Ministério da Agricultura e do Mar e do Ambiente e do Ordenamento do Território.
- António Sampaio Duarte, Pinho, J. L., Ramísio, P. J., & Vieira, J. P. (2001). Modelação matemática do impacto de caudais de cheia nas condições de escoamento fluvial. Um caso de estudo. In ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos (Ed.), *Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (SILUSBA)*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/7870>
- Araújo, J. M. S. (2011). *Aplicação de redes neuronais artificiais para a criação de emuladores dos comportamentos hidrodinâmico e de qualidade de águas superficiais*. Universidade do Minho. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/16364>
- Bateira, C., Pereira, S., Martins, L., & Santos, M. (2007). *Plano regional de ordenamento do território do Norte - PROT - Norte (RISCOS EXT.)*. Retrieved from <http://consulta-prot-norte.inescporto.pt/plano-regional/relatorio-do-plano/relatorios-tematicos-de-caracterizacao-e-diagnostico/Riscos-Extensivos-Final.pdf>
- Brandão, C., Joaquim, R. R., & Costa, P. da. (1998). *Análise de fenómenos extremos. Precipitações intensas em Portugal Continental*. Retrieved from http://snirh.pt/snirh/download/relatorios/relatorio_prec_intensa.pdf
- Cardoso, A. H. (1998). *Hidráulica Fluvial*. (Fundação Calouste Gulbenkian, Ed.). Lisboa. Retrieved from <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/845043405430905/Hidraulica-Fluvial-A.H.Cardoso-crop.pdf>
- Celeste, A., & Chaves, V. S. (2014). Avaliação de Algoritmos de Otimização e Funções Objetivo para Calibração Automática Do Modelo Chuva-Vazão Tank Model. *Ciência E Natura*, 36(3), 527–537. doi:10.5902/2179460X13421
- Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. (2015). Laboratório de Hidroinformática da Universidade do Minho. Retrieved from <http://www.hydroinformatics.pt/>
- DHI. (2014). *Software para ambientes aquáticos Catálogo de softwares 2014* (Catálogo d.).

- Direção-Geral do Território. (2015). Corine Land Cover. Retrieved May 20, 2001, from http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/cartografia_tematica/cartas_de_ocupacao_do_solo/corine_land_cover/
- Donnell, B. P., Letter, J. V., McAnally, D. W. H., & Thomas, W. A. (2006). *Users Guide To RMA2 WES Version 4.5*. US Army, Engineer Research and Development Center Waterways Experiment Station Coastal and Hydraulics Laboratory. Retrieved from <http://chl.wes.army.mil/software/tabs/docs.htm>
- Fernandez, P., Mourato, S., & Moreira, M. (2013). Comparação dos modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP na delimitação de zonas inundáveis. *Revista Recursos Hídricos*, pp. 63–73. doi:10.5894/rh34n1-5
- Ferret, J. O. (2013). Obter curvas IDF (parte II). Retrieved May 8, 2015, from <http://www.hidrojing.com/obter-curvas-idf-parte-ii/>
- Fundação Francisco Manuel dos Santos. (2015). Pordata - Base de dados Portugal Contemporâneo. Retrieved January 1, 2015, from <http://www.pordata.pt/Municipios/Densidade+populacional+segundo+os+Censos-591>
- Gomes, S. F. F. (2008). *A História das Cheias em Portugal*.
- Gonçalves, P. (2012). *A Delimitação de Perímetros de Inundação no Rio Leça – modelação hidráulica para duas áreas do concelho de Matosinhos*. Universidade do Porto. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10216/66357>
- Jesus, Â. V. de. (2012). *Contributos para o estabelecimento de descargas máximas diárias de poluentes na bacia hidrográfica do rio Cávado*. Universidade do Minho.
- Maia, R., & Ribeiro, A. Á. (1998). As cheias e a gestão de bacias hidrográficas. In *4º Congresso da Água* (pp. 1–11). FIL - Lisboa. Retrieved from <http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/093.pdf>
- Martins, A. A. A. da C. L. (2007). *Contributo da geomorfologia para a elaboração dos planos directores municipais (PDMs) : aplicação no concelho de Barcelos*. Universidade do Minho. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/7262>
- Martins, P. M. F. (2013). *Sistema de previsão e alerta de cheias e inundações*. Universidade do Minho. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/31029>
- Medeiros, A. G. H. (2014). *Desenvolvimento de um modelo hidrológico para inclusão num sistema de previsão e alerta de cheias na bacia hidrográfica do rio Cávado*. Universidade do Minho. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/36088>
- Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. (2002, March 15).

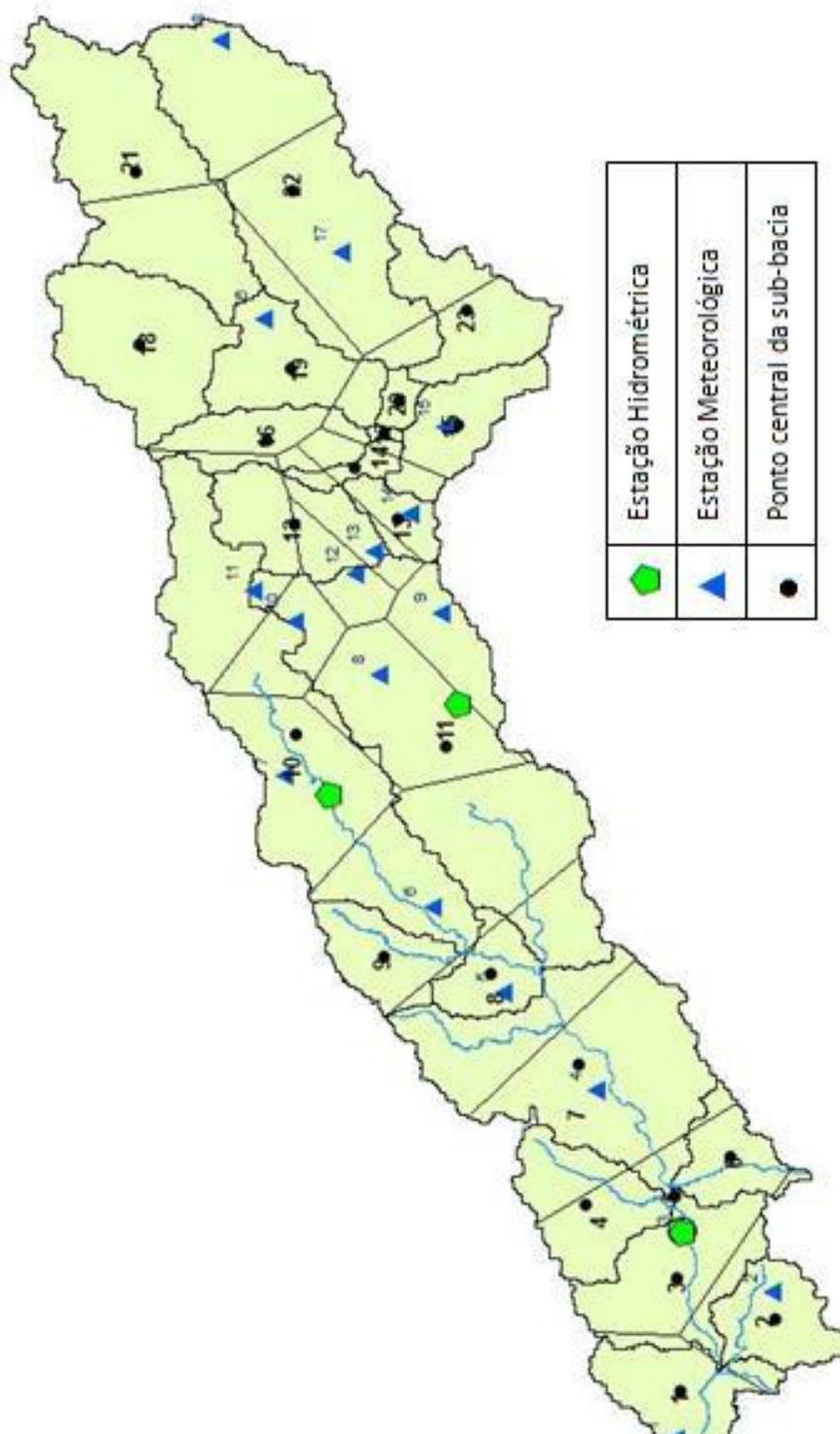
- Decreto Regulamentar n.º17/2002 de 15 de Março. *1ª Série - B, N.º 63*, pp. 2427–2439. Portugal: Diário da República.
- Ministério do Ambiente e Ordenamento de Território. (2010, October 22). Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de Outubro. *Diário Da República*. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território.
- Pinho, J. L. S. (2000). *Aplicação de modelação matemática ao estudo da hidrodinâmica e da qualidade da água em zonas costeiras*. Universidade do Minho. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/2798>
- Pinho, J. L. S. (2013). *TUTORIAL Criação de modelos com o programa SOBEK Utilizando recursos www: Google Earth e kml2shp online*. Universidade do Minho - Escola de Engenharia Departamento de Engenharia Civil.
- Pinho, J. L. S., Brito, A. G., & Costa, S. (2008). *Estudo de valorização e desenvolvimento estratégico dos Rios Cávado e Homem : conhecer e preservar para usufruir : relatório final, documento síntese*. Braga. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/32548>
- Pinho, J. L. S., & Vieira, J. M. P. (2006). Aspectos da aplicação do Delft Hydraulics “SOBEK” no desenvolvimento de um sistema de gestão operacional da água em Alqueva. In *8º Congresso da água* (pp. 1–13). Lisboa. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/7210>
- Pinho, J., Vieira, J., Pinho, R., & Araújo, J. (2011). *Web-Based Decision Support Framework for Water Resources Management at River Basin Scale*. Retrieved from http://www.hydroinformatics.pt/downloads/docs/lhrh_artigo_bacia_rio_cavado_en.pdf
- Pinto, R. B., Gibertoni, R. de F. C., Rego, J. L., Schwanenberg, D., & Reis, A. A. dos. (2013). Sistema integrador Delft-Fews : usos e aplicações no cenário Brasileiro. In *Simpósio brasileiro de recursos hídricos* (pp. 1–8). Porto Alegre. Retrieved from https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/66e45c3853c8bfd0eb45bfadfaa10c09_6ed7f85fb3549f9f90f7399b085971bc.pdf
- Ramos, C. (2013, June 4). Perigos naturais devidos a causas meteorológicas: o caso das cheias e inundações. *E-LP Engineering and Technology Journal*, pp. 11–16. América do Norte. Retrieved from <http://revistas.ulusofona.pt/index.php/revistae-lp/article/view/3320>
- Rodrigues, C. M., Moreira, M., & Guimarães, R. C. (2011). *Apontamentos para as aulas de hidrologia*. (Departamento de Engenharia Rural, Ed.). Retrieved from <http://hdl.handle.net/10174/4721>
- Santos, A. R. dos, Eugenio, F. C., Ribeiro, C. A. A. S., Soares, V. P., Moreira, M. A., & Santos, G. M. A. D. A. dos. (2014). *ArcGIS 10.2.2 PASSO A PASSO Elaborando Meu Primeiro Mapeamento VOLUME 1*.

- Santos, S., Monteiro, A., Mourato, S., & Fernandez, P. (2006). Os sistemas de informação geográfica na modelação hidrológica. In *XII Congreso Nacional de Tecnologías de la información Geográfica. El Acceso a la Información Espacial y Las Nuevas Tecnologías Geográficas* (pp. 465–480). Granada. Retrieved from <http://www.hidro.ufcg.edu.br/twiki/pub/GeoRecHId0/CASemestreAtual/033-Santosetal.pdf>
- Teles, V. M. B. (2010). *A (In)consciência dos riscos naturais em meio urbano : estudo de caso : o risco de inundação no concelho de Braga*. Universidade do minho. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/13999>
- UE. (2007, October 23). Directiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Outubro de 2007 relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações. *Jornal Oficial Da União Europeia*, pp. 27–34.
- Vieira, J. M. P., Duarte, A. A. L. S., & Pinho, J. L. S. (1998). Aplicação de um modelo de qualidade da água do rio Cávado ao estudo do impacto ambiental da captação de Areias de Vilar. APESB - Associação Portuguesa de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- Vieira, L. M. V. (2013). *Towards a decision support system for flood management in a river Basin*. Universidade do Minho. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/30858>
- Vieira, L. M. V., & Pinho, J. L. S. (2014). Calibração e validação de um modelo hidrológico para a bacia do rio Lima. In *2.º Congresso da Água*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/31394>

ANEXO A

Número
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18

Figura Estações



A.2:

Figura A.1: Localização e listagem das estações meteorológicas, hidrométricas e pontos centrais das sub-bacias

meteorológicas

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
1	1	42692500,74	0,894732173	89,47322
	2	5022896,16	0,105267827	10,52678
	Total	47715396,9	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
2	1	68808,46328	0,001789693	0,178969
	2	38378277,73	0,998210307	99,82103
	Total	38447086,19	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
3	1	4217727,249	0,058068922	5,806892
	2	12259207,72	0,1687826	16,87826
	3	56156190,03	0,773148478	77,31485
	Total	72633124,99	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
4	3	32586760,74	0,59623282	59,62328
	4	22067662,2	0,40376718	40,37672
	Total	54654422,94	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
5	3	188295,1826	1	100
	Total	188295,1826	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
6	2	1447893,253	0,045479987	4,547999
	3	27188541,14	0,854023256	85,40233
	4	3199397,887	0,100496757	10,04968
	Total	31835832,28	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
7	3	6999959,739	0,043232863	4,323286
	4	101412525,5	0,626339857	62,63399
	5	53500451,29	0,33042728	33,04273
	Total	161912936,5	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
8	5	26672086,68	0,929871269	92,98713
	6	2011546,807	0,070128731	7,012873
	Total	28683633,49	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
9	5	3191596,885	0,086316303	8,63163
	6	33784000,64	0,913683697	91,36837
	Total	36975597,53	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
10	5	155632,3296	0,000785761	0,078576
	6	44588107,18	0,225117853	22,51179
	7	73366759,18	0,370416426	37,04164
	8	4342398,474	0,021924039	2,192404
	10	19169257,08	0,096782355	9,678235
	11	56441664,35	0,284964469	28,49645
	16	1801,59537	0,0000	0,00091
	Total	198065620,2	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
11	5	25567620,7	0,107308335	10,73083
	6	73630529,85	0,309030303	30,90303
	7	387845,2872	0,001627802	0,16278
	8	70824995,25	0,297255361	29,72554
	9	31290440,06	0,131327239	13,13272
	10	15686730,57	0,065837841	6,583784
	11	4572541,323	0,01919114	1,919114
	12	12198510,13	0,051197639	5,119764
	13	4089858,629	0,017165302	1,71653
	14	14066,54904	5,90379E-05	0,005904
	Total	238263138,3	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
12	10	149951,7863	0,002908803	0,29088
	11	26313616,67	0,510438177	51,04382
	12	10942708,33	0,212269418	21,22694
	13	14137912,5	0,274250795	27,42508
	14	6846,377993	0,000132808	0,013281
	Total	51551035,67	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
13	9	40500,49187	0,002217427	0,221743
	13	3242971,568	0,177554724	17,75547
	14	14981159,26	0,820227849	82,02278
	Total	18264631,32	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
14	13	2828283,965	0,286812574	28,68126
	14	5294009,108	0,536858533	53,68585
	15	1738794,683	0,176328893	17,63289
	Total	9861087,756	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
15	14	5888460,494	0,14505369	14,50537
	15	34706580,42	0,85494631	85,49463
	Total	40595040,91	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
16	11	5659772,093	0,138516023	13,8516
	13	2862660,89	0,070060136	7,006014
	14	6393728,102	0,156478702	15,64787
	15	3327757,547	0,08144281	8,144281
	16	22616134,65	0,553502329	55,35023
	Total	40860053,28	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
17	15	1659787,003	1	100
	Total	1659787,003	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
18	16	82577898,72	1	100
	Total	82577898,72	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
19	15	9046654,557	0,170305485	17,03055
	16	44073504,97	0,829694515	82,96945
	Total	53120159,53	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
20	15	7685232,113	1	100
	Total	7685232,113	1	100

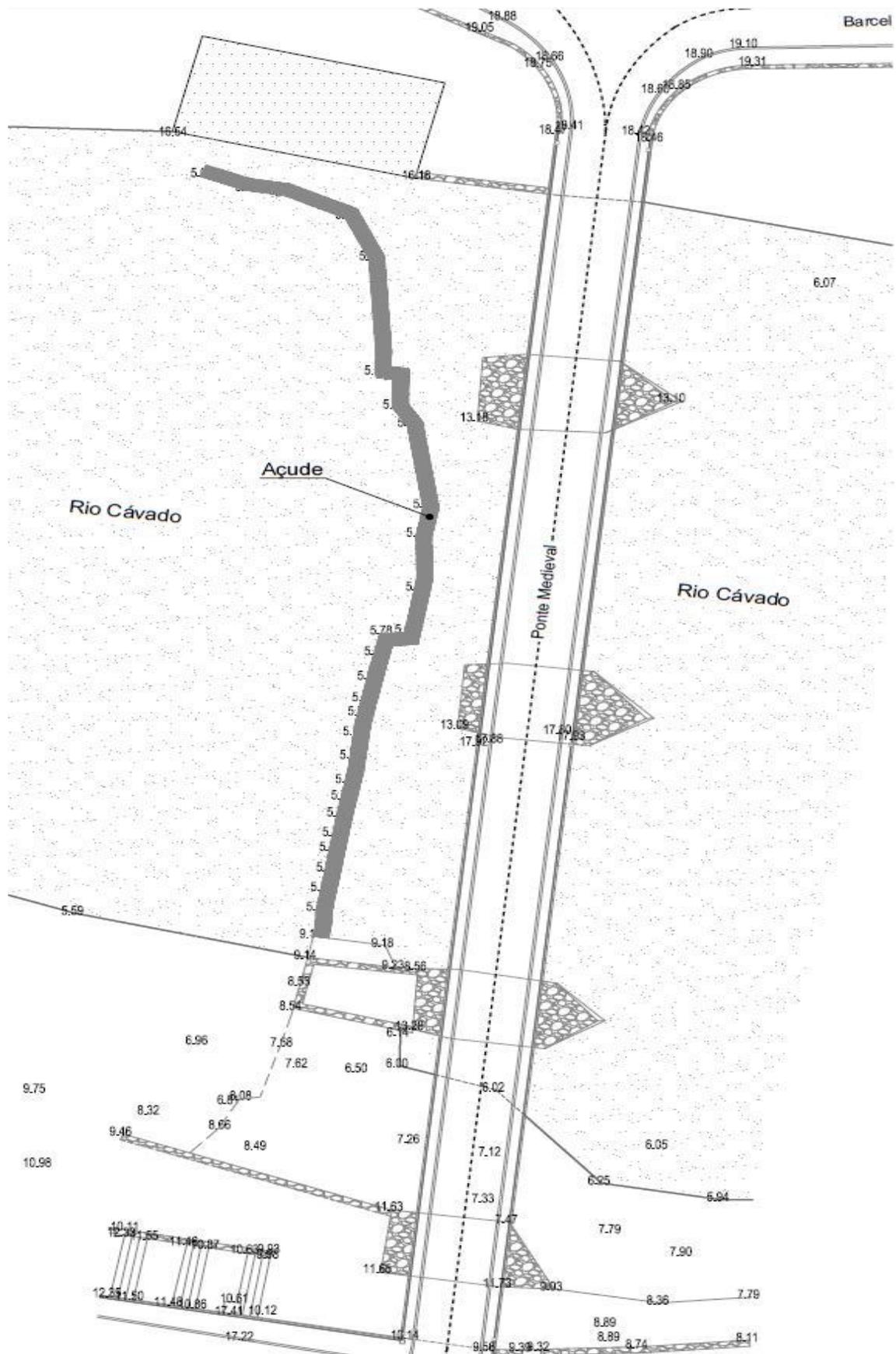
Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
21	16	54990895,34	0,414119437	41,41194
	17	319831,3001	0,002408551	0,240855
	18	77479213,61	0,583472012	58,3472
	Total	132789940,2	1	100

Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
22	15	8605457,273	0,046267448	4,626745
	16	16260123,18	0,087422944	8,742294
	17	90020951,4	0,483999813	48,39998
	18	71107241,07	0,382309794	38,23098
	Total	185993772,9	1	100

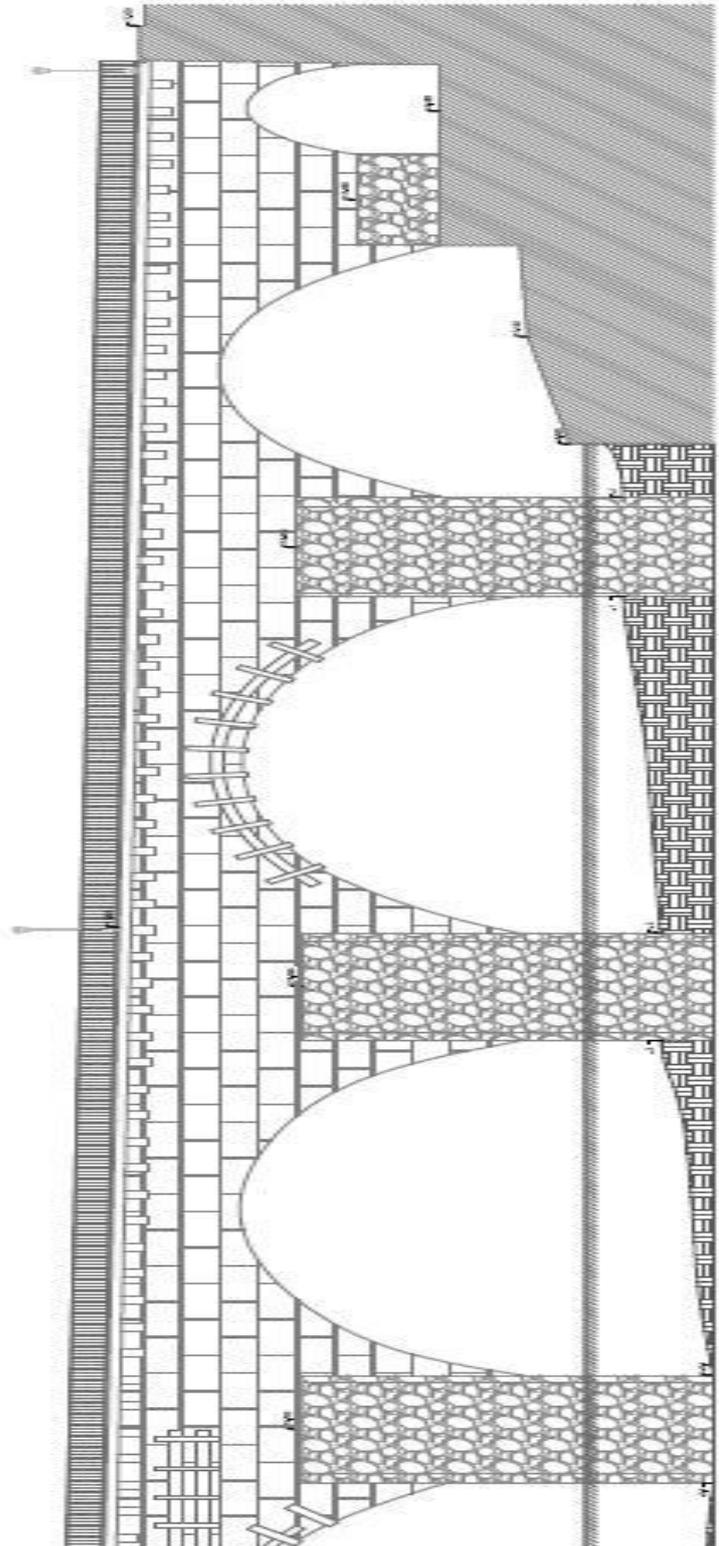
Bacia	Posto Udométrico	Área de influência	Peso	Peso (%)
23	15	33812285	0,630810299	63,08103
	17	19789067,2	0,369189701	36,91897
	Total	53601352,2	1	100

Figura A.3: Percentagem das áreas de cada estação que utilizadas na aplicação do método *Thiessen*

ANEXO B



**Figura B.1: Levantamento topográfico da ponte medieval de Barcelos (I),
(Câmara Municipal de Barcelos)**



**Figura B.2: Levantamento topográfico da ponte medieval de Barcelos (II),
(Câmara Municipal de Barcelos)**

