

Cheias em Áreas Urbanas: a zona de intervenção do Programa Polis em Coimbra

J. Alfeu Sá Marques*
P. Amado Mendes**
F. J. Seabra Santos***

Resumo:

Utilizando um modelo digital do terreno, concebido especificamente para este fim, e de registos de fenómenos de cheias antecedentes bem detalhados, foi possível calibrar um modelo numérico baseado nas equações unidimensionais de Saint-Venant. Conseguida uma boa concordância entre os resultados do modelo numérico e de fenómenos bem conhecidos, foi possível com base no mesmo modelo e com fenómenos de cheias com diferentes tempos de recorrência, elaborar mapas de inundação, na área de intervenção da CoimbraPolis, associados a probabilidades de ocorrência.

Palavras Chave:

Cheias, Equações unidimensionais de Saint-Venant.

Résumé:

La fleuve Mondego, c'est la plus grande fleuve intégralement portugaise. Elle présente un régime torrentiel, avec de très grandes crues, de telle façon que depuis plus de trois siècles des études, avec le but de maîtriser ces crues, on été entrepris conduisant notamment à la construction de nouveaux lits. Dans les années septante du vingtième siècle un projet d'aménagement à buts multiples a été mis en place.

Avec un model digital du terrain spécifiquement construit pour ce but et avec des donnés récoltés des crues récentes, il a été possible de calibrer un modèle numérique de résolution des équations unidirectionnelles de Saint Venant, avec lequel on a pu faire des cartes d'inondations fonctions des débits et respectives probabilités d'occurrence. Les résultats de cette étude, avec un foc sur l'analyse hydrologique et le travail de développement du modèle numérique mis au point, sont présentés.

Mots clés:

Crues, Equations unidimensionnels de Saint-Venant.

Abstract:

A considerable plan of hydraulic infrastructures and interventions has been programmed since the middle of last century for the Mondego river, the longest river with its basin totally developed in Portugal.

Using a digital terrain model, specifically conceived for this study, and the detailed data collected during the recent flood events, a numerical model based on the one-dimensional Saint-Venant equations was validated. The same model was then used to model previous extreme flood events in order to determine maximum flood inundation levels associated to its estimated probability of occurrence and to produce high definition inundation maps to be used by Polis' architects and urban designers. Results of this study with emphasis on hydrological analysis and on the modelling work developed will be presented as an application to this recent case study.

Key words:

Floods, One-dimensional Saint-Venant equations.

1. Introdução

O Programa Polis é uma acção nacional, desenvolvida pelo Governo Português para a requalificação urbana e a valorização ambiental das cidades. Visa permitir a eleição para a requalificação de meios urbanos com importância estratégica para o desenvolvimento do país. A cidade de Coimbra candidatou-se a este Programa e foi seleccionada para intervenção uma zona ribeirinha do rio Mondego, a área compreendida entre a Ponte de Santa Clara e a Ponte Europa.

Na sequência das cheias verificadas no Rio Mondego, em Dezembro de 2000 e Janeiro de 2001, esta zona foi "afectada" por aqueles fenómenos hidrológicos, tendo a Sociedade CoimbraPolis, solicitado ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra a elaboração de um parecer.

O estudo desenvolvido tinha por objecto a análise do comportamento hidráulico e hidrológico do Rio Mondego, no trecho adjacente à zona de intervenção deste Programa e, como fim último, a definição das possíveis áreas inundadas naquela zona de intervenção.

* Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

** Mestre em Engenharia Civil pela Universidade de Coimbra.

*** Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Reitor da Universidade de Coimbra.

2. Caracterização do Sistema Físico

O Rio Mondego é o maior rio com bacia hidrográfica totalmente compreendida em território nacional, com

uma área de cerca de 6644 Km². Corre, em grande parte do seu curso, num vale muito encaixado e entra, na zona de Coimbra, numa bacia aluvionar. Os seus principais afluentes são, na margem direita, o Rio Dão e, na margem esquerda, os Rios Alva, Ceira e Arunca (Figura 1). O comportamento hidráulico da bacia hidrográfica na zona de intervenção do Programa Polis é, em grande medida, determinado pelo funcionamento da barragem da Aguieira, situada no Rio Mondego, imediatamente a jusante da foz do Rio Dão, e da barragem de Fronhas, situada no Rio Alva, a cerca de 10 Km da sua foz, e ainda pelo açude-ponte de Coimbra, situado imediatamente a jusante da zona em análise.

O sistema físico em estudo é, assim, constituído pelo troço da bacia do Rio Mondego limitado a montante pelas barragens da Aguieira e de Fronhas, e a jusante pelo açude-ponte de Coimbra. A influência do Rio Ceira é tida em consideração através dos hidrogramas de cheia referentes ao último posto hidrométrico do seu curso, na Ponte do Cabouco, e ao de Serpins, no caso da cheia de 1969. Representações esquemáticas do sistema físico podem ser observadas na Figura 1 e na Figura 2.

Desde tempos imemorráveis que as cheias do Mondego foram causa de preocupação para as populações de Coimbra e para as que habitam a jusante. Após vários estudos foi decidido, na década de 70, executar um conjunto de intervenções na bacia do Mondego, tendo-se designado tal conjunto de obras por Aproveitamento Hidráulico do Mondego (Figura 3), cujas obras principais têm as seguintes características:

Barragem da Aguieira – é uma barragem cuja albufeira apresenta um volume de armazenamento de 450 hm³ até ao Nível de Máxima Cheia (NMC), situado à cota 126.00 m, e de 432.03 hm³ até ao Nível de Pleno Armazenamento (NPA), situado à cota 124.70 m. A sua principal função no controlo das cheias em Coimbra e no Baixo Mondego consiste em encaixar os volumes afluentes, de forma a garantir que o caudal de ponta da cheia centenária em Coimbra não ultrapasse 1200 m³/s. A barragem da Aguieira foi concluída em 1981;

Barragem de Fronhas – trata-se de uma barragem cujos NMC e NPA se situam, respectivamente, às cotas 140.00 m e 136.00 m. A barragem de Fronhas foi concluída em 1985;

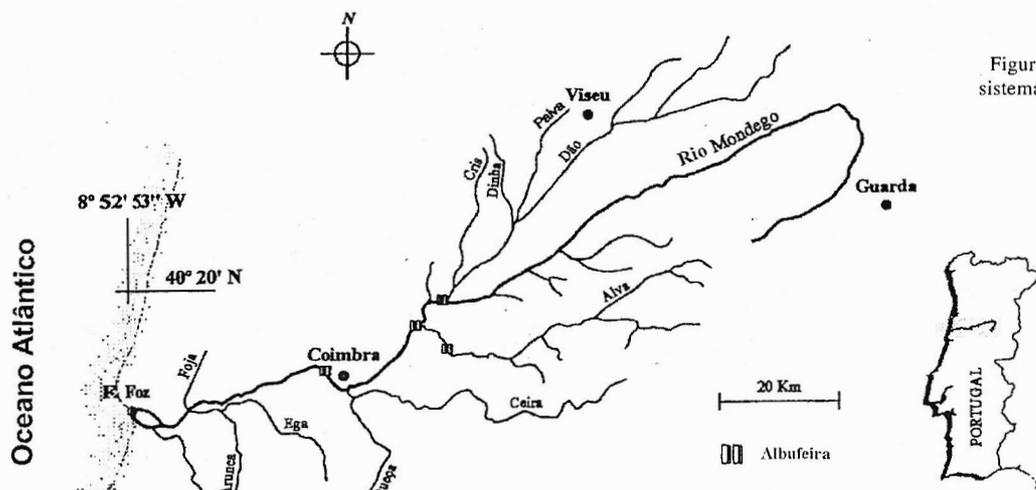
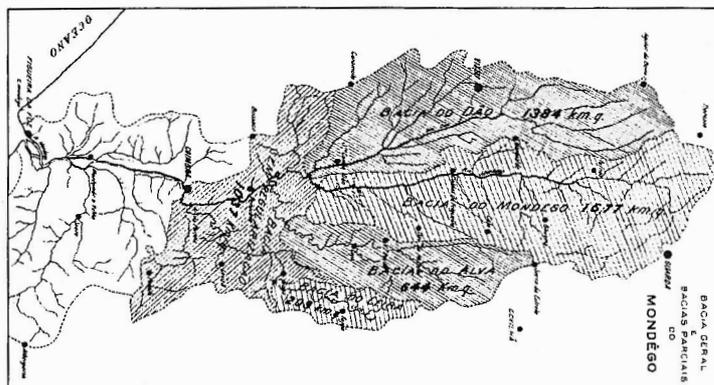


Figura 1 - Representação do sistema físico [Adaptação de Marques *et al.*, 2002].

Figura 2 - Delimitação da bacia geral e das bacias parciais do Rio Mondego, a montante de Coimbra [Reprodução de Sanches, 1996].



Barragem da Raiva – é uma barragem que não tem uma intervenção relevante no controlo de cheias, dada a sua baixa capacidade de armazenamento (26.80 hm^3 , ao nível de pleno armazenamento). A barragem da Raiva entrou em exploração em 1983;

Açude-Ponte de Coimbra – trata-se de uma barragem móvel, sobre a qual se lançou também uma ponte rodoviária. A sua localização no tecido urbano e o facto de a albufeira apresentar uma reduzida capacidade (1.6 hm^3), evidenciam o papel determinante da exploração do açude-ponte nos níveis de água atingidos em situações de cheia em Coimbra. O nível de exploração normal corresponde à cota 18.00 m e o nível de cota máxima de cheia é 19.00 m, correspondente ao caudal de $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ para a cheia modificada pelas albufeiras da Aguieira e de Fronhas (SANCHES, 1996). A construção do açude-ponte de Coimbra ficou concluída em 1981.

O Aproveitamento Hidráulico do Mondego foi concebido, projectado e executado como um aproveitamento de fins múltiplos, tendo como primeiro objectivo a regularização fluvial e a protecção contra cheias.

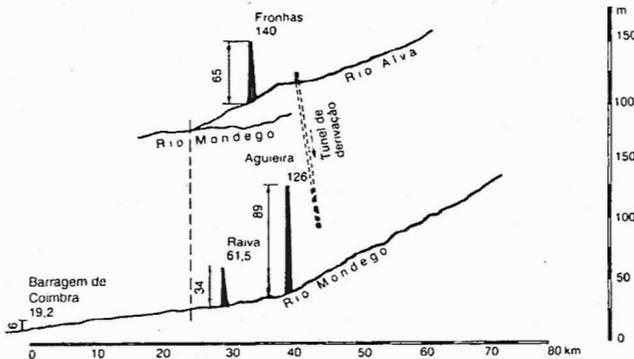


Figura 3 - Esquemática do Aproveitamento Hidráulico do Mondego.

3. Dados disponíveis

3.1. Introdução

Para a elaboração do estudo hidráulico e hidrológico do Rio Mondego na zona de intervenção do Programa Polis em Coimbra, foi de vital importância a obtenção de diversos elementos, nomeadamente:

- a) Elementos batimétricos e topográficos;
- b) Dados hidrométricos:
 - b1) Caudais máximos instantâneos;
 - b2) Hidrogramas das cheias relevantes.

3.2. Elementos batimétricos e topográficos

A simulação numérica de escoamentos gradualmente variáveis com superfície livre, em particular a propagação de cheias em domínios fluviais, carece do conhecimento de informação batimétrica de base, nomeadamente da morfologia do leito onde os escoamentos se desenrolam. O troço do Rio Mondego, ao longo do qual se procedeu à modelação numérica de escoamentos em regime variável, encontra-se limitado a montante pela barragem da Raiva e a jusante pelo açude-ponte de Coimbra.

Dispôs-se de elementos topográficos e batimétricos da área de intervenção do Programa Polis em Coimbra e zona envolvente, em formato digital à escala 1/1000 e 1/2000.

Se na região a montante da Ponte da Portela se permitiu recorrer a informação de índole topográfica não muito detalhada, o rigor e a pormenorização pretendidos na área de intervenção do Programa Polis, representada no desenho n.º 1, obrigaram ao desenvolvimento de um modelo digital de terreno extremamente detalhado. A delimitação deste modelo digital numa carta plano-altimétrica da região, bem como uma perspectiva da área por ele abrangida, podem observar-se nos desenhos n.ºs. 2 e 3.

3.3. Dados hidrométricos

3.3.1. Caudais máximos instantâneos

Os dados hidrométricos utilizados para a realização do estudo, no que se refere a caudais máximos instantâneos, foram parcialmente obtidos através da página WEB do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), disponibilizada pelo INAG-Instituto da Água.

Na Figura 4 apresenta-se, sob a forma gráfica, a distribuição temporal dos caudais instantâneos máximos verificados na Ponte de Santa Clara entre 1917 e 1984.

3.3.2. Definição dos hidrogramas de cheia

A definição de hidrogramas de cheia de um determinado curso de água, correspondendo a uma dada secção, é algo extremamente complexo, função das dimensões e características da bacia do rio na secção considerada, e ainda de características do próprio fenómeno de precipitação. A análise efectuada baseou-se essencialmente em três cheias reais, ocorridas na bacia do Rio Mondego no período de medição disponível, e em diferentes cenários delas derivados. Trata-se das cheias reais relevantes, para as quais foi possível reunir todos os elementos necessários à sua

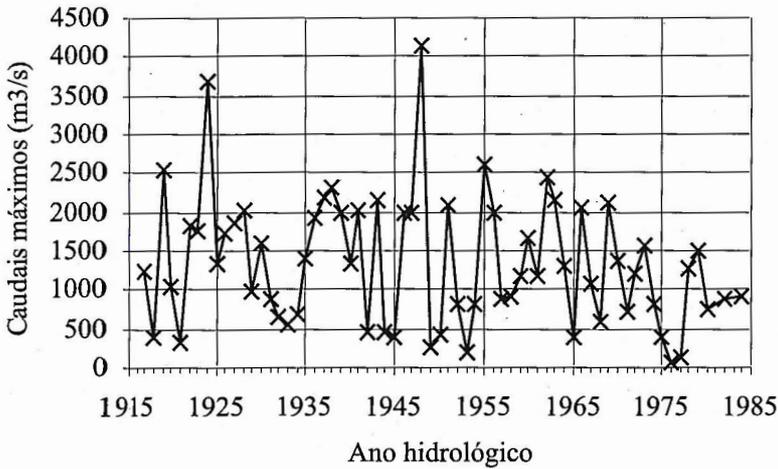


Figura 4 - Representação gráfica dos caudais instantâneos máximos na Ponte de Santa Clara, correspondentes à amostra considerada.

reprodução numérica. Nesta conformidade, foram analisados os fenómenos associados às cheias de Dezembro/Janeiro de 2000/2001, à cheia natural de Março de 1969 e ainda à cheia de Janeiro de 1948, a maior cheia de que há registo no Rio Mondego e usualmente designada por “cheia histórica”.

No âmbito do presente artigo, serão apenas apresentadas as cheias de 2001 e de 1948, sendo apresentadas nas figuras que se seguem os hidrogramas correspondentes:

- i) de 22 a 31 de Janeiro de 2001 (Figura 5, baseados em registos do INAG e da CPPE, os hidrogramas afluentes às albufeiras da Agueira e de Fronhas, e no limnigrama do posto do Cabouco, fornecido pela DRAOT-Centro, no caso do Rio Ceira);
- ii) de 28 a 30 de Janeiro de 1948 (Figura 6, adaptados de SANCHES, 1996).

Figura 5 - Hidrogramas afluentes registados durante a cheia de 22 a 31 de Janeiro de 2001.

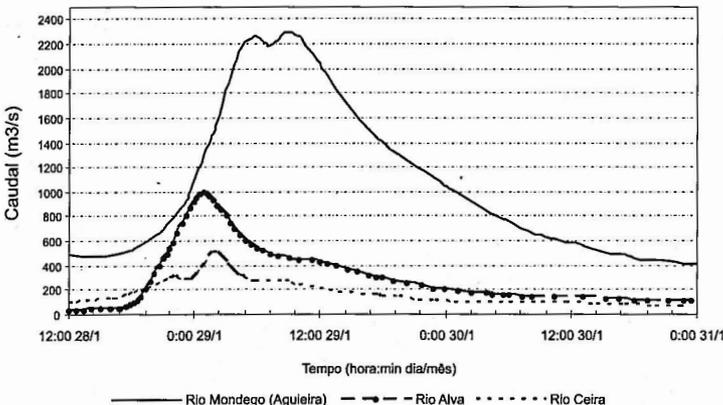
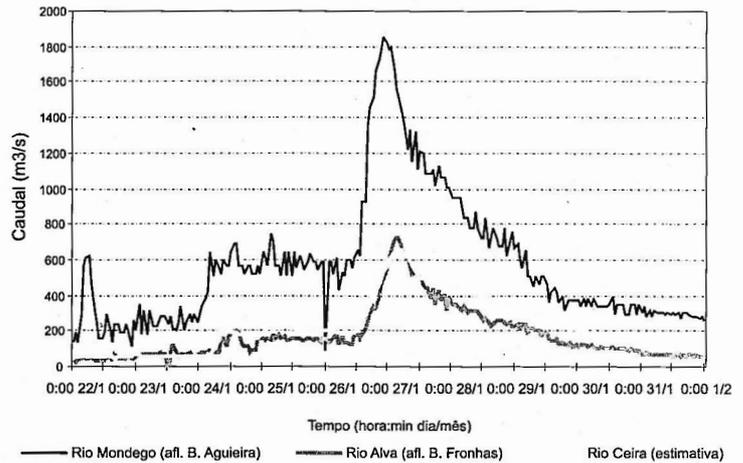


Figura 6 - Hidrogramas registados durante a cheia de 28 a 30 de Janeiro de 1948.

4. Avaliação dos caudais máximos de cheias naturais

4.1. Avaliação estatística dos caudais máximos instantâneos anuais

Os métodos estatísticos aplicados ao estudo de caudais de ponta de cheia têm por finalidade a obtenção de caudais de ponta de cheia para períodos bastante superiores aos da amostra. São vários os tipos de distribuição estatística propostos na bibliografia como sendo aplicáveis à distribuição de caudais extremos, aceitando-se, como regra geral, que não deverão ser estimados valores para períodos de retorno superiores a duas ou três vezes a dimensão da amostra. A exiguidade das amostras de que normalmente dispomos em Portugal obriga-nos, muitas vezes, a extrapolar os resultados para períodos de retorno superiores, o que não fazemos sem dar conhecimento desta reserva.

Os resultados da aplicação do método de Gumbel às séries de caudais máximos instantâneos anuais disponíveis (não foram considerados os valores dos postos de Ponte de Santa Clara e de Ponte da Mucela, respectivamente, após a construção das barragens da Agueira e de Fronhas) estão resumidos no Quadro 1. Pode observar-se na Figura 7 a representação de caudais máximos instantâneos em função dos respectivos períodos de retorno.

5. Modelação da propagação das cheias em regime variável

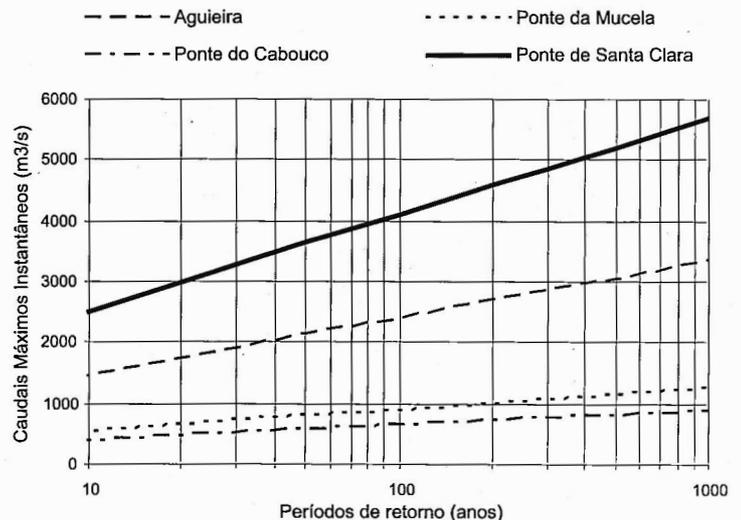
O recurso a estruturas computacionais, baseadas em métodos numéricos, para a resolução de problemas no âmbito da hidráulica fluvial tem-se vulgarizado, em particular ao longo das últimas três décadas, dando origem a modelos computacionais que, tanto podem funcionar como ferramenta de previsão, como de análise da evolução de escoamentos com superfície livre de canais e obras hidráulicas. Estes modelos baseiam-se em princípios gerais de conservação e em equações empíricas, para descrever o comportamento físico dos sistemas naturais considerados. Na modelação matemática e, em especial, na concepção do modelo global a adoptar em hidráulica fluvial, assumem especial relevância os desenvolvimentos matemático e numérico, a correcta implementação computacional, as validações analítica e numérica e a verificação recorrendo a dados experimentais (vejam-se os trabalhos de AMADO MENDES, 2001 e AMADO MENDES, SEABRA SANTOS e ANTUNES DO CARMO, 2001).

A componente hidrodinâmica da estrutura computacional desenvolvida baseia-se em equações de escoamento gradualmente variável com superfície livre, habitualmente designadas na literatura por *equações de Saint-Venant*. Trata-se de equações às derivadas parciais, quasi-lineares, de tipo hiperbólico, obtidas

Nome do Posto	Caudais Máximos Instantâneos (m ³ /s)						
	Período de Retorno (anos)						
	5	10	25	50	100	500	1000
Agueira	1160	1461	1841	2123	2403	3050	3328
Ponte da Mucela	420	534	678	785	892	1137	1242
Ponte do Cabouco	295	376	478	554	629	803	877
Ponte de Santa Clara	1988	2501	3148	3628	4104	5205	5678

Quadro 1 - Estimativa dos caudais máximos instantâneos, para vários períodos de retorno, em diversas estações hidrométricas, calculados com o método de Gumbel.

Figura 7 - Representação de caudais máximos instantâneos vs. períodos de retorno.



por aplicação dos princípios gerais de conservação aplicados a um volume de controlo.

Admitidas as principais hipóteses simplificativas, habitualmente utilizadas nas aplicações em hidráulica fluvial, as equações de Saint-Venant, a uma dimensão no plano horizontal, podem escrever-se:

$$\frac{\partial(A + A_0)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial(h + \xi)}{\partial x} + gAS_r + q \left(\frac{Q}{A} - u_t \right) = 0$$

sendo A a área do escoamento e A_0 a respectiva área não activa; Q o caudal escoado; h a altura de água na secção e ξ a correspondente cota de fundo ou do talvegue; q o caudal do escoamento transversal, por unidade de largura e u_t a componente da velocidade daquele escoamento, na direcção do escoamento principal.

A perda de carga unitária, S_r , é usualmente calculada com recurso à fórmula de Manning-Strickler, válida em rigor para escoamentos uniformes, sendo definida por:

$$S_r = \frac{|Q|Q}{K_s^2 A^2 R^{2/3}}$$

onde K_s é o coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler e R é o raio hidráulico da secção.

O sistema formado pelas equações de Saint-Venant é resolvido pelo método de MacCormack (*MacCormack explicit time-splitting scheme*), um esquema numérico de diferenças finitas explícito de segunda ordem tipo Lax-Wendroff.

Na modelação computacional de escoamentos com superfície livre em regime variável, como a que se pretende levar a cabo como suporte do presente trabalho, assume grande importância a definição das

condições de fronteira a adoptar. Trata-se da caracterização, ao longo do tempo, das relações do exterior com o domínio de cálculo, relacionando a transmissão de informação física (ou numérica) entre estas duas regiões. Podem distinguir-se condições de fronteira externas, nas secções de montante e de jusante do troço a modelar, e condições de fronteira internas, nas confluências de cursos de água afluentes ao curso de água principal. Na secção de montante, junto à Barragem da Raiva, e nas confluências dos rios Alva e Ceira com o troço do Rio Mondego em análise, as condições de fronteira baseiam-se nos hidrogramas reais registados durante os fenómenos de cheia que definem as simulações hidráulicas. No que se refere à fronteira de jusante, situada no açude-ponte de Coimbra, afigura-se mais do que uma possibilidade: *i*) a imposição, ao longo do tempo, dos níveis de água registados naquela estrutura hidráulica, caso sejam conhecidos para o fenómeno a simular; *ii*) o não condicionamento do nível de água por aquela estrutura, no caso da simulação de cheias sem que estivesse erigido o Aproveitamento Hidráulico do Mondego; e *iii*) a imposição da cota da superfície livre a jusante, reproduzindo a “gestão” do açude-ponte em situações correntes e em situações de afluências mais elevadas. Saliente-se, a este respeito, a determinação da curva de vazão do açude-ponte representada graficamente na Figura 8, efectuada com base em dados hidrométricos do período de 22 a 31 de Janeiro de 2001, e que, consoante a magnitude do caudal afluyente, pode reproduzir o comportamento do açude antes e após a abertura da totalidade das comportas em situação de cheia eminente. Deve ainda referir-se que, devido à proximidade da zona de intervenção do Programa

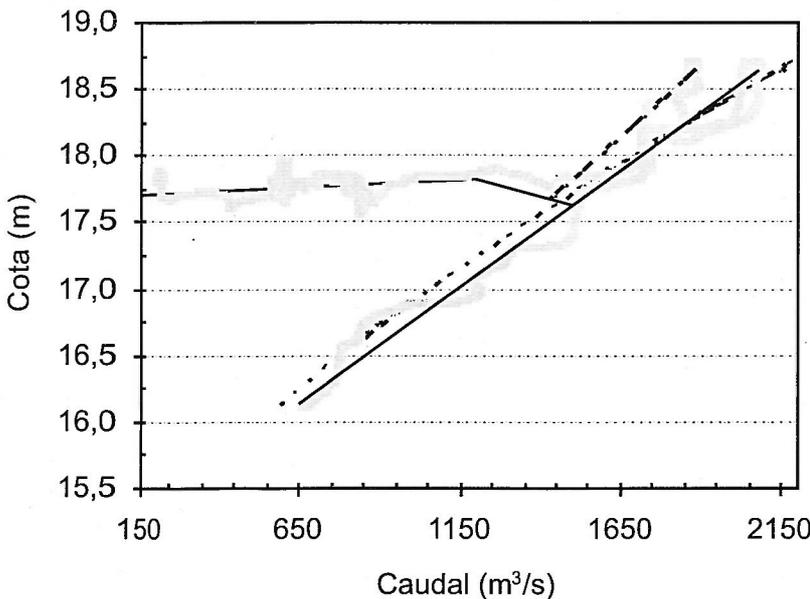


Figura 8 - Determinação da curva de vazão do açude-ponte de Coimbra.

Polis desta fronteira de jusante, a “gestão” e o controlo do açude-ponte se tornam determinantes para os níveis da superfície livre do escoamento nesta região de jusante do troço em estudo.

6. Resultados da aplicação da modelação às cheias de referência

As simulações efectuadas em regime variável, e cujos resultados mais relevantes, em termos de valores máximos atingidos nas secções da Ponte da Portela, Ponte Europa, Clube Náutico, Choupalinho e Ponte de Santa Clara, são resumidos em quadros abaixo inseridos, tiveram como afluições os hidrogramas anteriormente referidos no ponto 3.3.2.

Estes dados de base foram modificados, de modo a ter em consideração não só os desfasamentos temporais dos hidrogramas registados, como também as relações entre as áreas das bacias nos postos hidrométricos e as mesmas áreas totais até às confluências dos respectivos cursos de água com o Rio Mondego. Foram assim efectuadas simulações baseadas nas cheias anteriormente referidas (as de 2001 e 1948), tendo-se começado pela cheia real de Janeiro de 2001.

6.1. Resultados das simulações numéricas efectuadas com base na cheia de 22 a 31 de Janeiro de 2001

6.1.1. Hidrogramas reais, registados no período de 22 a 31 de Janeiro de 2001

A modelação desta cheia recente do Rio Mondego reveste-se de elevada importância, não só do ponto de vista da aplicação do modelo computacional, mas

também da verificação da sua implementação. A caracterização da cheia de 22 a 31 de Janeiro de 2001 pode ser efectuada de forma extremamente detalhada e precisa, nomeadamente no que se refere aos hidrogramas que a originaram, à evolução ao longo do tempo dos níveis de escoamento, ao levantamento de cotas de inundação máximas, entre outros parâmetros disponíveis. A simulação daquela cheia assume, assim, o papel de validar e verificar os resultados do modelo numérico em condições de propagação de uma cheia natural em leito real, permitindo o tratamento cuidado das condições de fronteira, em especial da fronteira do açude-ponte de Coimbra, e possibilitando ainda a delicada operação de calibração do coeficiente de atrito do escoamento.

Os hidrogramas adoptados na simulação numérica podem observar-se na Figura 9. Inclui-se ainda o hidrograma do caudal afluente à albufeira da Barragem da Aguieira, apesar de a secção de montante do modelo coincidir com a Barragem da Raiva.

Na simulação desta cheia natural, recorreu-se à imposição dos níveis de água registados no açude-ponte, como condição de fronteira de jusante (Figura 10). A evolução ao longo do tempo do caudal efluente nesta secção é determinada de forma automática por uma condição de fronteira numérica, apresentando-se a comparação com os valores registados pelo INAG na Figura 11. Ressalta da análise desta figura uma discrepância entre os resultados da modelação hidráulica e os valores fornecidos, essencialmente após o primeiro pico de cheia nesta secção. Desconhecendo-se a curva de vazão adoptada pelo INAG no registo daqueles caudais, foi também testada a curva de vazão original, determinada pela Hidroprojecto, resultando em caudais ainda superiores aos da simulação computacional. O cálculo do volume de água que aflui ao açude-ponte, a partir dos hidrogramas afluentes,

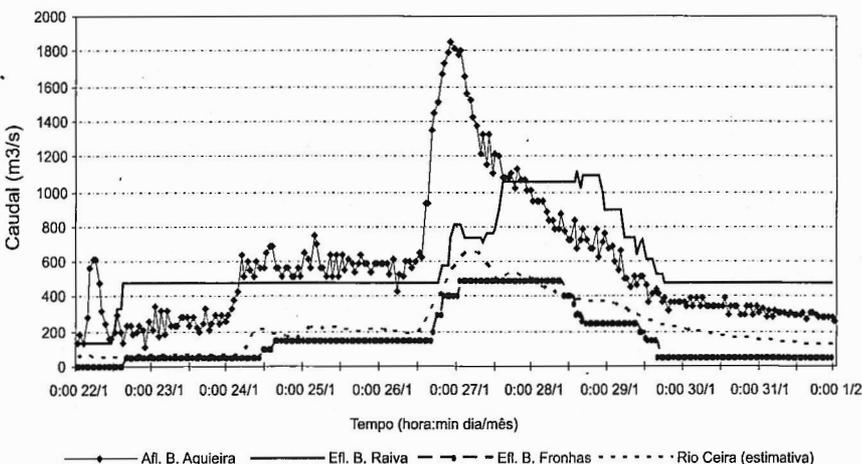


Figura 9 - Hidrogramas adoptados na simulação numérica da cheia de 22 a 31 de Janeiro de 2001.

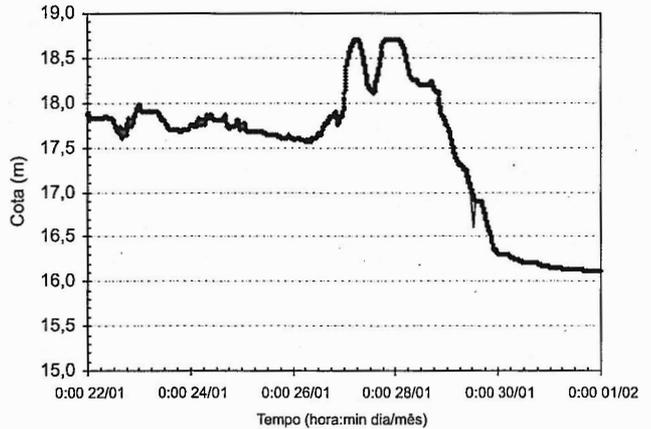
e o cálculo do volume de água efluente da mesma secção, permitem concluir que os caudais aí registados não se encontram correctamente avaliados pelo INAG. Por outro lado, utilizando a curva de vazão original (Hidroprojecto), os caudais desta secção aparentam estar a ser avaliados por excesso, estimando-se numericamente que o caudal máximo tenha sido, efectivamente, da ordem dos 2070 m³/s.

O mapeamento da zona inundada, resultante da modelação computacional, pode observar-se no desenho nº. 4, desde a Ponte da Portela ao açude-ponte de Coimbra, e, um pouco mais em detalhe, nas imediações da zona de intervenção do Programa Polis em Coimbra,

no desenho nº. 5. Naqueles desenhos pode observar-se também a planimetria da cidade de Coimbra que rodeia o Rio Mondego, assim como os níveis de água ao longo do eixo do curso de água e os níveis de cheia obtidos junto a ambas as margens do curso de água. A evolução dos níveis de água com o tempo, ao longo do fenómeno de cheia, é apresentada na Figura 12, para as secções da Ponte Europa, Clube Náutico, Choupalinho e Ponte de Santa Clara.

No Quadro 2 apresentam-se, em resumo, os valores máximos calculados numericamente nas secções anteriormente enunciadas, correspondentes à situação de cheia natural de 22 a 31 de Janeiro de 2001.

Figura 10 - Níveis de água no açude-ponte de Coimbra (registados e obtidos através de simulação numérica, na imposição da condição de fronteira de jusante do modelo).



— Níveis registados (INAG) —•— Simulação numérica

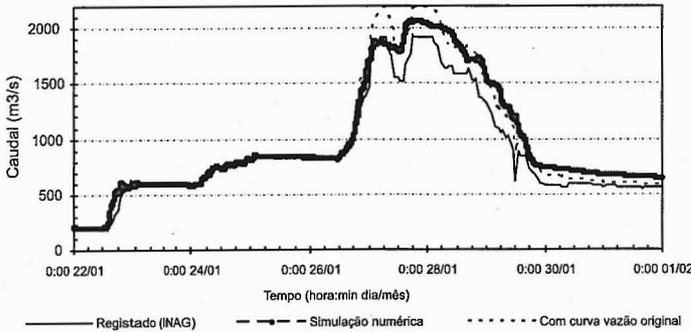
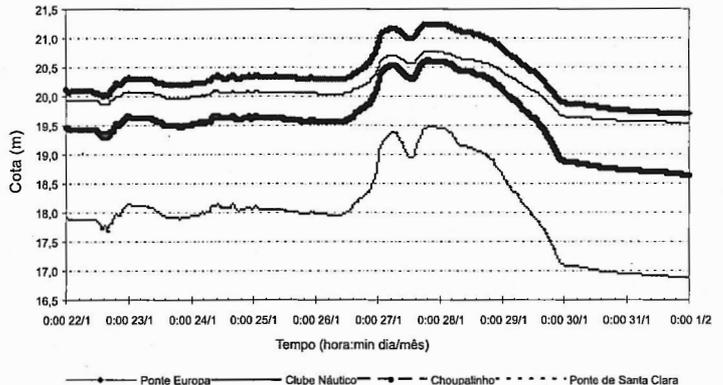


Figura 11 - Hidrogramas no açude-ponte de Coimbra (registado e obtidos através de simulação numérica).

Figura 12 - Níveis de água obtidos através de simulação numérica.



—•— Ponte Europa — Clube Náutico —•— Choupalinho —•— Ponte de Santa Clara

(de montante para jusante)	Cota máx. (m)	Altura esc. máx. (m)	Caudal máx. (m ³ /s)	Veloc. máx. esc. (m/s)
Ponte da Portela	22.8	5.7	2081	2.8
Ponte Europa	21.3	6.8	2074	1.7
Clube Náutico	20.8	7.0	2072	1.2
Choupalinho	20.6	6.7	2072	1.6
Ponte de Santa Clara	19.5	5.6	2068	2.8
Açude-Ponte	18.7	4.4	2071	3.0

Quadro 2 - Valores máximos obtidos a partir de simulação numérica (hidrogramas correspondentes às aflúências da Figura 9)

Deve agora salientar-se a boa concordância da aproximação dos resultados computacionais, não só em termos da evolução dos caudais registados (atente-se nos ramos ascendentes dos hidrogramas da Figura 11), mas também em relação aos níveis máximos de cheia atingidos pelo escoamento. A este respeito, deve fazer-se referência aos níveis de cheia detectados pela DRAOT-Centro, através de levantamento topográfico directo no terreno. No Centro Náutico do Choupalinho, a montante da Ponte de Santa Clara, a cota de inundação terá atingido os 20.86 m, tendo-se obtido o valor de 20.8 m através da simulação com o modelo numérico. Um pouco mais a montante, na Ponte Europa, observou-se que o nível da água chegou à cota 21.05 m, estimando a simulação computacional a cota 21.3 m.

Por outro lado, os registos fotográficos observáveis na Figura 13 e na Figura 14 permitem, também eles, corroborar os níveis de água resultantes da modelação computacional.

De acordo com a análise estatística dos caudais máximos instantâneos naturais, recorrendo ao método

de Gumbel, pode associar-se ao caudal máximo na Ponte de Santa Clara um período de retorno de cerca de 5 a 6 anos.

Nesta primeira simulação que acaba de ser apresentada, constatou-se a necessidade de considerar, em termos de comportamento hidrodinâmico, a existência de detritos acumulados nos pilares da Ponte de Santa Clara. De facto, também na realidade, durante o período de cheia, se verificou uma redução da capacidade de vazão daquela secção, não só devido ao seu estreitamento, mas também devido a um aumento do coeficiente de atrito, ambos motivados pelo avolumar de detritos e sujidades transportados pelo escoamento em situações de cheia.

6.1.2. Cheia natural de Janeiro de 2001, sem laminação introduzida pelo aproveitamento hidráulico do Mondego

Os hidrogramas considerados para esta simulação são os que afluíram às barragens da Aguieira e de



Figura 13 - Cheia de 22 a 31 de Janeiro de 2001. Vista a partir da margem esquerda do Mondego, na manhã do dia 28 de Janeiro [Fotografia cedida por *Estúdio 2000*].



Figura 14 - Cheia de 22 a 31 de Janeiro de 2001. Vista do Choupalinho, na margem esquerda do Mondego, na manhã do dia 28 de Janeiro [Fotografia cedida por *Estúdio 2000*].

Fronhas, e o que se estima ter ocorrido no Rio Ceira, sendo apresentados graficamente na Figura 15. O mapeamento da zona inundada, nas condições desta cheia hipotética, pode observar-se no desenho n.º. 6.

A variação das cotas do escoamento com o tempo é apresentada na Figura 16.

O resumo dos valores máximos obtidos a partir da simulação computacional consta do Quadro 3.

A esta cheia natural, cujo caudal máximo instantâneo em Coimbra se avalia em cerca de 3000 m³/s, corresponderá um período de retorno de aproximadamente 19 a 20 anos, na Ponte de Santa Clara. Associado ao significativo incremento do caudal máximo instantâneo, verifica-se que as cotas de inundação entre a Ponte Europa e a Ponte de Santa Clara aumentam de 0.2 m a 0.9 m.

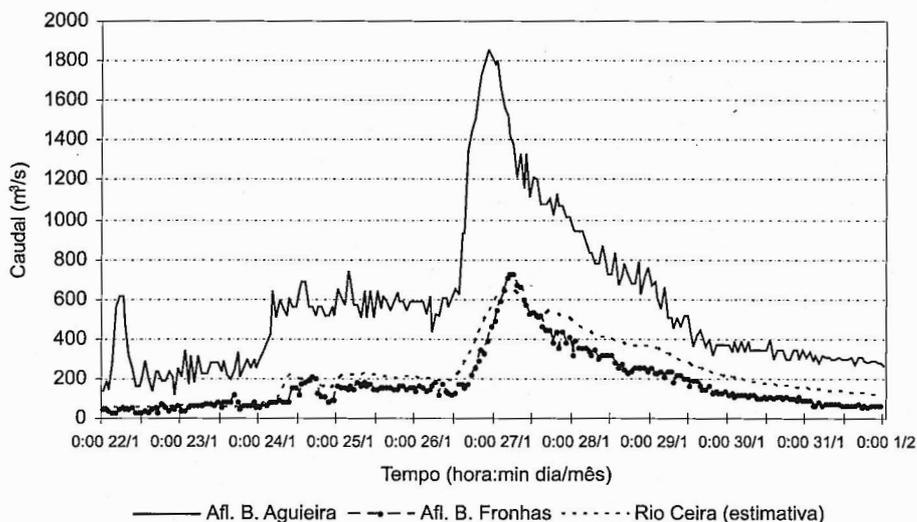
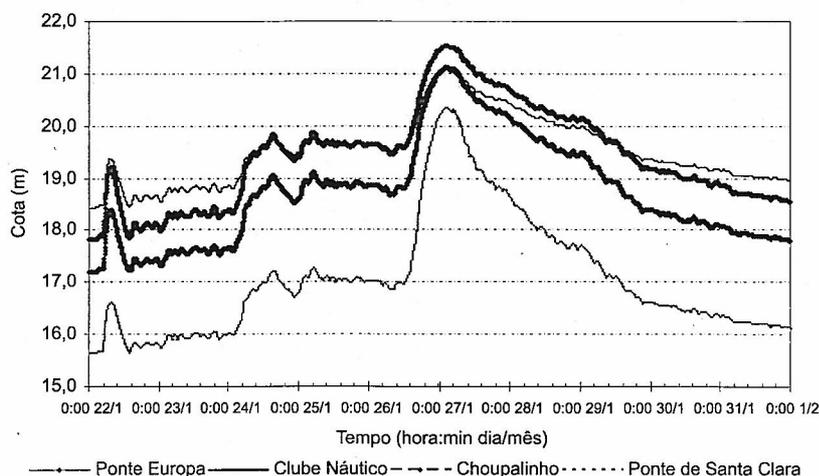


Figura 15 - Hidrogramas adoptados na simulação numérica da cheia natural de Janeiro de 2001, sem aproveitamento hidráulico do Mondego.

Figura 16 - Níveis de água obtidos através de simulação numérica.



(de montante p/ jusante)	Cota máx. (m)	Altura esc. máx. (m)	Caudal máx. (m ³ /s)	Veloc. máx. esc. (m/s)
Ponte da Portela	21.9	4.8	2967	5.0
Ponte Europa	21.5	7.1	2977	2.2
Clube Náutico	21.1	7.3	2951	1.4
Choupalinho	21.1	7.2	2976	1.9
Ponte de Santa Clara	20.4	6.5	2971	3.4
Açude-Ponte	20.2	5.9	2949	3.0

Quadro 3 - Valores máximos obtidos a partir de simulação numérica (hidrogramas correspondentes às afluências da Figura 15)

6.2. Resultados das simulações numéricas, efectuadas com base na cheia de 28 a 30 de Janeiro de 1948

6.2.1. Cheia natural de Janeiro de 1948

Dado o carácter excepcional da cheia verificada em Janeiro de 1948, usualmente designada como “a cheia histórica do Rio Mondego”, com um período de retorno que se pode estimar em cerca de 110 anos em Coimbra, e ainda atendendo à existência de registos dos respectivos hidrogramas no rio Mondego na Aguieira e em Coimbra, e nos rios Alva e Ceira (Figura 17), considerou-se esta cheia como situação de referência particularmente importante e cuja modelação se afigura extremamente relevante.

Como tentativa de validação dos resultados da simulação numérica, sobrepoem-se, na Figura 18, dois hidrogramas: o hidrograma registado em Coimbra durante a cheia, em 1948, e o hidrograma estimado

através da modelação computacional, na Ponte de Santa Clara, praticamente na extremidade de jusante do troço analisado. Do ponto de vista da magnitude dos caudais, observa-se uma excelente concordância, havendo apenas a notar um pequeno desfasamento, que se pode estimar em cerca de uma hora a uma hora e meia, e que não se prevê que afecte os níveis de inundação determinados.

Deste modo, foi elaborado o mapa de inundação que se prevê que corresponda à maior cheia de que há registo no Rio Mondego. O mapeamento é apresentado, desde a Ponte da Portela ao açude-ponte de Coimbra, no desenho nº. 7, e nas imediações da zona de intervenção do Programa Polis em Coimbra, no desenho nº. 8.

A evolução, ao longo do tempo, dos níveis de água atingidos pelo escoamento está patente na Figura 19, para as secções da Ponte Europa, Clube Náutico, Choupalinho e Ponte de Santa Clara. Os valores extremos observados na modelação hidrodinâmica encontram-se sistematizados no Quadro 4.

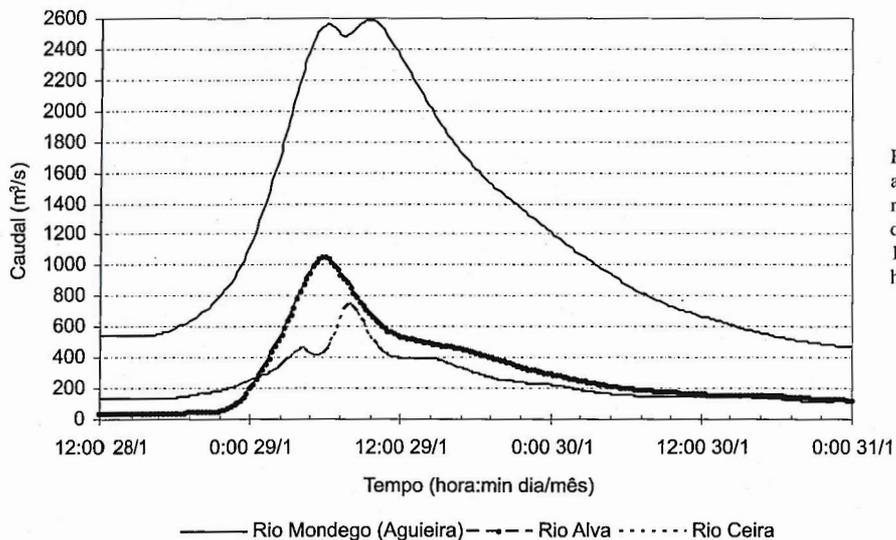


Figura 17 - Hidrogramas adoptados na simulação numérica da cheia natural de 28 a 30 de Janeiro de 1948 (sem aproveitamento hidráulico do Mondego).

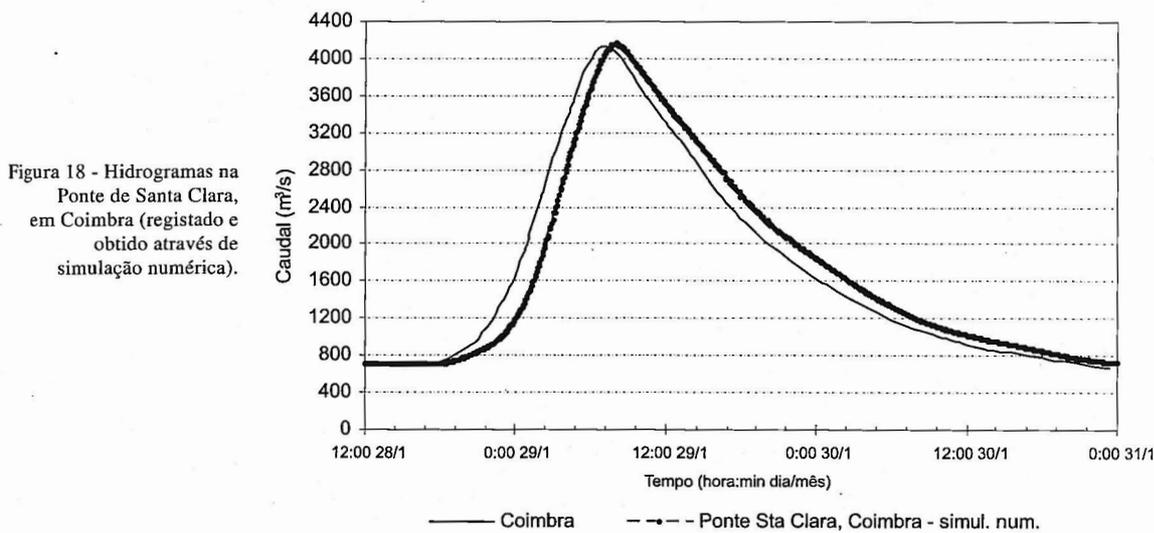


Figura 18 - Hidrogramas na Ponte de Santa Clara, em Coimbra (registado e obtido através de simulação numérica).

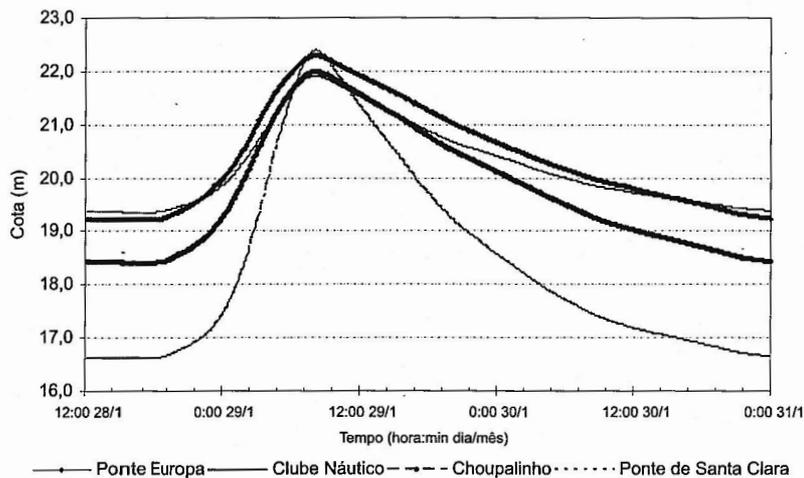


Figura 19 - Níveis de água obtidos através de simulação numérica.

<i>(de montante p/ jusante)</i>	Cota máx. (m)	Altura esc. máx. (m)	Caudal máx. (m ³ /s)	Veloc. máx. esc. (m/s)
Ponte da Portela	22.9	5.8	4233	5.7
Ponte Europa	22.3	7.8	4183	2.3
Clube Náutico	21.9	8.1	4176	1.6
Choupalinho	22.0	8.1	4176	2.1
Ponte de Santa Clara	22.4	8.5	4167	3.6
Açude-Ponte	22.3	8.0	4165	3.1

Quadro 4 - Valores máximos obtidos a partir de simulação numérica (hidrogramas correspondentes às afluições da Figura 17)

Atendendo à inexistência de registos, as cotas de inundação estimadas através do modelo computacional não poderão ser exaustivamente verificadas face aos níveis de cheia reais. No entanto, o registo fotográfico que se reproduz na Figura 20 pode servir como possível referência indicativa. A partir daquela imagem, recolhida na manhã do dia 29 de Janeiro, estima-se que o nível de água, a montante da antiga Ponte de Santa Clara, junto ao actual Parque Dr. Manuel Braga, se tenha aproximado da cota 22.00 m. A simulação numérica conduz a um nível de inundação de aproximadamente 21.9 m, no instante correspondente. A estimativa do caudal máximo encontra-se, também, muito próxima dos 4140 m³/s, valor do caudal de ponta máxima registado em Coimbra.

6.2.2 Cheia de Janeiro de 1948, com uma proposta de laminação dos caudais efluentes dos aproveitamentos da Aguieira e de Fronhas

Uma gestão que privilegiasse a protecção contra cheias em Coimbra e no Baixo Mondego, nomeadamente acautelando a possibilidade de recorrer aos volumes

úteis disponíveis das albufeiras da Aguieira e de Fronhas, permitiria efectuar o amortecimento de uma cheia com carácter tão excepcional como a de Janeiro de 1948.

De facto, foi o que se tentou ao propor uma gestão dos caudais efluentes daquelas barragens, tendo-se procurado não ultrapassar os caudais em Coimbra da ordem de 1500 m³/s. Para o período de simulação computacional da cheia de 1948 (de 28 a 30 de Janeiro), e admitindo idênticas afluições ao sistema, verificou-se a necessidade de mobilizar um volume máximo da albufeira da Aguieira de cerca de 151 hm³, para o encaixe deste fenómeno excepcional. Tal teria sido possível entre as cotas 115.7 m e 124.8 m daquela albufeira e para um caudal máximo descarregado de 500 m³/s. No mesmo período de tempo, constatou-se a necessidade de encaixar um volume máximo de cerca de 25 hm³ na albufeira de Fronhas, entre as cotas 119.7 m e 124.9 m, para uma descarga máxima de 300 m³/s a partir deste aproveitamento.

A modelação do escoamento resultante daquela proposta baseia-se nos hidrogramas da Figura 21. Uma vez mais surge ainda, e apenas a título indicativo, o hidrograma registado na estação hidrométrica da Aguieira.



Figura 20 - Cheia de Janeiro de 1948. O Mondego na ponte de Coimbra, às 9 horas do dia 29 de Janeiro [Reprodução de SANCHES, 1996].

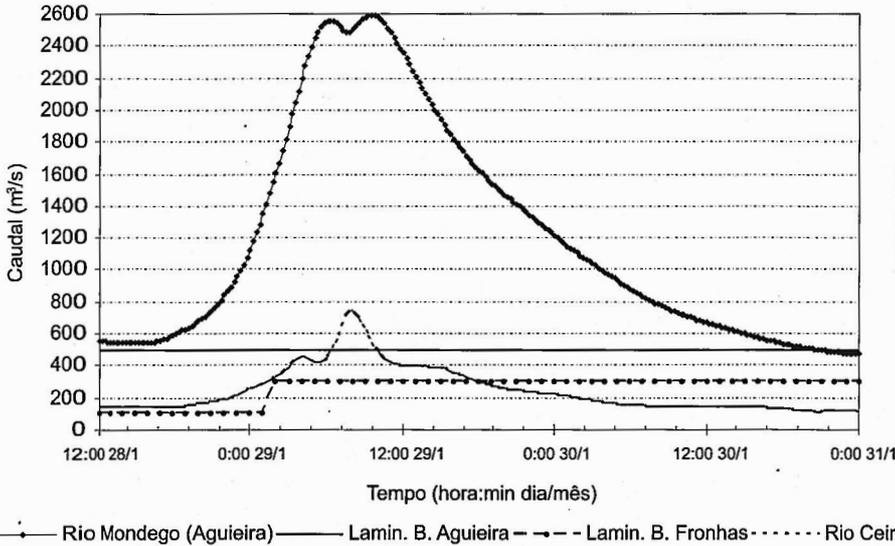


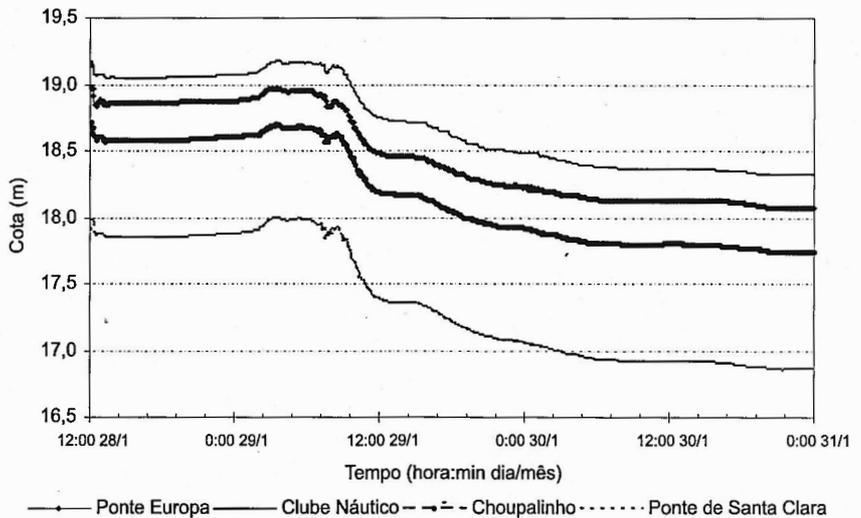
Figura 21 - Hidrogramas adoptados na simulação numérica, correspondentes à laminação da cheia de Janeiro de 1948.

Como se pode observar no desenho n.º 9, feito à escala 1/5000, apesar da dimensão da cheia natural, o escoamento poderá ter-se processado em Coimbra sem que se verificasse a inundação e o galgamento

das margens do rio. A variação temporal dos níveis de água previstos consta da Figura 22.

Os valores máximos resultantes da simulação numérica apresentam-se no Quadro 5.

Figura 22 - Níveis de água obtidos através de simulação numérica.



(de montante p/ jusante)	Cota máx. (m)	Altura esc. máx. (m)	Caudal máx. (m ³ /s)	Veloc. máx. esc. (m/s)
Ponte da Portela	21.2	4.1	1522	3.2
Ponte Europa	19.0	4.5	1531	3.2
Clube Náutico	19.2	5.4	1524	2.0
Choupalinho	18.7	4.8	1524	2.3
Ponte de Santa Clara	18.0	4.2	1513	2.2
Açude-Ponte	17.8	3.5	1523	2.7

Quadro 5 - Valores máximos obtidos a partir de simulação numérica (hidrogramas correspondentes às afluições da Figura 21)

7. Conclusões

As simulações efectuadas permitem obter as seguintes conclusões:

- O comportamento hidráulico do sistema na zona em estudo é fortemente condicionado pelo modo de exploração das obras existentes. Estas obras, que constituem o chamado Aproveitamento Hidráulico do Mondego, concebido e executado para garantir a regularização fluvial e a protecção contra cheias, asseguram um volume de armazenamento suficiente para encaixar cheias com elevados períodos de retorno;
- A simulação efectuada com base na cheia histórica de 1948, à qual se associa um período de retorno da ordem dos 110 anos, em Coimbra, mostra que uma conveniente gestão hidráulica das barragens permite limitar o escoamento em Coimbra a cerca de 1500 m³/s, com níveis no Choupalinho que não ultrapassam os 18.7 m.
- No extremo oposto, a simulação efectuada para uma cheia natural, não laminada, com um período de retorno muito baixo prova que, na ausência de barragens ou com uma gestão ineficaz das mesmas, o Choupalinho pode ser inundado com uma periodicidade média de quatro ou cinco anos.
- Outros factores condicionam igualmente o comportamento hidráulico do rio na zona em estudo. Foi possível constatar a influência de uma deficiente manutenção da secção correspondente à Ponte de Santa Clara, que pode por si só provocar um aumento de nível de cerca de 0.30 m na zona do Choupalinho.
- As barragens possuem uma capacidade de encaixe que assegura a protecção do Choupalinho contra cheias com períodos de retorno elevados. Assim sendo, se a gestão for efectuada de acordo com os objectivos do Aproveitamento, existe uma firme convicção, fundamentada nos estudos estatísticos dos caudais e nas simulações numéricas do escoamento efectuadas, de que a cota actual do Choupalinho não será ultra-

passada, mesmo para cheias de elevado período de retorno.

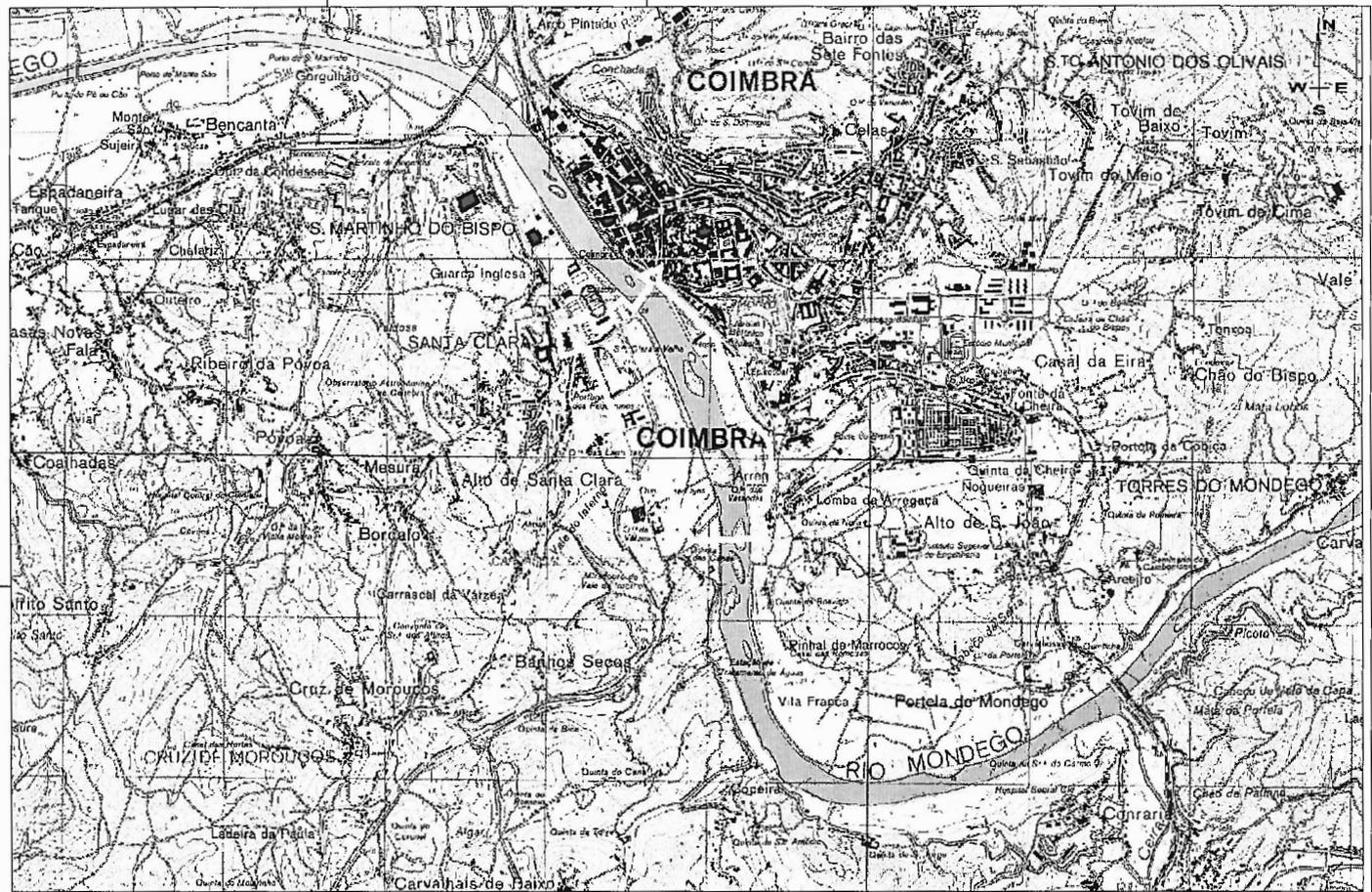
- As respostas e resultados que é possível fornecer no âmbito do presente estudo encontram-se, portanto, fortemente condicionadas pela definição da política de gestão das barragens.
- Com base nos caudais máximos instantâneos em condições de cheia natural na Ponte de Santa Clara, podem ser estimados os níveis de inundação entre a Ponte Europa e o Choupalinho e os correspondentes períodos de retorno, apresentados no Quadro 6.

Bibliografia

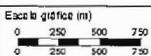
- AMADO MENDES, P. (2001) – *Contribuição para o Estudo da Modelação das Ondas de Cheia Provocadas pela Ruptura de Barragens: Aspectos Hidrodinâmicos e Morfodinâmicos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, área de especialização em Hidráulica e Recursos Hídricos, FCTUC, 2001.
- AMADO MENDES, P.; SEABRA SANTOS, F. J. e ANTUNES DO CARMO, J. S. (2001) – “Escoamentos unidimensionais com superfície livre: análise comparativa de métodos numéricos com ênfase no tratamento dos termos fonte”. *Recursos Hídricos. Revista da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos*, vol. 22, N.º 1, Maio, pp. 5-24.
- Aproveitamento Hidráulico da Bacia do Mondego*, Ministério das Obras Públicas. Direcção-Geral dos Serviços Hidráulicos. Direcção dos Serviços de Aproveitamentos Hidráulicos, 1966.
- HIDROPROJECTO (1999) – “Estudo relativo ao sistema de organização, tarifário e de gestão do Aproveitamento Hidráulico do Mondego. Relatório final 1ª fase”, vols. 1 e 2, Lisboa.
- MARQUES, J.C.; GRAÇA, M.A. e PARDAL, M.A. (2002) – “Introducing the Mondego River Basin”, in Pardal, M.A., Marques, J.C. e Graça, M.A. (eds.), *Aquatic Ecology of the Mondego River Basin. Global Importance of Local Experience*, Imprensa da Universidade, Coimbra.
- SANCHES, R. (1996) – *O problema secular do Mondego e a sua resolução*, LNEC, Lisboa.

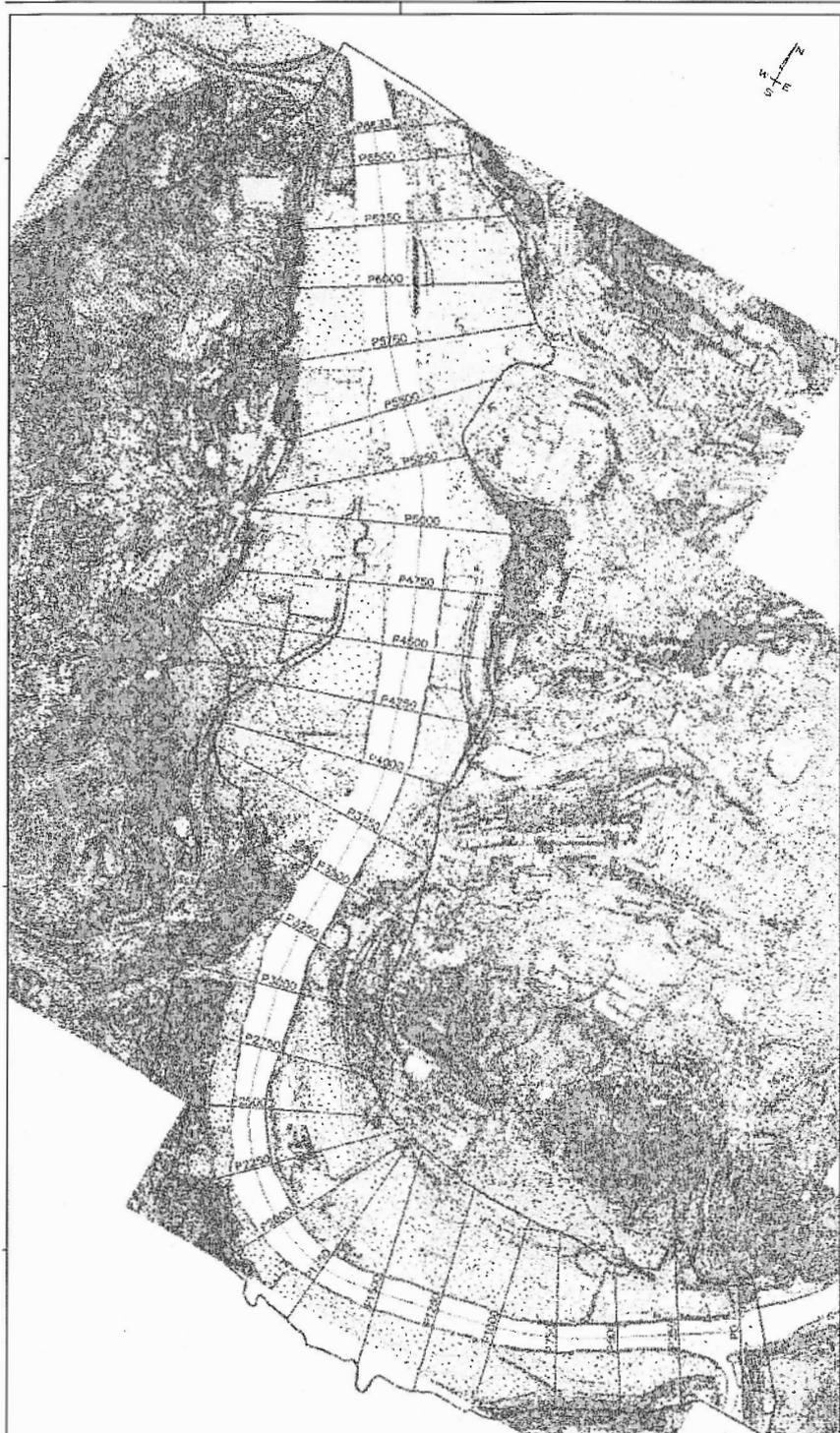
Secção	Períodos de retorno (anos)		
	5-8	19-20	110
Ponte Europa	21.3	21.5	22.3
Choupalinho	20.6	21.1	22.0

Quadro 6 - Níveis máximos de inundação (m)



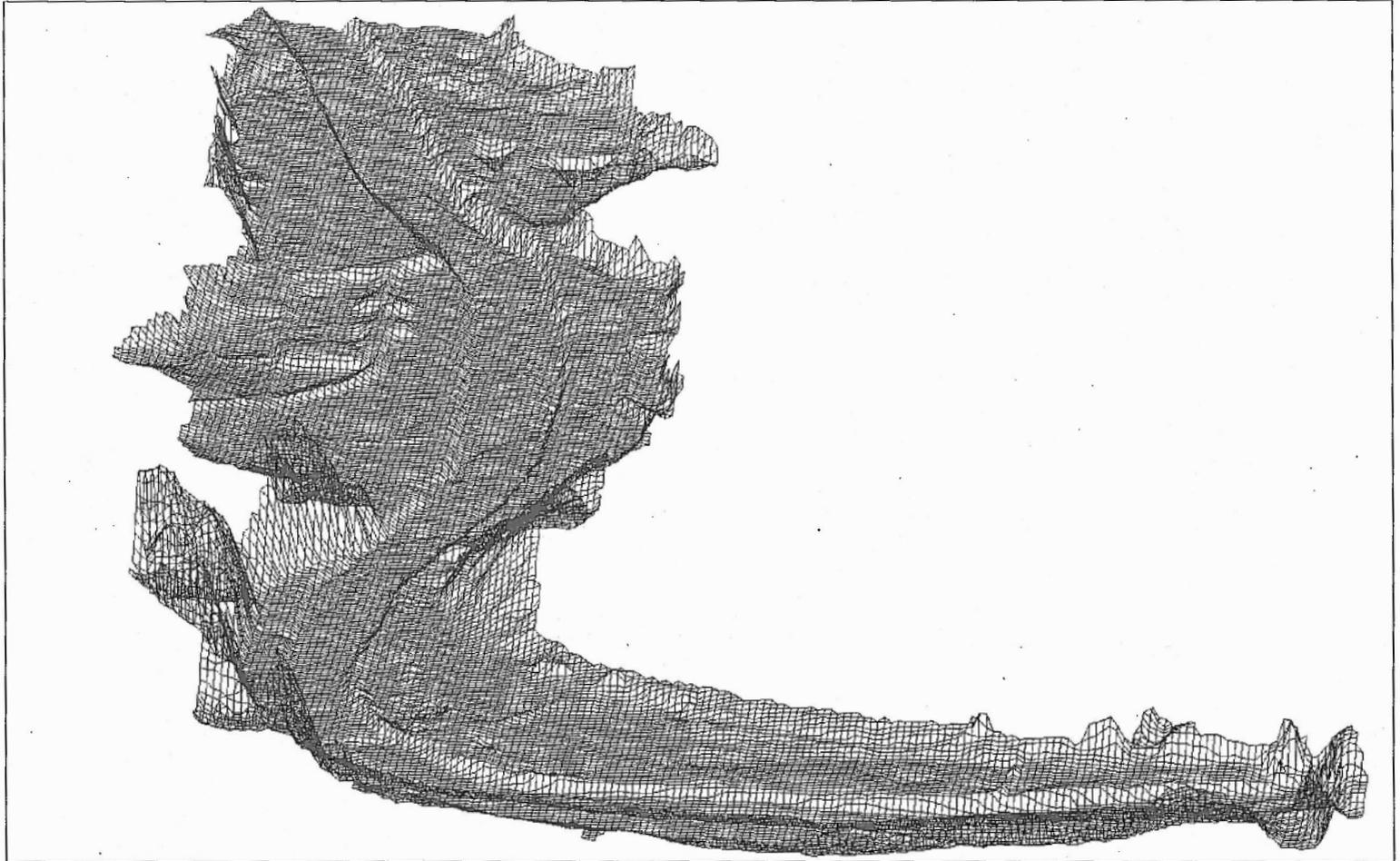
Zona de intervenção do Programa Polis em Coimbra

 Universidade de Coimbra  Laboratório de Hidráulica Recursos Hídricos e Ambiente Dep. de Engenharia Civil da FCT  Instituto do Idr	Coimbra Polis, S.A.	Escala numérica 1/25.000
	Elaboração do Estudo Hidrológico/Hidráulico do Rio Mondego na Zona de Intervenção do Programa Polis em Coimbra	Escala gráfica (m) 
	Mapa de localização	Data Fev. 2002
		Documento nº 1

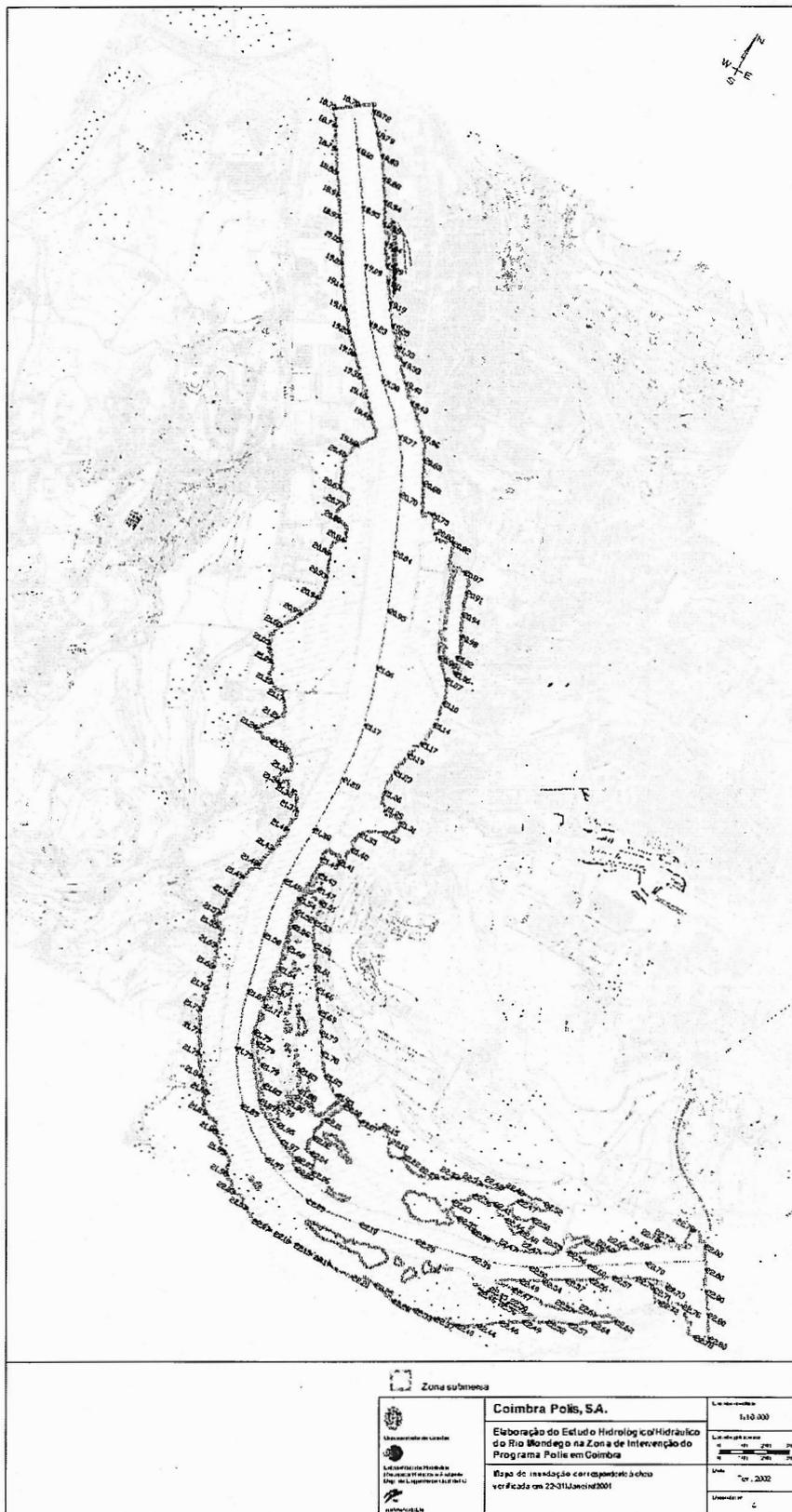


Coimbra Polys, S.A.
 Elaboração do Estudo Hidrológico e Hidráulico do Rio Mondego na Zona de Intervenção do Programa Polis em Coimbra
 Carta planialtimétrica, de simulação de modo digital do terreno por fe

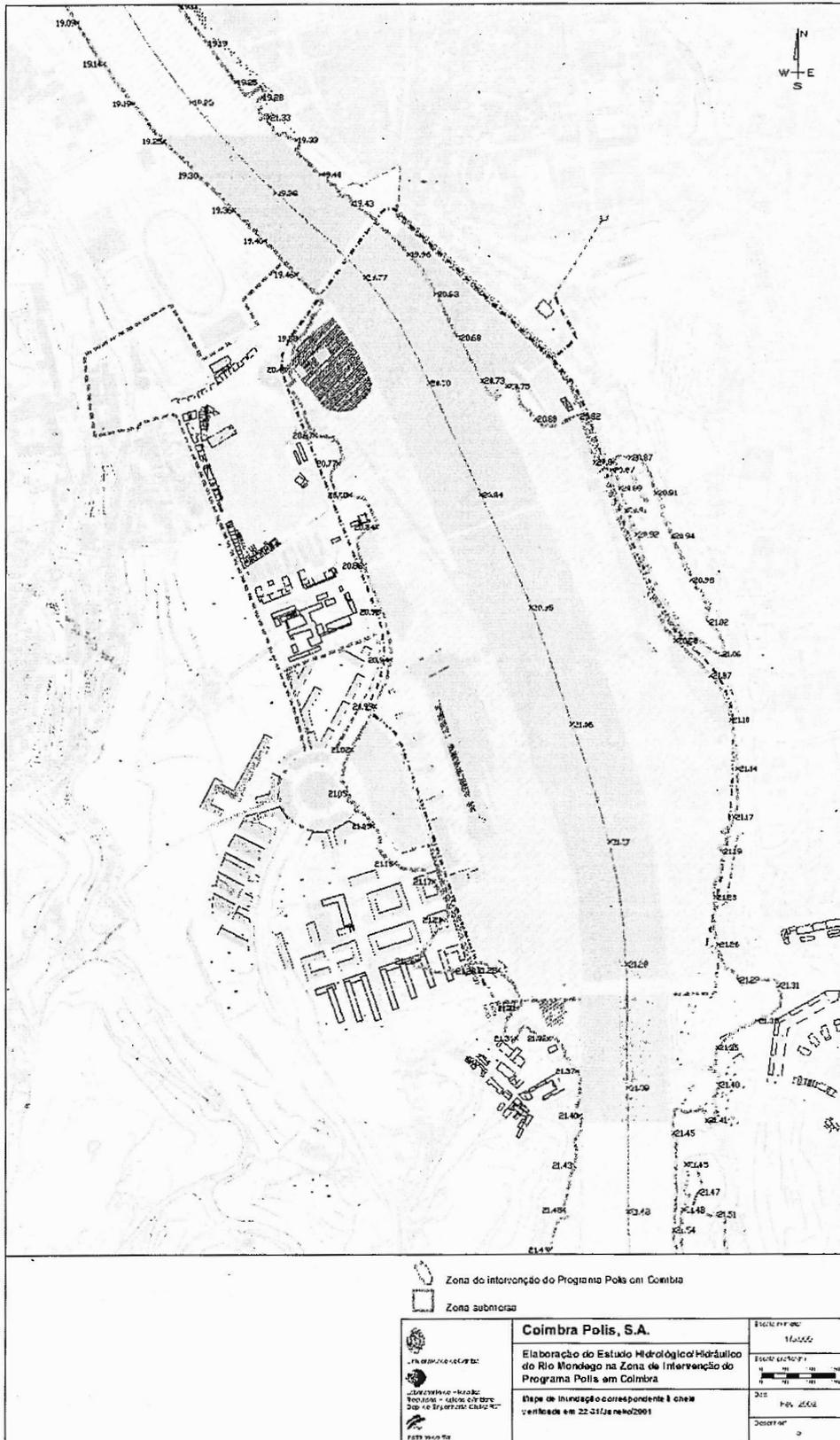
Escala	1:10.000
Projeto	10/03/2002
Unidade	2

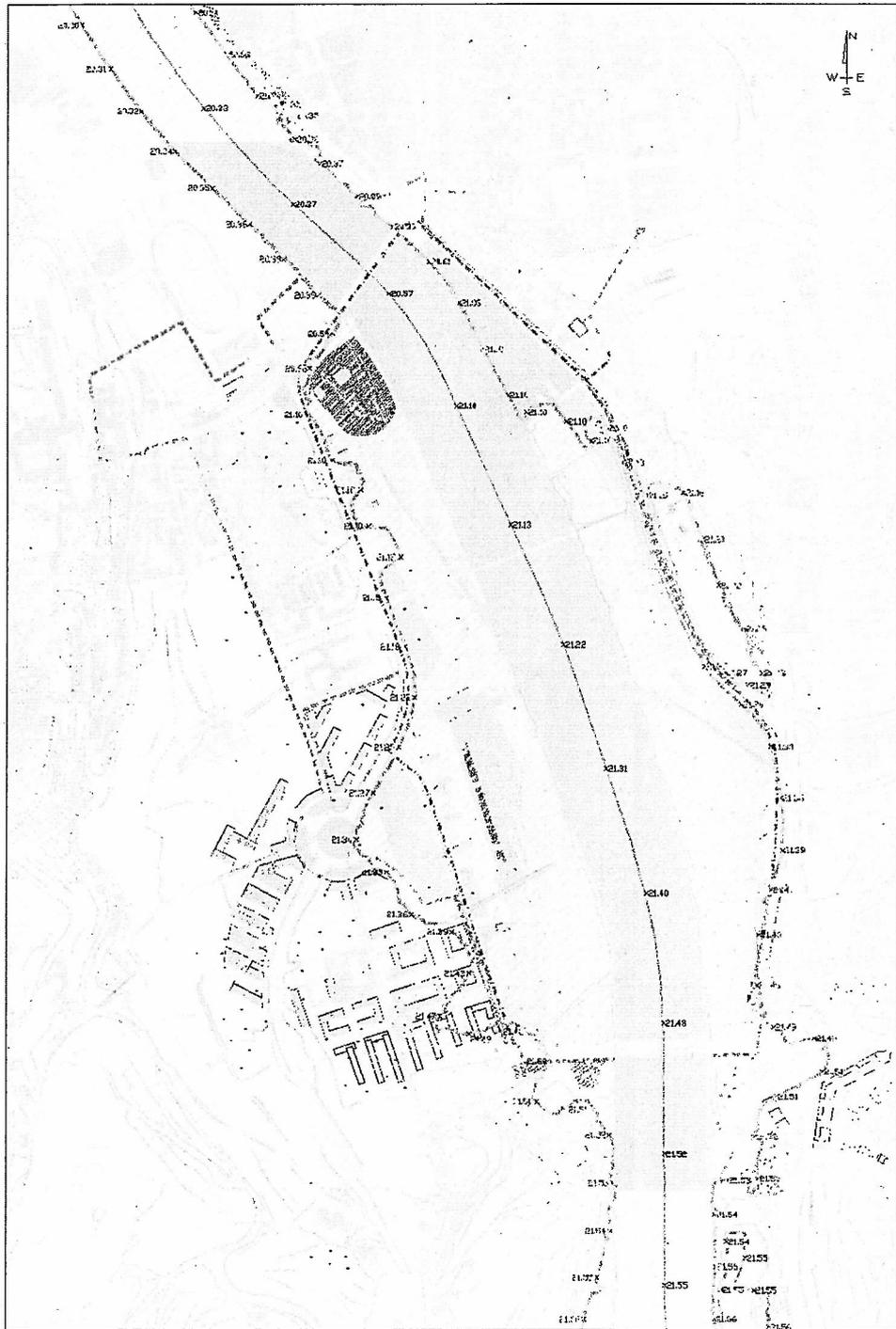


 Universidade de Coimbra  Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente Dep. de Engenharia Civil da FCT  Ins. Ilustre do Mar	Coimbra Polis, S.A.	Escala numérica
	Elaboração do Estudo Hidrológico/Hidráulico do Rio Mondego na Zona de Intervenção do Programa Polis em Coimbra	Escala gráfica (m)
Perspectiva do modelo digital de terreno	Data Fev. 2002	
	Documento nº 3	



 Município de Coimbra	Coimbra Polís, S.A. Elaboração do Estudo Hidrológico/Hidráulico do Rio Mondego na Zona de Intervenção do Programa Polís em Coimbra	Escala gráfica: 0 100 200 300 m
Log. do Instituto de Ambiente e Qualidade do Ambiente I.A.Q.A.	Mapa de base da Comissão de Regulação do Rio Mondego verificada em 22-01-2002	Data: 10.01.2002 Versão: 1.0



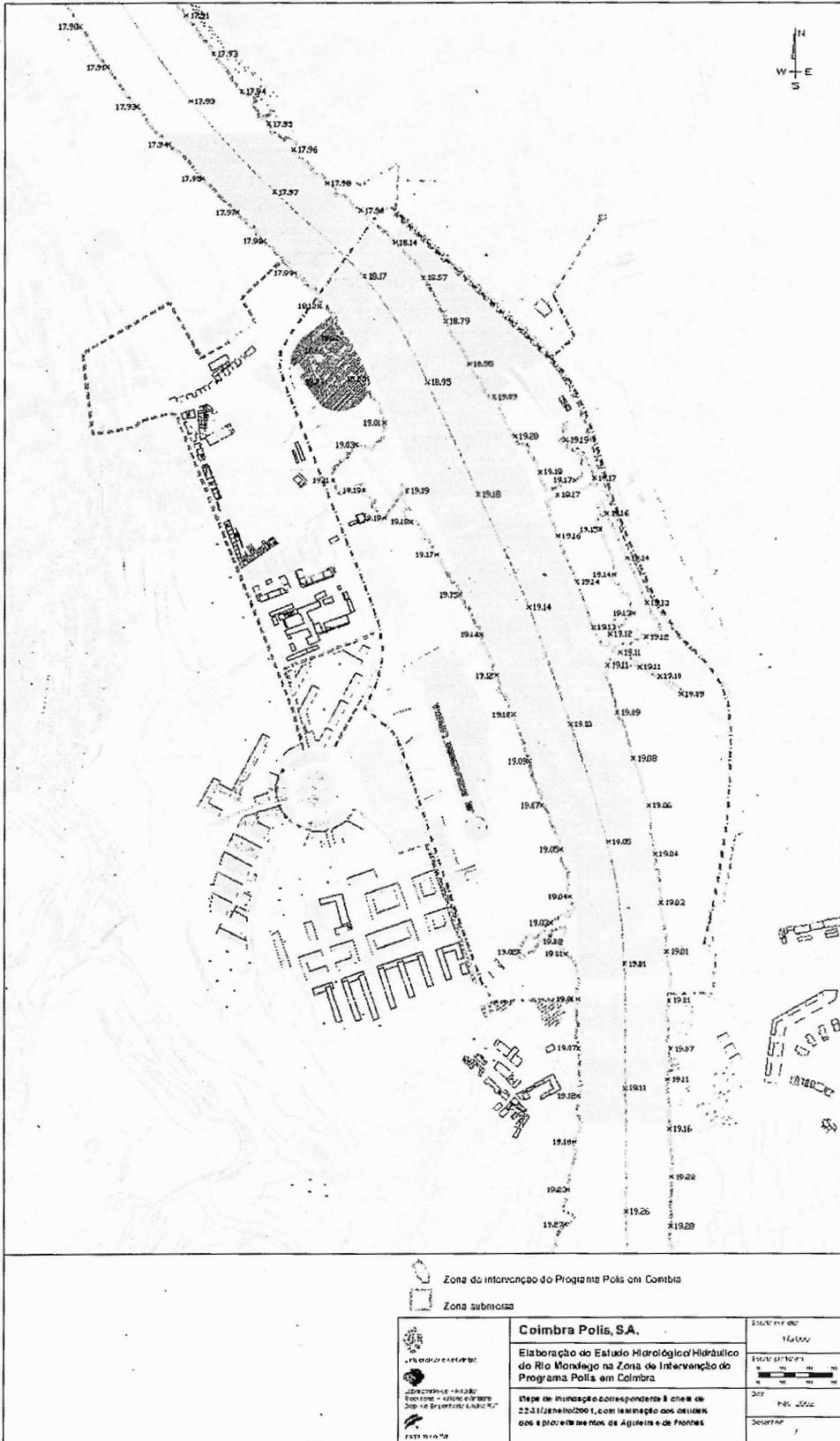


 Zona de intervenção do Programa Polis em Coimbra
 Zona subúrbica


 INSTITUTO DE GESTÃO TERRITORIAL
 I.G.T.
 INSTITUTO DE GESTÃO TERRITORIAL
 INSTITUTO DE GESTÃO TERRITORIAL
 INSTITUTO DE GESTÃO TERRITORIAL

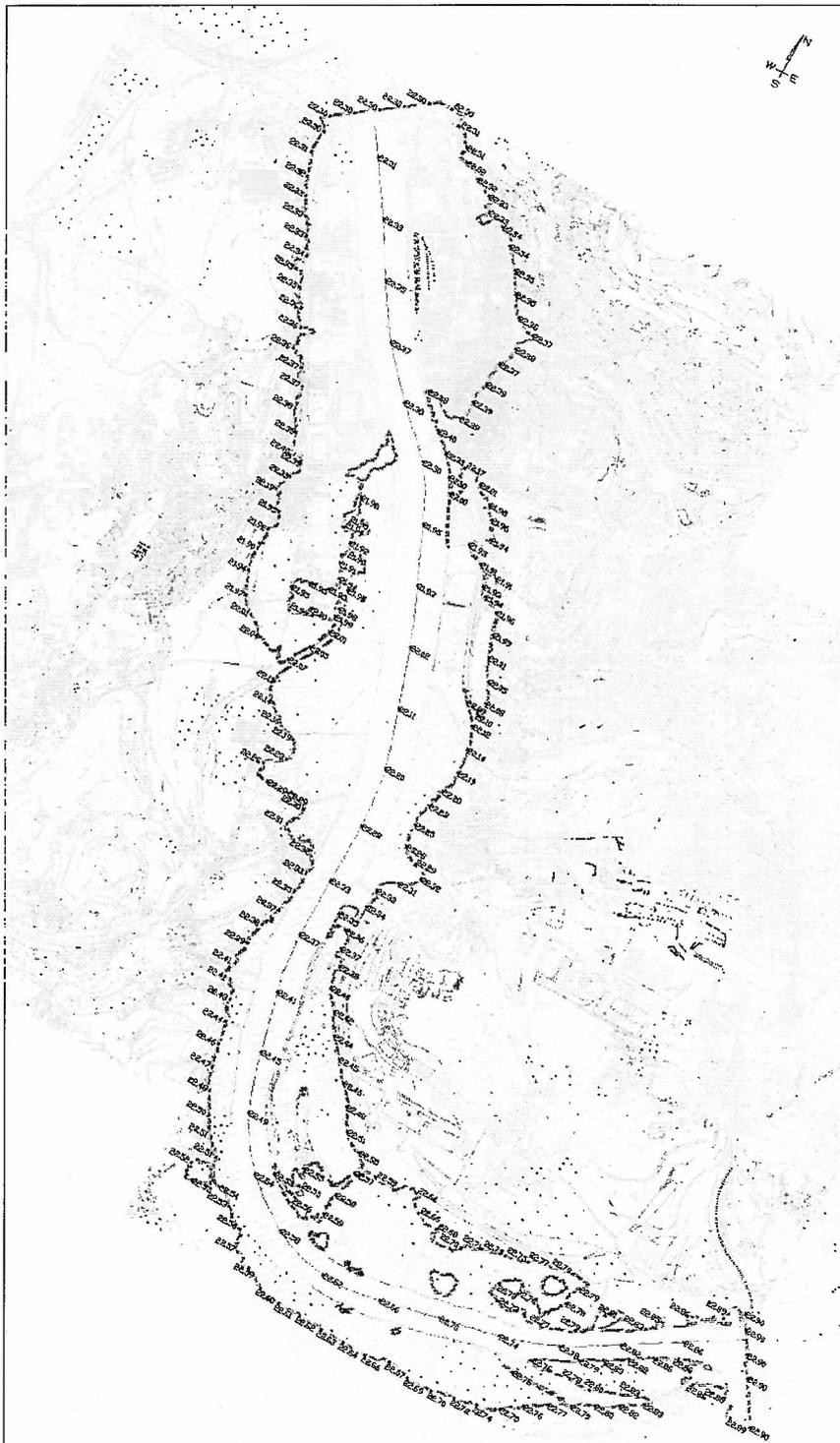
Coimbra Polis, S.A.
 Elaboração do Estado Hidrológico/Hidroalógico do Rio Mondego na Zona de Intervenção do Programa Polis em Coimbra
 Mapa de Interdição correspondente à Chamada Lusi de 22.0 II e a Lei 209/01, sem o procedimento Interdição do Mondego

Escala: 1:10.000
 0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
Data: 18.05.2002 Autor:



Zona de intervenção do Programa Polis em Coimbra
 Zona submostrada

<p>UNIVERSIDADE DE COIMBRA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE GEOMÁTICA</p>	<p>Coimbra Polis, S.A.</p> <p>Elaboração do Estudo Hidrológico/Hidráulico do Rio Mondego na Zona de Intervenção do Programa Polis em Coimbra</p>	<p>Escala: 1:5000</p> <p>Estado: Situação</p> <p>1:5000</p>
	<p>Mapa de localização correspondente à cota de 223m (anexo 200), com a ligação aos cursos aos a projectos dos Açudes e de Fontes</p>	<p>Data: 19.12.2002</p> <p>Desenho: 1</p>



Zona submersa

República Portuguesa

Município de Coimbra

Coimbra Polis, SA

Coimbra Polis, SA.

Elaboração do Estudo Hidrológico e Hidráulico do Rio Mondego na Zona de Intervenção do Programa Polis em Coimbra

Mapa de inundação correspondente a cheia natural "histórica" verificada em 28-30 Janeiro 1988

Escala	1:10.000
Legenda gráfica	
Data	Out. 2002
Desenho nº	7

