

MODELAÇÃO HIDROLÓGICA DE CHEIAS AFLUENTES A BARRAGENS COMO MECANISMO DE AUXÍLIO À GESTÃO DE ALBUFEIRAS.

Cláudia Brandão¹ e Rui Rodrigues¹

RESUMO:

As zonas de cabeceira das bacias hidrográficas são, geralmente, pouco monitorizadas em termos hidrometeorológicos devido a estarem confinadas em regiões montanhosas de difícil acesso. Por outro lado, devido à intensificação pluviométrica que aí se faz sentir conjugada com os fortes declives característicos das regiões montanhosas, essas regiões acabam por congregam um grande número de aproveitamentos hidroeléctricos.

Nesta situação encontra-se a bacia hidrográfica do rio Zêzere, um dos mais importantes afluentes portugueses do rio Tejo, com o pico da Serra da Estrela como cumeada. A exploração do potencial hidroeléctrico do Zêzere levou à construção de uma cascata de albufeiras onde a barragem do Cabril funciona como primeiro controlo da atenuação da propagação das cheias para jusante (função da conjugação das aflúências naturais com o grau de armazenamento verificado no momento).

Para que a gestão da exploração das albufeiras, localizadas ao longo do rio Zêzere, possa beneficiar da capacidade de previsão das cheias afluentes ao Cabril na optimização dos volumes armazenados para laminação de cheias e na identificação das regras de exploração mais adequadas, foi iniciado o processo de simulação dos escoamentos afluentes ao Cabril. Para tal foi utilizado um modelo hidrológico calibrado com registos de caudal, alguns provenientes da fase de construção da barragem, e outros provenientes da própria exploração recente da Barragem de Cabril. Como dados de entrada udométricos foram considerados apenas aqueles provenientes de postos udográficos com um número de anos suficiente para permitir a caracterização estatística dos máximos de precipitação.

Na modelação hidrológica utilizaram-se os episódios de precipitação registados nos postos udográficos de Penhas Douradas e Covilhã e os hidrogramas de cheia registados na estação hidrométrica de Ponte de Cabril (para as cheias anteriores à construção da barragem) e na Barragem de Cabril para cheia de 1996.

¹ Instituto da Água, Direcção de Serviços de Recursos Hídricos, Av. Almirante Gago Coutinho - 30 - 1000 Lisboa

1 - INTRODUÇÃO

O INAG tem vindo a desenvolver o Sistema de Vigilância e Alerta de Cheias (SVAC) prioritariamente para os grandes rios portugueses ainda que com evoluções recentes também no domínio das pequenas bacias urbanas, Lacerda *et al.* (1997).

Depois de uma fase inicial de instalação de limnígrafos com autonomia de funcionamento e capacidade de telemetria e, simultaneamente, de desenvolvimento de todo o *software* de suporte às comunicações e visualização dessa informação, o SVAC progrediu para o desenvolvimento de capacidades preditivas, hidráulicas e hidrológicas.

No domínio da simulação hidrológica foram identificadas as zonas de cabeceira a montante de aproveitamentos hidráulicos e com áreas drenantes significativas, como prioritárias para o desenvolvimento de modelos hidrológicos dedicados, calibrados para diferentes chuvadas críticas e diferentes estados de humidade do solo. Nesta fase de simulação pretende-se prover as entidades exploradoras dos aproveitamentos hidráulicos em zonas mais carenciadas de dados, de informações respeitantes a previsíveis volumes afluentes e sua distribuição temporal, como forma de se optimizarem os lançamentos e a exploração desses mesmos aproveitamentos hidráulicos sem por em risco a segurança.

A área drenante da bacia do Zêzere a montante da barragem do Cabril, pela sua magnitude expressiva (cerca de 2340 km²), foi seleccionada como caso piloto, dentro das áreas prioritárias, para desenvolvimento de um modelo hidrológico dedicado que, brevemente, será utilizado em tempo real e estimulado pelos *inputs* de precipitação provenientes de udómetros com telemetria a instalar nos postos udográficos da região com períodos de registo mais extensos (Figura 1).

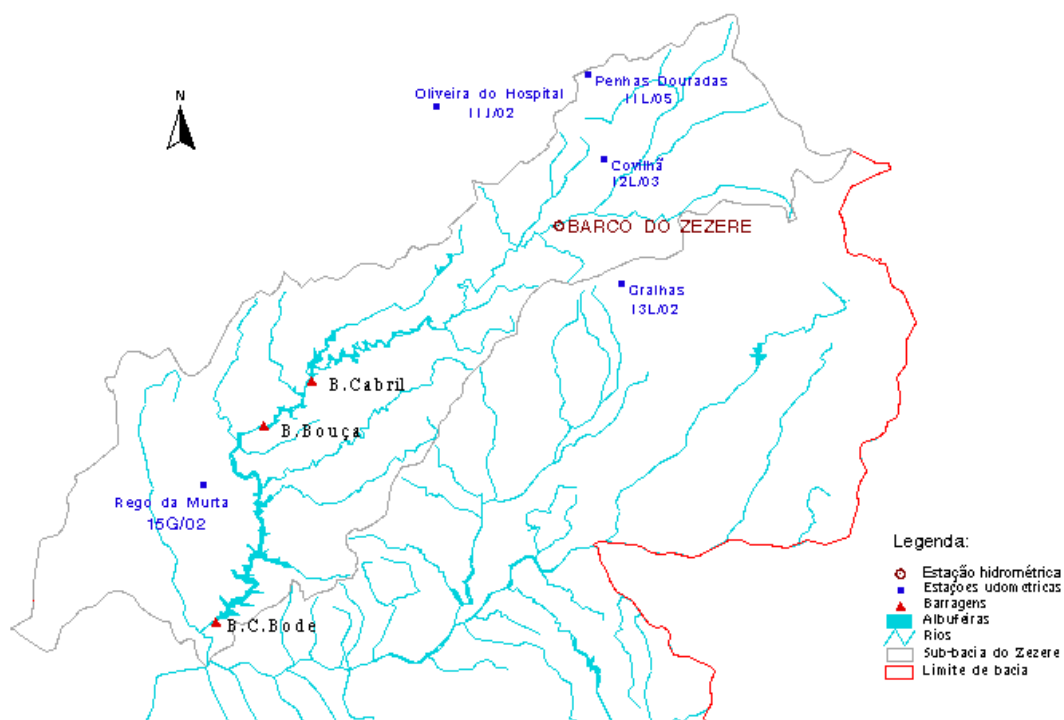


Figura 1 - Bacia do Zêzere e rede hidrometeorológica principal em termos de SVAC

Na mesma Figura apresenta-se a nova estação hidrométrica que está sendo instalada a montante da albufeira do Cabril (Barco do Zêzere) que servirá para o controlo das afluições em tempo real a Cabril.

O INAG neste desenvolvimento piloto está em estreita colaboração com a CPPE que possui uma experiência inestimável no conhecimento hidrológico da bacia hidrográfica, a par da experiência da exploração da cascata do Zêzere.

O sistema hidrológico do rio Zêzere na actividade de modelação é representado conceptualmente pelo modelo hidrológico U. S. Army Corps of Engineers (1981) HEC-1. Numa primeira fase, este modelo determinístico e estacionário (sem variação, portanto, quer das equações de transformação da precipitação em escoamento, quer dos seus parâmetros no tempo), será utilizado na sua modalidade agregada passando, numa segunda fase, a semi-distribuído pela consideração, de sub-bacias dos afluentes do rio Zêzere, sendo os principais a ribeira da Meimoa, a ribeira da Pampilhosa e a ribeira das Cortes.

Como forma de assegurar que os parâmetros de calibração responderão com boa precisão não só aos *inputs* de precipitação como também a diferentes condições de humidade da bacia foram seleccionadas para o presente artigo três situações hidrológicas de persistência pluviosa de modo a caracterizar a evolução do processo de calibração do modelo.

Na Figura 2 é mostrada uma dessas situações onde a influência de condições de humidade antecedente elevada contribuíram para uma rápida concentração da segunda cheia.

Neste estudo foi já possível utilizar os dados hidrométricos da década de quarenta arquivados no INAG dado os valores udográficos de dois postos da região (Penhas Douradas e Covilhã) se encontrarem a ser digitalizados, como parte de um outro projecto do INAG, iniciado em 1990, Rodrigues (1990) Brandão (1995), para o estabelecimento de curvas PDF a nível nacional com uma densidade de postos aceitável para a caracterização de zonas com preponderância de fenómenos convectivos sobre os fenómenos de origem frontal.

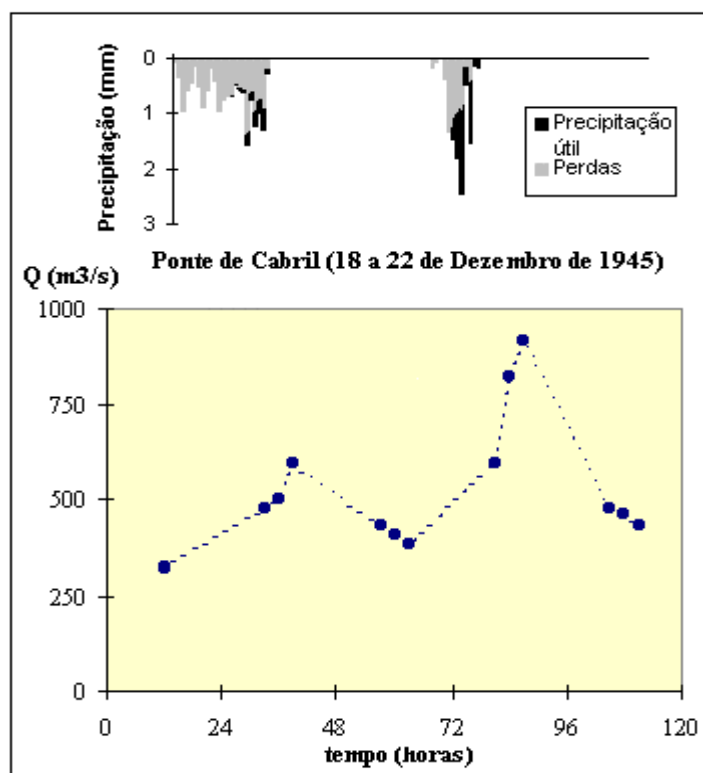


Figura 2 - Cheia em Ponte de Cabril de 18 a 22 de Dezembro de 1945

As calibrações do modelo efectuadas, até ao momento, para estes dois postos apenas permitem desde já uma representação hidrológica credível do sistema pois dividem a bacia numa parte de altitude e outra de vale. Para além disso facultam, desde já, um conjunto de parâmetros calibrados do modelo úteis para estimativas futuras em tempo real se só se esses dois postos estiverem a transmitir dados em tempo real, quer seja por condicionamentos logísticos quer seja por falha nos outros tele-udómetros a instalar (Figura 1).

Descrevem-se seguidamente as fases que levaram às primeiras calibrações do modelo, agrupadas em torno dos estudos da precipitação e do escoamento. Relembra-se que apenas os 2 238 km² de cabeceira dos 4 996 km² totais da área da bacia se encontram sujeitos a modelação.

2 - PRECIPITAÇÃO

Para os estudos de simulação das afluições em tempo real ao Cabril seleccionaram-se cinco postos udográficos influentes sobre a bacia hidrográfica do rio Zêzere que registam a precipitação há mais de 30 anos. Estes postos udográficos têm dois tipos de registo contínuo: o de revolução diária, nos postos de Penhas Douradas e Covilhã; o de revolução semanal (menos preciso) nos restantes postos (Oliveira do Hospital, Gralhas e Rego da Murta).

A área de influência e o tamanho da série dos registos de cada um dos cinco postos udográficos com influência sobre a bacia do rio Zêzere é apresentada no Quadro 1 bem como uma breve caracterização da localização, tipo de aparelho e extensão da série de registo. Na primeira fase do estudo o posto da Covilhã adquire as áreas de influência dos demais postos exceptuando o de Penhas Douradas.

Quadro 1

Caracterização dos postos udográficos com influência na bacia do rio Zêzere

Identificação	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Série de Registos	Tipo de Registo	Área de Influência (%)
Penhas Douradas	40°24''	07°33''	1380	1941-	Sifão diário	20,7
Covilhã	40°17''	07°31''	745	1943-	Sifão diário	39,4
Oliveira do Hospital	40°22''	07°52''	480	1930-	Báscula Semanal	6,7
Gralhas *	40°05''	07°29''	910	1946-1984	Báscula Semanal	33,0
Rego da Murta	39°46''	08°21''	230	1933-	Báscula Semanal	7,0

* extinta.

Em virtude do grande volume de dados e do curto tempo disponível para se obterem as primeiras estimativas dos parâmetros do modelo hidrológico, concentraram-se as actividades de análise e pré-processamento nos postos udográficos de Penhas Douradas e Covilhã.

Foram analisados 6 560 udogramas de Penhas Douradas (18 anos de registos) e 15 195 udogramas de Covilhã (43 anos de registos).

Construíram-se seis séries de precipitação máxima anual correspondentes às durações 6, 12, 24, 48, 72 e 96 h e oito séries de intensidade máxima anual correspondentes às durações 5, 10, 15 e 30 min e 1, 2, 6 e 12 h, para esses dois postos udográficos. Para cada série de máximos de precipitação e de intensidade ajustou-se a função de distribuição de probabilidades de Gumbel para posterior construção, a partir do resultado do ajustamento estatístico, das linhas de possibilidade udométrica ou linhas PDF (P-precipitação, D-duração, F-frequência) e as curvas IDF (I-intensidade, D-duração, F-frequência) para os períodos de retorno entre 2 e 1000 anos. As curvas IDF e as linhas PDF apresentam-se na Figura 3 e 4, respectivamente.

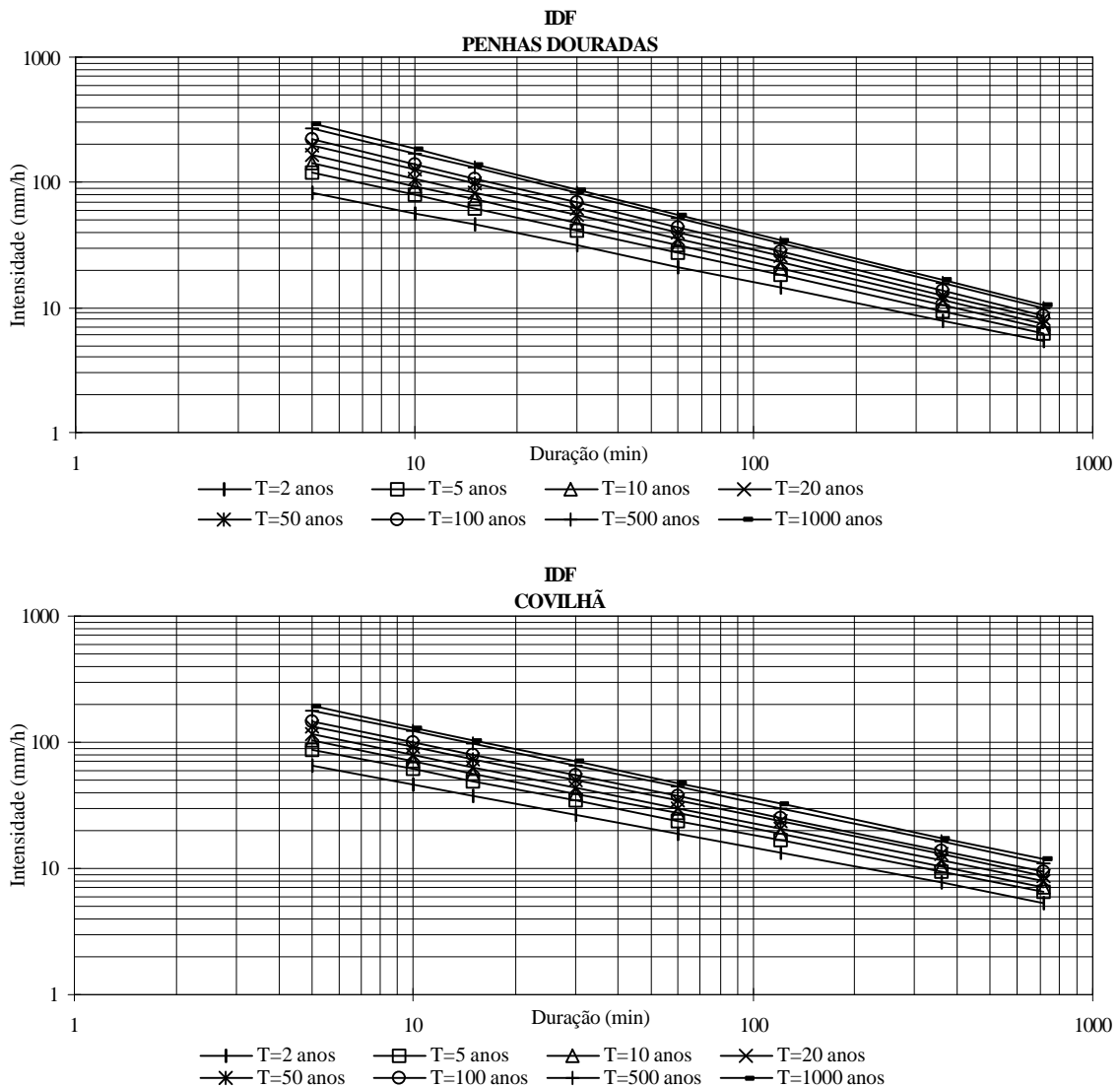


Figura 3 - Curvas IDF (Intensidade-Duração-Frequência) dos postos udográficos de Penhas Douradas e Covilhã

No Quadro 2 indicam-se os parâmetros a e b das curvas IDF que são expressas por

$$I=aD^b \tag{1}$$

onde I e D representam respectivamente a intensidade (mm/h) e D a duração (min).

Quadro 2

Parâmetros das curvas Intensidade-Duração-Frequência dos postos udográficos de Penhas Douradas e Covilhã

Postos Udográficos	Parâmetros	Periodo de Retorno (anos)							
		1000	500	100	50	20	10	5	2
Penhas	a	859,553	787,399	620,866	549,522	455,321	383,539	309,986	202,49
Douradas	b	-0,669	-0,664	-0,649	-0,641	-0,626	-0,612	-0,593	-0,55
Covilhã	a	472,942	438,14	357,356	322,509	276,147	240,471	203,469	148,159
	b	-0,562	-0,56	-0,552	-0,548	-0,541	-0,534	-0,524	-0,504

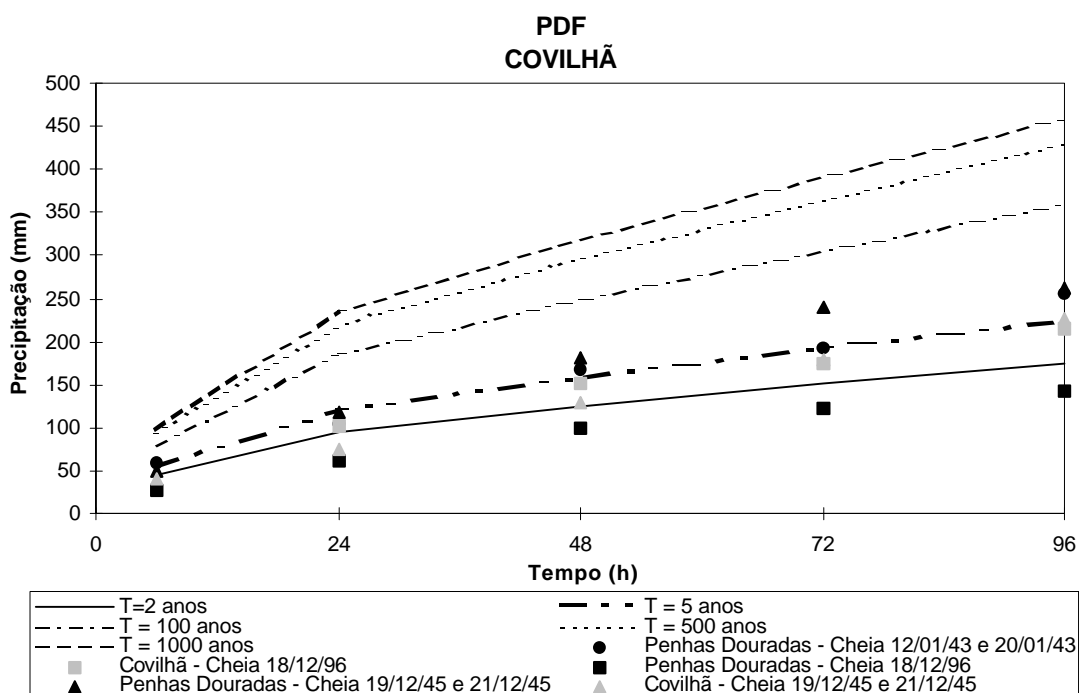
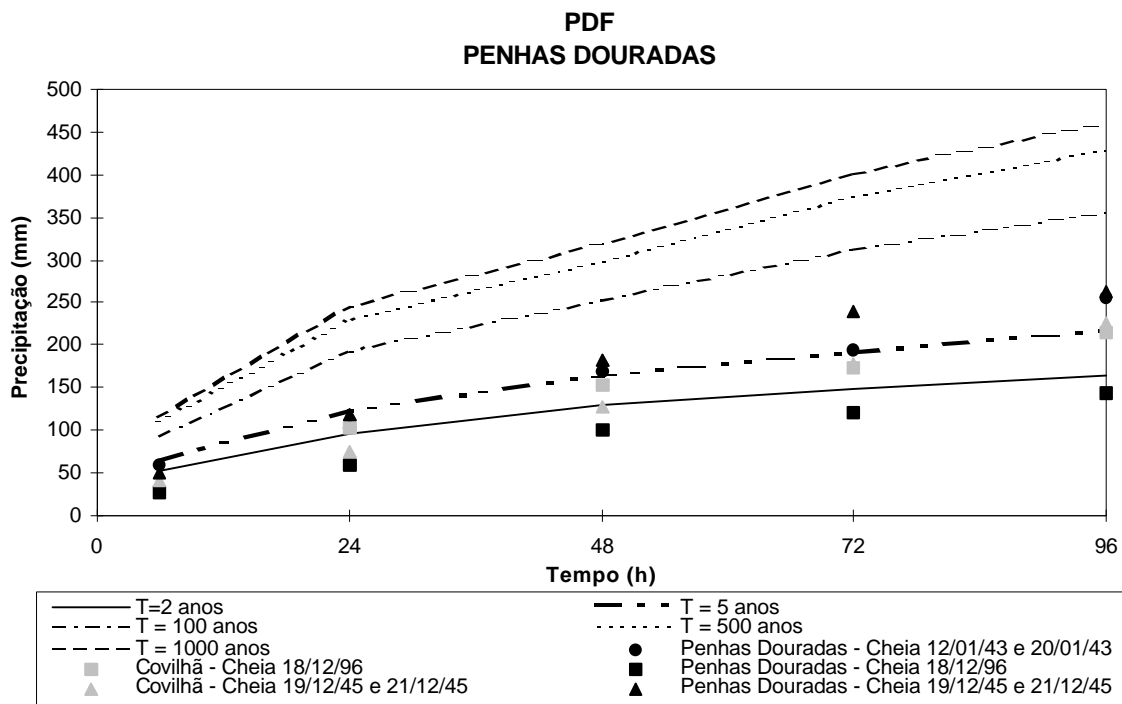


Figura 4 - PDFs estabelecidas para os dois postos udográficos utilizados no modelo HEC-1

Para uma noção do grau de excepcionalidade dos episódios pluviográficos utilizados na calibração do modelo sobrepõem-se, na mesma figura, os valores das chuvas ocorridas em ambos os postos (Penhas Douradas e Covilhã), sendo visível que as precipitação foram sempre mais excepcionais nas cabeceiras do que no vale excepto nas cheias mais recentes de 1996. Mesmo para durações superiores a 48 horas os períodos de retorno dos episódios pluviosos

analisados localizaram-se sempre próximos ou inferiores aos 5 anos excepto em Dezembro de 1945, quando os valores udográficos em Penhas Douradas para 72 horas corresponderam a períodos de retorno entre os 20 e os 50 anos.

3 - ESCOAMENTO

Na modelação hidrológica utilizaram-se os episódios de precipitação registados nos postos udográficos de Penhas Douradas e Covilhã e os hidrogramas de cheia registados na estação hidrométrica de Ponte de Cabril (para as cheias anteriores à construção da barragem) e na Barragem de Cabril para cheia de 1996.

Até ao presente foram analisadas seis cheias incluídas em três episódios de longa duração, dois registadas em Ponte de Cabril, e um na Barragem de Cabril. No Quadro 3 identificam-se as cheias modeladas, recorrendo ao HEC-1 (1981).

Quadro 3
Cheias modeladas do rio Zêzere

Identificação	Duração do hidrograma de Cheia (h)	Caudal de ponta observado (m ³ /s)
12/Jan/43	96	437,4
20/Jan/43	132	1238,9
19/Dez/45	51	592,7
21/Dez/45	48	918,0
18/Dez/96	66	771,0
21/Dez/96	42	763,0

Os episódios utilizados na modelação têm diferentes discretizações, dependentes da frequência da leitura hidrométrica que lhes deu origem (tempo de amostragem) e do detalhe necessário à modelação. Assim, os episódios de 1996 têm discretização horária, os de 1945 e o primeiro episódio de 1943 têm discretização de três horas, e o segundo episódio de 1943 tem discretização de doze horas.

O compasso de cálculo foi 15 min, excepto na modelação das cheias ocorridas em Janeiro de 1943 que foi 20 min, devido ao grande tempo de base do hidrograma de cheia.

Apesar do tempo de amostragem do episódio de cheias de Janeiro de 1943 parecer inadequado à modelação de caudais de cheia, a permanência da precipitação sobre a bacia fez com que a resposta em termos de caudal fosse monótona em termos de configuração dos hidrogramas de cheias, especialmente o segundo (Figura 5), potenciando esse acontecimento hidrológico para o estudo do efeito do estado antecedente de humidade na concentração e magnitude das cheias. Ainda que o valor das pontas de cheia possa sofrer um ligeiro incremento face ao máximo lido, o volume de cheia está praticamente determinado.

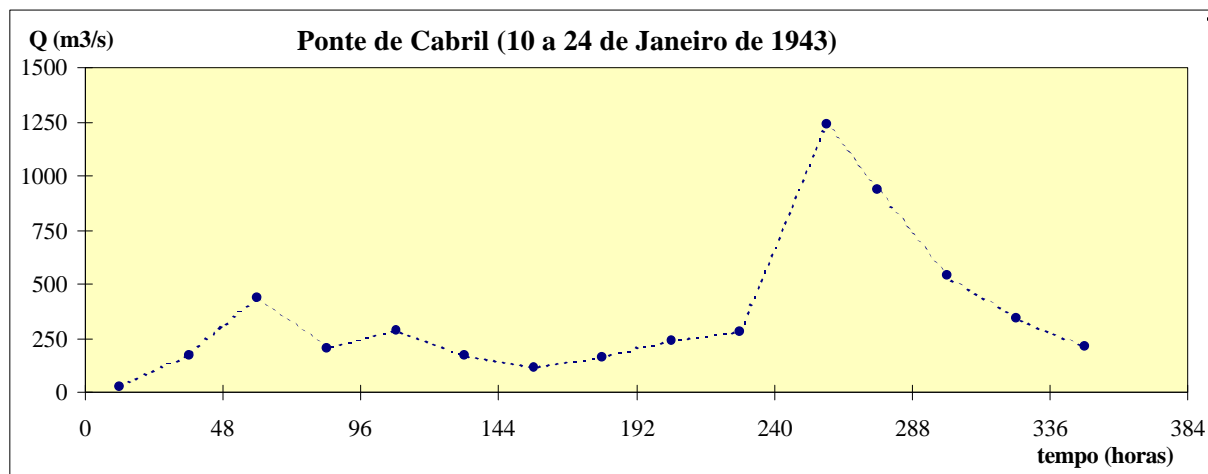


Figura 5 - Episódio de cheia com duração de 14 dias em Janeiro de 1943 no Zêzere em Ponte de Cabril

4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

No Quadro 4 confrontam-se os resultados obtidos da modelação das seis cheias ocorridas no rio Zêzere com os valores registados na secção Ponte de Cabril e na Barragem de Cabril, e listam-se os parâmetros de calibração obtidos.

Na Figura é apresentada graficamente essa confrontação de resultados para melhor identificação quer dos volumes modelados quer da relação das precipitações úteis para o total pluviométrico de cada chuva.

Quadro 4
Resultados das modelações

Período	Q ponta observado (m³/s)	Q ponta simulado (m³/s)	CN	Tempo de atraso, Lag (h)	Tempo para o pico (h)	Tempo de concentração (h)	STRTQ (m³/s)	QRCSN (m³/s)	RTIOR	STRTL (mm)
12/Jan/43	437,4	438,3	48,40	5,5	17,5	9,2	173,5	415	1,019	54,16
20/Jan/43	1238,9	1238,9	95,85	17,7	39,5	29,5	258,4	1200	1,019	2,20
19/Dez/45	592,7	592,6	61,25	6,3	21,3	10,5	321,6	570	1,019	32,14
21/Dez/45	918,0	918,2	88,02	15,0	23,0	25,0	380,8	472	1,004	6,91
18/Dez/96	771,0	771,2	69,20	15,8	28,8	26,3	150,0	596	1,05	22,61
21/Dez/96	763,0	762,7	76,48	5,3	14,3	8,8	303,0	700	1,019	15,62

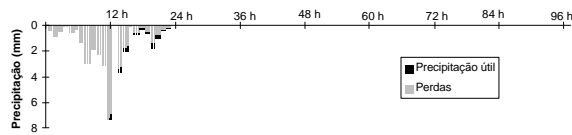
STRTQ - Caudal inicial.

QRCSN - Caudal de início de recessão do escoamento de base.

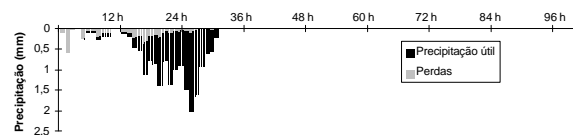
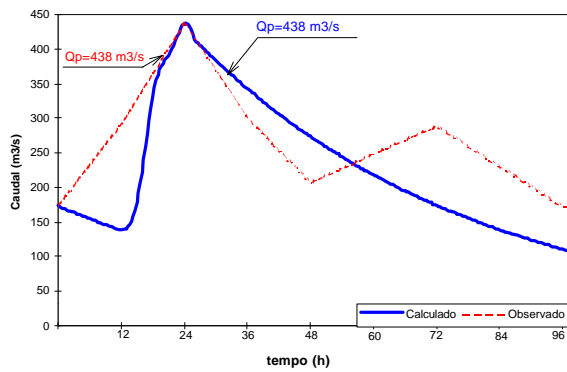
RTIOR - Constante de recessão.

STRTL - Perdas iniciais.

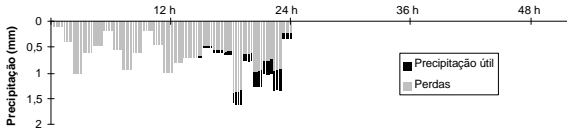
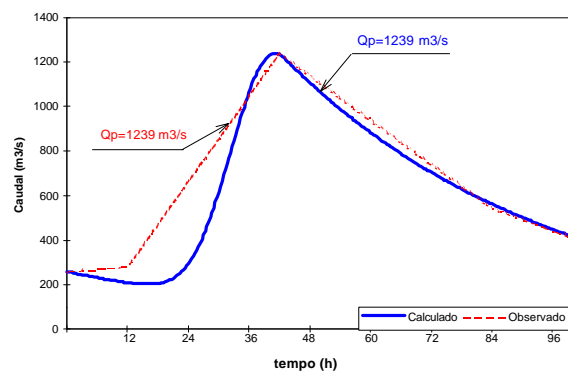
De uma maneira geral obtiveram-se boas reproduções do comportamento hidrológico da bacia para vários estados de humidade antecedente e intensidade pluviográfica, apesar da extensa área de drenagem agregada e do escaso número de postos udográficos utilizados.



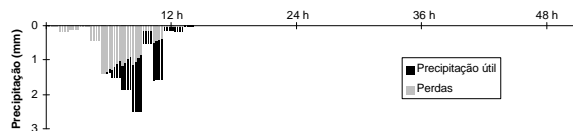
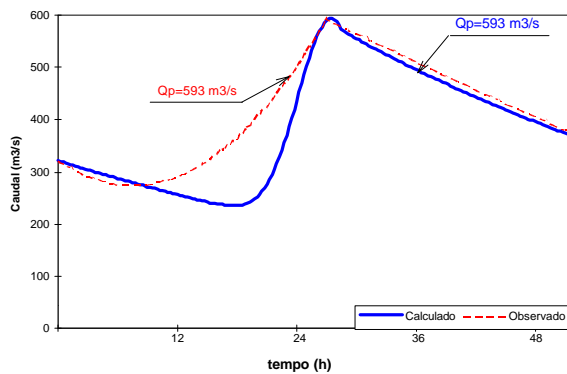
CHEIA DE 12 DE JANEIRO 1943



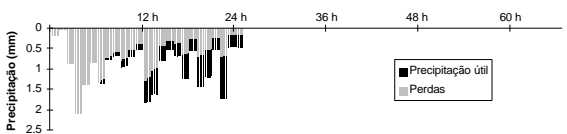
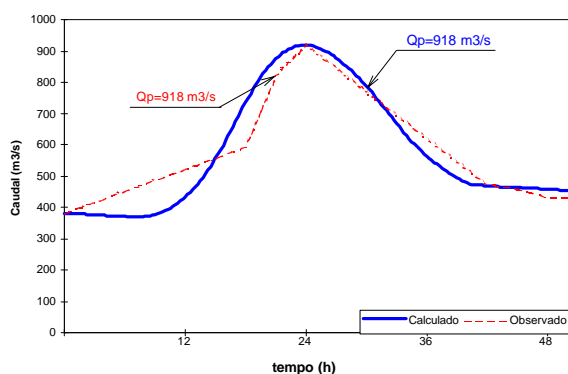
CHEIA DE 20 DE JANEIRO 1943



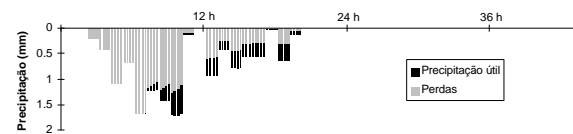
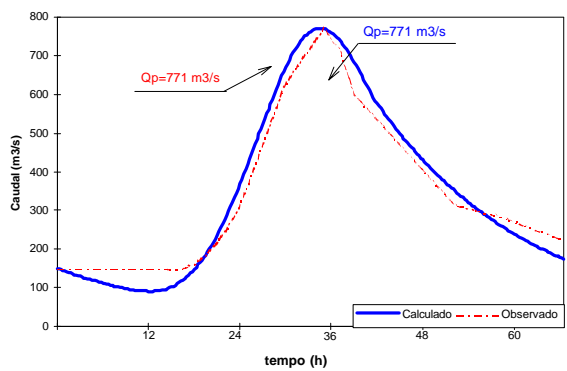
CHEIA DE 19 DE JANEIRO 1945



CHEIA DE 21 DE JANEIRO 1945



CHEIA DE 18 DE DEZEMBRO 1996



CHEIA DE 20 DE DEZEMBRO 1996

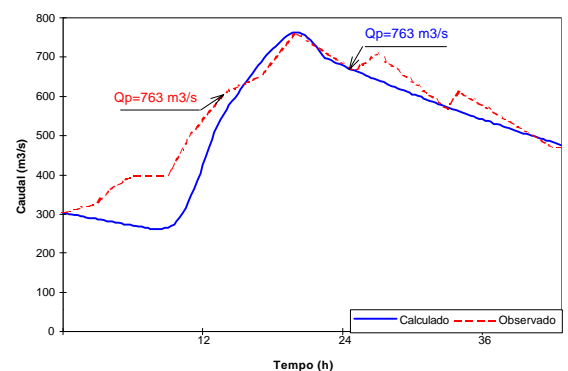


Figura 6 - Cheias modeladas ocorridas no rio Zêzere em Ponte de Cabril e Barragem de Cabril

Com os episódios simulados conseguiram-se primeiras estimativas dos parâmetros do modelo, importantes para utilização futura em situações de previsão. No Quadro 4 pode ser observado como a evolução e persistência de episódios pluviosos contribui para o aumento do CN (*curve number*) e para a diminuição acentuada das perdas iniciais (STRTL).

Digno de nota, e característico da hidrogeologia da bacia, é a constante de recessão que apresentou um valor estabilizado em torno de 1,019.

O valor do tempo de concentração oscilou entre duas ordens de grandeza: 10 e 25 horas. Ainda que o estado de humidade antecedente possa ter influência na contribuição da área drenante, grande parte da justificação poderá estar associada à forma do hidrograma: sempre que o hidrograma era bem definido e unimodal o tempo de concentração atingia valores próximos das 25 horas; os hidrogramas bi- e tri-modais (onde a localização do tempo de concentração é mais complexa) apresentaram valores próximos das 10 horas.

Os hidrogramas plurimodais poderão também ser provenientes de contribuições das sub-bacias desfazadas no tempo, quer por diferentes isócronas envolvidas quer por deslocamentos das perturbações atmosféricas sobre a bacia. Ainda que a consideração de mais postos udográficos e a individualização dos sub-sistemas drenantes da bacia possam aumentar a definição das estimativas, possui-se já uma ferramenta expedita e agregada que reproduz os picos e os volumes de cheia para descrições muito rudimentares da pluviometria na bacia.

5 - DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como foi já referido uma das principais preocupações na extensão do presente modelo é a sua consideração como semi-distribuído. Este passo acarreta um trabalho ciclópico de processamento de mais informação de base que foi já iniciado.

Paralelamente, e com a obtenção de mais dados para um número estatisticamente significativo de outros episódios de cheia, irão ser geradas as cheias prováveis para períodos de retorno de referência (100, 500 e 1000 anos) para controlo da informação em tempo real proveniente da estação hidrométrica de Barco do Zêzere. Para estas simulações torna-se necessário uma identificação da influência das condições antecedentes de humidade nos parâmetros iniciais do modelo tendo já sido esboçada uma primeira função desse tipo (Fig. 7).

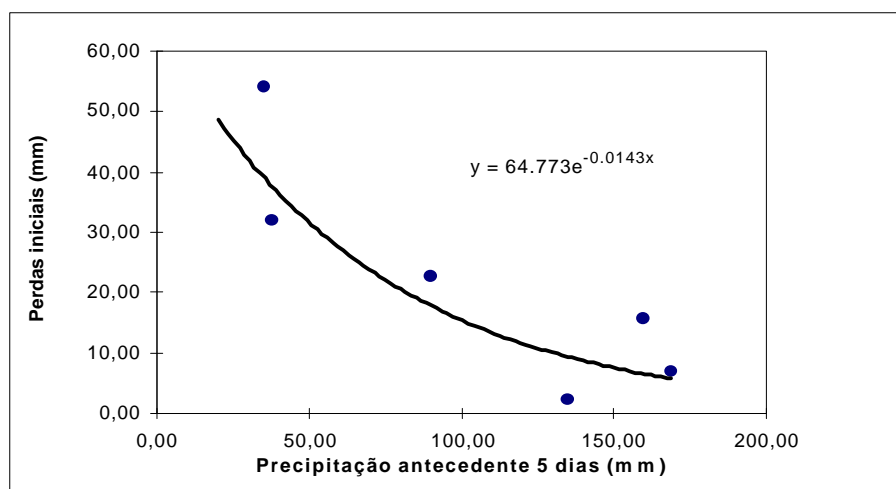


Figura 7 - Relação entre STRTL e a precipitação antecedente acumulada em cinco dias.

Outro passo significativo é o estudo da evolução das perturbações atmosféricas sobre a bacia. Através do estudo estocástico das séries diárias de precipitação a barlavento e sotavento da serra da Estrela pretendem-se obter previsões de volumes diários a serem posteriormente desagregados em termos horários pelos hietogramas de projecto identificados na digitalização e pré-processamento dos udogramas. Este tipo de *downscaling* temporal (que tem implícito um *downscaling* espacial, já que os fenómenos pluviosos com expressão diária têm uma abrangência espacial diferente dos horários e sub-horários) irá estar apoiado nos dados dos teleudómetros e, associados ao modelo semi-distribuído, permitirá ter previsões mais credíveis quer da ocorrência quer da propagação dos caudais na bacia.

BIBLIOGRAFIA

BRANDÃO, C. C. - *Análise de Precipitações Intensas*, Tese de Mestrado, IST, Outubro 1995.

HEC-1 - *Flood Hydrograph Package*, Water Resources Support Center, U. S. Army Corps of Engineers, Setembro, 1990.

LACERDA, M. A., *et al.*, 1997, *O Sistema de Vigilância e Alerta de Cheias*, INAG, Março, na Internet http://www.inag/snirh/main_menu_frame.html.

RODRIGUES, R. R. - *Caracterização de Episódios Meteorológicos Extremos*, Sotavento Algarvio, DGRN, Junho, 1990.