

dinâmica fluvial e ordenamento do território

(Programa de Unidade Curricular do 2º Ciclo)

Núcleo de Investigação em Sistemas Litorais e Fluviais:
Dinâmicas, Mudanças Ambientais e Ordenamento do Território SLIF – 6
Centro de Estudos Geográficos - Universidade de Lisboa 2009

COLEÇÃO SLIF

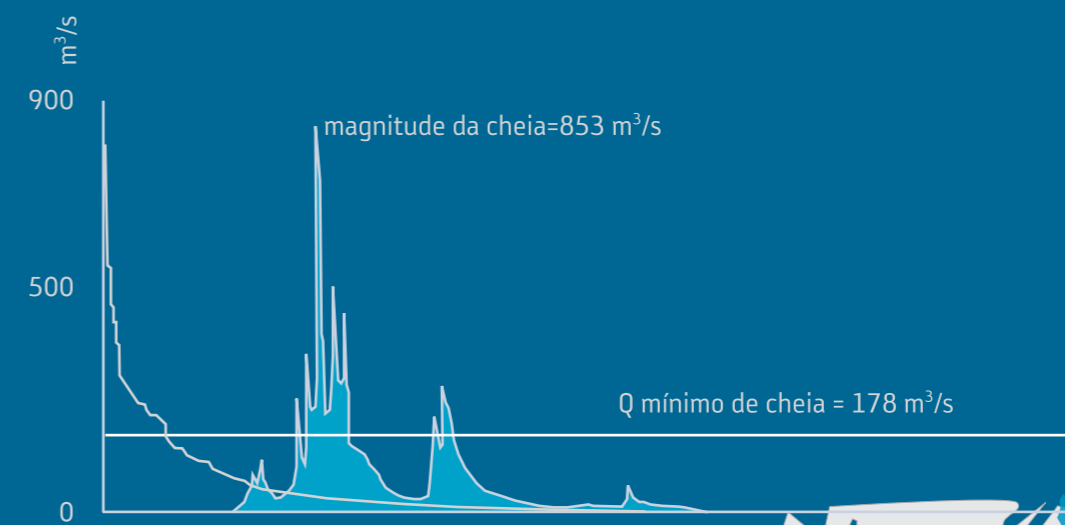
A. Ramos-Pereira (2008) - *Programa de Sistemas Litorais: Dinâmicas e Ordenamento do Território*. Linha de Investigação em Dinâmica Litoral e Fluvial, DILIF-5, Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa.

M. Neves (2006) - *Os Sistemas Litorais da Estremadura. Classificação e Caracterização Geomorfológica*. Linha de Investigação em Dinâmica Litoral e Fluvial, DILIF-4, Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa.

C. Ramos (2005) - *Programa de Hidrogeografia*. Linha de Investigação em Dinâmica Litoral e Fluvial, DILIF-3, Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa.

P. Oliveira (2003) - *Inundações na cidade de Lisboa - Estudo de Hidrogeografia Urbana*. Linha de Investigação em Dinâmica Litoral e Fluvial, DILIF-2, Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa.

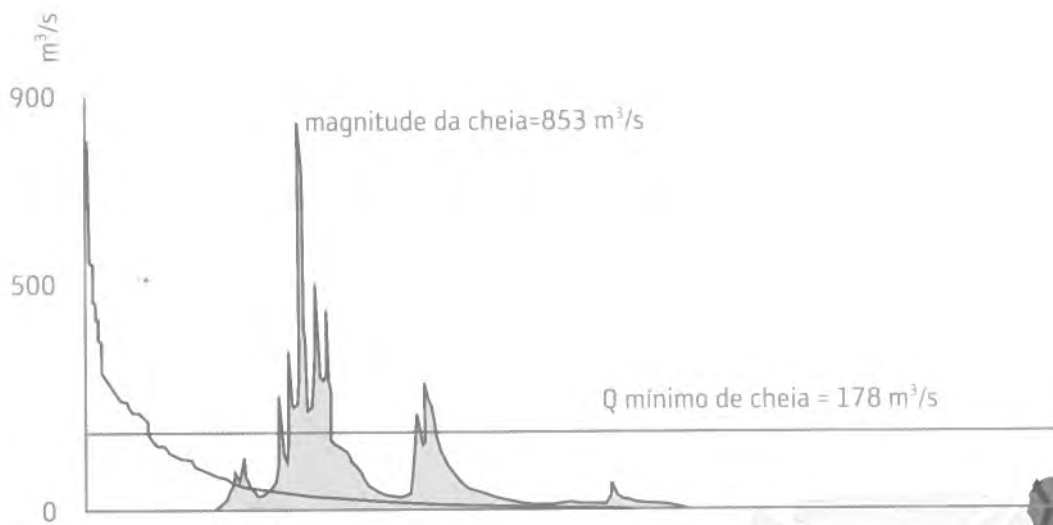
A. Ramos -Pereira; C. Ramos & Colaboradores (2000) - *Contrastes Espaciais Concelhios de Algumas Componentes Ambientais em Portugal Continental*. Linha de Investigação em Dinâmica Litoral e Fluvial, DILIF-1, Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa.



dinâmica fluvial e ordenamento do território

(Programa de Unidade Curricular do 2º Ciclo)

Núcleo de Investigação em Sistemas Litorais e Fluviais:
Dinâmicas, Mudanças Ambientais e Ordenamento do Território SLIF - 6
Centro de Estudos Geográficos - Universidade de Lisboa 2009



Ficha Técnica:

Título: Dinâmica Fluvial e Ordenamento do Território

Autor: Catarina Ramos

Unidade de Investigação: Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa

Edição e Distribuição: Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa

Design e Produção Gráfica: André Luz | info@andreluzdesign.com

Impressão: Rainho & Neves, Lda

Tiragem: 300 exemplares

ISBN: 978-972-636-195-4

"You cannot step in the same river twice,
for the second time it is not the same river."

Heráclito

Ao IGOT e a todos os que nele acreditam

Nota prévia:

Devido à reorganização interna do Centro de Estudos Geográficos, operada em 2009, a antiga Linha de Investigação em Dinâmica Litoral e Fluvial (DILIF) deu lugar ao Núcleo de Investigação em Sistemas Litorais e Fluviais: Dinâmicas, Mudanças Ambientais e Ordenamento do Território (SLIF). Deste modo, o presente relatório do SLIF continua a linha editorial da extinta DILIF e corresponde ao Programa da unidade curricular do 2º ciclo, apresentada pela signatária aquando das suas provas de Agregação, realizadas em 2009.

Este Programa foi concebido na sequência da licenciatura em Geografia de 3 anos, de acordo com o modelo de Bolonha.

ÍNDICE

I. Introdução	11
II. Objectivos, competências, métodos de ensino-aprendizagem e avaliação	15
1. Objectivos gerais e competências	15
2. Objectivos específicos	16
3. Métodos de ensino-aprendizagem	17
4. Avaliação	17
III. Programa	21
1. Plano do programa	21
2. Planificação das aulas teóricas e práticas	22
IV. Desenvolvimento do programa	25
Módulo I. As cheias: elemento extremo do regime fluvial	25
Módulo II. Bacias hidrográficas e suas componentes como factores condicionantes das cheias	33
Módulo III. Fundos de vale: formas, processos e dinâmica	53
Módulo IV. Dinâmica fluvial e intervenção humana	73
V. Bibliografia	87
1. Bibliografia fundamental	87
2. Bibliografia específica	89
Módulo I	89
Módulo II	90
Módulo III	91
Módulo IV	93



I. INTRODUÇÃO

O Processo de Bolonha veio modificar drasticamente a organização curricular dos estudos graduados e pós-graduados no Departamento de Geografia da Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa (FLUL). Com este Processo, os referidos estudos passaram a estar organizados em 3 ciclos: 1º ciclo (licenciatura) - 3 anos; 2º ciclo (mestrado) - 2 anos; 3º ciclo (doutoramento) - 3 anos. No conjunto, a duração dos estudos graduados e pós-graduados diminuiu, tendo o 1º ciclo um carácter generalista ("licenciatura de banda larga"), enquanto nos 2º e 3º ciclos se desenvolve uma progressiva especialização.

Na licenciatura pós-Bolonha, a Hidrogeografia passou a ser leccionada no módulo de Hidrossistemas (5 ECTS), pertencente à disciplina de Hidrossistemas e Ecossistemas, obrigatória para todos os alunos do 2º ano. Neste ano foi ainda criada uma opção, designada Hidroclimatologia, cujos conteúdos programáticos são essencialmente de climatologia, mas onde são leccionados métodos e técnicas de análise da relação precipitação - escoamento.

Por outro lado, no âmbito da Geomorfologia, existem apenas duas aulas teóricas, dadas na disciplina de Dinâmica da Litosfera e Sistemas Morfogenéticos (1º ano do 1º ciclo) sobre o sistema fluvial.

À data da publicação deste Programa, decorre o processo de Acreditação dos Cursos do 1º, 2º e 3º ciclos do IGOT - Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, nova Unidade Orgânica da Universidade de Lisboa, que integra o ex-Departamento de Geografia da FLUL e o Centro de Estudos Geográficos da UL. Nesse processo de acreditação foi proposta uma reestruturação da actual Licenciatura em Geografia e a criação de uma nova Licenciatura em Planeamento e Gestão do Território. Em ambas foi integrada uma unidade curricular obrigatória de 6 ECTS, designada Análise e Gestão de Recursos Hídricos, que além de herdar, praticamente, os conteúdos curriculares do módulo de Hidrossistemas da disciplina de Hidrossistemas e Ecossistemas, entretanto extinta, tem ainda um ponto programático dedicado aos Planos de Recursos Hídricos (Plano Nacional da Água, Planos Regionais da Água e Planos de Bacia). É esta disciplina do 1º ciclo que precede a unida-

de curricular que agora se apresenta, no que respeita ao elenco formativo dos alunos no domínio da Hidrogeografia, recursos hídricos e riscos hidrológicos.

Genericamente, os estudos da dinâmica actual dos fundos de vale, têm sido pouco desenvolvidos por parte dos geógrafos portugueses, que se dedicaram a outros domínios temáticos da Geomorfologia.

O interesse da autora deste programa pela dinâmica actual dos fundos de vale surgiu no âmbito dos Projectos IDAFRE e GEOTARIF, ligado à temática das cheias (tema central da dissertação de doutoramento). As cheias podem, em poucas décadas, levar à mudança de localização do canal fluvial nas planícies aluviais, e modificar, em poucos dias ou, mesmo horas, quer o leito ordinário, quer o leito maior dos cursos de água. Por outro lado, a crescente pressão humana, sobre as planícies aluviais e sobre os leitos de cheia das áreas urbanas e suburbanas, tem levado a uma ocupação desajustada destes territórios, de grande dinâmica hidrológica, potenciando o risco a eles associado. Pela sua complexidade, a temática das cheias é objecto de estudo de diferentes especialistas, com visões diferentes, mas complementares, nos quais os geógrafos se inscrevem, pela sua visão integradora dos processos naturais e antrópicos que nelas intervêm, e pelo contributo que podem dar na resolução ou minimização dos efeitos nefastos deste fenómeno hidrológico.

Num momento, de particular importância, para a Escola de Geografia de Lisboa, devido ao seu processo de autonomia e à criação do novo Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa, pareceu à autora deste programa, que deveria impôr a si própria o desafio de criar uma nova unidade curricular, cujo tema central são as cheias, numa tripla abordagem: hidrológica, geomorfologia e de ordenamento e gestão territorial.

Pela especificidade do tema, e pelas razões acima apontadas, a disciplina de "Dinâmica Fluvial e Ordenamento do Território" inscreve-se no 2º ciclo, ou seja, aquele em que o IGOT mais irá apostar na sua futura oferta formativa.

Dezembro de 2009
Catarina Ramos



II.
**OBJECTIVOS, COMPETÊNCIAS, MÉTODOS DE
ENSINO-APRENDIZAGEM E AVALIAÇÃO**

1. OBJECTIVOS GERAIS E COMPETÊNCIAS

A unidade curricular “Dinâmica Fluvial e Ordenamento do Território” foi concebida, pelos motivos expostos na Introdução a este programa, para integrar estudos pós-graduados no âmbito de mestrados em Geografia Física, Riscos Naturais e Ordenamento do Território. O seu objecto de estudo é o sistema fluvial. Os rios são um dos agentes erosivos mais importantes do planeta e os vales, que eles entalham, são uma das formas de relevo mais generalizadas nos continentes. De todos os elementos dos regimes fluviais, as cheias são particularmente importantes, não só porque é durante a sua ocorrência que os rios atingem o máximo da sua capacidade modeladora, mas também porque alargam a sua área de influência territorial, em várias dezenas de metros de altura, nos vales encaixados, e em várias centenas ou milhares de km² de extensão, nas grandes planícies de inundação. As cheias são, por isso, o principal elemento modelador dos fundos de vale.

O objectivo central desta unidade curricular é o estudo das cheias, numa perspectiva eminentemente geográfica, ou seja, a diversas escalas de análise, a saber: (i) a dos continentes (regiões hidroclimáticas das cheias), (ii) a das bacias hidrográficas, (iii) a dos fundos de vale e (iv) a dos canais fluviais. Este tipo de abordagem tem como triplo objectivo: (i) mostrar que as causas das cheias se manifestam a diversas escalas espaciais, (ii) que os factores que as condicionam têm graus de importância diferentes, consoante essas mesmas escalas, e (iii) que os tipos de intervenção territorial, que podem ser implementados no sentido de minimizar as suas consequências, também são diferentes, à escala da bacia, do fundo de vale ou do canal fluvial.

As cheias manifestam-se a várias escalas temporais: meses, semanas, dias e horas, pelo que os métodos quantitativos são essenciais nesta disciplina, a par dos qualitativos (onde se inserem a observação e interpretação de campo, das formas e depósitos fluviais).

Os cursos de água variam muito na sua dimensão e dinamismo, e o seu comportamento depende das características climáticas e biofísicas das suas bacias hidrográficas, pelo que foi dada especial importância à classificação das formas, processos e fenómenos de natureza hidrogeomorfológica, em análise. A classificação ajuda a identificar as referidas formas, processos e fenómenos, agrupando-os em classes que sistematizam as respectivas semelhanças e diferenças, facilitando a análise comparativa entre os diversos sistemas fluviais. Saliente-se que a classificação é utilizada numa perspectiva dinâmica, no sentido de ajudar a perceber, não só a fase evolutiva em que se encontra o fundo de vale e o canal fluvial, mas também o seu grau de (des)equilíbrio, devido essencialmente à intervenção humana.

A integração das componentes espaciais e temporais é feita com base numa análise sistémica, essencial para a compreensão do funcionamento dos sistemas fluviais por parte dos alunos.

Assim, esta unidade curricular procura desenvolver nos alunos as seguintes competências:

a) ao nível do saber

• apreender os conceitos fundamentais e usar a terminologia geográfica, de forma adequada, ligados às cheias, às componentes das bacias hidrográficas, aos fundos de vale e aos canais fluviais;

- compreender a dimensão geográfica e a interligação dos fenómenos e processos, naturais e humanos, ligados às cheias;
- combinar as dimensões espacial e temporal na interpretação das cheias e na dinâmica dos fundos de vale e canais fluviais bem como dos processos naturais e humanos que os influenciam;
- compreender o funcionamento de um rio como parte integrante de um sistema fluvial;
- identificar os riscos devidos ao fenómeno das cheias;
- mobilizar saberes de outras disciplinas para desenvolver uma perspectiva integrada na interpretação e avaliação dos fenómenos e processos que afectam os fundos de vale;
- conhecer e interpretar as dinâmicas territoriais presentes nos fundos de vale, bem como as grandes linhas das políticas públicas com incidência no ordenamento territorial das áreas ribeirinhas.

b) ao nível do saber fazer

- usar fontes documentais e cartográficas adequadas para o conhecimento das cheias e da evolução das áreas ribeirinhas;
- recolher, tratar e representar gráfica e cartograficamente, de forma crítica, informação sistemática de base territorial relativa aos fundos de vale;
- adequar os métodos e as técnicas às diferentes perspectivas e problemas a resolver nas áreas ribeirinhas;
- dominar as metodologias e técnicas do trabalho de campo;
- avaliar o estado dos fundos de vale e canais fluviais e elaborar o respectivo diagnóstico;

c) ao nível do saber agir

- propor estratégias e intervenções de (re)ordenamento territorial em diferentes escalas geográficas (bacia hidrográfica e áreas ribeirinhas);
- utilizar métodos e técnicas adequados para a comunicação dos resultados.

2. OBJECTIVOS ESPECÍFICOS

A disciplina de Dinâmica Fluvial e Ordenamento do Território está organizada em quatro módulos:

O Módulo I – As cheias: elemento extremo do regime fluvial tem como objectivos: (i) perceber que os factores que desencadeiam as cheias são diversos e de diferentes naturezas; (ii) que a maior parte dos factores desencadeantes das cheias dependem do contexto climático em que se inserem as bacias hidrográficas; (iii) que, em determinados contextos climáticos, as cheias são um fenómeno regular, e noutros, um fenómeno hidrológico raro; (iv) que existem diferentes critérios de classificação das cheias, consoante a perspectiva com que estas se abordam.

O Módulo II – Bacias hidrográficas e suas componentes como factores condicionantes das cheias tem como objectivos: (i) perceber como cada componente da bacia hidrográfica interfere no seu comportamento face às cheias; (ii) quantificar essa influência, para cada componente, e integrar os resultados; (iii) perceber a dependência do tempo de concentração das bacias das suas características biofísicas e dominar os métodos de cálculo; (iv) quantificar os caudais de ponta de cheia e saber aplicar, em cada caso, o(s) método(s) de cálculo mais adequado(s).

O Módulo III – Fundos de vale: formas, processos e dinâmica tem como objectivos: (i) compreender que a bacia hidrográfica é um sistema natural aberto e dinâmico, onde actuam diversos processos hidrológicos e geomorfológicos em diferentes escalas temporais; (ii) conhecer os principais processos e formas fluviais; (iii) relacionar a modelação dos leitos maior e menor com os caudais de cheia respectivos; (iv) classificar as formas e o grau de estabilidade do sistema fluvial a partir da sua análise quantitativa.

O Módulo IV – Dinâmica fluvial e intervenção humana tem como objectivos: (i) discutir os diferentes tipos de intervenção humana nos sistemas fluviais e perceber que essa intervenção se faz sobre diversas componentes da bacia e a diversas escalas espaciais; (ii) analisar as consequências das cheias e discutir as várias fases de avaliação do risco de cheia; (iii) conhecer os vários tipos de medidas mitigadoras das cheias e os respectivos impactes no sistema fluvial; (iv) conhecer a legislação portuguesa no domínio das cheias e a sua aplicação no ordenamento do território das áreas ribeirinhas.

3. MÉTODOS DE ENSINO-APRENDIZAGEM

O Processo de Bolonha veio introduzir modificações nos métodos de ensino e de aprendizagem (algumas ainda não completamente assimiladas por parte de professores e alunos), de que se destacam: (i) os conteúdos programáticos passaram a ser definidos não só em função dos objectivos a atingir por cada unidade curricular, mas também pelas competências a adquirir pelos alunos; (ii) os alunos devem ser agentes activos no seu processo de aprendizagem através de uma maior autonomia e responsabilização; (iii) o professor deve ser essencialmente um orientador; (iv) o tempo de trabalho dos alunos foi dividido em dois blocos distintos, em função do *European Credit Transfer System* (ECTS): o tempo de contacto com o professor, através das aulas (teóricas, teórico-práticas ou práticas, inclusivé de campo) e de sessões de tutoria; e o tempo de trabalho sem o professor, do qual fazem parte os tempos de projecto, de trabalho de campo, de estudo e de avaliação.

A experiência adquirida, decorridos três anos de implementação do Processo de Bolonha, mostra que o professor, além de tutor, não se pode divorciar do seu papel de agente formador. Por outras palavras, as aulas expositivas continuam a desempenhar um papel importante como fio condutor do processo de ensino-aprendizagem. Por tal motivo, nesta disciplina, aplicar-se-á um modelo misto neste processo: as aulas teóricas são expositivas, ou seja, seguem o modelo behaviorista, em que o professor exerce a sua acção de agente formador e os alunos são agentes reactivos; enquanto as aulas práticas seguem o modelo construtivista, em que o professor exerce uma função de tutoria e os alunos são os agentes activos do processo de aprendizagem. Para saber agir, objectivo primordial do modelo construtivista, é necessário dominar os conceitos, distinguir causas e efeitos, processos e formas, bem como os seus ritmos evolutivos. As aulas teóricas têm como objectivo ministrar a formação de base conceptual essencial para o desenvolvimento do trabalho prático, pelo que a ligação teórico-prática é assim muito forte. O trabalho prático tem por base questões de partida ou situações-problema às quais os alunos terão de responder ou propor a solução que considerem mais adequada. Privilegia-se o trabalho prático em grupo, porque ele permite o desenvolvimento de competências nos domínios do confronto de opiniões, muitas vezes diferentes mas sempre enriquecedoras, da partilha de tarefas, do espírito de entre-ajuda e da responsabilização individual e colectiva.

4. AVALIAÇÃO

Do exposto no ponto anterior se infere que os métodos de avaliação também são mistos. São três os elementos de avaliação: (i) um teste escrito teórico-prático individual presencial, onde se avaliam os conhecimentos e competências adquiridos por cada aluno, no que se refere ao domínio dos conceitos, métodos e técnicas e capacidade de análise; (ii) um trabalho de grupo escrito, onde se avaliam as competências adquiridas nos domínios da recolha da informação, análise e integração dos resultados, bem como no domínio do saber agir, através da discussão das propostas apresentadas; (iii) uma exposição oral individual sobre o trabalho desenvolvido no seio do grupo, onde se avalia a integração de cada aluno na equipa de trabalho, a contribuição individual para o trabalho colectivo e a capacidade de comunicação dos resultados obtidos.



III. PROGRAMA

1. PLANO DO PROGRAMA

• Módulo I. As cheias: elemento extremo do regime fluvial

1. Os conceitos de cheia e inundação
2. As regiões hidroclimáticas das cheias
3. Critérios de classificação e tipologia das cheias
 - 3.1. Factores desencadeantes
 - 3.2. Nº de pontas de cheia
 - 3.3. Frequência de ocorrência
 - 3.4. Velocidade de progressão / Duração
 - 3.5. Volume
 - 3.6. Magnitude / Área inundada
 - 3.7. Probabilidade de ocorrência
 - 3.8. Critérios múltiplos

• Módulo II. Bacias hidrográficas e suas componentes como factores condicionantes das cheias

1. Análise quantitativa das componentes biofísicas das bacias
 - 1.1. Geometria
 - 1.2. Rede de Drenagem
 - 1.3. Relevo
 - 1.4. Solo e Subsolo
 - 1.5. A vegetação e o uso do solo
2. Tempo de concentração das bacias: definição e métodos de cálculo
3. Avaliação dos caudais de ponta de cheia
 - 3.1. Métodos empíricos não cinemáticos
 - 3.2. Métodos empíricos cinemáticos
 - 3.3. Métodos estatísticos

• Módulo III. Fundos de vale: formas, processos e dinâmica

1. A importância das escalas de análise
2. As macroformas do sistema fluvial: os vales
3. Os processos fluviais
4. Os leitos fluviais
 - 4.1. Relação entre os tipos de leito e caudais característicos
 - 4.2. Formas do leito maior
 - 4.2.1. Planícies de inundação
 - 4.2.2. Leques aluviais
 - 4.2.3. Deltas fluviais
 - 4.3. Formas do leito menor
 - 4.3.1. Tipos de canais fluviais
 - 4.3.2. Formas de acumulação e de erosão do canal fluvial
 - 4.3.3. Perfil transversal do canal fluvial
5. Análise integrada dos troços e das secções dos canais

• Módulo IV. Dinâmica fluvial e intervenção humana

1. A influência antrópica nos sistemas fluviais
 - 1.1. Desflorestação
 - 1.2. Construção de barragens
 - 1.3. Artificialização dos canais fluviais
 - 1.4. Urbanização
 - 1.5. A acção humana como factor agravante das cheias
2. As consequências das cheias
 - 2.1. O risco de cheia
 - 2.2. Os benefícios das cheias

3. A gestão do risco de cheia

3.1. Modelo conceptual de avaliação e gestão do risco de cheia

3.2. Tipologia das medidas de mitigação do risco de cheia

3.3. A legislação portuguesa no domínio das cheias

• Trabalho prático

2. PLANIFICAÇÃO DAS AULAS TEÓRICAS E PRÁTICAS

Esta unidade curricular foi concebida para uma valência de 10 ECTS, ou seja, de 280h, das quais 56h são horas de contacto e as restantes são tempo de trabalho do aluno sem o professor.

Obedecendo a estas normas, a unidade curricular “Dinâmica Fluvial e Ordenamento do Território” foi organizada em 14 sessões de 4h por semana, atingindo, no total, as respectivas 56h de contacto (quadro 1).

QUADRO 1 – PLANIFICAÇÃO DAS AULAS

Sessão nº	Aulas Teóricas	Aulas Práticas
1	Objectivos da disciplina. Método de avaliação. Os conceitos de cheia e inundação. As regiões hidroclimáticas das cheias: o código de Hayden.	Formação dos grupos de trabalho. Formulação de perguntas de partida ou de situações-problema.
2	Crítérios de classificação e tipos de cheias: nº de pontas de cheia, frequência, velocidade, duração, volume, magnitude, probabilidade de ocorrência (métodos estatísticos de Gumbel e Pearson III), critérios múltiplos.	Definição da bacia a estudar por parte de cada grupo de trabalho. Análise das séries hidrométricas existentes e tratamento estatístico das cheias.
3	Factores desencadeantes das cheias (critério genético).	Análise dos primeiros resultados dos critérios de classificação das cheias.
4	Análise quantitativa das componentes biofísicas das bacias: índices de geometria e da rede de drenagem.	Conclusão da elaboração da tipologia das cheias e do cálculo de diferentes períodos de retorno.
5	Análise quantitativa das componentes biofísicas das bacias: índices de relevo; métodos de classificação da permeabilidade do solo e do subsolo.	Início da análise quantitativa da bacia de drenagem: cálculo e discussão dos resultados dos índices de geometria e da rede de drenagem.
6	Análise quantitativa das componentes biofísicas das bacias: vegetação e uso do solo. Definição e métodos de cálculo do tempo de concentração.	Continuação da análise quantitativa da bacia de drenagem: cálculo dos índices de relevo e discussão dos resultados.
7	Avaliação dos caudais de ponta de cheia através de métodos empíricos não cinemáticos e cinemáticos.	Conclusão da análise quantitativa da bacia de drenagem: discussão dos resultados para o solo, subsolo, vegetação e uso do solo.
8	As escalas espaciais e temporais no estudo das formas e processos fluviais. Tipologia dos processos fluviais e dos vales.	Cálculo do tempo de concentração e dos caudais de ponta de cheia por métodos empíricos. Discussão dos resultados.
9	Relação entre os tipos de leitos e caudais característicos. Formas do leito maior: planícies de inundação e seus elementos morfológicos; leques aluviais e deltas fluviais.	Preparação da saída de campo. Definição, por parte dos alunos, de pontos críticos e troços a observar.
10	Saída de campo com todos os alunos: análise dos troços a estudar e aprendizagem de análise e medição das técnicas de formas fluviais.	
11	Formas do leito menor: tipos de canais fluviais; formas de acumulação e de erosão do canal fluvial; perfil transversal do canal fluvial.	Análise e discussão dos resultados do levantamento de campo das características morfológicas do leito maior e sua ocupação humana.
12	Análise integrada dos troços e das secções dos canais. Explicação da classificação de Rosgen. A influência antrópica nos sistemas fluviais: deflorestação, construção de barragens, artificialização dos canais fluviais, urbanização.	Análise e discussão dos resultados do levantamento de campo das características morfológicas do leito menor.
13	A acção humana como factor agravante das cheias. As consequências das cheias. Modelo conceptual de avaliação e gestão do risco de cheia.	Integração dos resultados da análise longitudinal e transversal do troço do rio em estudo. Discussão e conclusões.
14	Tipologia das medidas de mitigação do risco de cheia. A legislação portuguesa no domínio das cheias.	Esclarecimento final de dúvidas e preparação para a apresentação oral e escrita do trabalho.

Notas: (i) Nas 11^a, 12^a e 13^a semanas os alunos terão de fazer obrigatoriamente trabalho de campo; (ii) a exposição oral é efectuada na semana seguinte à conclusão das aulas. O teste teórico é efectuada durante o período de avaliação, fixado pela Comissão Pedagógica do Departamento, bem como a entrega do trabalho de grupo.



IV.

DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA



MÓDULO I

CHEIAS: ELEMENTO EXTREMO DO REGIME FLUVIAL

1. Os conceitos de cheia e inundação

O conceito de cheia: em sentido lato e em sentido restrito. O conceito de cheia em sentido lato: "subida da água (de um rio, lago, mar ou albufeira) que ultrapassa o seu limite natural ou artificial e que submerge uma área que usualmente se encontra emersa" (Wilson e Moore, *Glossary of Hydrology*, 1998). O conceito de cheia em sentido restrito: "qualquer escoamento fluvial relativamente elevado que implica o transbordo das margens de um troço de um rio, e que pode ser medido em altura ou caudal" (Wilson e Moore, *Glossary of Hydrology*, 1998).

O termo "flood" da escola anglo-americana e os termos "crue" e "inondation" da escola francesa. A adopção da terminologia da escola francesa (cheia e inundação) e do conceito restrito de cheia, tal como defendia Chow em 1956 (in Smith e Ward, 1998): as cheias são fenómenos hidrológicos extremos devidos à dinâmica fluvial, isto é, existe uma cheia sempre que o rio transborda em relação ao seu leito ordinário. O transbordo origina, por sua vez, a inundação dos terrenos ribeirinhos. A importância da definição do caudal mínimo de cheia (*bankfull discharge*) como indicador quantitativo do início do transbordo.

Resumindo: todas as cheias provocam inundações, mas nem todas as inundações são devidas às cheias. As cheias são fenómenos hidrológicos temporários, enquanto as inundações (na sua maioria temporárias) podem ser definitivas (à escala de vida humana). Breve discussão sobre a tipologia das inundações e suas causas (quadro 2).

2. As regiões hidroclimáticas das cheias

À escala continental, as causas das cheias dependem, sobretudo, das zonas ou das regiões climáticas onde as

bacias hidrográficas se inserem; ou seja, das características do clima. O "Código Climático das Cheias", proposto por Hayden (1988), utilizado na organização de diversas bases de dados sobre cheias, à escala dos continentes (regional), mostra que as causas climáticas das cheias podem ser classificadas e regionalizadas. Hayden considera dois reservatórios de água das cheias: a atmosfera (o principal) e os continentes onde existem neve e gelo acumulados à superfície (o secundário). A atmosfera é dividida pelas suas condições barotrópicas (T) ou baroclínicas (C) dominantes (fig. 1 e quadro 3), as quais podem ser permanentes (p) ou estar presentes apenas sazonalmente (s). Quando as condições barotrópicas dominam, as precipitações podem ser devidas à CIT (z), a actividade convectiva organizada à escala sinóptica (o) ou a actividade convectiva não organizada, como é o caso das células convectivas isoladas (u). Quando as condições baroclínicas dominam as precipitações ou são de origem frontal ou resultam de depressões sem frentes (gotas de ar frio).

QUADRO 2 - TIPOS DE INUNDAÇÕES E SUAS CAUSAS

Tipo	Causa
Cheia (inundação fluvial)	<ul style="list-style-type: none"> - chuvas abundantes e/ou intensas - fusão da neve ou do gelo - efeito combinado chuva + efeito das marés e/ou + storm surge - obstáculos ao escoamento ou derrocada dos obstáculos
Inundação de depressões topográficas	<ul style="list-style-type: none"> - subida da toalha freática (natural ou artificial*) - retenção da água da precipitação por um solo ou substrato geológico de permeabilidade muito reduzida - cheias
Inundação costeira	<ul style="list-style-type: none"> - storm surge - tsunamis - subida eustática do nível do mar - sismos com fenómenos de subsidência tectónica
Inundação urbana	<ul style="list-style-type: none"> - chuva intensa + sobrecarga dos sistemas de drenagem artificiais - subida da toalha freática (natural ou artificial*) - cheias

* A inundação devida à subida da toalha freática de origem artificial deve-se, neste caso, essencialmente à irrigação e ao fim da actividade de indústrias extractivas.

Nas latitudes elevadas, onde quer os totais quer a intensidade de precipitação são reduzidos, a acumulação da neve (S) e subsequente fusão é o mecanismo principal das cheias (reservatório secundário). Quando a neve se acumula durante o inverno e funde na primavera, o símbolo (s) é usado e indica fusão sazonal da neve e cheias; quando a neve acumulada funde durante o inverno periodicamente, o símbolo (e) é usado e indica a natureza efémera da cobertura de neve. A magnitude das cheias no final do inver-

no depende da espessura da cobertura de neve até aí acumulada. As regiões com uma espessura de neve apreciável (50cm ou mais) são indicadas com dois asteriscos (**), enquanto as regiões com menos de 50cm de espessura de neve aparecem com um asterisco (*) (fig. 1 e quadro 3).

Portugal situa-se na sub-região TsuCs, típica da bacia mediterrânea e do Atlântico, à mesma latitude, junto à fachada ocidental do continente europeu.

QUADRO 3 – O CÓDIGO DE HAYDEN

CÓDIGO	CAUSA CLIMÁTICA DAS CHEIAS
Trz	
Tpo	Condições atmosféricas barotrópicas permanentes
Tpu	
Tsz	
Tszo	Condições atmosféricas barotrópicas e baroclínicas sazonais
Tso	
Tsu	
TsoCs	Condições atmosféricas barotrópicas e baroclínicas sazonais, mas as cheias são devidas essencialmente às últimas, podendo também ocorrer durante tempestades tropicais no verão (variante TsuCs, idem, sem tempestades tropicais no verão)
TsoCp	Condições atmosféricas barotrópicas dominantes no verão, mas com a presença de depressões frontais ao longo de todo o ano
TsuCpSe	
TsuCpSs*	Condições atmosféricas barotrópicas dominantes no verão, mas com a presença de depressões frontais ao longo de todo o ano e ainda fusão da neve
TsuCpSs**	
Cp	Condições atmosféricas baroclínicas permanentes
CpSe*	Condições atmosféricas baroclínicas permanentes com fusão da neve
CSs*	
CSs**	Condições atmosféricas baroclínicas com raras depressões bem desenvolvidas e com fusão da neve

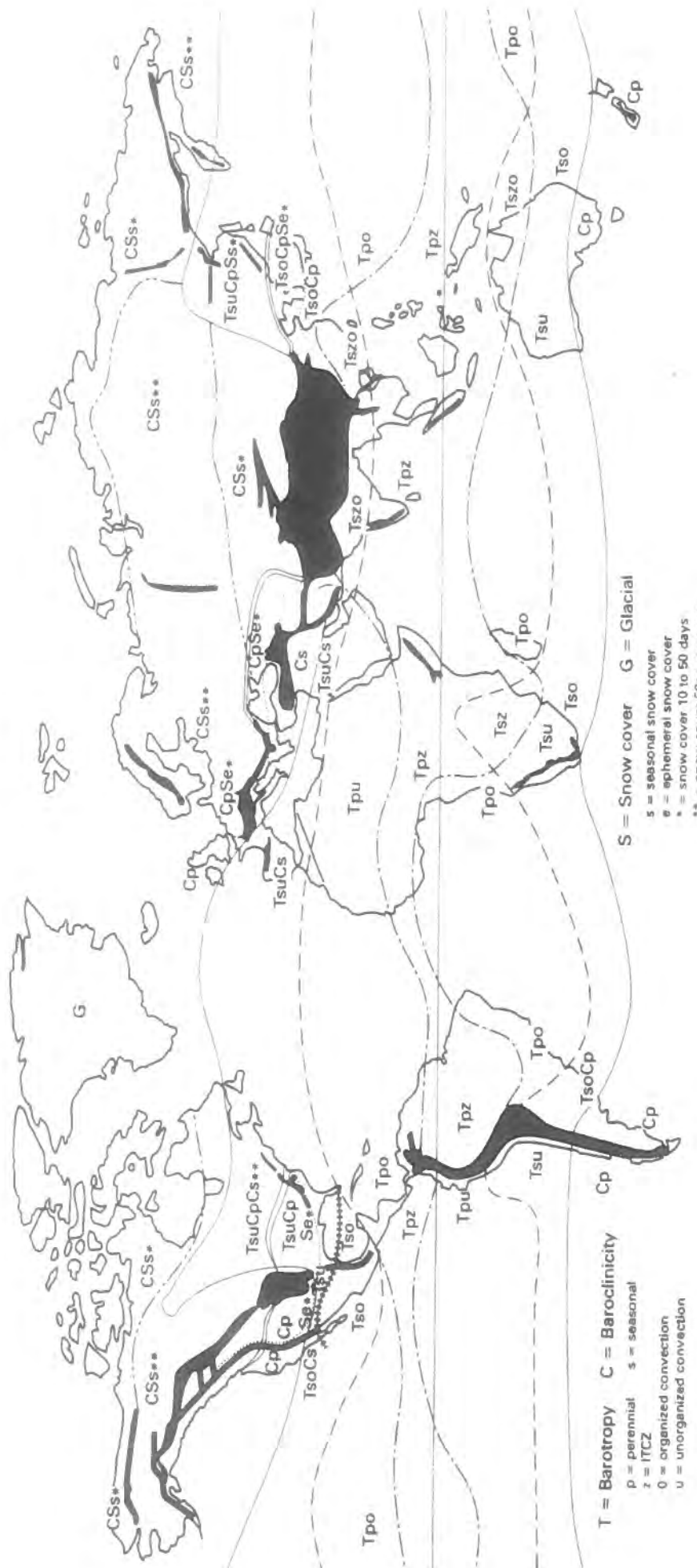


FIGURA. 1 - Regiões hidroclimáticas das cheias.

As linhas a cheio indicam o limite máximo latitudinal das condições barotrópicas no verão e as linhas a tracejado no inverno. As linhas a tracejado com um ponto representam a posição da CIT em Janeiro e em Julho. As linhas a pontilhado marcam o limite sul da cobertura de neve no inverno com uma duração de 10 ou mais dias. As linhas a tracejado com dois pontos indicam as regiões com mais de 50 dias de neve e mais de 50cm de espessura. As áreas a negro indicam as grandes regiões montanhosas (Hayden 1988, modificado).

3. Critérios de classificação das cheias

Tipologia das cheias. Os critérios de classificação das cheias quanto à: (i) sua génese (factores desencadeantes) e (ii) ao nº de pontas de cheia, (iii) periodicidade (frequência de ocorrência), (iv) velocidade de progressão/duração, (v) magnitude/área inundada, (vi) recorrência (probabilidade de ocorrência), (vii) à severidade, (viii) índice de magnitude. Os critérios de classificação encontram-se sintetizados no quadro 4.

QUADRO 4 - CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO E TIPOS DE CHEIA

Critérios	Tipo de cheia
Génese (factores desencadeantes)	- pluvial - de fusão - costeira - de obstáculo - de derrocada natural - de derrocada artificial
Génese (nº de pontas de cheia)	- simples ou monogénica - complexa ou poligénica
Periodicidade (frequência de ocorrência)	- regular - irregular
Velocidade de progressão / Duração	- rápida ou repentina (< 1 dia) - semi-rápida (> 1 dia e < 1 semana) - lenta ou progressiva (> 1 semana a meses)
Magnitude / Área inundada	- pequena ou azuela - média - grande
Recorrência (probabilidade de ocorrência)	- anual - decenal - centenária - milenária - decamilenária
Severidade	- classe 1: cheias grandes - classe 1,5: muito grandes - classe 2: excepcionais
Índice de Magnitude	índice que considera a duração, a severidade e a área afectada

3.1. Génese (factores desencadeantes)

A classificação genética das cheias, quanto aos factores desencadeantes é fundamental porque define a causa próxima da cheia bem como as características hidrodinâmicas que esta irá assumir (quadro 4).

Os factores desencadeantes das cheias são essencialmente climáticos e devem-se à pluviosidade e à fusão rápida da neve. As chuvas são a principal causa das cheias (fig. 2) e podem ser de dois tipos: ou são contínuas e prolongadas, podendo até não atingir grande intensidade (originam neste caso cheias lentas), ou são concentradas no tempo e no espaço, mas de grande intensidade (dando origem às cheias rápidas).

As primeiras são chuvas generalizadas a vastas áreas e que devido à sua duração (semanas a meses) levam à sa-

turação dos solos, à reposição das reservas subterrâneas e, finalmente, a fenómenos de transbordo. Nas latitudes baixas podem ser devidas à influência da CIT, à actividade convectiva organizada à escala sinóptica (ondas de leste) ou às monções. Nas latitudes médias podem ser devidas a famílias de depressões frontais, correspondendo, à escala sinóptica, a uma circulação zonal de oeste.

As segundas podem ocorrer apenas em algumas horas ou em menos de uma semana, mas atingem grandes intensidades. Na zona intertropical e nas fachadas orientais dos continentes banhadas por correntes marítimas quentes, são essencialmente devidas a ciclones tropicais, a sistemas convectivos organizados ou a células convectivas isoladas; nas zonas temperadas são devidas a frentes frias muito activas, a gotas de ar frio e a células convectivas isoladas. Segundo Penning-Rowse e Peerbolte (1994), as áreas densamente urbanizadas da Europa, têm vindo a registar cheias rápidas com maior frequência, durante o verão, devidas a tempestades com trovoadas ligadas à potenciação de células convectivas pelo efeito da "ilha de calor".

Nas latitudes médias (interior dos continentes) e elevadas, a fusão rápida da neve deve-se a subidas bruscas da temperatura e a advecções de ar quente vindas de latitudes mais meridionais, por vezes conjugadas com chuvas, que ajudam o processo de fusão. As quantidades colossais de água retidas no estado sólido são assim libertadas levando ao transbordo dos rios e originando as "cheias de fusão". Estas atingem extensas áreas, sobretudo nas planícies russas, canadianas e americanas e dão-se ao longo da primavera.

Normalmente a fusão do gelo, que ocorre mais tarde que a fusão da neve (no verão), não origina cheias, porque o processo de degelo é mais lento. Contudo, nas áreas com vulcões activos cobertos por glaciares, as erupções vulcânicas podem, em poucos dias, fundir quantidades colossais de gelo e originar cheias violentas com grande poder de destruição.

As causas de natureza marinha ocorrem nos troços terminais dos cursos de água costeiros, aquando de situações de escoamento fluvial abundante, mas que por si só não originam cheias, a não ser que coincidam com a maré cheia ou com fenómenos de *storm surge* (sobreelevação do nível do mar de origem meteorológica), que ao elevarem o nível do mar, exercem um efeito de tampão sobre o escoamento fluvial, obrigando ao transbordo (cheias costeiras de efeito combinado).

As cheias de obstáculo ocorrem quando se interpõem ao escoamento fluvial quaisquer obstáculos que ocupam,

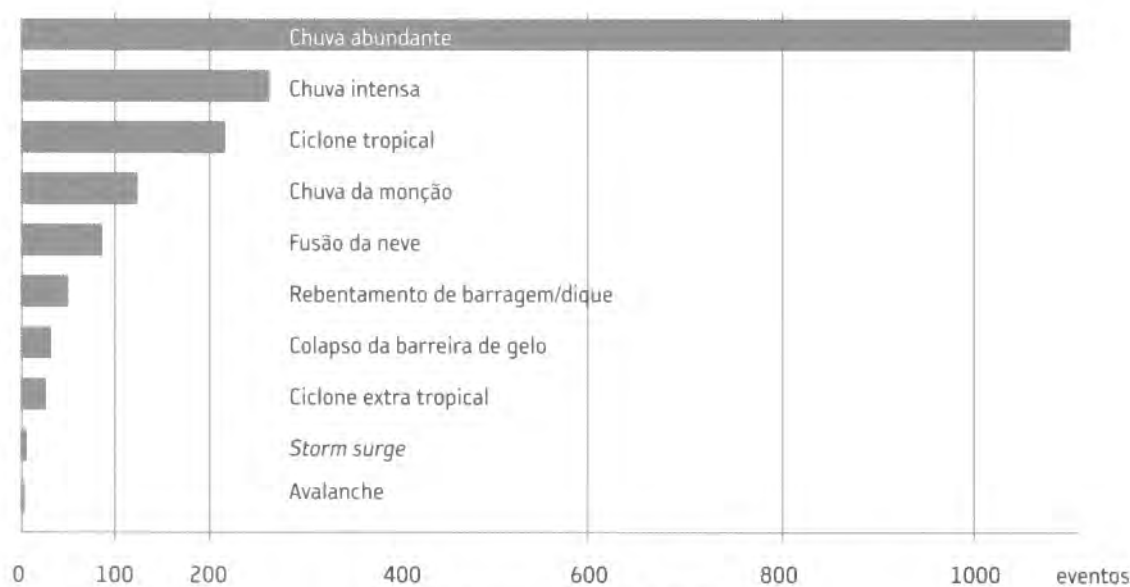


FIGURA. 2 – Causas das cheias no Planeta.

Fonte: Dartmouth Flood Observatory, 1985-2002.

temporariamente, o canal fluvial. Esses obstáculos, que originam o transbordo a montante, podem ser devidos a: (i) blocos de gelo ou grandes quantidades de vegetação ou lixo, transportados pelo próprio curso de água, que ao passarem em estreitamentos do canal fluvial se podem acumular e formar um muro que funciona de barreira ao escoamento; (ii) desabamentos, deslizamentos ou avalanches, que ao atingirem o canal fluvial o bloqueiam, e que podem, por sua vez, ser devidos a causas muito diferentes (geológicas, como por exemplo, sismos, geomorfológicas e climáticas); (iii) congelamento do curso de água no seu troço terminal, enquanto para montante se dá a fusão do gelo e da neve, bloqueando o escoamento fluvial proveniente da água de fusão.

As cheias de derrocada acontecem devido à cedência do obstáculo, na maior parte das vezes, bruscamente, pelo que as águas libertadas provocam grandes ondas de cheia e são extraordinariamente destruidoras. As cheias de derrocada podem ter causas naturais ou antrópicas. As causas naturais são devidas à pressão da água, acumulada no canal fluvial, sobre o obstáculo, levando ao seu rebentamento. De entre elas destacam-se: (i) a cedência da acumulação da neve ou de materias provenientes de movimentos de vertente que tenham obstruído temporariamente o canal fluvial; (ii) o colapso de moreias frontais por acumulação da água do degelo nos lagos situados entre elas e o lóbulo frontal dos glaciares; (iii) o colapso de barreiras de gelo que se acumularam em estreitamentos do

QUADRO 4 – TIPOS DE CHEIA, QUANTO AOS FACTORES DESENCADANTES

Tipo de cheia	Tipo de causa	Factor desencadeante
cheia lenta (pluvial)	climática	chuvas abundantes de longa duração
cheia rápida (pluvial)	climática	chuva intensa de curta duração
cheia de fusão da neve	climática	subida rápida da temperatura na primavera
cheia de fusão da neve de efeito combinado	climática	subida rápida da temperatura + chuva intensa
cheia de fusão do gelo	geológica	erupções vulcânicas
cheia costeira	climática + marinha	escoamento fluvial elevado + efeito das marés ou escoamento fluvial elevado + efeito das marés + <i>storm surge</i>
cheia de obstáculo	climática geológica geomorfológica	movimentos de vertente de obstrução ao escoamento fluvial
cheia de derrocada natural	hidrológica	cedência de obstáculo natural
cheia de derrocada artificial	antrópica	ruptura de barragem ou de dique

canal fluvial durante o degelo; (iv) o rebentamento de parte do sector frontal dos glaciares por acumulação da água do degelo, no seu interior, ao longo de fendas, que se vão alargando no verão durante o processo de fusão. Este último tipo, conhecido como *glacier outburst floods*, é muito comum na Islândia, onde toma o nome de *jökulhlaups*, termo que se tem difundido na literatura científica, onde quer que ocorra este fenómeno (Smith e Ward, 1998).

As cheias de derrocada também podem ser devidas ao colapso de estruturas antrópicas, como é o caso do rebentamento de barragens e diques.

3.2. Génese (nº de pontas de cheia)

As cheias simples apresentam uma única ponta de cheia no hidrograma, porque são devidas a uma única causa (chuvada intensa, colapso de um obstáculo, etc.), sendo por isso monogénicas. No caso das cheias complexas, as diversas pontas de cheia são devidas a causas diferentes: várias chuvadas intensas, tempos de concentração muito diferentes dos afluentes (ou as duas causas juntas), colapso sucessivo de estruturas, etc., sendo por isso poligénicas (Pardé, 1968). Por definição, as cheias complexas duram mais tempo do que as simples.

3.3. Periodicidade (frequência de ocorrência)

Dependendo da região hidroclimática em que se inserem, as cheias podem ocorrer todos os anos, e na mesma época, ou esporadicamente. As primeiras são fenómenos hidrológicos extremos regulares (por exemplo, as cheias de fusão da neve nas grandes planícies russas); as segundas são fenómenos irregulares (por exemplo, as cheias repentinas ligadas a precipitações intensas e concentradas nas regiões semi-áridas).

A frequência de ocorrência das cheias permite definir o número de cheias, bem como a época do ano mais susceptível à sua ocorrência.

3.4. Velocidade de progressão / Duração

A velocidade de progressão da onda de cheia ao longo dos rios e o seu tempo de duração estão intrinsecamente relacionados. Segundo este critério, as cheias podem ser divididas em: (i) lentas ou progressivas (*slow-onset floods*), semi-rápidas (termo proposto para *rapid-onset floods*) e (iii) rápidas ou repentinas (*flash floods*).

As cheias progressivas ocorrem de forma lenta, pois os rios vão aumentando progressivamente o seu caudal, dando tempo para a evacuação de pessoas e bens. A sua duração atinge uma ou mais semanas, ou mesmo meses.

As cheias semi-rápidas duram normalmente um a dois dias (embora a inundação devido ao transbordo possa durar uma semana). Apesar de serem mais curtas do que as anteriores, podem causar mais prejuízos e provocarem um maior risco para vidas e bens, uma vez que as pessoas têm, no geral, menos tempo para tomarem as respectivas medidas preventivas.

As cheias rápidas podem ocorrer em alguns minutos ou poucas horas, depois de chuvas intensas, tempestades tropicais, rebentamento de barragens ou diques e derrocadas de obstáculos naturais. As cheias rápidas são as mais perigosas porque ocorrem subitamente, apanhando as populações de surpresa. São mortíferas, especialmente nas bacias com cursos de água de regime irregular, onde podem ocorrer vários anos sem cheias levando ao “esquecimento” destas situações por parte das autoridades e das populações. Estas instalam-se nos leitos de cheia potencializando grandes catástrofes.

3.5. Volume

O volume das cheias é utilizado para calcular a quantidade de água escoada durante cada evento de cheia. Mede-se em unidades de volume (m^3 a km^3 , consoante as dimensões do rio em estudo e da área da sua bacia hidrográfica), ou em % em relação ao escoamento total (usualmente anual) do curso de água.

3.6. Magnitude / Área inundada

A ponta de cheia é o valor máximo que o caudal atinge durante a cheia. É em função da magnitude (ou potência) das cheias que se constroem as pontes, barragens, diques de protecção, entre outras estruturas hidráulicas. Ao aumento dos caudais de ponta corresponde um aumento da área inundada. Essa diferença é particularmente acentuada nos fundos de vale largos, com planícies de inundação bem desenvolvidas. Nestes casos, utilizam-se, muitas vezes, como referência para a classificação das cheias, as alturas hidrométricas, devido a dificuldades de cálculo do caudal em tão vastas secções do perímetro molhado. Por exemplo, considerando como referência o hidrómetro de Santa Iria (Santarém), as cheias do Rio Tejo são classificadas em pequenas cheias ou azielas, quando não ultrapassam a altura de 6m; cheias médias, quando se mantêm entre 6 e 7m; e grandes cheias, quando ultrapassam 7m de altura (neste caso, praticamente toda a planície de inundação fica submersa).

3.7. Recorrência (probabilidade de ocorrência)

A recorrência das cheias define a probabilidade de determinados caudais de ponta voltarem a ocorrer (período de

retorno). Neste caso, os dados utilizados são os caudais máximos instantâneos anuais das séries hidrométricas disponíveis, analisados através de métodos estatísticos. Para a aplicação deste critério na classificação das cheias em Portugal, Henriques (1981) e Correia (1983) mostraram que, das várias leis de distribuição estatística usualmente utilizadas para representar a distribuição dos caudais de ponta, as que melhor se adaptam aos rios portugueses são as leis de Gumbel e Pearson tipo 3. Posteriormente, Henriques (1983), num estudo comparativo da aplicabilidade à distribuição de frequências de caudais de cheia nas várias regiões portuguesas, mostrou que a lei que apresenta um melhor ajustamento entre os valores calculados e os observados é a de Pearson tipo 3. Discussão dos problemas usuais das séries hidrométricas (exiguidade e consistência). A regra de que não deverão ser determinados valores para períodos de retorno superiores, em geral, a duas ou três vezes o número de anos da amostra. Estes métodos estatísticos permitem calcular os caudais de ponta de cheia para diferentes probabilidades de excedência, consoante o objectivo do estudo. Uma cheia centenária, por exemplo, é uma cheia com uma probabilidade de ocorrência de 1% em cada ano, sendo correntemente utilizada na delimitação de leitos de cheia para fins de ordenamento do território.

3.8. Critérios múltiplos

Análise da base de dados do Dartmouth Flood Observatory (1985 ao presente).

Informação existente na base de dados por evento:

- país
- bacia hidrográfica / rio
- data de início e do fim da cheia
- duração
- vítimas mortais
- desalojados
- prejuízos (USD)
- causa principal da cheia
- severidade
- área inundada
- índice de magnitude
- notas e comentários (causas secundárias das cheias, actividades económicas afectadas, outras)
- georeferenciação

O cruzamento destas informações permite desenvolver critérios múltiplos de classificação, como por exemplo, a severidade das cheias e o índice de magnitude:

(i) A severidade avalia apenas os eventos com consequências graves. A severidade é avaliada numa escala de 1 a 2 e as cheias são divididas em três classes. A classe 1 cor-

responde a grandes cheias, ou seja, as que provocam prejuízos significativos na agricultura ou em estruturas, vítimas mortais e / ou com 1 a 2 décadas de intervalo desde o último evento de consequências semelhantes. A classe 1,5 corresponde a cheias muito grandes com um intervalo de recorrência estimado entre 20 e 100 anos; ou com um intervalo de recorrência de 1 a 2 décadas mas que afectam uma grande região geográfica (> 5000 km²). A classe 2 corresponde a eventos excepcionais com um intervalo de recorrência > 100 anos.

(ii) O Índice de magnitude das cheias considera a duração (D) das cheias (em dias), a severidade (S, classes 1, 1,5 e 2) e a área inundada (A, em km²), tal que: Índice de Magnitude = LOG (D x S x A).

MÓDULO II

AS COMPONENTES BIOFÍSICAS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS COMO FACTORES CONDICIONANTES DAS CHEIAS

1. Análise quantitativa das componentes biofísicas

Além dos factores desencadeantes, existem outros que influenciam o comportamento dos cursos de água face às cheias. As componentes biofísicas das bacias hidrográficas como factores condicionantes do fenómeno das cheias. Discussão dos factores permanentes e dos factores variáveis do escoamento fluvial, no geral, e das cheias, em particular, e sua influência no hidrograma (fig. 3).

Factores que condicionam fundamentalmente o tempo de concentração (área, forma, relevo e características da rede de drenagem das bacias hidrográficas); factores que condicionam fundamentalmente as perdas de precipitação (condições antecedentes de armazenamento de água na bacia, coberto vegetal e uso do solo); factores que condicionam directamente o hidrograma de cheia (distribuição temporal e espacial da precipitação).

Análise quantitativa das bacias hidrográficas: linear, areal e hipsométrica. Na análise linear são englobados os indicadores relativos à rede de drenagem, cujas medições são efectuadas ao longo das linhas de água. Na análise areal estão englobados os indicadores nos quais intervêm medições planimétricas. A análise hipsométrica representa a 3ª dimensão das bacias, ou seja, os indicadores dependentes do relevo.

1.1. Geometria

Nas características geométricas entram: a área, o perímetro, o comprimento e a forma da bacia. O perímetro (P) corresponde à linha divisória de águas da bacia, ou seja, ao comprimento da linha que a delimita. A área (A) é a superfície plana, isto é, em projecção horizontal, limitada pelo perímetro da bacia. O comprimento da bacia (Cb) é a distância, medida em linha recta, entre a desembocadura e um ponto definido no

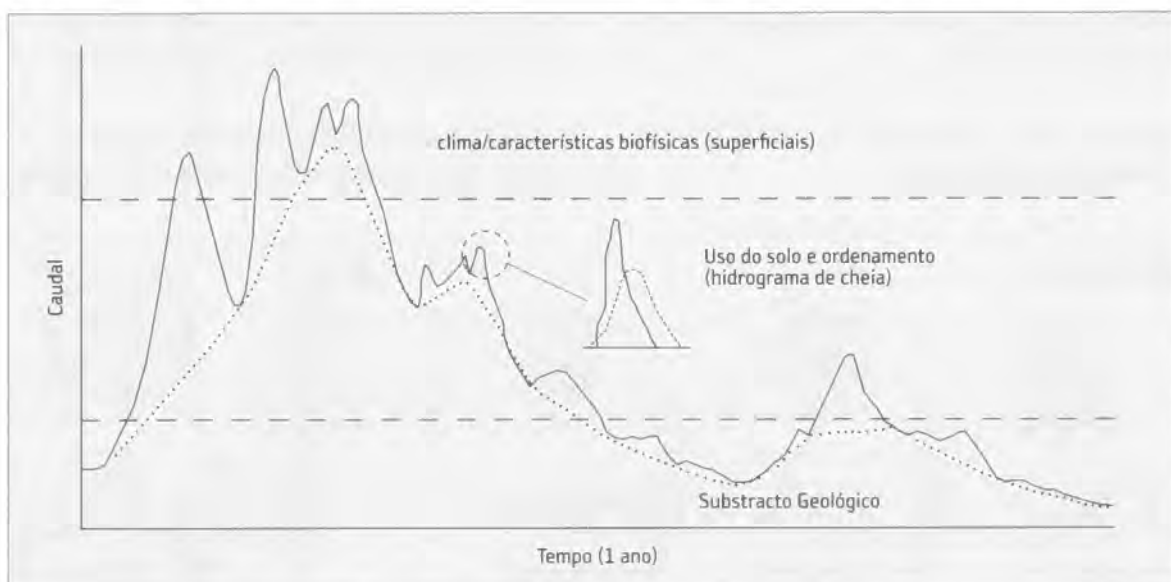


FIGURA. 3 – O hidrograma anual de um rio e os factores que o controlam.

A linha a tracejado representa o escoamento de base, dependente do substrato geológico (de Newson, 1994).

perímetro da bacia. Discussão dos diferentes critérios de definição do comprimento da bacia:

- comprimento do curso de água principal;
- distância medida em linha recta desde a desembocadura até ao interflúvio próximo da cabeceira do curso de água principal;
- maior distância, em linha recta, entre a desembocadura e determinado ponto situado ao longo do perímetro;
- distância, em linha recta, entre a desembocadura e o ponto do perímetro de cota mais elevada.

Destes critérios, segue-se o critério de Linsley *et al* (1988), ou seja, o segundo dos expostos.

A quantificação da forma visa a comparação entre a forma da bacia e a de figuras geométricas, como o rectângulo ou o círculo, eliminando a subjectividade da descrição qualitativa.

A área e a forma são as duas componentes geométricas mais importantes das bacias. Durante uma chuvada semelhante, e em igualdade dos restantes factores, as bacias produzirão caudais de ponta tanto mais elevados quanto maior for a sua área. Por outro lado, a tendência para grandes cheias será tanto mais acentuada quanto mais próxima da forma circular for a bacia (fig. 4).

Este facto, deve-se a dois factores essenciais: (i) uma bacia de forma circular tem uma maior probabilidade de ser atingida, em toda a sua extensão, por uma chuvada intensa e concentrada, do que uma bacia de forma alongada, sendo os valores da precipitação mais elevada uniformemente distribuídos pela bacia no espaço de tempo considerado; (ii) numa bacia de forma circular o escoamento proveniente dos vários afluentes chega ao sector jusante com menor desfazamento no espaço e no tempo em relação ao período em que decorre a chuvada.

São apresentados alguns índices de forma mais conhecidos e referidos os mais utilizados.

a) Factor Forma (Horton)

$$Ff = \frac{A}{Cb^2}$$

em que: A é a área da bacia (em km²) e Cb é o comprimento da bacia (em km).

Procura relacionar a forma da bacia com a de um rectângulo. É a relação entre a largura média (Lm) e o comprimento da bacia (Cb):

$$Ff = \frac{Lm}{Cb}, \text{ mas como } Lm = \frac{A}{Cb}, \text{ então } Ff = \frac{A}{Cb^2}$$

O Factor Forma varia entre 0,1 (bacia alongada) e 0,9 (bacia arredondada) e constitui um índice da maior ou menor tendência para a ocorrência de cheias de uma bacia hidrográfica.

b) Índice de Forma (U.S. Army Corp of Engineers)

$$If = \frac{Cb^2}{A}$$

Corresponde ao Inverso do anterior, sendo tanto maior quanto mais alongada for a bacia. Como pode variar desde a unidade até várias dezenas permite diferenciar melhor as bacias do que o Factor Forma.

c) Índice de Gravelius ou Coeficiente de Compacidade

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Um dos mais utilizados em hidrologia, em que: P é o perímetro da bacia (em km) e A é a área da bacia (em km²).

Procura relacionar a forma da bacia com a de um círculo. É a relação entre o perímetro da bacia (P) e o perímetro de

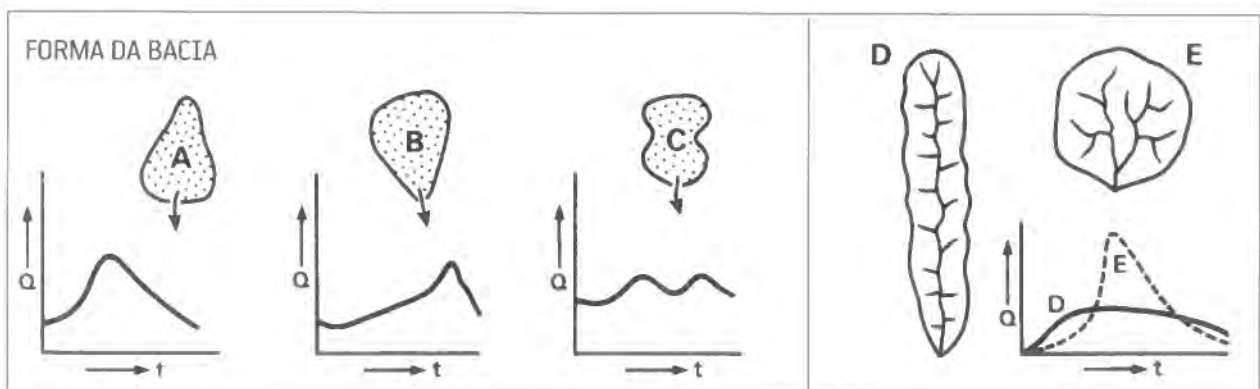


FIGURA 4 – Influência da forma da bacia no hidrograma de cheia; Q – caudal, t – tempo (Gregory e Walling, 1973).

um círculo (P_c) de igual área:

$$K_c = \frac{P}{P_c} = \frac{P}{2\pi r} = \frac{P}{2\pi\sqrt{A/\pi}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

O Índice de Gravelius é um número adimensional. No mínimo será igual à unidade (1), correspondendo, nesse caso, a uma bacia circular. Quanto mais irregular for a bacia, tanto maior será o respectivo coeficiente de compactidade. Considera-se compacta uma bacia em que $K_c < 1,6$.

d) Índice de Forma (Toletino, Gandolfi e Paraguassu)

$$K = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = \frac{P}{3,54491A}$$

Este índice resulta da transformação matemática do Índice de Gravelius, tendo, por isso, uma interpretação semelhante.

e) Índice de Circularidade (Miller)

$$I_c = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Este índice relaciona a área da bacia (A) com a área de um círculo (A_c) de perímetro igual ao da bacia considerada (P).

Logo:

sendo $P = 2\pi r$ e $A_c = \pi r^2$ com $r = \sqrt{A/\pi}$ temos que, $A = \pi (P/2\pi)^2$, resultando

$$I_c = \frac{A}{A_c} = \frac{A}{\pi (P/2\pi)^2} = \frac{A}{\pi P^2 / 4\pi^2} = \frac{A}{P^2 / 4\pi} = \frac{4\pi A}{P^2}$$

O valor máximo de I_c é 1, correspondendo a uma bacia perfeitamente circular.

f) Índice de alongamento da bacia (Schumm)

$$I_a = \frac{2\sqrt{A/\pi}}{C_b}$$

Traduz a relação entre o diâmetro de um círculo (D_c) de igual área à da bacia e o diâmetro maior da bacia (comprimento medido paralelamente ao curso de água principal). Assim temos:

$I_a = D_c/C_b$, mas como $D_c = 2r = 2\sqrt{A/\pi}$, logo:

$$I_a = \frac{2\sqrt{A/\pi}}{C_b}$$

O índice de alongamento compara a forma da bacia com a de um círculo, sendo semelhante ao índice de circularidade.

de. O valor máximo é 1 e será tanto mais próximo de zero quanto mais alongada for a bacia.

g) Índice de Homogeneidade (Pinchemel)

$$I_h = \frac{A}{3,85(C_b / 2,59)^4}$$

Relaciona a bacia com uma forma oval. Quando os valores do I_h se aproximam de 1, a bacia é arredondada, quando tendem para 0, a bacia é alongada.

1.2. Rede de Drenagem

A análise morfométrica da rede de drenagem. A abordagem linear, areal e hipsométrica da rede de drenagem e respectivos indicadores. As relações entre as características da rede de drenagem e as cheias: uma bacia bem drenada, com uma rede de drenagem de baixa sinuosidade e com uma inclinação elevada, será mais favorável à ocorrência de cheias e produzirá rapidamente caudais de ponta elevados.

a) Hierarquia (Strahler)

A hierarquia procura classificar os cursos de água por ordem de importância. Assim, os canais de ordem 1 são os que não possuem tributários, os de ordem 2 resultam da confluência de dois canais de ordem 1, os de ordem 3 resultam da confluência de dois canais de ordem 2 e assim por diante.

b) Magnitude (Shreve)

Nas bacias de drenagem, sob condições geomorfológicas e climáticas similares, o escoamento depende, em grande parte, do número de cursos de água nelas existente. Ele será tanto maior quanto maior for o número de canais em funcionamento. A magnitude de um curso de água é igual ao número de cabeceiras que lhe são tributárias, ou seja, na prática, estas correspondem ao número de canais de ordem 1, segundo o critério de Strahler.

No estudo das cheias, a utilização conjunta da hierarquia e da magnitude da rede de drenagem, deve ser implementada, pois cursos de água com o mesmo nº de ordem, mas com diferentes magnitudes, respondem de forma diferentes às cheias.

c) Comprimento do curso de água principal

É a distância (em km) que se estende ao longo do curso de água desde a desembocadura até à cabeceira. Discussão dos principais critérios para a definição do curso de água principal:

- método de Horton, do canal de ordem mais elevada, para a definição do qual propôs as seguintes regras: a) partindo de jusante de cada confluência, estender a linha do curso de água para montante, para além da bifurcação, seguindo a mesma direcção; o canal confluyente que apresentar maior ângulo é o de ordem menor; b) se ambos os cursos de água possuem o mesmo ângulo de confluência, o de maior dimensão é geralmente o de ordem mais elevada;

- método de Shreve: em cada bifurcação, partindo de jusante de cada confluência, optar pelo canal de maior magnitude;

- em cada bifurcação, partindo de jusante de cada confluência, escolher o curso de água mais longo;

- em cada bifurcação, partindo de jusante de cada confluência, seguir a linha de água a montante situada numa posição altimétrica mais baixa até atingir a cabeceira do segmento de primeira ordem localizado a menor altitude.

Há uma relação directa entre o comprimento do curso de água principal e a área da bacia; além disso a bacia tende a alongar-se à medida que aumenta a sua dimensão.

d) Relação de Bifurcação (Horton)

A relação de bifurcação (R_b) é a razão entre o número total de segmentos de uma certa ordem (N_i) e o número total dos de ordem imediatamente superior (N_{i+1}). Se se considerar o sistema de ordenação de Strahler, os segmentos são troços fluviais ao longo dos quais o nº de ordem permanece constante.

A expressão de cálculo é a seguinte: $R_b = N_i / (N_{i+1})$.

Os valores desta relação dentro duma bacia hidrográfica tendem a ser constantes duma ordem para outra, ou seja, "a soma do número de canais duma determinada ordem segue uma lei geométrica inversa, cujo primeiro termo é a unidade de primeira ordem e a razão é a relação de bifurcação" (lei do número de canais, ou 1ª lei da composição da drenagem, segundo Horton).

O valor mínimo possível da R_b é 2. As bacias quase circulares tendem a atingir valores próximos de 2, aumentando o R_b com o alongamento progressivo das bacias. Horton constatou também que o valor de R_b aumenta em áreas de relevo muito dissecado.

e) Relação entre o comprimento médio dos canais de cada ordem (Horton)

Esta relação (RC_m) define a razão entre a média dos comprimentos dos segmentos de uma dada ordem e a média dos com-

primentos dos segmentos de ordem imediatamente inferior. $RC_m = C_{mi} / (C_{mi-1})$, em que C_{mi} é o comprimento médio dos canais de ordem i e C_{mi-1} é o comprimento médio dos canais de ordem imediatamente inferior.

Numa determinada bacia hidrográfica, "os comprimentos médios dos canais de cada ordem ordenam-se segundo uma série geométrica directa, cujo primeiro termo é o comprimento médio dos canais de primeira ordem, e a razão é a relação entre os comprimentos médios" (2ª lei da composição da drenagem, segundo Horton).

f) Densidade de Drenagem (Horton)

$$D_d = C_t / A \text{ (km / km}^2\text{)}$$

Exprime a relação entre o comprimento total (C_t) dos cursos de água da bacia (em km), sejam eles perenes, sazonais ou ocasionais, e a área (A) da bacia (em km^2).

Em condições climáticas similares, a densidade de drenagem depende fundamentalmente do substrato geológico e do relevo. A D_d fornece uma indicação da eficiência da drenagem natural das bacias, sendo estas tanto mais bem drenadas quanto maior for a D_d . Em igualdade dos restantes factores, as bacias com maior densidade de drenagem tenderão a produzir pontas de cheia mais elevadas do que as bacias com menor densidade de drenagem (fig. 5).

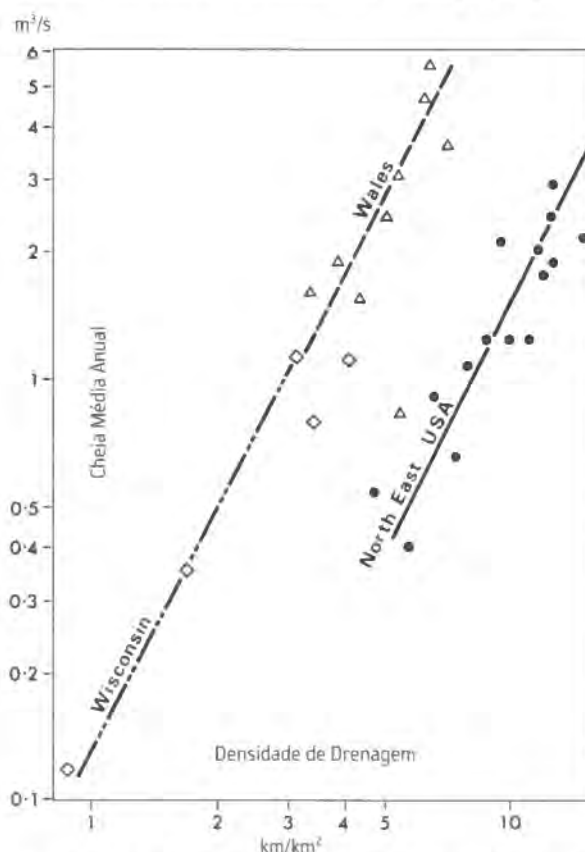


FIGURA 5 - Relação entre a densidade de drenagem e as cheias, em bacias dos Estados Unidos (Gregory e Walling, 1973)

A representação dos cursos de água depende do documento de base utilizado (mapa, fotografia aérea) e, sobretudo, da escala do mesmo. Assim, considerando que o documento base é o mapa topográfico à escala 1:25 000, poder-se-ão definir, para o território de Portugal continental, as classes de densidade de drenagem representadas no quadro 5.

QUADRO 5 – DENSIDADES DE DRENAGEM, VÁLIDAS PARA A ESCALA 1:25 000

Densidade de Drenagem (km / km ²)	Classe
< 3	muito baixa
3 ≤ Dd < 5	baixa
5 ≤ Dd < 7	média
7 ≤ Dd < 9	elevada
9 ≤ Dd < 11	muito elevada
Dd ≥ 11	extremamente elevada

g) Densidade Hídrica ou Hidrográfica (Horton)

$$Dh = N / A \quad (n^{\circ} \text{ de cursos de água} / \text{km}^2)$$

em que: N é o número total de cursos de água existentes na bacia e A é a área da bacia. Segundo o critério de Strahler, o n^o de cursos de água corresponde aos de 1^a ordem, portanto à magnitude (Shreve) de uma bacia.

A Dh representa a capacidade que uma área tem em gerar novos cursos de água. Deve ser utilizada em conjunto com a densidade de drenagem, pois rios compridos e pouco numerosos podem dar, para uma mesma área, a mesma densidade de drenagem que os rios curtos e muito numerosos.

h) Coeficiente de Manutenção (Schumm)

Este índice (Cm) fornece o valor da área mínima necessária ao desenvolvimento ou manutenção de um metro de canal de escoamento. Calcula-se multiplicando por mil o inverso da densidade de drenagem.

$$Cm = \frac{1}{Dd} \times 1000, \text{ em que } Cm \text{ se expressa em metros e a } Dd$$

Dd em km / km².

É considerado um dos valores numéricos mais importantes para a caracterização da rede de drenagem, sendo que, quanto menor for o seu valor mais rapidamente a água proveniente da precipitação se concentra nos canais fluviais, aumentando a susceptibilidade das bacias hidrográficas às cheias.

i) Coeficiente de Torrencialidade (Vivas)

$$Ct = Dh \times Dd$$

em que: Dh é a densidade hidrográfica e Dd é a densidade de drenagem.

É um índice utilizado sobretudo em pequenas bacias hidrográficas, afectadas pelo escoamento torrencial. A torrencialidade de uma bacia será tanto maior quanto mais elevado for o valor do índice.

1. 3. Relevo

O relevo influencia de forma determinante o comportamento das bacias hidrográficas relativamente às cheias. As suas componentes mais importantes são: a posição relativa das serras / montanhas, a exposição aos fluxos pluviogénicos, a altitude e o declive. O efeito orográfico nas precipitações é mais acentuado quando existe uma maior densidade de serras / montanhas numa determinada região do que numa serra isolada. No primeiro caso, os impulsos sucessivos das massas de ar, instabilizam-nas progressivamente, levando a que as vertentes expostas aos fluxos pluviogénicos sejam as mais chuvosas, e aumentando os valores da precipitação em direcção ao topo das serras. Em Portugal, com o domínio da circulação de oeste, essas vertentes são as expostas a NW, W e SW. Contudo, no caso de serras isoladas, as vertentes mais chuvosas podem não ser as expostas aos fluxos pluviogénicos, porque as massas de ar atingem um máximo de instabilidade perto do topo, pelo que as precipitações tendem a ser mais elevadas próximo do topo, mas já nas vertentes expostas a leste (Reis, 2006).

O declive interfere na velocidade de escoamento e na infiltração (quanto maior ele for maior será a velocidade e menor a infiltração, fig. 6), bem como na intensidade da erosão hídrica e fluvial, tendo consequências

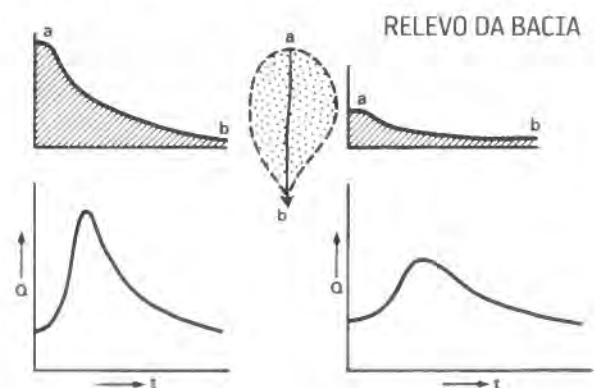


FIGURA. 6 – Influência do relevo da bacia (altitude e declive) no hidrograma de cheia; ab – perfil longitudinal do curso de água, Q – caudal, t – tempo (Gregory e Walling, 1973).

na carga sólida transportada durante as cheias e, logo, no seu poder destruidor. As bacias declivosas são, por norma, mais perigosas nas situações de cheia, porque favorecem o aumento da velocidade da progressão da onda de cheia e da sua capacidade de transporte da carga sólida.

Existem vários indicadores que permitem quantificar a componente relevo das bacias hidrográficas. Apresentação e discussão dos principais: curva hipsométrica, altitude e altura média, amplitude altimétrica, coeficiente orográfico, índice de rugosidade, índice de encaixe dos vales, relação de relevo, índice de declive de Roche, declive dos canais fluviais, relação de declive dos canais fluviais e perfil longitudinal dos cursos de água.

a) Curva hipsométrica

Representa a área da bacia que fica acima de cada cota, em referência ao nível médio do mar, expressa em unidades de área ou em percentagem da área total (quadro 6). A curva hipsométrica (fig. 7) exprime a maneira pela qual o volume rochoso da bacia, situado abaixo da superfície topográfica, se distribui desde a base até ao topo; o valor correspondente a esse volume foi designado, por Strahler, de integral hipsométrica (fig. 7). A elaboração da curva hipsométrica permite calcular outros indicadores de relevo da bacia.

b) Altitude média da bacia (fig. 7)

$$Z = \frac{\sum z_i A_i}{A}$$

em que:

Z é a altitude média da bacia;

z_i é a altitude média de cada classe altitudinal considerada;

A_i é a área dessa classe altitudinal;

A é a área da bacia.

c) Altura média da bacia

Define-se de modo semelhante à anterior, mas em vez de se referir a cotas acima do nível médio do mar (altitudes), refere-se a cotas acima da área em estudo (alturas). Assim será:

$$H = \frac{\sum h_i A_i}{A}$$

em que:

H é a altura média da bacia;

h_i é a altura média de cada classe altitudinal considerada;

A_i é a área dessa classe altitudinal;

A é a área da bacia.

Se toda a área da bacia estiver acima da altitude mínima desta, então:

$$H = Z - A_m \text{ (fig. 7).}$$

d) Amplitude altimétrica

Corresponde à diferença (expressa em metros) entre a altitude do ponto mais elevado da bacia, situado na linha divisória de águas, e a desembocadura da bacia.

$$D = A_M - A_m$$

em que:

D é a amplitude altimétrica;

A_M é a altitude máxima da bacia;

A_m é a altitude mínima da bacia.

e) Coeficiente Orográfico (Fourier)

Este coeficiente "combina duas variáveis essenciais do relevo de uma bacia hidrográfica: a sua altura média, que tem influência sobre a energia potencial da água, e o seu

QUADRO 6 - DISTRIBUIÇÃO ALTITUDINAL NUMA BACIA HIDROGRÁFICA (RAMOS, 1994)

Classe altimétrica (m)	Superfície de cada classe altimétrica		Superfície acumulada (Km ²)	Altitude média entre curvas de nível h (m)	P = Sxh
	Km ² (S)	%			
> 500	0,6	0,3	0,6	514,5	308,7
450 - 500	1,4	0,7	2,0	475,0	665,0
400 - 450	3,6	1,7	5,6	425,0	1530,0
350 - 400	2,8	1,3	8,4	375,0	1050,0
300 - 350	3,0	1,4	11,4	325,0	975,0
250 - 300	3,9	1,8	15,3	275,0	1072,5
200 - 250	7,0	3,3	22,3	225,0	1575,0
150 - 200	14,5	6,9	36,8	175,0	2537,5
100 - 150	70,8	33,4	107,6	125,0	8850,0
50 - 100	80,6	38,1	188,2	75,0	6045,0
< 50	23,5	11,1	211,7	28,0	658,0
Σ	211,7	100,0	-	-	25266,7

A_M - Altitude máxima: 529 m | A_m - Altitude mínima: 6 m | Z - Altitude média: $H = \Sigma P / \Sigma S = 119$ m | H - Altura média: $H - A_m = 113$ m

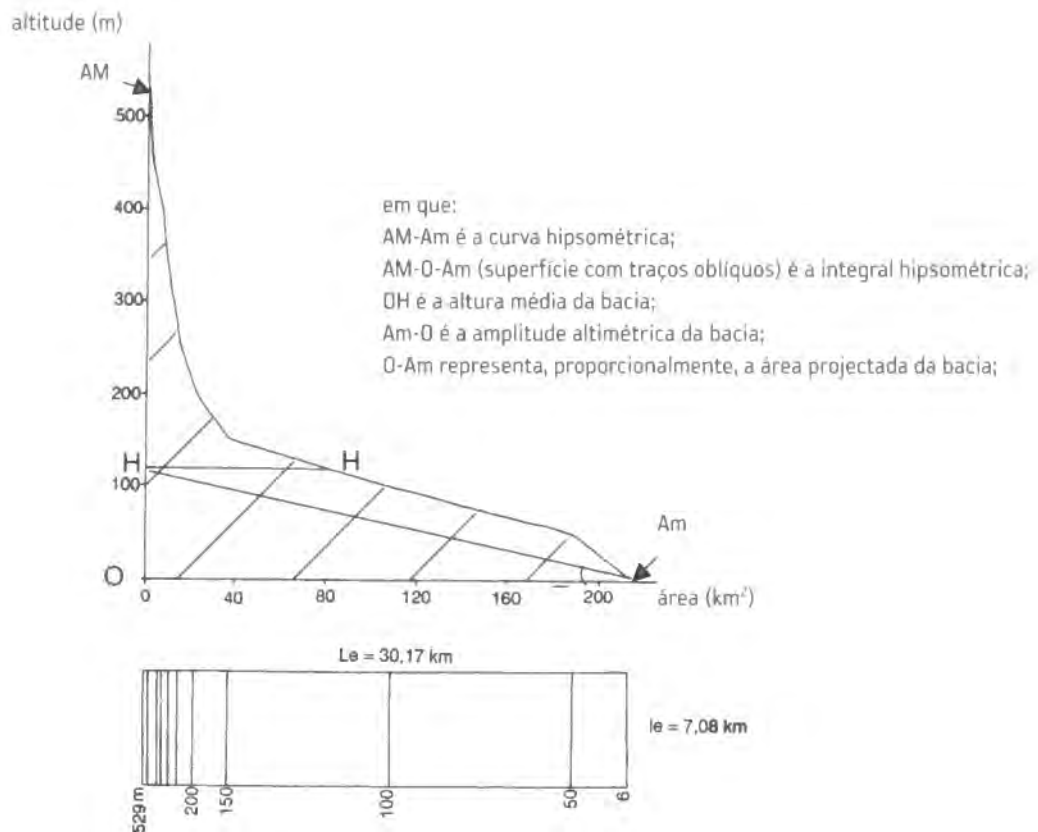


FIGURA. 7 - Curva hipsométrica e rectângulo equivalente de uma bacia hidrográfica (Ramos, 1994, modificado).

declive, que tem influência sobre o escoamento superficial. Admite-se que um valor deste coeficiente igual ou inferior a 6 indica um relevo pouco acentuado, e superior a 6 um relevo acentuado" (Lencastre e Franco, 2003). Assim:

$$Co = H \operatorname{tg} \alpha \text{ (fig. 7), ou seja, } Co = \frac{H^2}{A}$$

em que:

Co é o coeficiente orográfico;

H é a altura média da bacia (em metros).

A é a área da bacia (em km²).

f) Índice de Rugosidade (Melton)

Este índice combina o declive e o comprimento das vertentes com a densidade de drenagem, expressando-se como número adimensional, que resulta do produto entre a amplitude altimétrica (D) e a densidade de drenagem (Dd):

$$Ir = D \cdot Dd$$

O Índice de Rugosidade será tanto maior quanto mais acidentada for uma bacia e mais dissecada ela estiver pela erosão fluvial. As áreas potencialmente assoladas por cheias rápidas são possuidoras de elevados índices de rugosidade.

g) Relação de Relevo (Schumm)

É a razão entre a amplitude altimétrica (D) da bacia e com-

primento da bacia (Cb), medido paralelamente ao curso de água principal.

$Rr = D / Cb$, em que Rr é a relação de relevo. Neste índice, os valores da D e do Cb são em metros.

É um indicador da inclinação da bacia influenciando, por isso, a velocidade do escoamento. Quanto maior for a relação de relevo de uma bacia mais rápida é a chegada das águas à sua desembocadura.

h) Índice de Declive de Roche

É um dos índices de declive médio da bacia mais utilizados. Considera toda a área da bacia, entre a cota mais elevada e a mais baixa, tal que:

$$IdR = \frac{AM - Am}{Le}$$

em que:

IdR é o índice de declive de Roche (m / km);

AM é a altitude máxima da bacia (m);

Am é a altitude mínima da bacia (m);

Le é o comprimento do rectângulo equivalente da bacia (km).

O rectângulo equivalente (fig. 7) é um rectângulo de comprimento Le e largura le , de perímetro e área iguais aos da bacia, tal que:

$$\begin{cases} 2 (Le + le) = P & \text{sendo que } P = \frac{Kc \sqrt{A}}{0,28} \\ Le \cdot le = A \end{cases}$$

Resolvendo este sistema de equações em relação a Le e tendo em conta que de $Kc = 0,28 (P / \sqrt{A})$ teremos:

$$Le = 0,89 Kc \sqrt{A} (1 + (\sqrt{1 - (1,12 / Kc)^2})$$

i) Perfil longitudinal dos cursos de água

Relaciona as cotas do respectivo leito com as distâncias à desembocadura. Muitas vezes, associam-se em vários troços do perfil longitudinal os perfis transversais do vale, para definir as variações da largura e forma deste (fig. 8).

A análise destes perfis permite detectar troços com diferentes características morfológicas, bem como eventuais

rupturas de declive, ou troços de maior erosão e / ou assoreamento potenciais devidos às mudanças de inclinação dos cursos de água.

j) Declive dos canais fluviais (Horton)

$$Dc = Dh / Ch$$

O declive, inclinação ou gradiente (Dc) dos canais fluviais é a relação entre o desnível (Dh) dos seus pontos extremos e o respectivo comprimento (Ch). Tanto pode ser medido para o curso de água principal, ou para cada um dos seus afluentes, como para os segmentos que formam uma linha de água. Vem expresso em % (se as unidades estiverem em metros e multiplicando o resultado final por 100), graus ou m/km (se D estiver em metros e Ch em km). Um curso de água será tanto mais inclinado quanto maior for o valor deste índice.

O declive dos canais controla, em boa parte, a velocidade do escoamento à superfície e, conseqüentemente, o tempo que

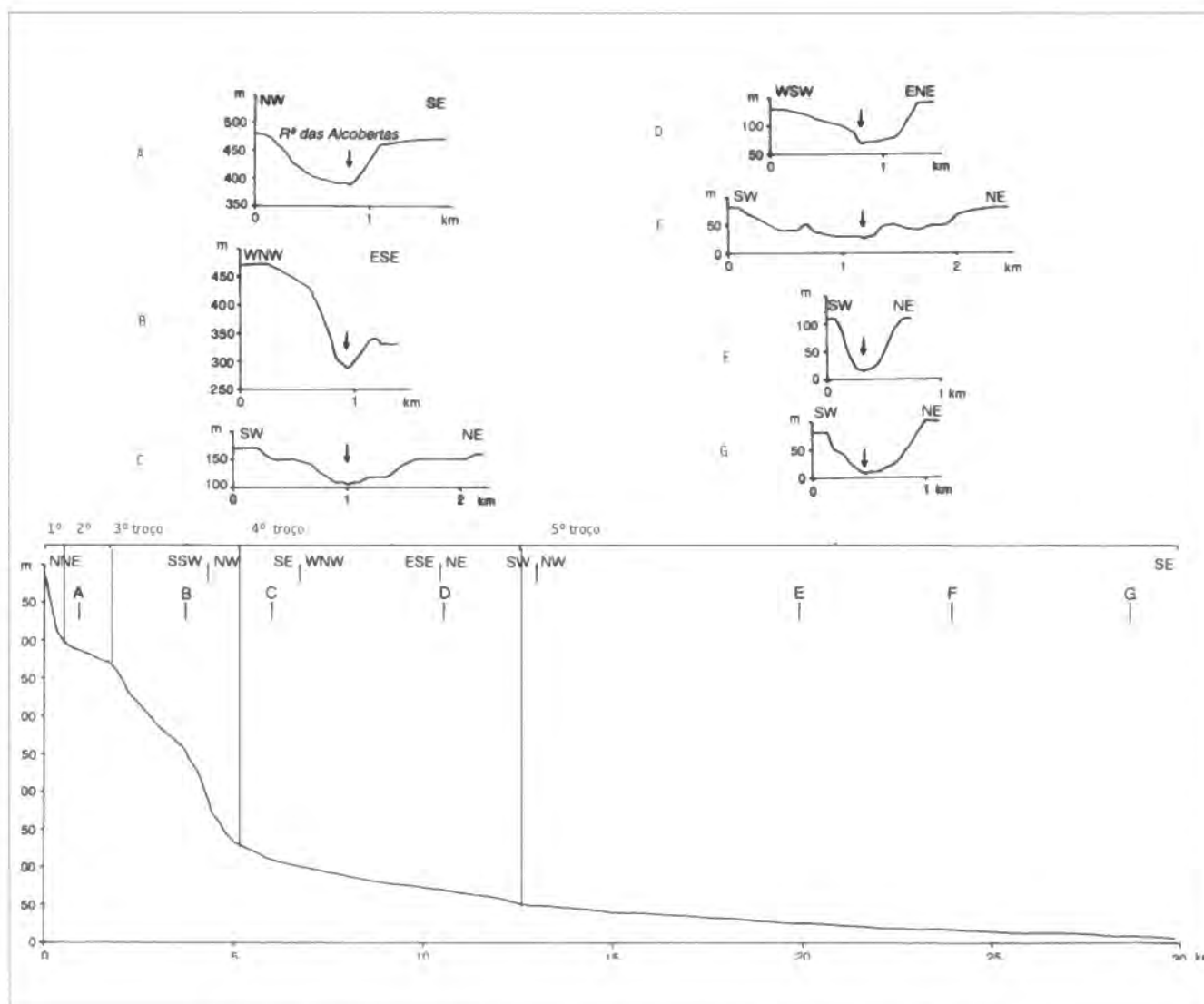


FIGURA. 8 - Perfil longitudinal e perfis transversais de um curso de água (Ramos, 1994, modificado).

a água leva a concentrar-se nos canais fluviais, afectando a grandeza das pontas de cheia, a infiltração e a susceptibilidade à erosão dos solos das bacias de drenagem.

l) Relação de Declive dos canais fluviais (Horton)

$$Rdc = dci / (dci+1)$$

É a razão (Rdc) entre o declive médio dos canais de uma dada ordem (dci) e o declive médio dos canais de ordem imediatamente superior (dci+1). A comparação entre o declive médio dos canais de cada ordem permitiu a Horton enunciar a 3ª lei da composição da drenagem: "numa bacia existe uma relação geométrica inversa entre o declive médio dos canais de determinada ordem e o declive médio dos canais de ordem imediatamente superior, na qual o primeiro termo é o declive médio dos canais de primeira ordem e a razão é a relação entre os gradientes dos canais".

1.4. Solo e Subsolo

Os solos e o substrato geológico condicionam o escoamento superficial, as pontas de cheia e os fenómenos de erosão nas bacias hidrográficas, logo, da carga sólida que os cursos de água podem transportar durante as cheias.

Os solos constituem a película superficial das bacias e influenciam o escoamento destas através da sua espessura e textura. O substrato geológico influencia o escoamento através dos litofácies, da estrutura e da rede de falhas e fracturas. Exemplos.

Discussão das noções de porosidade, porosidade efectiva, permeabilidade e condutividade hidráulica.

Porosidade: razão entre o volume de espaços vazios de uma amostra de solo ou rocha e o volume total da amostra. **Porosidade efectiva:** razão entre o volume de água que pode drenar livremente de uma amostra saturada de solo ou rocha e o volume total da amostra. A porosidade efectiva é assim sempre menor que a porosidade. Ambas se exprimem em percentagem. A porosidade diminui com a compactação, com a coerência, com a cimentação dos sedimentos e com o desenvolvimento do metamorfismo. A porosidade, ou capacidade dos solos e rochas de reterem água, é assim mais elevada nos solos e nas formações geológicas não consolidadas do que nas rochas.

A permeabilidade, ou aptidão do solo e subsolo de se deixar atravessar pela água, depende da dimensão dos espaços vazios e não do seu volume. A permeabilidade mede-se em cm^2 ou em darcy (1 darcy = 10^8 cm^2). A condutividade hi-

dráulica mede a velocidade da passagem da água, através de uma unidade de secção transversal de um solo ou rocha saturados, por unidade de tempo, sob condições hidráulicas e a temperaturas específicas. Exprime-se em cm/h ou em m/dia (quadro 7). A permeabilidade dos solos é condicionada fundamentalmente pela sua textura, estrutura, grau de compactação e teor de matéria orgânica. A permeabilidade das rochas depende, além da textura, estrutura e grau de compactação, de todo o tipo de descontinuidades que nelas se observam (planos de estratificação, planos de xistosidade, diaclases e outras fracturas, falhas e zonas de esmagamento).

Assim, os meios de permeabilidade reduzida, ao dificultar a infiltração, favorecem o desenvolvimento e hierarquização da rede de drenagem e a densidade desta, aumentam o escoamento directo e potenciam quer a frequência quer a magnitude das cheias (fig. 9). Pelo contrário, as bacias com solos ou com subsolo de permeabilidade elevada, em situação de cheia, têm curvas de decrescimento mais suaves, uma vez que são alimentadas por um importante escoamento de base; ou seja, têm menos cheias e pontas de cheia mais reduzidas, mas de maior duração.

QUADRO 7 - VALORES DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA PARA VÁRIOS TIPOS DE SUBSOLO

Tipo de subsolo	Condutividade hidráulica (m/dia)	Classe de permeabilidade	
Formações geológicas não consolidadas	cascalho	$10^2 - 10^6$	elevada
	areia	$10 - 10^4$	elevada
	silte	$10^{-3} - 10$	variável a reduzida
	argila	$10^{-6} - 10^{-4}$	reduzida
Rochas	arenito	$10^{-2} - 10^2$	variável
	calcário	$10^{-2} - 10$	variável
	conglomerado	$10^{-4} - 1$	variável
	argilito	$10^{-7} - 10$	reduzida
	basalto alterado	$10^{-5} - 10^{-2}$	reduzida
	tufos	$10^{-4} - 10^{-2}$	reduzida
	granito e afins	$10^{-7} - 10^{-3}$	reduzida
	xisto e grauvaque	$10^{-9} - 10^{-5}$	muito reduzida
	ardósia	$10^{-9} - 10^{-6}$	muito reduzida
gnaisse, micaxisto	$10^{-9} - 10^{-6}$	muito reduzida	

Valores de condutividade hidráulica extraídos de Gregory e Walling (1973).

Classificação da textura dos solos (fig. 10) e relação com os valores de porosidade, porosidade efectiva e condutividade hidráulica (quadro 8). Os quatro tipos hidrológicos do solo, segundo a classificação do Soil Conservation Service (referida para os tipos de rocha mãe):

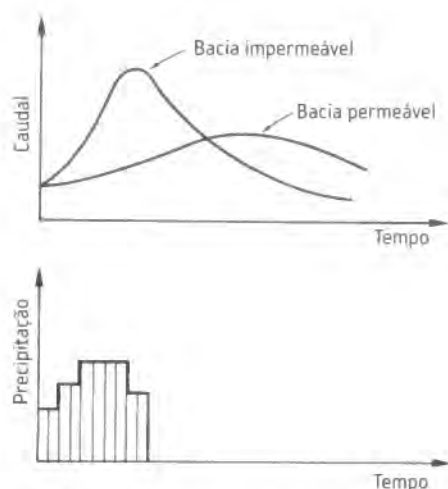


FIGURA 9 - Relação entre a permeabilidade do solo e subsolo e os caudais de ponta das cheias (Villela e Mattos, 1975).

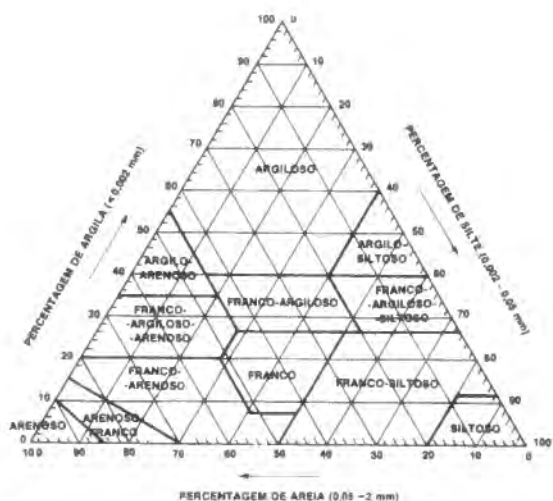


FIGURA 10 - Diagrama da textura do solo

QUADRO 8 - VALORES MÉDIOS DE POROSIDADE E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA PARA AS VÁRIAS CLASSES DE SOLOS, SEGUNDO RAWLS, BRAKENSIEK E MILLER, EM CHOW ET AL, 1988.

Classe de solo	Porosidade (%)	Porosidade efectiva (%)	Condutividade hidráulica (cm / h)
Arenoso	43,7	41,7	11,78
arenoso - franco	43,7	40,1	2,99
franco - arenoso	45,3	41,2	1,09
Franco	46,3	43,4	0,34
franco - siltoso	50,1	48,6	0,65
franco - argiloso - arenoso	39,8	33,0	0,15
franco - argiloso	46,4	30,9	0,10
franco - argiloso - siltoso	47,1	43,2	0,10
argiloso - arenoso	43,0	32,1	0,06
argilo - siltoso	47,9	42,3	0,05
Argiloso	47,5	38,5	0,03

(i) tipo A (baixo potencial para o escoamento superficial), têm uma elevada capacidade de infiltração, mesmo quando completamente humedecidos; incluem areias profundas com drenagem boa ou excessiva;

(ii) tipo B (potencial de escoamento superficial abaixo da média), têm uma capacidade de infiltração moderada, quando completamente humedecidos; incluem principalmente solos medianamente profundos, com textura moderadamente fina e moderadamente grosseira, e medianamente drenados, com rocha-mãe no essencial granítica, quartzítica e arenítica;

(iii) tipo C (potencial de escoamento superficial acima da média), têm uma capacidade de infiltração baixa, quando completamente humedecidos; incluem essencialmente solos com camadas impermeáveis subjacentes e solos com textura moderadamente fina, com rocha mãe xistenta;

(iv) tipo D (elevado potencial de escoamento superficial), têm uma capacidade de infiltração muito baixa, quando completamente humedecidos; incluem principalmente solos argilosos expansíveis, solos com o nível freático sempre próximo da superfície e solos com substratos impermeáveis a pouca profundidade (complexos argilosos e margosos e solos de espessura muito reduzida sobre substrato xistento).

1.5. A vegetação e o uso do solo

A vegetação e o uso do solo somam a sua influência à dos factores pedológicos e geológicos no condicionamento à rapidez do escoamento superficial, às taxas de evaporação e na capacidade de intercepção e retenção da água. A dinâmica hidrológica das bacias hidrográficas é assim condicionada pelo tipo de revestimento (arbóreo, arbustivo ou herbáceo), pela densidade de cobertura e pelo tipo de utilização antrópica (florestal, agrícola, incultos, ou da impermeabilização dos solos com os mais diversos tipos de construções e materiais).

A urbanização de áreas extensas conduz a uma redução brutal nos valores da infiltração e no aumento considerável do escoamento directo, potenciando os picos de cheia (fig. 11).

Na análise quantitativa das bacias de drenagem para avaliação da sua susceptibilidade às cheias, define-se o tipo de uso do solo, as áreas ocupadas por cada tipo, aplicando-se de seguida, para cada uma dessas áreas, o número de escoamento (N), que depende do tipo hidrológico do solo, da sua utilização e das condições de superfície (quadro 9).

QUADRO 9 - VALORES DO NÚMERO DE ESCOAMENTO (N) PARA DIVERSOS USOS DO SOLO, SEGUNDO O SOIL CONSERVATION SERVICE (CARVALHO, 1998 E LENCASTRE E FRANCO, 2003)

Uso do solo	Condições de superfície	Tipo hidro. de solo			
		A	B	C	D
Solo lavrado		77	86	91	94
Culturas arvenses	segundo o maior declive	64	76	84	88
	segundo as curvas de nível	62	74	82	85
	segundo as curvas de nível e em terraços	60	71	79	82
Rotações de cultura	segundo o maior declive	62	75	83	87
	segundo as curvas de nível	60	72	81	84
	segundo as curvas de nível e em terraços	57	70	78	82
Pastagens	pobre	68	79	86	89
	normal	49	69	79	84
	boa	39	61	74	80
	pobre, segundo as curvas de nível	47	67	81	88
Prado permanente	normal, segundo as curvas de nível	25	59	75	83
	boa, segundo as curvas de nível	6	35	70	79
	normal	30	58	71	78
Florestas	muito abertas ou de transpiração baixa	56	75	86	91
	abertas ou de transpiração baixa	46	68	78	84
	normal	36	60	70	76
Áreas sociais rurais	densas ou de transpiração alta	26	52	62	69
	muito densas ou de transpiração alta	15	44	54	61
	normal	59	74	82	86
Espaços abertos, relvados, campos de golfe, cemitérios, etc.	boas condições: cobertura com 75% ou mais de relva	39	61	74	80
	fracas condições: cobertura com 50% a 75% de relva	49	69	79	84
Áreas comerciais	85 % de impermeabilização	89	92	94	95
Zonas industriais	72% de impermeabilização	81	88	91	93
	lote: 500 m ² e 65% impermeabilizaç.	77	85	90	92
Áreas residenciais (valores médios)	lote: 500 m ² e 65% impermeabilizaç.	61	75	83	87
	lote: 1000 m ² e 38% impermeabilizaç.	57	72	81	86
	lote: 2000 m ² e 25% impermeabilizaç.	54	70	80	85
	lote: 4000 m ² e 20% impermeabilizaç.	51	68	79	84
	parques pavimentados, telhados, passeios, etc.	98	98	98	98
Ruas, estradas	pavimentadas, com sarjetas e colectores	98	98	98	98
	empedradas	76	85	89	91
Superfície impermeável	terra batida	72	82	87	89
		100	100	100	100

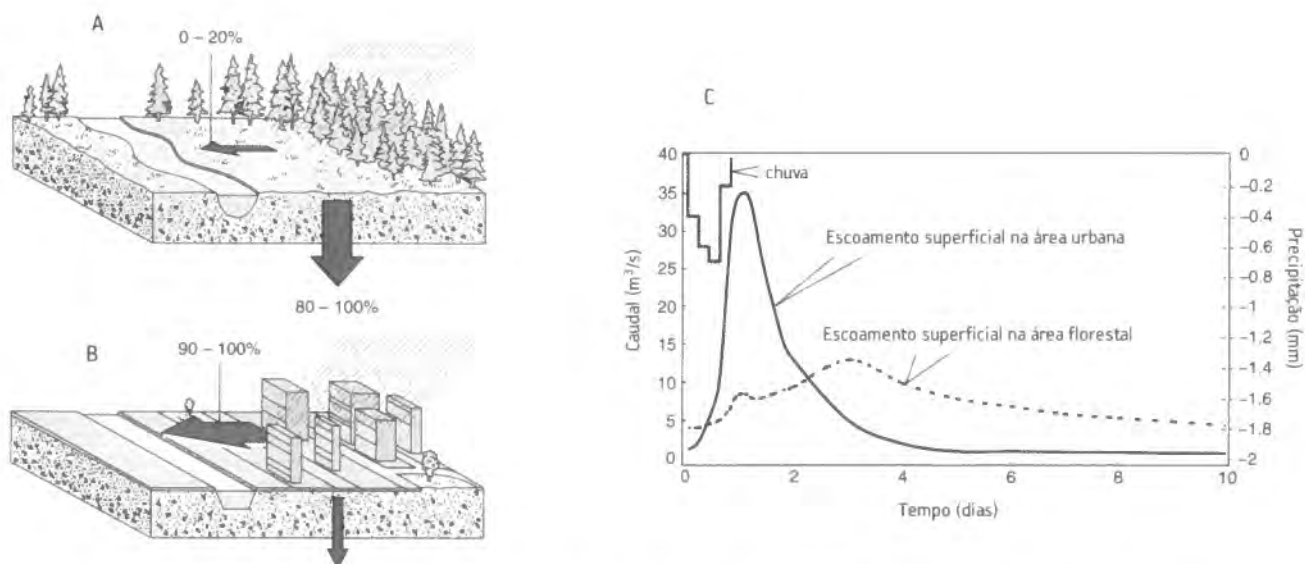


FIGURA. 11 - escoamento superficial vs. infiltração (A - área florestal; B - área urbanizada; Hamblin e Christiansen, 2001) e diferenças nos respectivos caudais de ponta (C; Ward e Trimble, 2004).

2. Tempo de concentração das bacias: definição e métodos de cálculo

As componentes do hidrograma de cheia (fig. 12): curva de crescimento, ponta do hidrograma, curva de decrescimento e curva de esgotamento. Noções de: tempo de precipitação, precipitação útil, tempo base (tempo de crescimento + tempo de decrescimento), tempo de concentração (T_c) e tempo de resposta. A importância da definição do tempo de concentração das bacias para avaliar o caudal máximo de cheia e a forma do hidrograma. Os factores que condicionam o tempo de concentração. O tempo de concentração é maior numa bacia alongada e estreita e é mais curto desde que ela tenha um forte declive e seja arredondada. Aumenta com o comprimento dos diferentes canais que constituem a rede de drenagem. Os transbordos, a elevada permeabilidade do solo e subsolo e o coberto vegetal aumentam-no. É considerado uma característica constante da bacia, independentemente das características das chuvas. Dele depende, em grande parte, a ponta de cheia. Métodos de cálculo do tempo de concentração.

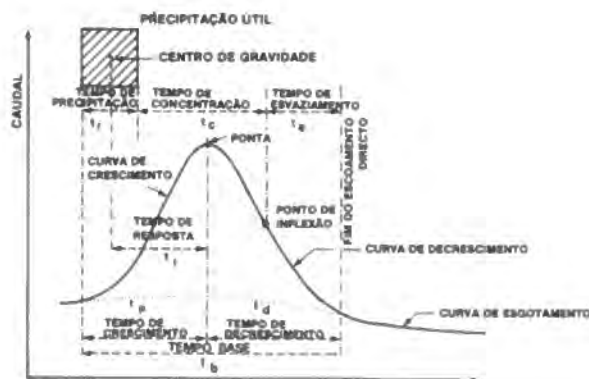


FIGURA. 12 - Características do hidrograma de cheia (Lencastre e Franco, 2003).

A determinação numérica do tempo de concentração depende essencialmente do comprimento do curso de água principal da bacia hidrográfica e do declive do canal fluvial. Existem numerosas fórmulas empíricas para o cálculo do T_c .

Recentemente (IPR, 2005) foram testadas 14 dessas fórmulas (Kirpich, Picking, US Corps of Engineers, Ven Te Chow, DNOS, Kirpich modificada, George Ribeiro, Pasini, Ventura, Rossi, Giandotti, método do Lag, John Collins, método do número de curva CN - US Soil Conservation Service), em diversas bacias de drenagem, cuja área variou entre 0,03 a 3476 km², o comprimento do curso de água principal entre 0,1 a 105 km, e o desnível máximo entre 20 a 1130m. Para comparação foram determinadas as velocidades mé-

dias, dadas pelo quociente entre o comprimento do curso de água principal e o tempo de concentração, porque esse valor varia menos de uma bacia para a outra do que o próprio tempo de concentração. As que apresentaram os resultados mais consistentes são as seguintes:

a) Fórmula de Kirpich modificada

$$T_c = 1,42 (Ch^3/D)^{0,385}$$

em que:

T_c é o tempo de concentração, em horas;

Ch é o comprimento do curso de água principal em km;

D é o desnível máximo em metros.

b) Fórmula do DNOS

$$T_c = \frac{10}{K} \cdot \frac{A^{0,3} Ch^{0,2}}{I^{0,4}}$$

em que:

T_c é o tempo de concentração, em minutos;

A é a área da bacia em hectares;

Ch é o comprimento do curso de água principal em metros;

I é a inclinação média do curso de água principal em %;

K depende das características da bacia, a saber:

$K=2,0$ (solos areno-argilosos, com vegetação densa, elevada absorção)

$K=3,0$ (solos comuns, cobertos de vegetação, absorção apreciável)

$K=4,0$ (solos argilosos, cobertos de vegetação, absorção média)

$K=4,5$ (solos argilosos, com vegetação, pouca absorção)

$K=5,0$ (terrenos com rocha, escassa vegetação, baixa absorção)

$K=5,5$ (substrato rochoso, vegetação rala, reduzida absorção).

c) Fórmula de George Ribeiro

$$T_c = \frac{16 Ch}{(1,05 - 0,2p) (100 I)^{0,04}}$$

em que:

T_c é o tempo de concentração, em minutos;

Ch é o comprimento do curso de água principal em km;

I é a inclinação média do curso de água principal em m/m;

p é um parâmetro dado pela porção da bacia coberta por vegetação (para uma área coberta de vegetação de 30%, $p=0,30$).

d) Fórmula de Pasini

$$T_c = 0,107 \cdot \frac{\sqrt[3]{A \cdot Ch}}{\sqrt{I}}$$

em que:

T_c é o tempo de concentração, em horas;

A é a área da bacia em km^2 ;

Ch é o comprimento do curso de água principal em km;

I é a inclinação média do curso de água principal em m/m.

e) Fórmula de Ventura

$$T_c = 0,127 \sqrt{(A/I)}$$

em que:

T_c é o tempo de concentração, em horas;

A é a área da bacia em km^2 ;

I é a inclinação média do curso de água principal em m/m.

A fórmula de Temez (não analisada neste estudo) tem dado bons resultados em Portugal, nomeadamente nas pequenas bacias hidrográficas da região de Lisboa:

$$T_c = 0,3 (Ch / I^{0,25})^{0,76}$$

em que:

T_c é o tempo de concentração, em horas;

Ch é o comprimento do curso de água principal em km;

I é a inclinação média do curso de água principal em km/km.

3. Avaliação dos caudais de ponta de cheia

Discussão de vários métodos de avaliação das pontas de cheia: (i) métodos empíricos não cinemáticos, que não utilizam o tempo de concentração das bacias (T_c); (ii) métodos empíricos cinemáticos, que consideram o T_c ; sendo (i) e (ii) aplicados aos cursos de água que não dispõem de registos hidrométricos ou em que o número desses registos é insuficiente e (iii) métodos estatísticos.

3.1. Métodos empíricos não cinemáticos

Os métodos empíricos podem especificar ou não o período de retorno. Apresentam-se os métodos de Loureiro (1984) e Portela e Dias (2003) aplicados especificamente a Portugal continental.

a) Método de Loureiro (1984)

$$Q_p = CA^Z \quad \text{em que:}$$

Q_p é o caudal de ponta de cheia em m^3/s ;

C é um parâmetro regional, relacionado com o período de retorno;

Z é um parâmetro regional relacionado com as características físicas das bacias;

A é a área da bacia hidrográfica em km^2 .

Este método baseia-se na correlação entre os valores de caudais máximos instantâneos anuais, determinados para 55 estações hidrométricas a partir da lei de Gumbel, com

características físicas das próprias bacias, para diversos períodos de retorno. A fórmula de Loureiro permite transpor, para as bacias de características análogas mas sem registos hidrométricos, a avaliação de um caudal de cheia com determinado período de retorno. A regionalização desses valores encontra-se na fig. 13.

b) Método de Portela e Dias (2003)

Este método, mais recente, considerou os caudais máximos instantâneos anuais de 120 estações hidrométricas e a proposta de regionalização obedece aos limites das bacias hidrográficas. São consideradas seis regiões, a saber: (i) região litoral a norte do rio Tejo; (ii) bacia hidrográfica do Douro (engloba as bacias da margem direita, a montante da confluência com o Tâmega, incluindo a bacia deste rio, e na margem esquerda, as bacias a montante da confluência com o Paiva); (iii) bacia hidrográfica do Mondego (a montante da estação hidrométrica de St^a Clara - Coimbra); (iv) bacia hidrográfica do rio Tejo (engloba a margem direita a montante de Santarém e a margem esquerda de acordo com os limites do respectivo Plano de Bacia); (v) região litoral a sul do rio Tejo; (vi) região interior a sul do rio Tejo.

A sequência do cálculo, que conduz à estimativa de caudais de ponta de cheia em secções não monitorizadas de Portugal continental, efectua-se de acordo com as seguintes etapas:

(i) definição da bacia hidrográfica relativa à secção de cálculo e obtenção da respectiva área (A);

(ii) identificação da região homogénea em que tal bacia se insere;

(iii) leitura, na curva regional de distribuição de frequências referente à anterior região, do valor da relação $Q_T/Q_{2,33}$ correspondente ao período de retorno, T , para o qual se pretende estimar o caudal de ponta de cheia, Q_T (fig. 14);

(iv) leitura, na curva que, para a região, relaciona áreas de bacias hidrográficas com índices de cheias, do valor deste índice, $Q_{2,33}$ (média dos caudais máximos instantâneos anuais), correspondente à área A obtida em i), em que:

- $Q_{2,33} = 1,376 A^{0,685}$ para a região litoral a norte do rio Tejo;
- $Q_{2,33} = 0,930 A^{0,839}$ para a bacia hidrográfica do Douro;
- $Q_{2,33} = 0,730 A^{0,918}$ para a bacia hidrográfica do Mondego;
- $Q_{2,33} = 1,982 A^{0,549}$ para a bacia hidrográfica do rio Tejo;
- $Q_{2,33} = 0,596 A^{1,065}$ para a região litoral a sul do rio Tejo;
- $Q_{2,33} = 2,228 A^{0,595}$ para a região interior a sul do rio Tejo;

(v) obtenção do caudal de ponta de cheia pretendido, Q_T , por multiplicação dos valores de $Q_T/Q_{2,33}$ e de $Q_{2,33}$ respectivamente obtidos em iii) e iv).

DESCRIÇÃO DAS ZONAS

ZONA	DESCRIÇÃO
1	Bacias superiores do Cávado, Tâmega e Tua.
2	Bacia do Lima, bacia intermédia do Cávado, bacia superior do Ave, bacias inferiores do Tâmega e do Tua e bacia superior do Sabor.
3	Bacias inferiores do Cávado, Ave, Douro, Vouga e Mondego.
4	Bacia inferior do Sabor, margem esquerda da bacia do Douro a montante da confluência do Paiva, bacias superiores do Vouga e Mondego.
5	Troço superior da bacia do Zêzere e bacias do Ponsul, Ocreza Aravil e Erges (não se devendo aplicar em áreas onde a isoieta seja superior a 1400 mm).
6	Troço inferior da bacia do Zêzere, bacias dos rios Nabão, Alviela, Maior, Alenquer, Grande da Pipa, Trancão, troço inferior das bacias do Sorraia e ribeira de Muge. Na área compreendida entre a Serra dos Candeeiros, Serra de Montejunto e o Litoral, bem como na bacia do Lis a expressão deverá ser aplicada com reservas, dada a curta série histórica das observações.
7	Troço superior da bacia do Sorraia, bacias da ribeira de Nisa, do Sever e do Caia.
8	Baixo Sado.
9	Alto Sado, regiões superiores das bacias do Xarrama, Degebe e Baixo Mira.
10	Bacia do Guadiana entre as zonas 9 e 11.
11	Ribeiras do Algarve, Baixo Guadiana e Alto Mira (não se devendo aplicar em áreas onde a isoieta seja superior a 1000 mm e inferior a 500 mm).

VALORES DOS PARÂMETROS C E Z

ZONAS	VALOR DE Z	VALOR DE C PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO - ANOS						
		5	10	25	50	100	500	1000
1	0,807	2,85	3,72	4,53	5,27	6,10	7,54	8,57
2	0,694	5,44	6,97	8,58	9,67	10,98	13,91	15,63
3	0,510	24,93	30,50	39,14	43,49	49,50	57,05	64,83
4	0,489	11,68	16,79	19,19	22,31	26,20	33,13	38,52
5	0,375	31,30	40,07	50,22	58,07	66,89	80,51	94,38
6	0,466	19,17	26,26	34,69	42,22	48,27	66,24	72,29
7	0,761	3,66	4,49	5,58	6,02	8,45	9,60	11,03
8	0,816	1,66	2,09	2,58	2,98	3,37	4,27	4,75
9	0,738	3,39	4,28	5,54	6,44	7,40	9,50	10,68
10	0,745	2,38	3,06	3,68	4,12	4,94	6,23	7,27
11	0,784	3,45	4,40	5,40	6,24	7,09	8,97	9,88

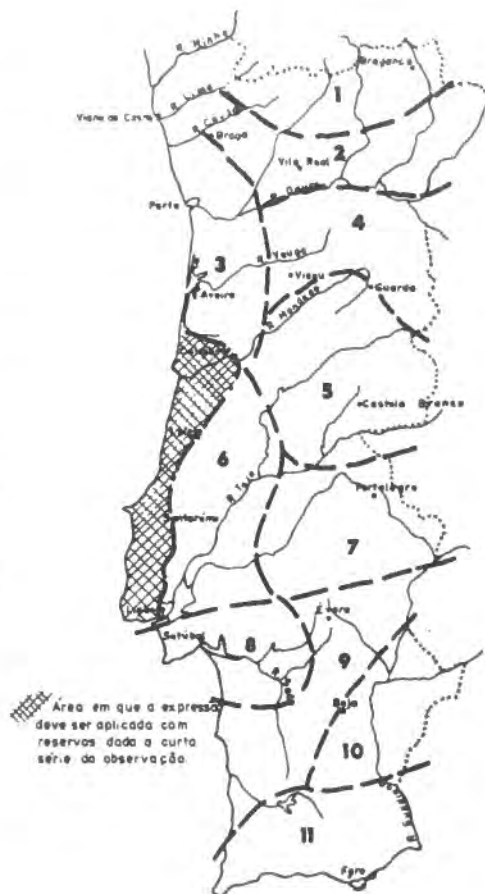


FIGURA. 13 - Método de Loureiro (1984) para a determinação de caudais de ponta em Portugal continental.

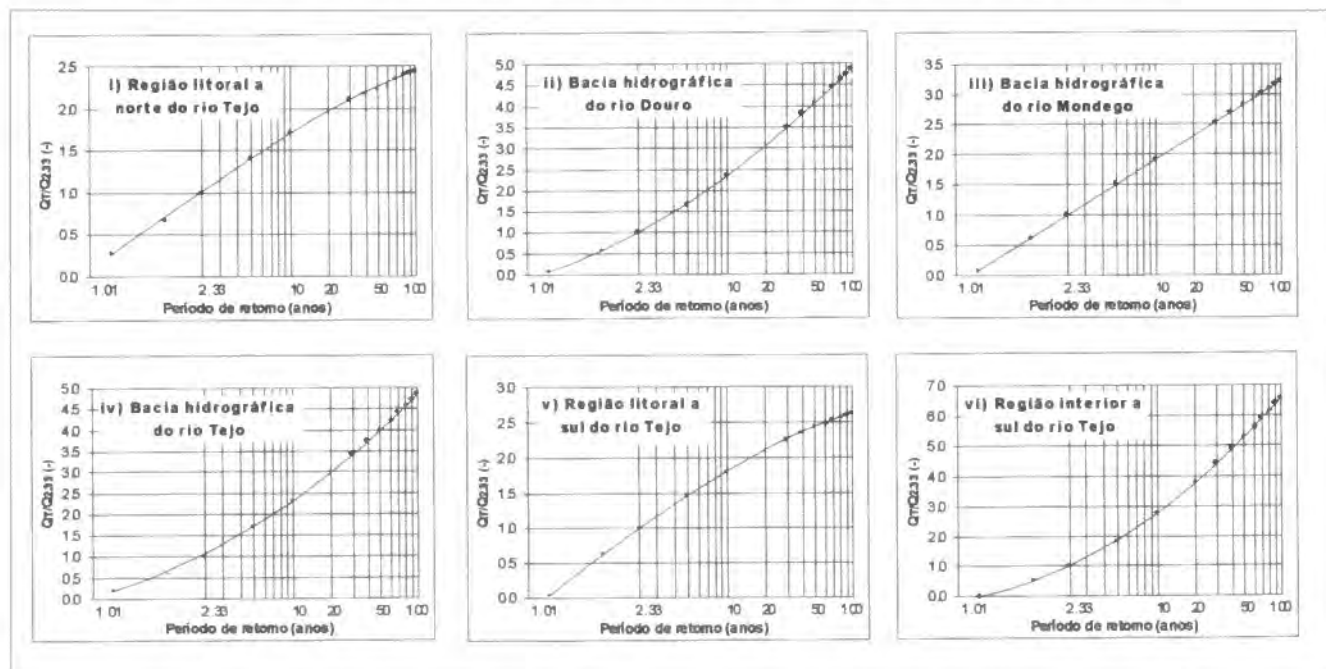


FIGURA. 14 - Curvas regionais de distribuição de frequências (Portela e Dias, 2003).

3.2. Métodos empíricos cinemáticos

a) Método Racional

Este método deve ser usado em pequenas bacias, nas quais a uniformidade da precipitação é facilmente admissível, e tem dado resultados bastante satisfatórios em bacias com $A < 25 \text{ km}^2$.

$$Q_p = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6} \quad \text{em que:}$$

Q_p é o caudal de ponta em m^3/s ,

C é o coeficiente de escoamento superficial (quadro 10),

i é a intensidade da precipitação com duração igual ao tempo de concentração da bacia (mm/h),

A é a área da bacia (km^2).

QUADRO 10 – VALORES DO COEFICIENTE DE ESCOAMENTO (C), PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO RACIONAL, SEGUNDO O AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (CARVALHO, 1998)

ZONAS URBANAS

TIPO DE OCUPAÇÃO	COEFICIENTE	
Relvados	solo arenoso, plano (declive até 2%)	0,05 - 0,10
	solo arenoso, declive médio (2 - 7%)	0,10 - 0,15
	solo arenoso, declive grande (> 7%)	0,15 - 0,20
Zonas comerciais	áreas centrais	0,70 - 0,95
	áreas periféricas	0,50 - 0,70
	moradias	0,30 - 0,50
	blocos residenciais afastados	0,40 - 0,60
Zonas residenciais	blocos residenciais próximos	0,60 - 0,75
	áreas suburbanas	0,25 - 0,40
	áreas de apartamentos	0,50 - 0,70
Zonas industriais	dispersas	0,50 - 0,80
	densas	0,60 - 0,90
Parques, cemitérios	0,10 - 0,25	
Campos de jogos	0,20 - 0,35	
Parques ferroviários	0,20 - 0,40	
Zonas não aproveitadas	0,10 - 0,30	
Vias (automóveis e peões)	0,75 - 0,85	
Telhados	0,75 - 0,95	

ZONAS AGRÍCOLAS

TIPO DE OCUPAÇÃO	COEFICIENTE	
Com infiltração acima da média	culturas	0,20
	pastagens	0,15
	bosques e florestas	0,10
Com infiltração média, sem lenticulas de argila, lodos e solos equivalentes	culturas	0,40
	pastagens	0,35
	bosques e florestas	0,30
Com infiltração superior à média, solos argilosos densos ou solos com rocha próxima da superfície e solos delgados sobre rocha impermeável	culturas	0,50
	pastagens	0,45
	bosques e florestas	0,40

b) Método de Turazza – Giandotti

É um método muito utilizado na avaliação do caudal de ponta de cheia em Itália e também em Portugal, onde é consagrado no Regulamento das Pequenas Barragens. Tem uma estrutura semelhante à fórmula racional, com a peculiaridade do coeficiente de escoamento ser determinado pela área da bacia.

$$Q_p = \frac{\lambda \cdot A \cdot h}{T_c}$$

em que:

Q_p é o caudal de ponta em m^3/s ,

A é a área da bacia em km^2 ,

λ é um parâmetro em função de A (quadro 11),

h é a precipitação máxima em mm , correspondente ao tempo de concentração e a um determinado período de retorno estatístico,

T_c é o tempo de concentração da bacia em horas.

Esta fórmula apresenta alguns problemas nos valores de λ para bacias com $A < 500 \text{ km}^2$ uma vez que os valores equivalentes aos da fórmula racional ultrapassam o valor de 1 (quadro 11), o que não faz sentido. Por esse motivo, Quintela (1984) sugere que se utilize $\lambda = 0,224$, para $A < 500 \text{ km}^2$.

QUADRO 11 – PARÂMETRO λ DA FÓRMULA DE GIANDOTTI PARA O CÁLCULO DO CAUDAL MÁXIMO DE CHEIA

Área da bacia em km^2	λ
< 300	0,346
300 - 500	0,277
500 - 1000	0,197
1000 - 8000	0,100
8000 - 20 000	0,076
20 000 - 70 000	0,055

c) Método do Soil Conservation Service

Este método, desenvolvido em 1990, é especialmente destinado a bacias com utilização agrícola.

$$Q_p = \frac{0,277 \cdot k \cdot A \cdot h_u}{T_p}$$

em que:

Q_p é o caudal de ponta da cheia em m^3/s ,

k é um factor de ponta, em função do declive da bacia (pode variar entre 1, no caso das bacias muito declivosas, e 0,5 no caso de bacias muito planas; nos cálculos habituais utiliza-se $k = 0,75$),

A é a área da bacia em km^2 ,

h_u é a precipitação útil em mm ,

T_p é o tempo de crescimento em horas,

0,277 é o factor de conversão das unidades utilizadas.

$$h_u = \frac{(h - h_0)^2}{h + 4h_0} \quad (h > h_0)$$

$$h_u = 0 \quad (h \leq h_0)$$

em que:

h é a precipitação total da chuvada considerada,

h_0 exprime as perdas iniciais da chuvada, antes de se iniciar o escoamento de superfície, e é calculado pela expressão

$$h_0 = \frac{5080}{N} - 50,8$$

em que N é o número de escoamento, que depende do tipo hidrológico do solo, da sua utilização (quadro 9), e das condições de superfície. N resulta da média ponderada dos números de escoamento das várias áreas homogêneas em que se dividir a bacia.

Os números de escoamento indicados no quadro 9 correspondem a condições médias de humedecimento do solo (*antecedent moisture conditions* – AMC); ou seja, AMC - II. Quando as AMC se aproximam dos seus valores extremos

(AMC – I para o limite inferior e AMC – III para o limite superior), os valores do quadro 9 deverão ser corrigidos com os do quadro 12.

No cálculo dos caudais de cheia para frequências de ocorrência elevadas considera-se geralmente o solo como bem humedecido, ou seja, utiliza-se N para AMC - III.

O tempo de crescimento T_p é calculado de acordo com a expressão seguinte:

$$T_p = \frac{1}{2} T_r + 0,6 T_c$$

em que

T_r é a duração da precipitação útil em horas,

T_c é o tempo de concentração da bacia em horas.

A duração T_r da precipitação útil pode ser calculada, subtraindo à duração T da precipitação total o tempo necessário para chover o correspondente às perdas iniciais h_0 , considerando a intensidade média $i = h(T) / T$, constante durante toda a chuvada. Assim:

$$T_r = T - \frac{h_0}{h(T)/T}$$

QUADRO 12 – CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS NÚMEROS DE ESCOAMENTO (N) PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE HUMEDECIMENTO DO SOLO (LENCASTRE E FRANCO, 2003).

AMC			AMC			AMC			AMC		
II	I	III	II	I	III	II	I	III	II	I	III
100	100	100	80	63	91	60	40	78	40	22	60
99	97	100	79	62	91	59	39	77	39	21	59
98	94	99	78	60	90	58	38	76	38	21	58
97	91	99	77	59	89	57	37	75	37	20	57
96	89	99	76	58	89	56	36	75	36	19	56
95	87	98	75	57	88	55	35	74	35	18	55
94	85	98	74	55	88	54	34	73	34	18	54
93	83	98	73	54	87	53	33	72	33	17	53
92	81	97	72	53	86	52	32	71	32	16	52
91	80	97	71	52	86	51	31	70	31	16	51
90	78	96	70	51	85	50	31	70	30	15	50
89	76	96	69	50	84	49	30	69	25	12	43
88	75	95	68	48	84	48	29	68	20	9	37
87	73	95	67	47	83	47	28	67	15	6	30
86	72	94	66	46	82	46	27	66	10	4	22
85	70	94	65	45	82	45	26	65	5	2	13
84	68	93	64	44	81	44	25	64	0	0	0
83	67	93	63	43	80	43	25	63			
82	66	92	62	42	79	42	24	62			
81	64	92	61	41	78	41	23	61			

3.3. Métodos estatísticos

Pelos motivos expostos no Módulo 1 (ponto 3.7) apresentam-se os métodos de Gumbel e Pearson tipo 3 no cálculo dos caudais de ponta para diferentes probabilidades de ocorrência, em séries hidrométricas de cursos de água portugueses.

Na década de 1950, Ven Te Chow observou que a maioria das funções de frequência utilizadas na análise de fenómenos hidrológicos, para valores anuais, pode ser resolvida por equações do tipo $x_T = X + K S_x$, em que:

x_T é o valor procurado da variável em estudo para o período de retorno T ,

X e S_x são, respectivamente, a média e o desvio-padrão da série de valores,

K é o factor de frequência que é função do período de retorno e do número de anos da amostra, o qual é tabelado em conformidade com a lei de distribuição utilizada.

a) Método de Gumbel

Para a lei de Gumbel o factor K encontra-se no quadro 13.

Também se podem calcular os períodos de retorno de uma série de valores de caudais máximos instantâneos anuais, ordenando-os por ordem decrescente e dando-lhes um número de ordem (r). A probabilidade de excedência $P(x)$ é calculada para cada valor da série (x) utilizando diversas fórmulas, das quais se destacam a de Gringorten (a melhor, Shaw, 1994) e a de Weibull (a mais utilizada, porque mais simples de aplicar). Ambas dão resultados semelhantes (exemplo da fig. 15).

Fórmula de Gringorten: $P(x) = \frac{r - 0,44}{N + 0,12}$

Fórmula de Weibull: $P(x) = \frac{r}{N + 1}$

em que:

r é o número de ordem do caudal considerado,
 N é o número de anos da série considerada.

$P(x)$ é a probabilidade de um dado valor de x ser igualado ou excedido num dado ano.

$P(x) = \frac{1}{T(x)}$ então $T(x) = \frac{1}{P(x)} = \frac{1}{1 - F(x)}$ e

$F(x) = \frac{T(x) - 1}{T(x)}$

Assim, se T (período de retorno) = 100 anos, $P(x) = 0,01$ e $F(x) = 0,99$.

QUADRO 13 – FACTOR K (LEI DE GUMBEL)

$F(x) = X + K S_x$

F(x)	K	F(x)	K
0,001	-1,957	0,70	0,354
0,01	-1,641	0,80	0,719
0,02	-1,514	0,90	1,305
0,05	-1,306	0,95	1,866
0,10	-1,100	0,99	3,137
0,20	-0,821	0,995	3,679
0,25	-0,705	0,998	4,395
0,30	-0,595	0,999	4,936
0,40	-0,382	0,9995	5,476
0,50	-0,164	0,9999	6,731
0,60	0,074		

X (m³/s)	Nº de ordem	P (X) F (X) (Gringorten)	P (X) F (X) (Weibull)
594.7	1	.023 .977	.040 .960
434.7	2	.065 .935	.080 .920
430.4	3	.106 .894	.120 .880
402.1	4	.148 .852	.160 .840
395.9	5	.189 .811	.200 .800
390.8	6	.231 .769	.240 .760
369.5	7	.272 .728	.280 .720
356.8	8	.313 .687	.320 .680
346.9	9	.355 .645	.360 .640
342.9	10	.396 .604	.400 .600
342.6	11	.438 .562	.440 .560
321.4	12	.479 .521	.480 .520
318.0	13	.521 .479	.520 .480
317.2	14	.562 .438	.560 .440
300.2	15	.604 .396	.600 .400
290.0	16	.645 .355	.640 .360
284.6	17	.687 .313	.680 .320
283.2	18	.728 .272	.720 .280
273.3	19	.769 .231	.760 .240
256.3	20	.811 .189	.800 .200
196.8	21	.852 .148	.840 .160
190.3	22	.894 .106	.880 .120
185.5	23	.935 .065	.920 .080
138.8	24	.977 .023	.960 .040

$X = 323.5$ (média) | $s_x = 97.1$ (desvio-padrão)

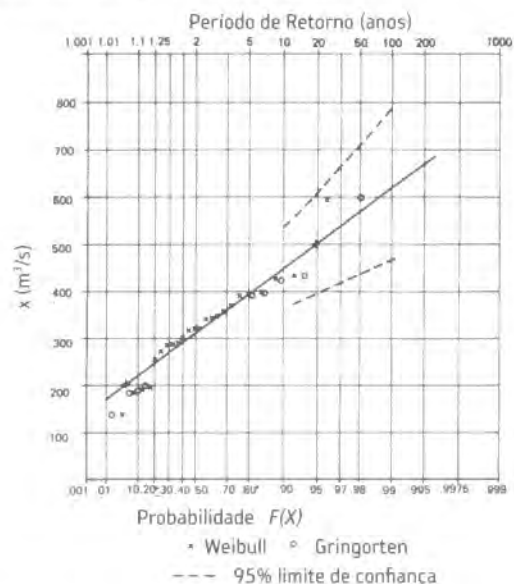


FIGURA 15 – Cálculo da recorrência das cheias através do método de Gumbel (extraído de Shaw, 1994).

b) Método de Pearson tipo 3

Para a lei de Pearson 3, além da média e desvio-padrão da série de valores considera-se, ainda, o coeficiente de assimetria da série (γ), do qual dependem também os valores de K (quadro 14). Hazen recomenda que, para séries pequenas de caudais máximos instantâneos anuais, se multiplique o coeficiente de assimetria da série pelo factor $(1 + 8,5 / N)$.

Como vários autores vêm demonstrando (ver Módulo 1, ponto 3,7), este método parece ser o que melhor se ajusta ao comportamento dos rios portugueses (fig. 16).

Nota: a ocorrência da cheias é de natureza aleatória e os métodos estatísticos permitem avaliar o valor do caudal de ponta máximo anual em função da probabilidade de ocorrência (ou, o que é equivalente, ao período de retorno). Essa avaliação é importante para caracterizar o risco de inundação de certas áreas, em consequência do fenómeno de transbordo dos cursos de água ou de ser excedido o caudal de dimensionamento de certas estruturas hidráulicas. Os critérios para a fixação do período de retorno não são uniformes nos diferentes países, contudo os critérios de Tonini (quadro 15) são recomendados por diversos autores (Quintela, 1984 e Carvalho, 1998, entre outros).

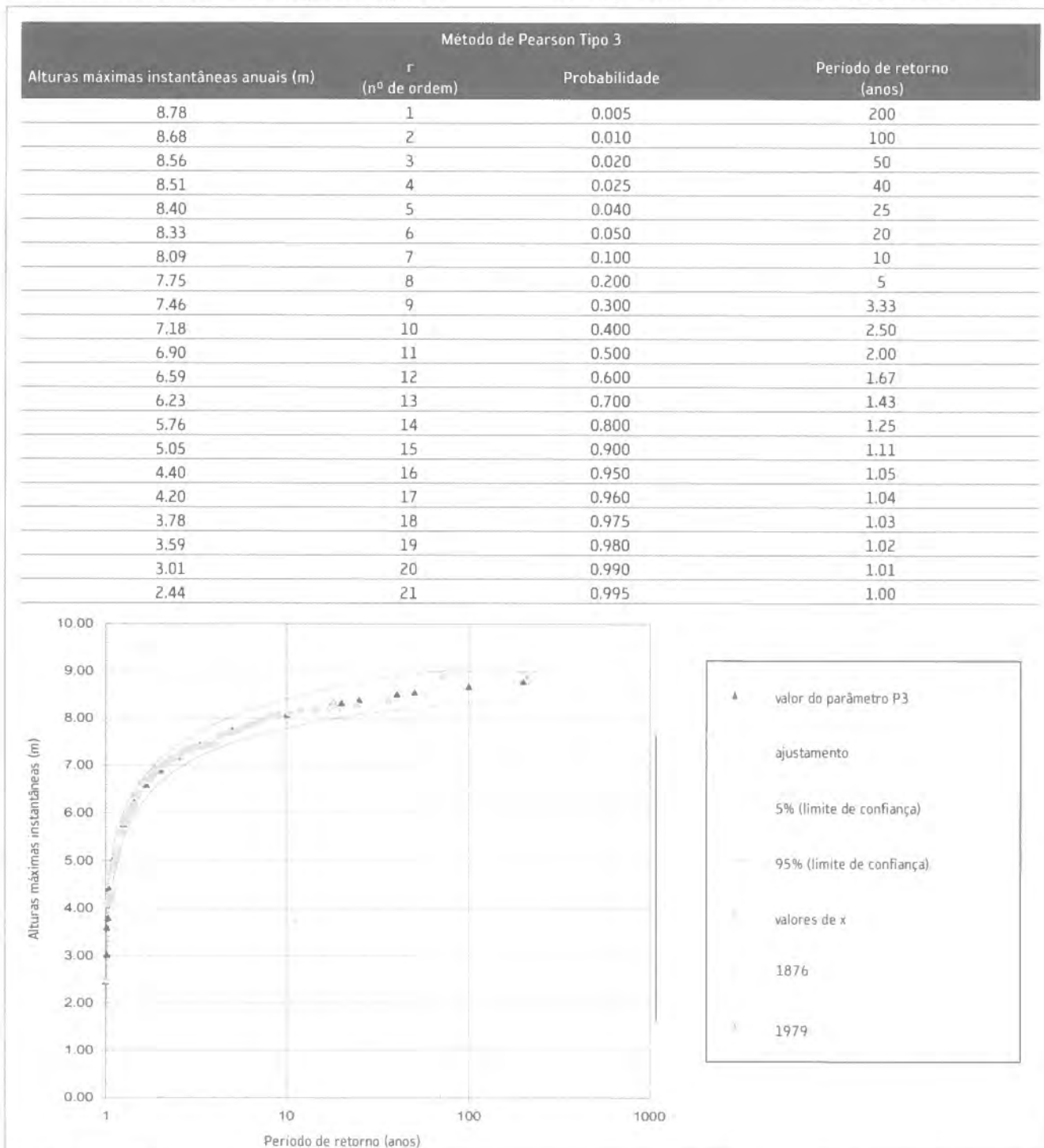


FIGURA. 16 - Cálculo dos períodos de retorno das alturas máximas instantâneas anuais do Rio Tejo, em Ponte de Santarém, segundo o método de Pearson tipo 3 (Azevêdo, Nunes e Ramos, 2004)

QUADRO 14 - VALORES DO COEFICIENTE K PARA A DISTRIBUIÇÃO DE PEARSON TIPO 3
(EXTRAÍDO DE LENCASTRE E FRANCO, 2003).

Coef. de Assimetria g	T, PERÍODO DE RETORNO (ANOS)										
	1,0101	1,0526	1,1111	1,2500	2	5	10	25	50	100	200
	G, PROBABILIDADE DE SER EXCEDIDO (%)										
	99	95	90	80	50	20	10	4	2	1	0,5
ASSIMETRIA POSITIVA											
3,0	-0,667	-0,665	-0,660	-0,636	-0,396	0,420	1,180	2,278	3,152	4,051	4,970
2,9	-0,690	-0,688	-0,681	-0,651	-0,390	0,440	1,195	2,277	3,134	4,013	4,909
2,8	-0,714	-0,711	-0,702	-0,666	-0,384	0,460	1,210	2,275	3,114	3,973	4,847
2,7	-0,740	-0,736	-0,724	-0,681	-0,376	0,479	1,224	2,272	3,093	3,932	4,783
2,6	-0,769	-0,762	-0,747	-0,696	-0,368	0,499	1,238	2,267	3,071	3,889	4,718
2,5	-0,799	-0,790	-0,771	-0,711	-0,360	0,518	1,250	2,262	3,048	3,845	4,652
2,4	-0,832	-0,819	-0,795	-0,725	-0,351	0,537	1,262	2,256	3,023	3,800	4,584
2,3	-0,867	-0,850	-0,819	-0,739	-0,341	0,555	1,274	2,248	2,997	3,753	4,515
2,2	-0,905	-0,882	-0,844	-0,752	-0,330	0,574	1,284	2,240	2,970	3,705	4,444
2,1	-0,946	-0,914	-0,869	-0,765	-0,319	0,592	1,294	2,230	2,942	3,636	4,372
2,0	-0,990	-0,949	-0,895	-0,777	-0,307	0,609	1,302	2,219	2,912	3,605	4,398
1,9	-1,037	-0,984	-0,920	-0,788	-0,294	0,627	1,310	2,207	2,881	3,553	4,223
1,8	-1,087	-1,020	-0,945	-0,799	-0,282	0,643	1,318	2,193	2,848	3,499	4,147
1,7	-1,140	-1,056	-0,970	-0,808	-0,268	0,660	1,324	2,179	2,815	3,444	4,069
1,6	-1,197	-1,093	-0,994	-0,817	-0,254	0,675	1,329	2,163	2,780	3,388	3,990
1,5	-1,256	-1,131	-1,018	-0,825	-0,240	0,690	1,333	2,146	2,743	3,330	3,910
1,4	-1,318	-1,168	-1,041	-0,832	-0,225	0,705	1,337	2,128	2,706	3,271	3,828
1,3	-1,383	-1,206	-1,064	-0,838	-0,210	0,719	1,339	2,108	2,666	3,211	3,745
1,2	-1,449	-1,243	-1,086	-0,844	-0,195	0,732	1,340	2,087	2,626	3,149	3,661
1,1	-1,518	-1,280	-1,107	-0,848	-0,180	0,745	1,341	2,066	2,585	3,087	3,575
1,0	-1,588	-1,317	-1,128	-0,852	-0,164	0,758	1,340	2,043	2,542	3,022	3,489
0,9	-1,660	-1,353	-1,147	-0,854	-0,148	0,769	1,339	2,018	2,498	2,957	3,401
0,8	-1,733	-1,388	-1,166	-0,856	-0,132	0,780	1,336	1,993	2,453	2,891	3,312
0,7	-1,806	-1,423	-1,183	-0,857	-0,116	0,790	1,333	1,967	2,407	2,824	3,223
0,6	-1,880	-1,458	-1,200	-0,857	-0,099	0,800	1,328	1,939	2,359	2,755	3,132
0,5	-1,955	-1,491	-1,216	-0,856	-0,083	0,808	1,323	1,910	2,311	2,686	3,041
0,4	-2,029	-1,524	-1,231	-0,855	-0,066	0,816	1,317	1,880	2,261	2,615	2,949
0,3	-2,104	-1,553	-1,245	-0,853	-0,050	0,824	1,309	1,849	2,211	2,544	2,856
0,2	-2,178	-1,586	-1,258	-0,850	-0,033	0,830	1,301	1,818	2,159	2,472	2,763
0,1	-2,252	-1,616	-1,270	-0,846	-0,017	0,836	1,292	1,785	2,107	2,400	2,670
0,0	-2,326	-1,645	-1,282	-0,842	0	0,842	1,282	1,751	2,054	2,326	2,576
ASSIMETRIA NEGATIVA											
-0,1	-2,400	-1,673	-1,292	-0,836	0,017	0,846	1,270	1,716	2,000	2,252	2,482
-0,2	-2,472	-1,700	-1,301	-0,830	0,033	0,850	1,258	1,680	1,945	2,178	2,388
-0,3	-2,544	-1,726	-1,309	-0,824	0,050	0,853	1,245	1,643	1,890	2,104	2,294
-0,4	-2,615	-1,750	-1,317	-0,816	0,066	0,855	1,231	1,606	1,834	2,029	2,201
-0,5	-2,686	-1,774	-1,323	-0,808	0,083	0,856	1,216	1,567	1,777	1,955	2,108
-0,6	-2,755	-1,797	-1,328	-0,800	0,099	0,857	1,200	1,528	1,720	1,880	2,016
-0,7	-2,824	-1,819	-1,333	-0,790	0,116	0,857	1,183	1,488	1,663	1,806	1,926
-0,8	-2,891	-1,839	-1,336	-0,780	0,132	0,856	1,166	1,448	1,606	1,733	1,837
-0,9	-2,957	-1,858	-1,339	-0,769	0,148	0,854	1,147	1,407	1,549	1,660	1,749
-1,0	-3,022	-1,877	-1,340	-0,758	0,164	0,852	1,128	1,366	1,492	1,588	1,664
-1,1	-3,087	-1,894	-1,341	-0,745	0,180	0,848	1,107	1,324	1,435	1,518	1,581
-1,2	-3,149	-1,910	-1,340	-0,732	0,195	0,844	1,086	1,282	1,379	1,449	1,501
-1,3	-3,211	-1,925	-1,339	-0,719	0,210	0,838	1,064	1,240	1,324	1,383	1,424
-1,4	-3,271	-1,938	-1,337	-0,705	0,225	0,832	1,041	1,198	1,270	1,318	1,351
-1,5	-3,330	-1,951	-1,333	-0,690	0,240	0,825	1,018	1,157	1,217	1,256	1,282
-1,6	-3,388	-1,962	-1,329	-0,675	0,254	0,817	0,994	1,116	1,166	1,197	1,216
-1,7	-3,444	-1,972	-1,324	-0,660	0,268	0,808	0,970	1,075	1,116	1,140	1,155
-1,8	-3,499	-1,981	-1,318	-0,643	0,282	0,799	0,945	1,035	1,069	1,087	1,097
-1,9	-3,553	-1,989	-1,310	-0,627	0,294	0,788	0,920	0,996	1,023	1,037	1,044
-2,0	-3,605	-1,996	-1,302	-0,609	0,307	0,777	0,895	0,959	0,980	0,990	0,995
-2,1	-3,656	-2,001	-1,294	-0,592	0,319	0,765	0,869	0,923	0,939	0,946	0,949
-2,2	-3,705	-2,006	-1,284	-0,574	0,330	0,752	0,844	0,888	0,900	0,905	0,907
-2,3	-3,753	-2,009	-1,274	-0,555	0,341	0,739	0,819	0,855	0,864	0,867	0,869
-2,4	-3,800	-2,011	-1,262	-0,537	0,351	0,725	0,795	0,823	0,830	0,832	0,833
-2,5	-3,845	-2,012	-1,250	-0,518	0,360	0,711	0,771	0,793	0,798	0,799	0,800
-2,6	-3,889	-2,013	-1,238	-0,499	0,368	0,696	0,747	0,764	0,768	0,769	0,769
-2,7	-3,932	-2,012	-1,224	-0,479	0,376	0,681	0,724	0,738	0,740	0,740	0,741
-2,8	-3,973	-2,010	-1,210	-0,460	0,384	0,666	0,702	0,712	0,714	0,714	0,714
-2,9	-4,013	-2,007	-1,195	-0,440	0,390	0,651	0,681	0,683	0,689	0,690	0,690
-3,0	-4,051	-2,003	-1,180	-0,420	0,396	0,636	0,660	0,666	0,666	0,667	0,667

QUADRO 15 – PERÍODOS DE RETORNO DO CAUDAL DE DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS HIDRÁULICAS,
SEGUNDO TONINI (CARVALHO, 1998)

TIPO DE ESTRUTURA	PERÍODO DE RETORNO
Drenagem de áreas urbanas, obras de protecção de trabalhos em curso	10 a 20 anos
Obras de defesa contra cheias, consoante as consequências a temer	20 a 100 anos
Obras de defesa costeiras	50 a 120 anos
Órgãos de segurança de barragens de betão:	
a - de pequena dimensão, em zonas pouco habitadas	100 a 250 anos
b - média dimensão, em zonas medianamente habitadas	250 a 500 anos
c - grandes dimensões, em zonas muito habitadas	500 a 1000 anos
Órgãos de segurança de barragens de terra:	
a - de média dimensão, em zonas medianamente habitadas	1000 a 5000 anos
b - grandes dimensões, em zonas muito habitadas	5000 a 10000 anos

MÓDULO III

FUNDOS DE VALE: FORMAS, PROCESSOS E DINÂMICA

1. A importância das escalas de análise

Os factores que afectam a dinâmica fluvial e a evolução das formas fluviais, manifestam-se a diversas escalas temporais e espaciais (fig. 17), além disso, as interacções, cada vez maiores, entre os sistemas naturais e as modificações antrópicas a que estão sujeitos, incrementam essa dinâmica, especialmente no que se refere às mudanças no uso e ocupação do solo. Os esquemas interpretativos de Knighton (1998) e Frissell et al (1986), sintetizados na figura 18. Quanto mais rápida é a evolução do modelado

fluvial maior é a sua susceptibilidade a fenómenos naturais extremos ou a fenómenos induzidos ou acentuados pela acção humana. A abordagem tradicional para a manutenção dos canais fluviais tem sido a de tratar o sintoma e não a causa. Pelo contrário, a análise hidrogeomorfológica integrada da bacia hidrográfica (fig. 18) pode ser utilizada para: (i) identificar correctamente a causa e a escala do problema (local ou da bacia); (ii) identificar os impactes da solução proposta (por exemplo, a montante e a jusante da intervenção no fornecimento de sedimentos); (iii) melhorar a solução proposta.

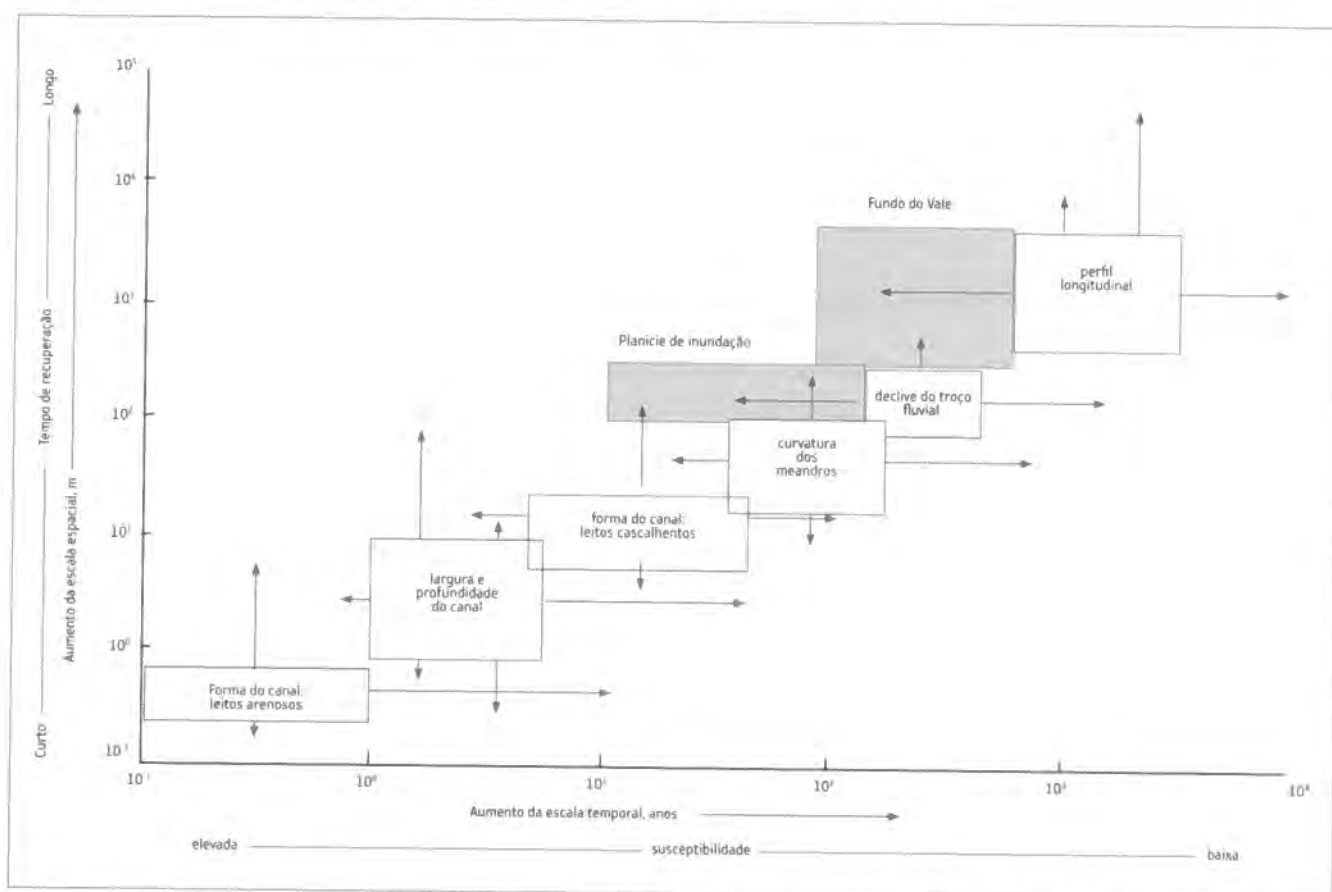


FIGURA. 17 – As escalas de análise temporais e espaciais na dinâmica fluvial (de Knighton, 1998 e Frissell et al, 1986, modificado).

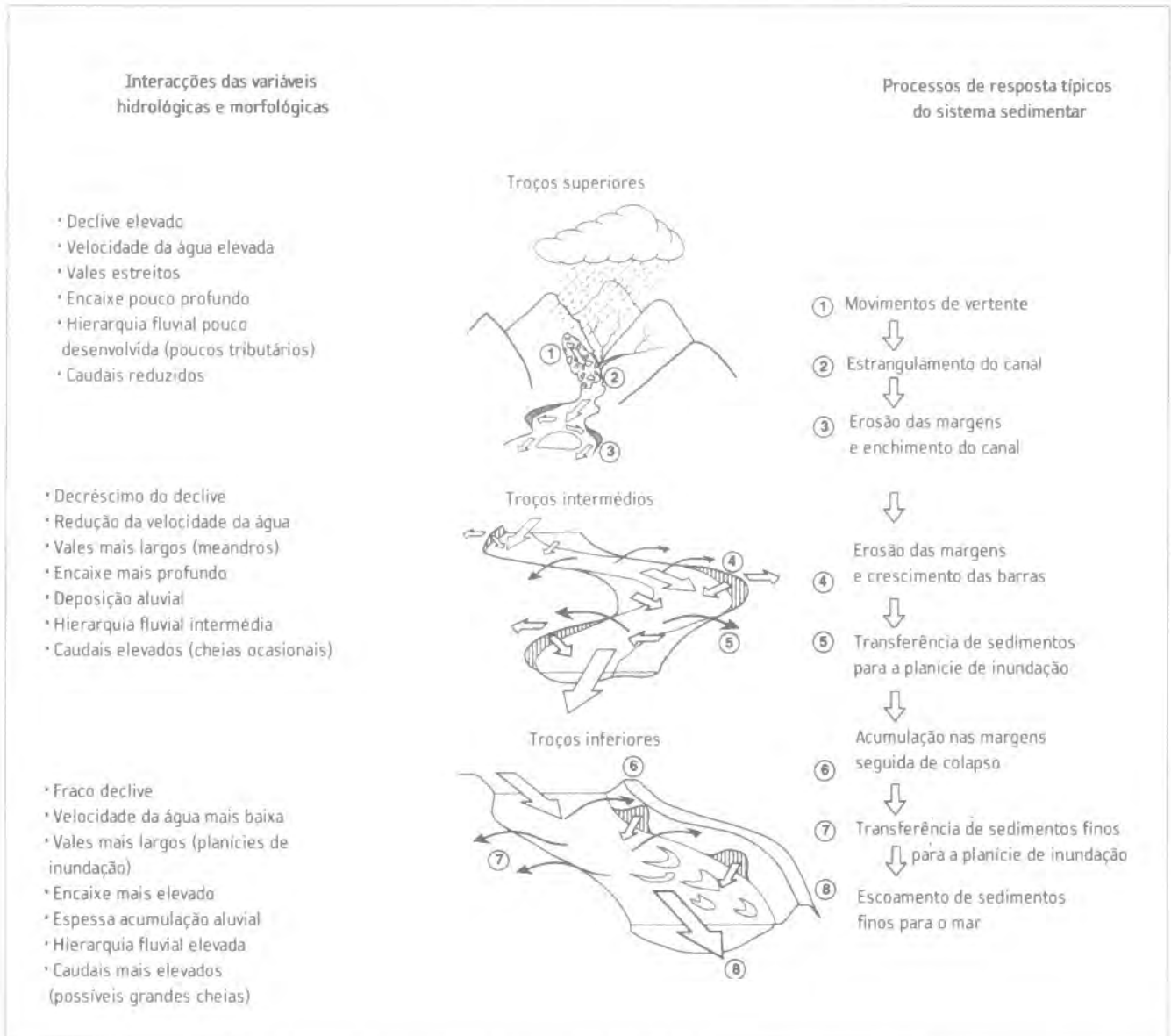


FIGURA. 18 - Interação das componentes da dinâmica fluvial ao longo do perfil longitudinal de um rio (de Sear e Newson, 1993 in Brooks, 2003 e Arbogast, 2007).

2. As macroformas do sistema fluvial: os vales

O escoamento fluvial (organizado), sua hierarquia e relação com o desenvolvimento das formas de incisão fluvial (quadro 16). Os vales, como as macroformas do sistema fluvial. A dependência do alargamento dos vales de processos morfogenéticos distintos: (i) erosão lateral do rio e colapso das vertentes, (ii) escoamento laminar (em toalha) e rebaixamento das vertentes, (iii) escoamento linear (concentrado) com erosão das vertentes em sulcos e ravinas, (iv) meteorização e movimentos de massa.

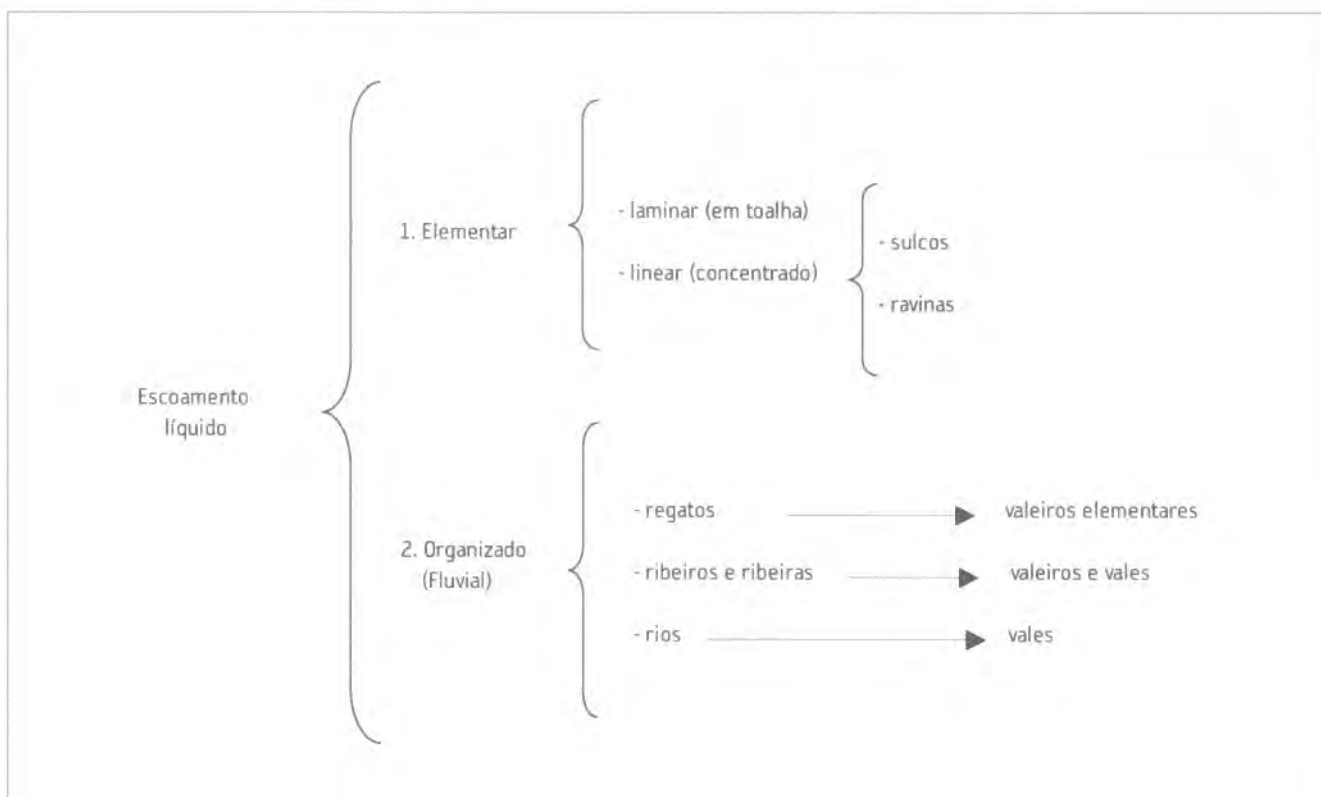
Tipos de vales e seu enquadramento nos diferentes sistemas fluviais (fig. 19 e quadro 17):

1. vales em garganta, muito estreitos e de entalhe profundo, com vertentes quase verticais, que indicam o predomínio do entalhe sobre o alargamento do vale;

2. vales com perfil em V, geralmente com vertentes simétricas, que indicam uma relação equilibrada entre o entalhe e o alargamento (tipo I, vales com perfil em V fechado; tipo II, vales de vertentes menos inclinadas, com perfil em V aberto; tipo III, vales onde domina a deposição de sedimentos vindos de tributários laterais, formando um perfil em V, mas com leques aluviais laterais; tipo VII, vales de perfil em V, muito dissecados por uma elevada densidade de drenagem que lhes fornece sedimentos abundantes);

3. vales com perfil em calha, em que domina o alargamento sobre o entalhe, formando extensas planícies aluviais cuja ligação às vertentes pode ser nítida ou, pelo contrário, imperceptível (tipo IX, vales com planícies do tipo sandur, cujos solos derivam de depósitos glaciários, aluviais e/ou eólicos; tipo X, vales com planícies de inundação cujos depósitos são devidos a processos de acumulação fluviais e lacustres; tipo XI, vales com deltas);

QUADRO 16 - TIPOS DE ESCOAMENTO LÍQUIDO E FORMAS DE EROSÃO ASSOCIADAS.



4. vales dissimétricos que apresentam uma vertente muito inclinada e outra de suave inclinação, devida a controles estruturais (falhas ou estruturas monoclinais e dobradas, com rios ortoclinais);

5. vales com terraços fluviais, que indicam uma sucessão de fases de acumulação e de entalhe, definindo os antigos fundos de vale;

6. vales com perfil em U, resultantes de processos glaciários, com vertentes muito íngremes, onde vários tributários apresentam vales suspensos, e de fundo amplo, com rupturas de declive, depressões fechadas e abundantes depósitos do tipo glacio-fluvial.

QUADRO 17 - TIPOS DE VALES E SUA CORRESPONDÊNCIA, SEGUNDO AS CLASSIFICAÇÕES DE CHRISTOFOLETTI (1988) E ROSGEN (1996)

CHRISTOFOLETTI (1988)	ROSGEN (1996)
1 - Vales em garganta	Vales do tipo IV
2 - Vales com perfil em V	Vales do tipo I Vales do tipo II Vales do tipo III Vales do tipo VII
3 - Vales com perfil em calha	Vales do tipo IX Vales do tipo X Vales do tipo XI*
4 - Vales dissimétricos	Vales do tipo VI
5 - Vales com terraços fluviais	Vales do tipo VIII
6 - Vales com perfil em U	Vales do tipo V

* Rosgen utiliza a classificação de Fisher para os tipos de delta.

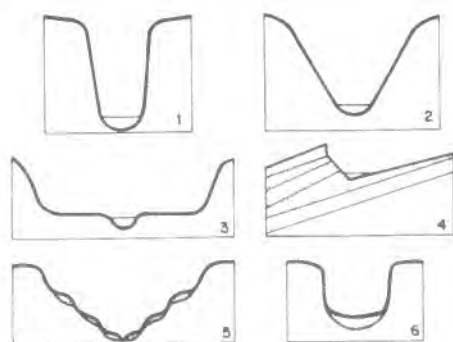


FIGURA. 19 – Tipos básicos de vales de acordo com o perfil transversal (Christofoletti, 1988).

A quantificação do encaixe dos vales pode ser efectuada através do Índice de Encaixe dos Vales (Ruellan), o qual relaciona a altura do vale (H_v , diferença entre o fundo do talvegue e o topo do interflúvio) com a sua largura superior (l_v), tal que: $IEV = H_v / l_v$, sendo IEV, o índice de encaixe do vale.

Quanto maiores forem os valores do índice, maior será o encaixe do vale (fig. 20).

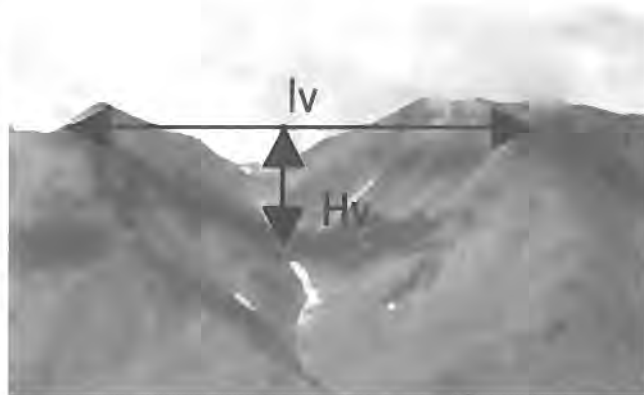


FIGURA. 20 – Quantificação do encaixe de um vale, segundo o IEV.

3. Os processos fluviais

As duas forças principais que actuam sobre o escoamento fluvial em cursos de água naturais: gravidade e fricção. A equação de Manning que descreve a inter-relação entre a gravidade, que promove o movimento da água nos canais, e a rugosidade (do fundo do leito e das margens dos canais), que promove uma acção de retardamento do fluxo:

$$V = 1,00 \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{n} \quad (\text{em unidades métricas})$$

O caudal como o produto da inter-relação entre a velocidade e a área da secção transversal do canal fluvial considerada:

$$Q = \frac{A R^{2/3} S^{1/2}}{n}$$

em que

V é a velocidade do escoamento

Q é o caudal fluvial

A é a área da secção transversal considerada

R é o raio hidráulico (razão entre a área transversal do canal e o perímetro molhado)

S é a inclinação da superfície da água

n é o factor de resistência (coeficiente de rugosidade) de Manning (quadro 18).

A variação complexa da velocidade no canal fluvial: (i) aumenta da periferia do canal em direcção ao centro e do fundo do canal em direcção à superfície, (ii) depende da sinuosidade do canal (aumenta nos sectores côncavos dos meandros e diminui nos convexos), (iii) depende da turbulência do fluxo.

Noção de fluxo laminar e de fluxo turbulento. Os factores que afectam a velocidade do fluido e que condicionam a evolução do fluxo laminar em turbulento: viscosidade do fluido, densidade do fluido, profundidade da água e a ru-

gosidade da superfície do canal. A distinção entre fluxo laminar e turbulento através da aplicação do número de Reynold (Rn):

$$Rn = \frac{V R \rho}{\mu}$$

em que

Rn é o número de Reynold,

V é a velocidade, R é o raio hidráulico,

ρ é a densidade, μ é a viscosidade.

Quando Rn é menor que 500 o fluxo é laminar; entre 500 a 2500 ocorre tanto o laminar como o turbulento; maior que 2500 o fluxo é turbulento. Fluxo turbulento: característico do escoamento fluvial.

A relação entre a velocidade do escoamento fluvial e a capacidade de erosão, transporte e acumulação de sedimentos por parte dos cursos de água. A relação de Hjulstrom (fig. 21); (i) não são os sedimentos mais finos que se movem com menores velocidades do fluxo, mas sim as areias com uma dimensão aproximada de 0,2 mm, uma vez que os siltes e argilas tendem a ter uma maior coesão; (ii) desde que os siltes e argilas sejam movimentados, essas partículas podem ser transportadas sob velocidades muito mais baixas (por exemplo, partículas de 0,01 mm de diâmetro são movimentadas sob a uma velocidade de aproximadamente 60 cm/s, mas conservam-se em movimento até velocidades inferiores a 0,1 cm/s).

Os processos erosivos fluviais: (i) químicos (corrosão), muito importantes em substratos geológicos onde domina a alteração química; (ii) cavitação, importantes em troços fluviais com elevada velocidade do escoamento, devidos às diferenças de pressão sobre as paredes do canal que facilitam a fragmentação das rochas; (iii) de atrito mecânico (os mais importantes), através da acção hidráulica e da abrasão. A importância de cada um destes processos nas cabeceiras (erosão regressiva), nas margens (erosão lateral) e no fundo do leito (erosão vertical) dos rios.

Noções de competência e de capacidade de curso de água. A competência define-se pela dimensão dos sedimentos que são movimentados pelo fluxo, sendo determinada pelo maior diâmetro encontrado entre os materiais da carga de fundo; a capacidade relaciona-se com a quantidade de material que pode ser movimentada por unidade de tempo. Variação da competência e da capacidade ao longo do perfil longitudinal de um curso de água. Os processos de transporte: dissolução, tracção (arrastamento, rolamento e saltação) e suspensão. Os processos de transporte e sua relação com a carga de fundo e com a carga em suspensão.

QUADRO 18 - VALORES DO COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DE MANNING (N) PARA CANAIS NATURAIS (LENCASTRE E FRANCO, 2003)

TIPO DE CANAL E DESCRIÇÃO	MÁXIMO	NORMAL	MÍNIMO
B. CURSOS DE ÁGUA NATURAIS			
B1. LEITOS MENORES (LARGURA MÁXIMA EM CHEIA <30m)			
a. cursos de água em planície			
1. limpo, em linha recta, ao nível máximo, sem quedas ou zonas profundas	0,025	0,030	0,033
2. o mesmo que no ponto 1, com mais pedras e vegetação	0,030	0,034	0,040
3. limpo, sinuoso, algumas zonas profundas e baixios	0,033	0,040	0,045
4. o mesmo que no ponto 3, mas com alguma vegetação e pedras	0,034	0,045	0,050
5. O mesmo que no ponto 4, níveis mais baixos, declives e secção menos efectivos	0,040	0,048	0,056
6. O mesmo que no ponto 4, mas com mais pedras	0,045	0,050	0,059
7. com troços menos inclinados, com vegetação e zonas profundas	0,050	0,071	0,077
8. troços com muita vegetação, zonas profundas, ou secções com troncos e com vegetação arbustiva	0,077	0,100	0,143
b. cursos de água de montanha sem vegetação no canal, margens declivosas e vegetação ao longo das margens inundadas, ao nível máximo			
1. fundo: cascalho, seixo rolado e pouco saibro	0,030	0,040	0,050
2. fundo: seixos rolados e saibro	0,040	0,050	0,071
B2. LEITOS MAIORES (PLANÍCIES INUNDÁVEIS)			
a. com pastagens e sem arbustos			
1. vegetação herbácea baixa	0,025	0,030	0,034
2. vegetação herbácea alta	0,030	0,034	0,050
b. áreas cultivadas			
1. sem cultura	0,020	0,030	0,040
2. cultura em linha	0,025	0,034	0,045
3. cultura dispersa	0,030	0,040	0,050
c. mato			
1. mato disperso, vegetação cerrada	0,034	0,050	0,071
2. mato pouco denso e árvores, no Inverno	0,034	0,050	0,059
3. mato pouco denso e árvores, no Verão	0,040	0,059	0,077
4. mato médio a denso, no Inverno	0,045	0,071	0,111
5. mato médio a denso, no Verão	0,071	0,100	0,167
d. árvores			
1. salgueiros densos, alinhados, no Verão	0,111	0,143	0,200
2. terra limpa, com troncos de árvore sem rebentos	0,030	0,040	0,050
3. o mesmo que o número anterior, mas com um crescimento intenso de rebentos	0,050	0,059	0,077
4. com maior densidade, poucas árvores caídas, pouco crescimento sob coberto, com o nível máximo abaixo dos ramos	0,077	0,100	0,125
5. o mesmo que o anterior, mas com o nível máximo alcançando os ramos	0,100	0,125	0,167
B3. CURSOS DE ÁGUA MAIORES (LARGURA SUPERFICIAL EM CHEIA > 30m). O VALOR KS É MAIOR DO QUE AQUELE PARA CURSOS MENORES COM UMA DESCRIÇÃO SIMILAR, POIS AS MARGENS OFERECEM UMA RESISTÊNCIA MENOS EFECTIVA			
a. secção regular sem seixos rolados nem vegetação	0,025	-	0,059
b. secção irregular e rugosa	0,034	-	0,100

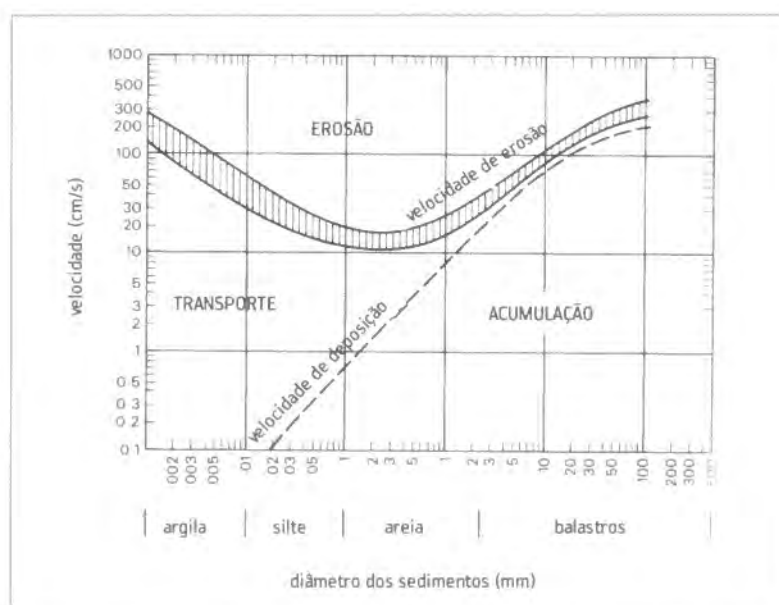


FIGURA. 21 - Curva de Hjulstrom: relação entre a velocidade da água e a dimensão dos sedimentos.

4. Os leitos fluviais

4.1. Relação entre os tipos de leitos e caudais característicos

Os fundos de vale e suas formas características: os terraços fluviais e a “área de influência actual” dos cursos de água (planície de inundação e canal fluvial). Discussão das visões hidrológica, geomorfológica e hidrogeomorfológica (quadro 19). A importância de uma visão integrada no ordenamento do território das áreas ribeirinhas: o limite superior das cheias de maior magnitude representa a “área de influência actual” dos cursos de água, ou seja, a submersão da sua planície de inundação; num fundo de vale com terraços fluviais esse limite deve corresponder à base dos terraços (fig. 22).

Tipos de leitos fluviais, segundo a classificação de Tricart: maior ou de cheia, menor ou ordinário e de estiagem (fig. 23). O leito de cheia corresponde à planície de inundação, ou à área ocupada pelas cheias de maior magnitude. Nos vales encaixados esse limite é dado pela linha de lavagem (fig. 24). O leito menor (canal fluvial) é bem delimitado, encaixado entre margens geralmente bem definidas, limitadas pelos diques naturais. Dentro do leito menor, acompanhando o talvegue (linha de maior profundidade ao longo do leito), encontra-se o leito de estiagem, no geral, bem definido nos rios portugueses.

QUADRO 19 – SÍNTESE DOS ELEMENTOS MORFOLÓGICOS DOS FUNDOS DE VALE E SUA RELAÇÃO COM OS CAUDAIS FLUVIAIS

PERSPECTIVA GEOMORFOLÓGICA	PERSPECTIVA HIDROLÓGICA	PERSPECTIVA HIDROGEOMORFOLÓGICA
terraços fluviais	limite inferior: caudal da cheia máxima provável	terraços fluviais (não sujeitos à dinâmica fluvial actual)
planície de inundação	limite superior: caudal da cheia máxima provável; limite inferior: caudal mínimo de cheia	leito maior, de inundação ou de cheia
canal fluvial	limite superior: caudal mínimo de cheia; limite inferior: caudal máximo de estiagem	leito menor, aparente ou ordinário
talvegue	limite superior: caudal máximo de estiagem	leito de estiagem

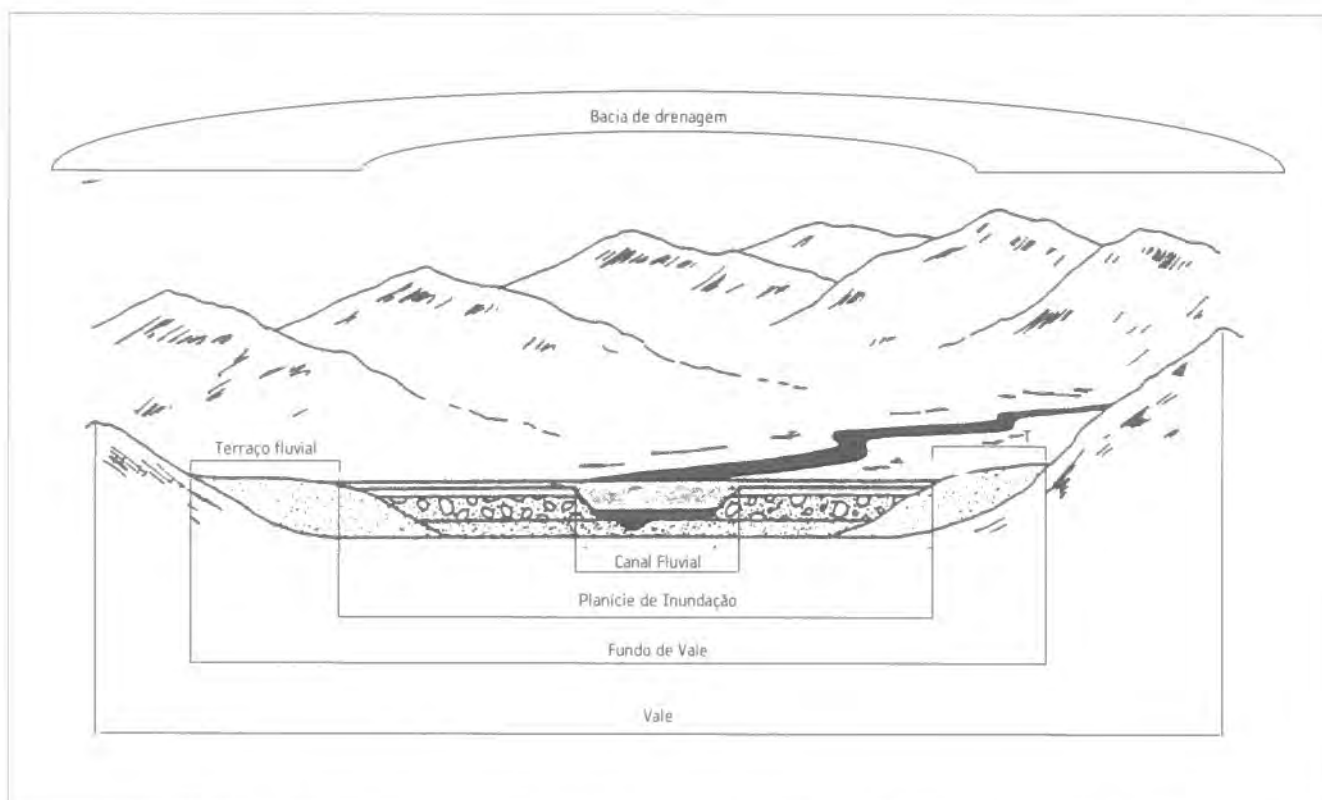


FIGURA 22 – Elementos morfológicos dos fundos de vale no contexto da bacia de drenagem: terraços fluviais, planície de inundação e canal fluvial (de Newson, 1995, modificado).

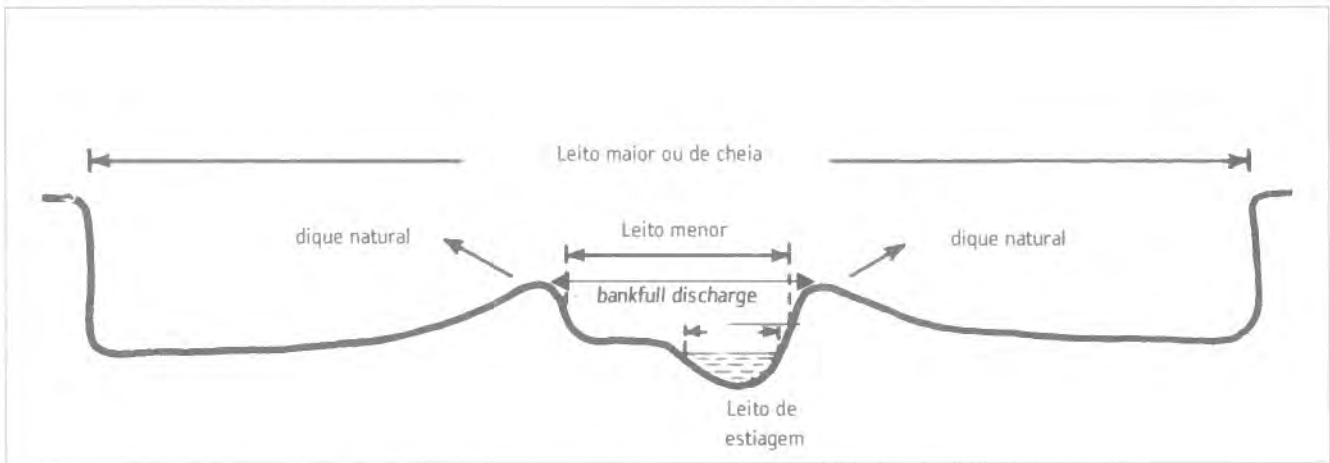


FIGURA. 23 – Tipos de leitos fluviais, segundo a classificação de Tricart.



FIGURA. 24 – O leito de cheia, dado pela linha de lavagem, no vale do Rio Cõa.

A importância da definição do caudal mínimo de cheia ou de “margens plenas” (*bankfull discharge*, *BD*) nos estudos de geomorfologia fluvial. Este caudal corresponde ao preenchimento total do canal fluvial, pelas águas, até ao topo dos diques marginais (naturais), de tal forma que se dá o início do transbordo para a planície aluvial (fig. 23). Tal como salientaram Dunne e Leopold (1978), o *BD* corresponde ao caudal que modela, de forma mais eficaz, o canal fluvial, isto é, aquele que (através da movimentação dos sedimentos, da formação ou da remoção das barras e a modificação das margens e meandros), é responsável pelas características morfológicas médias do canal fluvial. Utilizando o modelo estatístico de Log Pearson, o *BD* tem um período de retorno entre 0,5 e 2 anos (1,58 anos, como valor mais frequente nos canais arenosos). A semelhança deste período de retorno em ambientes contrastados e o facto dos canais não se tornarem progressivamente mais profundos à medida que a sedimentação na planície aluvial prossegue implica claramente que: (i) os canais estão ajustados ao caudal gerado

nas bacias de drenagem na maior parte do tempo; (ii) a planície de inundaçãõ está ajustada para receber os escoamentos mais elevados no resto do tempo; (iii) o funcionamento dos canais e das planícies de inundaçãõ que lhes estão associadas estão intrinsecamente relacionados. O *BD* deve ser validado através do trabalho de campo. Quando não há dados hidrométricos, o limite correspondente ao *BD* pode ser definido através de trabalho de campo, aplicando os seguintes critérios (Rosgen, 1996):

- altura da planície de inundaçãõ, em relaçaõ ao talvegue;
- topo das formas de deposiçaõ (barras) mais elevadas dentro do canal fluvial;
- mudança de declive na margem e/ou na mudança de sedimentaçaõ (de mais grosseira para mais fina);
- linha de coloraçãõ das rochas dentro do canal;

- raízes expostas abaixo de um solo intacto indicando exposição a fluxo erosivo;
- limite de implantação de espécies ripícolas (por exemplo, amieiros).

4.2. Formas do leito maior

4.2.1. Planícies de inundação

As planícies de inundação como locais de acumulação das aluviões: as planícies aluviais. Os processos de sedimentação nas planícies aluviais: (i) por deposição lateral (que ocorre quando os sedimentos que se depositaram no interior do canal, do lado convexo dos meandros, são incorporados na planície à medida que os meandros migram lateral e longitudinalmente (para jusante) ao longo do fundo de vale); (ii) por deposição vertical (que ocorre durante as cheias, por acumulação da carga detritica em suspensão). Os processos de erosão nas planícies aluviais: (i) por *cut-off* (corte do pedúnculo (colo) dos meandros levando ao entalhe de um novo troço do canal); (ii) por avulsão (mudança brusca do canal durante as cheias para uma posição mais deprimida no seio da planície levando ao posterior entalhe); (iii) por alvercamento (canais que se tornam activos durante as cheias formando depressões estreitas e alongadas – as alvercas); (iv) por expansão lateral do canal, devido à erosão das margens.

As mesoformas (de 0,5 a 10 km) das planícies aluviais e a sua classificação pela forma, posição e processo de formação (figs. 25 e 26):

a) diques naturais, cristas longitudinais mais elevadas do que a planície de inundação adjacente, que bordejam as margens do canal e o separam daquela, formados aquando do transbordo, por sedimentos em suspensão arenosos e siltosos;

b) leques de ruptura de canal, formados durante as cheias, por rebentamento dos diques naturais, levando à deposição de sedimentos pertencentes à carga de fundo, predominantemente arenosos e, por vezes, cascalhentos;

c) meandros abandonados, por vezes ocupados por lagoas semi-circulares, que representam os troços abandonados das curvas meândricas, devido ao processo de *cut-off*;

d) arcos meândricos, que constituem uma sucessão de depressões e saliências, devidas ao processo de deposição lateral no lado convexo das curvas, formados à medida que o canal migra lateralmente em direcção de jusante e para a margem côncava;

e) alvercas ou canais de cheia, invadidos durante as cheias, e que, durante as de maior magnitude são entalhados, e nas de menor magnitude, quando a entrada da água não é violenta, podem ocorrer processos de deposição dos sedimentos em suspensão; os canais de cheia podem definir canais de avulsão futuros (ou passados);

f) baixas de inundação, são as áreas mais distais e deprimidas da planície aluvial, onde decantam os materiais mais finos, provenientes da carga transportada, em suspensão,

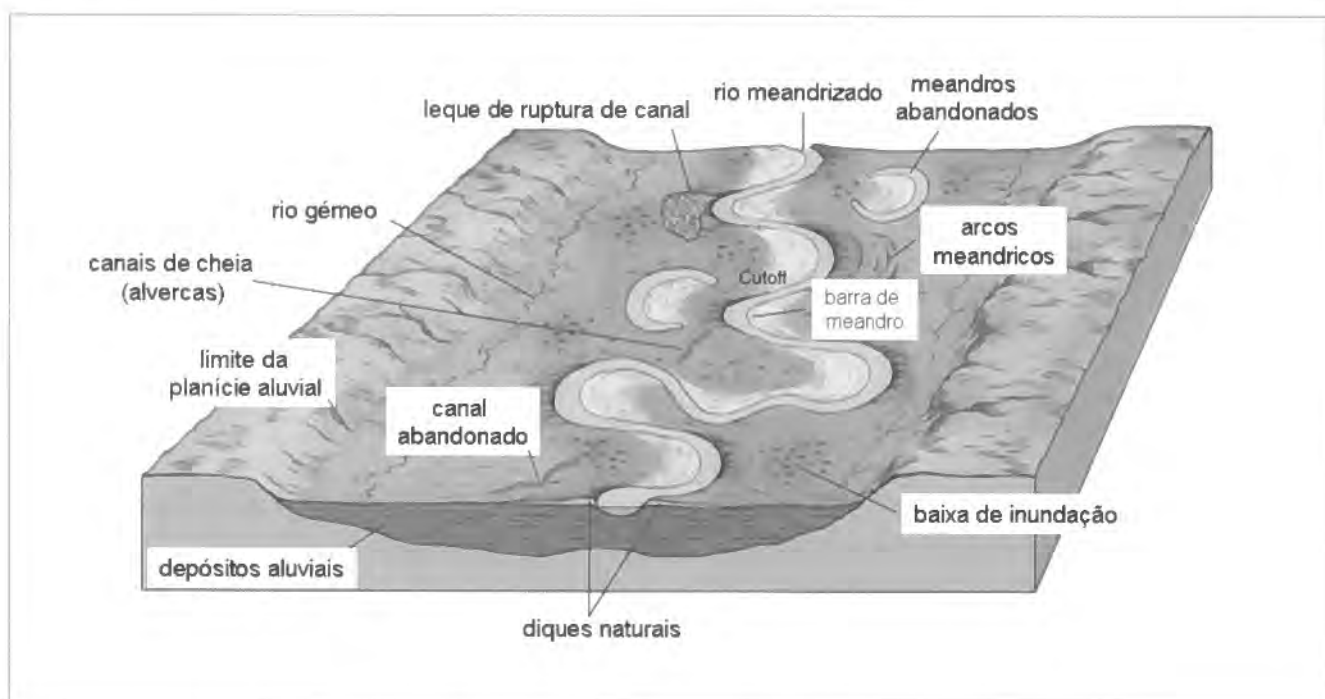


FIGURA. 25 - Elementos morfológicos de uma planície aluvial (Hamblin e Christiansen, 2001, modificado).

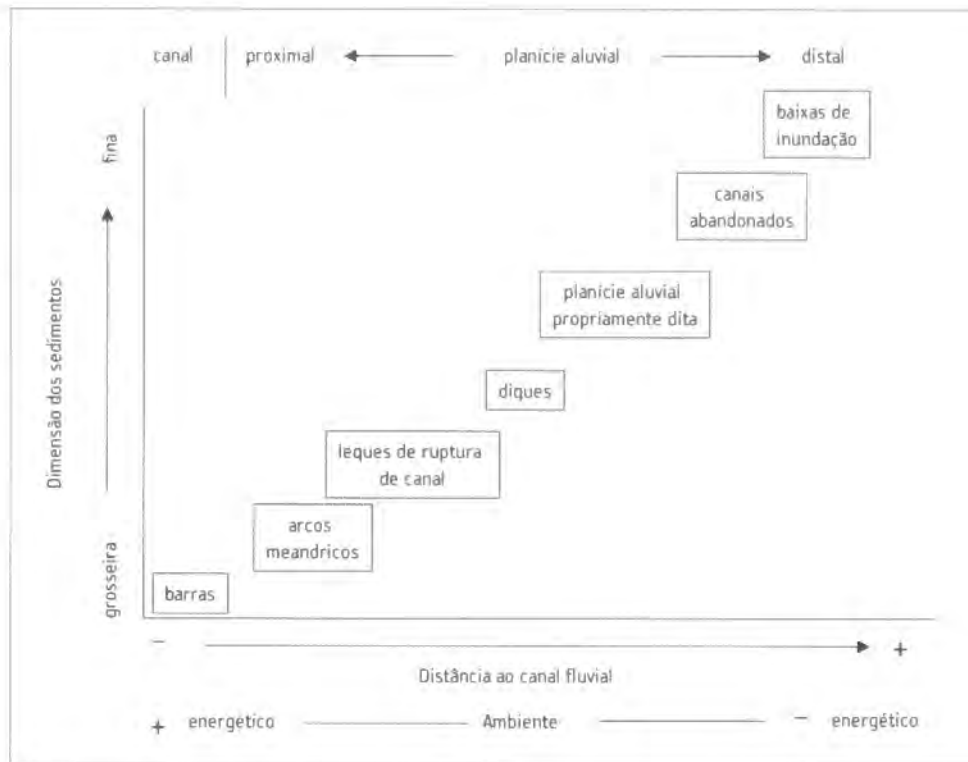


FIGURA. 26 - Relação entre a dimensão dos sedimentos e a distância ao canal, numa planície aluvial.

durante as cheias. São usualmente ocupadas por paúis, mas também podem ser drenadas por rios (*yazoo rivers*). Estes cursos de água (para os quais se propõe a designação de rios gémeos) são tributários, com uma trajectória paralela ao rio principal, por vezes durante muitos kms, e que acabam por confluir com ele.

4.2.2. Leques aluviais

Os leques aluviais e as cheias. O leque aluvial como forma de acumulação fluvial. Caracterização: forma, posição e génese. São constituídos por depósitos, no geral, mal calibrados, que se espraiam, à saída de vales encaixados, na planície adjacente, durante cheias torrenciais. Têm um declive médio entre 1° e 5° , mas que pode exceder 10° no ápex do leque. Este declive é semelhante ao do curso de água que lhes dá origem à saída das áreas montanhosas, pelo que o processo de deposição dos sedimentos se deve, essencialmente, à mudança súbita de um canal confinado a um fundo de vale estreito para um fundo de vale amplo, e não tanto à mudança de declive entre os dois ambientes fluviais. A dinâmica destas formas aluviais é muito diferente em ambientes semi-áridos e húmidos. Nos primeiros, os leques aluviais são alimentados por cursos de água efémeros que mudam de posição de uma cheia para a outra; nos segundos, além de serem maiores e menos inclinados, são alimentados por cursos de água perenes, muitas vezes com canais entrelaçados que tendem a migrar progressivamente ao longo de toda a superfície do leque.

4.2.3. Os deltas fluviais

Tipos de deltas fluviais, quanto à forma e à génese (classificação de Fisher, modificada por Rosgen, 1996): construtivos (alongados ou digitados, lobados e anastomosados) e destrutivos (cuspidados e franjados). Os deltas construtivos caracterizam-se por um grande afluxo de sedimentos fluviais, em que a dinâmica fluvial predomina sobre a marinha, e dividem-se em: (i) alongados (onde se observa um crescimento em direcção ao mar ao longo do rio principal e dos seus tributários, por vezes muito rápido durante as cheias, fazendo lembrar dedos); (ii) lobados, onde o aluvionamento fluvial é muito intenso, não se diferenciando um rio principal; (iii) anastomosados, que suportam extensas áreas húmidas estáveis com canais. Os deltas destrutivos são caracterizados por um baixo fornecimento detritico fluvial, em que a dinâmica marinha predomina sobre a fluvial, e dividem-se em: (iv) cuspidados, onde domina a energia das ondas, e que apresentam crescentes côncavas para o lado do mar, as quais são recortadas nas desembocaduras; (v) franjados, onde domina a energia das marés, apresentam muitas ilhotas separadas por canais, no geral, mais largos do que elas.

4.3. Formas do leito menor

A morfologia dos canais fluviais influencia decisivamente o comportamento dos cursos de água durante as cheias. Por sua vez, a morfologia dos canais depende de um conjunto de factores que interagem mutuamente, de entre os quais se destacam: substrato geológico, topografia, dimensão

da bacia de drenagem, velocidade do escoamento, caudal, transporte de sedimentos, características dos sedimentos e geometria do canal. A análise quantitativa dos canais é assim de importância fundamental, porque permite perceber e monitorizar as variações dos canais fluviais ao longo do tempo, quer durante os caudais mais frequentes (semi-permanentes) quer durante e após as situações de cheia.

Nesta análise há que distinguir entre os canais rochosos (confinados) e os canais aluviais (não confinados). A forma dos primeiros depende directamente das características litológicas e estruturais do fundo de vale, enquanto a dos segundos ajusta-se constantemente às mudanças do escoamento. Estes últimos são mais dinâmicos, desenvolvendo uma maior variedade de formas, pelo que é, essencialmente, sobre eles que se fará a análise da morfologia dos canais.

4.3.1. Tipos de canais fluviais

A morfologia dos canais (em projecção horizontal) pode ser classificada utilizando três critérios essenciais: o número de canais, a sinuosidade e a estabilidade. Quanto ao número de canais (Brierley e Fryirs, 2006): (i) únicos (apenas um canal), (ii) errantes (até 3 canais, situação de transição, com um canal com duas barras na mesma secção), entrelaçados e anastomosados (> 3 canais) e descontínuos ou ausentes (desaparecimento do canal).

A sinuosidade é a relação entre o comprimento do canal, medido entre dois pontos A e B, e o comprimento em linha recta entre esses dois pontos. Essa relação é quantificada pelo índice de sinuosidade (fig. 27). A partir deste índice (K), Leopold e Wolman (1957) definiram três tipos de canais: (i) rectilíneo, com $K < 1,1$; (ii) sinuoso, com K entre 1,1 e 1,5; (iii) meandrizado, com $K > 1,5$. Schumm (1985) com base em trabalhos de vários autores propõe: (i) rectilíneo, com K entre 1 e 1,05; (ii) de baixa sinuosidade, com K entre 1,06 e 1,30; (iii) meandrizado, com K entre 1,31 e 3,0.

No caso dos canais aluviais, o fundo e as margens são deformáveis e adaptam-se às mudanças de escoamento, sendo o grau de estabilidade dado por vários índices que medem a evolução dos meandros, os tipos de avulsão (mudança do traçado do rio) e o grau de entrelaçamento.

A combinação entre estes três critérios individualiza quatro tipos básicos de canais (padrões), com variadas formas de transição entre eles (fig. 28):

a) Canais rectilíneos e de baixa sinuosidade - são relativamente estáveis, com sedimentos finos, que se movem em suspensão, e que são bordejados por materiais cuja resistência à erosão fluvial é elevada. Mesmo em canais

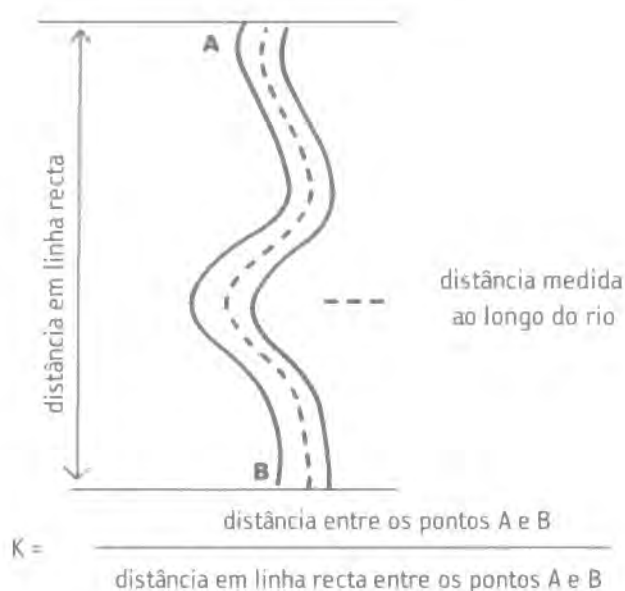


FIGURA. 27 – Cálculo do índice de sinuosidade (k).

rectilíneos a velocidade varia muito ao longo do talvegue. A tendência para um canal rectilíneo evoluir num de baixa sinuosidade está intimamente relacionada com as oscilações verticais no fundo do canal, ao longo dos fundões e baixios, os quais se individualizam muito bem nos rios com fundos cascalhentos, mas também são detectados nos de fundo arenoso. Os fundões (locais profundos no leito do rio, onde se acumulam os materiais mais finos, como os lodos e areias finas) e os baixios (locais pouco profundos no leito do rio, constituídos por materiais grosseiros, acumulados durante as cheias ou em períodos de forte caudal) são os elementos morfológicos básicos dos rios rectilíneos.

b) Canais meandrizados – pertencem a cursos de água que transportam sedimentos de dimensão intermédia, com mais carga de fundo mobilizável e maior fornecimento de sedimentos; com margens relativamente resistentes, mas particularmente erodíveis em determinados troços (margem côncava).

Os meandros são definidos geometricamente a partir de indicadores que quantificam: a amplitude, o comprimento de onda, o raio de curvatura, o arco do meandro, o espaçamento entre os baixios, a sinuosidade e a largura da faixa dos meandros (fig. 29).

Em que:

Lm é o comprimento de onda (distância em linha recta entre os eixos (ou dos baixios) de duas curvas meândricas consecutivas, situadas do mesmo lado da faixa dos meandros);

B é a largura da faixa dos meandros;

A é a amplitude do meandro;

L é a largura do canal (deve ser medida no ponto de inflexão entre dois arcos meândricos sucessivos);

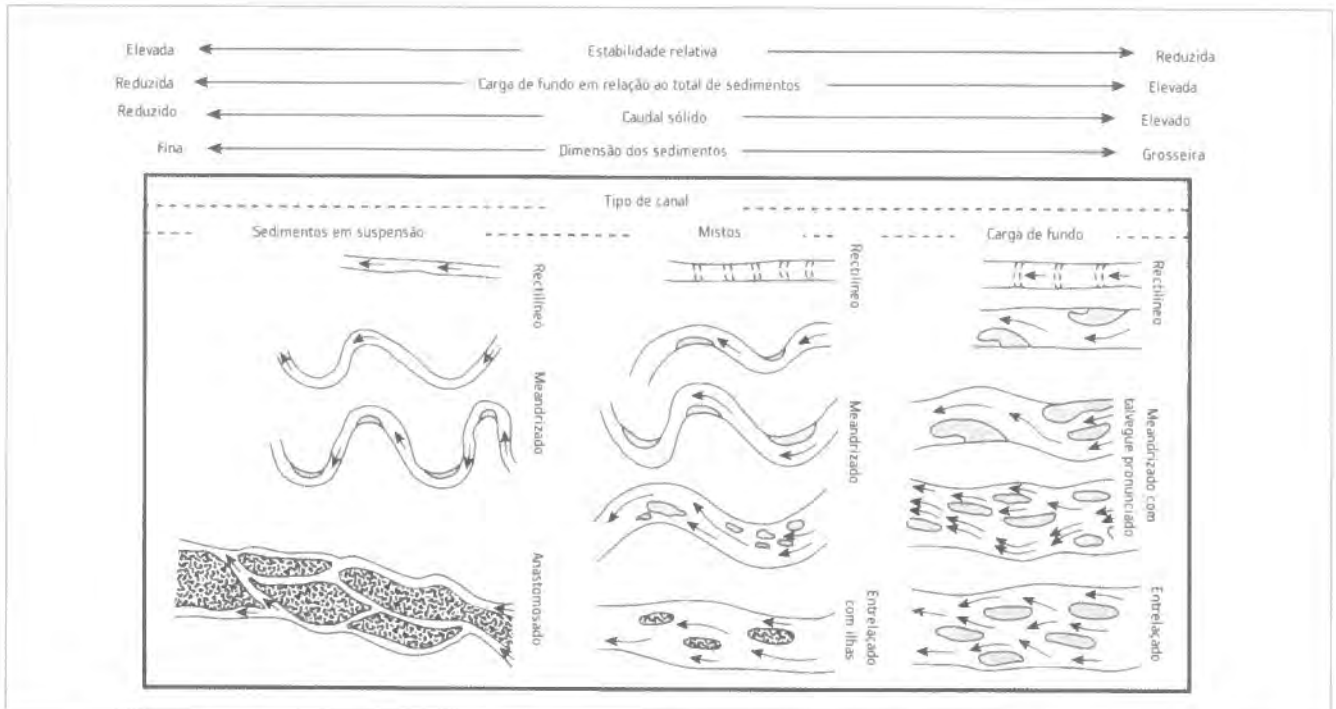


FIGURA. 28 – Relações entre os tipos morfológicos de canal, os sedimentos e a sua estabilidade relativa (Knighton e Nanson, 1993).

Ar é o arco do meandro (perímetro da circunferência compreendido dentro do canal).

Rc é o raio de curvatura (usado para avaliar a resistência do canal à erosão e as taxas de migração dos meandros), em que:

$$Rc = \frac{Lm \cdot K^{1.5}}{13 (K - 1)^{0.5}} \quad (\text{Rosgen, 1996})$$

Os canais meandrizados migram ao longo da planície aluvial, a partir da combinação de processos que podem incluir: (i) crescimento com aumento da sua amplitude; (ii) translação com progressão para jusante; (iii) rotação; (iv) cut-off dos colos; (v) cut-off transversal (fig. 30).

c) Canais entrelaçados – desenvolvem-se em cursos de água de elevada energia, que lhes permite transportar sedimentos abundantes e relativamente grosseiros, cujas

margens estão talhadas em materiais brandos (fáceis de erodir e que alimentam, por sua vez, a carga sólida do rio). O canal tende a ser muito amplo e o rio divide-se em braços que serpenteiam no meio das barras (bancos de sedimentos, normalmente arenosos ou cascalhentos).

Existem vários índices que quantificam o carácter de entrelaçamento de um rio. O mais comum é o Índice de Entrelaçamento (IE) de Brice:

$$IE = \frac{2 (\sum Cb)}{Cc}$$

em que:

Cb é o somatório do comprimento de todas as barras e ilhas do canal;

Cc é o comprimento do canal, medido ao longo da linha central do mesmo.

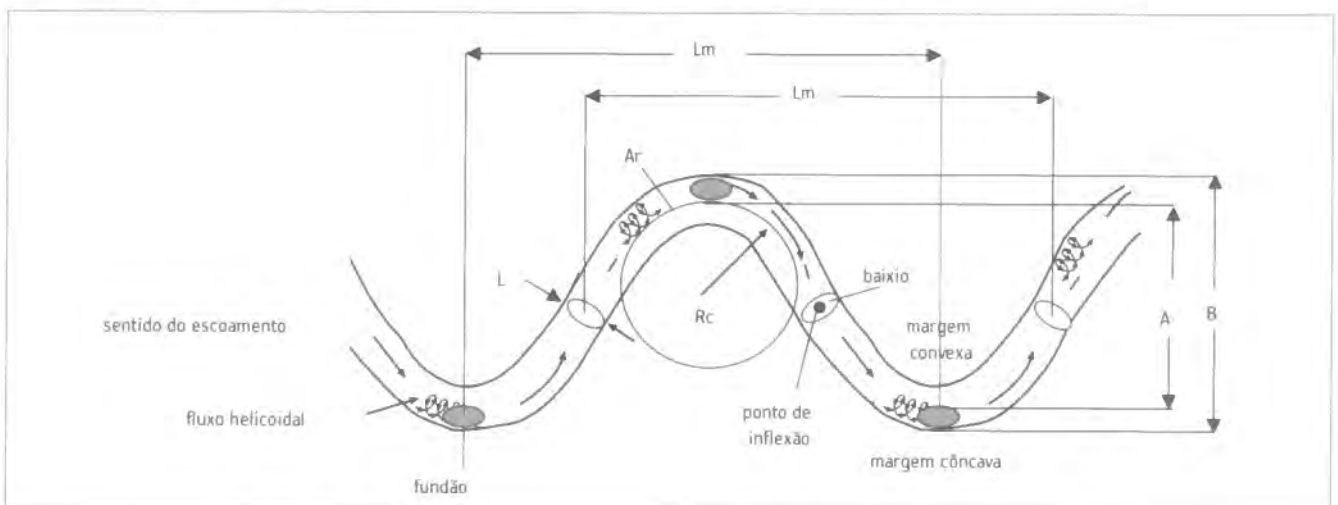


FIGURA. 29 – Elementos geométricos e posição dos fundões e baixios num canal meandrizado.

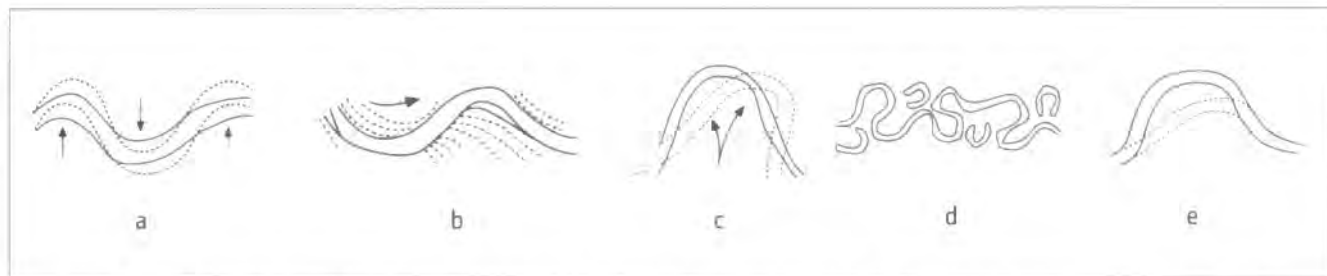


FIGURA. 30 - Modos de evolução dos meandros; a) crescimento com aumento da amplitude; b) translação com progressão para jusante; c) rotação; d) *cut-off* dos colos; e) *cut-off* transversal (Brierley e Fryirs, 2006, modificado).

d) Canais anastomosados - estão associados a sistemas fluviais de baixa energia. Os rios anastomosados são compostos por vários canais, de elevada sinuosidade, separados por extensas ilhas com vegetação, que permanecem emersas durante o BD, constituídas por sedimentos finos (siltes e argilas). A inclinação destes canais é tão ou mais baixa que a dos canais meandrizados.

4.3.2. Formas de acumulação e de erosão do canal fluvial

As barras de canal e as ilhas: definição. As barras de canal são formas dinâmicas, sem vegetação, que ficam submersas durante o caudal mínimo de cheia (BD); por vezes, desenvolvem-se ilhas, que são formas maiores e mais estáveis, onde já se deu a colonização da vegetação, e que permanecem emersas durante o BD. As ilhas (ou ilhotas) podem ser totalmente compostas por sedimentos, (para as quais se propõe o termo de *mouchão*), ou ter um núcleo rochoso, onde os sedimentos se vão acumulando e fixando com a vegetação (para as quais se propõe o termo *ínsua*).

As barras de canal: tipologia (fig. 31). Barras centrais: de forma alongada, em canais cascalhentos ou de sedimentação mista, resultam de um excesso de sedimentos que o rio não consegue transportar; ou então, quando há uma acumulação no fundo do rio de material grosseiro que provoca uma divergência e perda de velocidade do fluxo com a deposição de material mais fino (arenoso) a jusante. As barras centrais também podem ser formadas a jusante de

um obstáculo antrópico (como por exemplo, os pilares das pontes). Barras diagonais: de forma alongada, oval ou romboide, orientam-se diagonalmente às margens, em canais cascalhentos ou de sedimentação mista. Formam-se quando o fluxo se orienta obliquamente ao eixo longitudinal das barras. Podem indicar uma grande carga de sedimentos ou remobilização dos baixios. Barras marginais: de forma alongada, ligam-se às margens de canais cascalhentos ou de sedimentação mista, em troços rectilíneos ou de baixa sinuosidade. Ocorrem nos dois lados do canal, de forma alternada, e a sua superfície está geralmente inclinada para o centro do canal. Barras de meandro: de forma curvilínea, resultam da acumulação lateral dos sedimentos no sector convexo dos meandros. A areia ou o cascalho são movidos, por tracção, da margem côncava para a convexa, através de um fluxo helicoidal no sentido contrário aos ponteiros do relógio. Barras de confluência: formam-se imediatamente a jusante da confluência dos tributários com o rio principal. São constituídas por sedimentos cascalhentos e arenosos pouco calibrados juntamente com sedimentos finos, que se depositam em situações de cheia.

As microformas dos canais fluviais em leitos arenosos (<0,5 km): *ripples*, dunas, leito plano e anti-dunas (fig. 32). As *ripples* são pequenas formas dissimétricas, com um comprimento até 2 centímetros e com poucos centímetros de altura. Têm uma forma aproximadamente triangular, possuindo um declive suave em direcção a montante, sendo íngremes para jusante. São transversais ao sentido do escoamento.

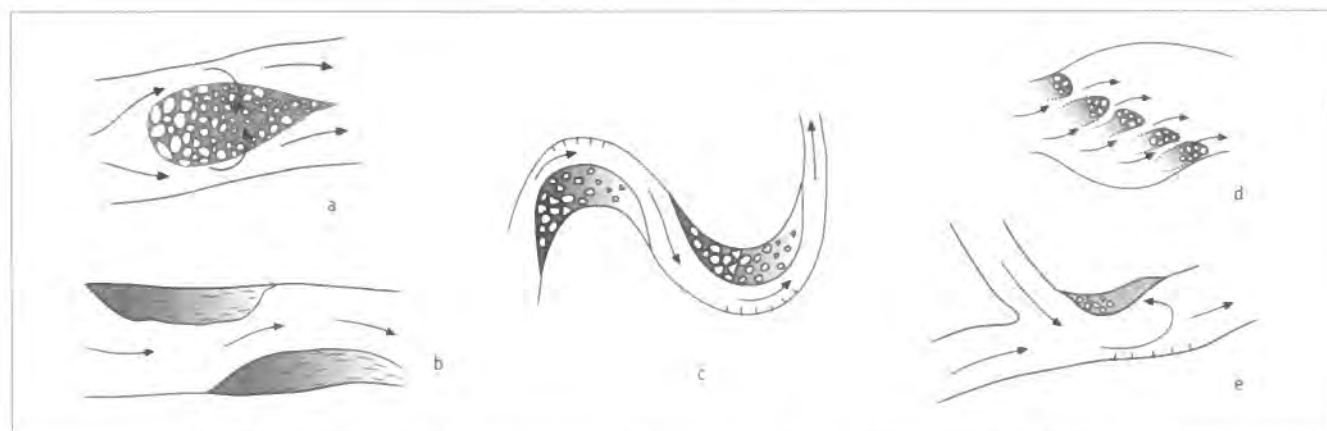


FIGURA. 31 - Tipos de barras de canal: a) central; b) marginal; c) de meandro; d) diagonal; e) de confluência (Brierley e Fryirs, 2006, modificado).

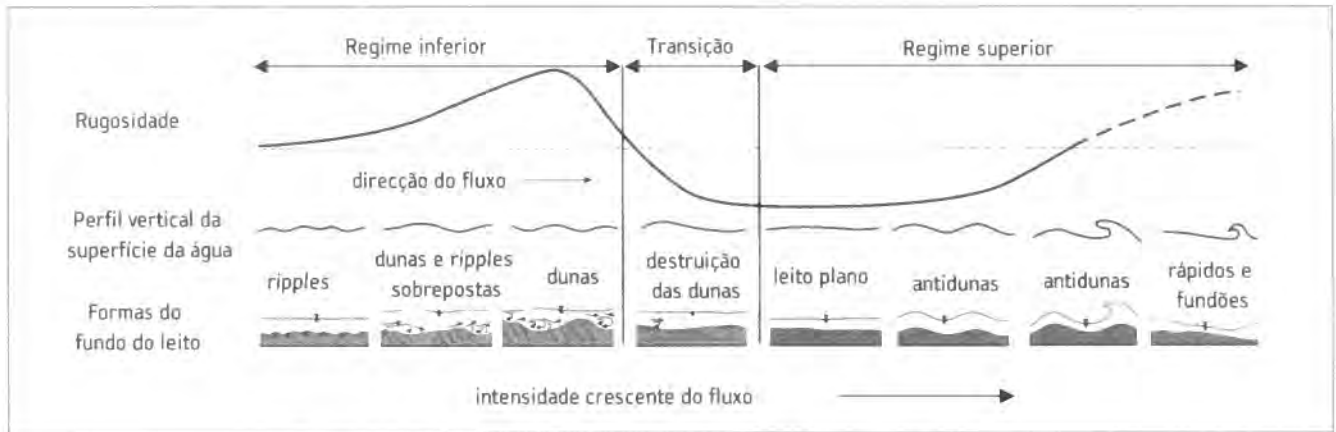


FIGURA. 32 – Formas dos fundos dos leitos arenosos (Knighton, 1998, modificado).

As dunas têm uma forma semelhante mas são de maior dimensão (metros) podendo atingir dezenas e até centenas de metros (a sua altura oscila entre 10 a 20% do valor da profundidade).

As anti-dunas têm dimensões muito variadas e têm também uma forma dissimétrica, mas a sua característica essencial é terem a face montante mais declivosa do que a face jusante e movimentarem-se em direcção contrária ao sentido do escoamento. Em geral, desenvolvem-se em canais com declives elevados e grande carga de sedimentos. Nestas condições o fluxo é rápido e as ondas podem caminhar em direcção a montante e movimentar os sedimentos nessa direcção.

Os cursos de água naturais raramente apresentam leitos planos. Tal forma é instável e tende a ficar deformada, dando lugar a um conjunto de formas no fundo do leito, que se vão ajustando às características do fluxo e ao fornecimento de sedimentos. As formas topográficas expressam diferentes níveis de intensidade no regime de fluxo turbulento. Para isso o regime do fluxo é dividido em três classes: (i) fluxo inferior, (ii) fluxo superior, (iii) situação de transição.

Essas classes podem ser definidas através do número de Froude (F):

$$F = \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

em que:

F é o número de Froude, V é a velocidade média, g é a força da gravidade, D é a profundidade da água.

O valor de F=1, divide um regime do outro, mas existe uma margem de imprecisão dado pelo regime de transição.

(i) o fluxo inferior ocorre quando é significativa a resistência oferecida ao escoamento, resultando num pequeno transporte de sedimentos; sob essas condições, as formas do lei-

to resultantes são muito pequenas (*ripples* e *dunas*).

(ii) o fluxo superior caracteriza-se pela baixa resistência ao escoamento e pelo transporte intenso de sedimentos; os sedimentos arenosos deslocam-se individualmente, de maneira quase contínua, dispondo-se em camadas planas (leito plano) ou, com o aumento da rugosidade, formando as anti-dunas.

(iii) situação de transição, quando há a passagem de um regime para o outro (fig. 32).

As formas erosivas do leito: definição e tipos principais. As formas em leitos rochosos dependem essencialmente de factores litológicos e estruturais e dos impactes das situações de cheia de maior magnitude. O declive do canal, a dimensão dos sedimentos e a capacidade do rio para os transportar originam uma variedade de formas, das quais se destacam (Christofolletti, 1988):

(i) quedas de água (em locais com uma ruptura de declive no perfil longitudinal do rio, de paredes praticamente verticais e de altura superior a 1m, mas que podem atingir várias centenas de metros de altura);

(ii) leitos com rápidos, de menor declive que os anteriores e que se subdividem em: leitos irregulares rochosos com blocos esparsos, leitos rochosos polidos e leitos rochosos com marmitas;

(iii) marmitas, que podem atingir variadas dimensões e até coalescer, que resultam de um processo de abrasão giratório de materiais grosseiros no leito do rio.

4.3.3. Perfil transversal do canal fluvial

O perfil transversal da secção do canal: principais tipos de formas e variação da velocidade com a forma do canal. Análise quantitativa da forma do canal: a relação largura / profundidade e o grau de incisão do canal (fig. 33):

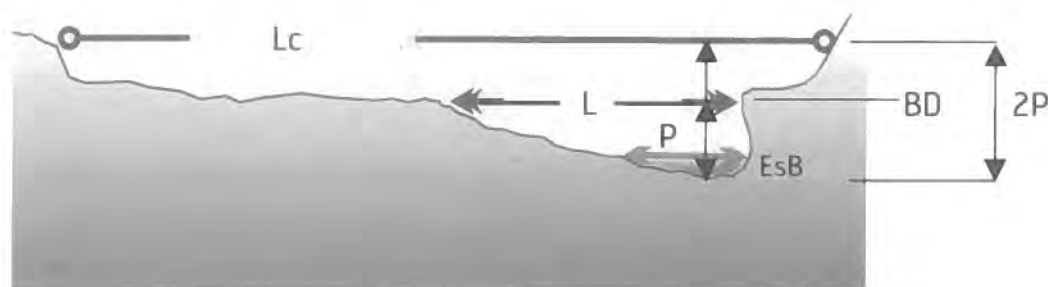


FIGURA. 33 – Perfil transversal do canal fluvial e seus elementos quantitativos. BD – Nível do *Bankfull Discharge*, EsB – Nível do Escoamento de Base (Rosgen, 1996, modificado).

$$RLP = L / P$$

em que:

RLP é a relação largura / profundidade,

L é a largura do canal, medida pelo nível do BD (*Bankfull Discharge*),

P é a profundidade do canal, medida desde o ponto mais baixo do canal (talvegue) até ao nível do BD.

$$IIC = Lc / L$$

em que:

IIC é o Índice de Incisão do Canal,

Lc é a largura do leito de cheia, correspondendo a duas vezes a profundidade do canal (método de Rosgen, 1996),

L é a largura do leito menor (largura do canal), medida pelo nível do BD (*Bankfull Discharge*).

As margens delimitam o canal fluvial, pelo que é muito importante perceber qual o seu grau de estabilidade e a sua tendência evolutiva. Os processos de erosão das margens dos canais: (i) processos de acção hidráulica (varrimento lateral e sapamento lateral); (ii) processos ligados a movimentos de massa (desabamento, balançamento, deslizamento translacional e deslizamento rotacional), fig. 34.

A vegetação das margens é um factor muito importante no controlo da erosão e da manutenção da respectiva estabilidade. Em rios com um regime de caudais semelhantes, margens com vegetação densa originam canais mais estreitos e com vegetação esparsa, canais mais largos. Mas, a capacidade de resistência, das margens do rio, à acção dos processos erosivos, não depende só da vegetação. Rosgen (1996) propõe o Índice de Perigo de Erosão das Margens (IPEM), o qual entra em linha de conta com os factores essenciais que determinam, essa capacidade de resistência, a saber (fig. 35):

(1) relação entre a altura da margem e a altura do nível do BD; (2) ângulo (declive) da margem; (3) grau da densidade das raízes; (4) grau de protecção da superfície da margem por detritos e vegetação; (5) relação entre a profundidade das raízes da vegetação rípicola e a altura da margem; (6) estratigrafia da margem e a presença de níveis de solo; (7) composição dos materiais que constituem a margem.

O IPEM varia numa escala de 1 a 10, para 5 destes 7 factores condicionantes. Os restantes 2 ajustam a pontuação final - quadro 20:

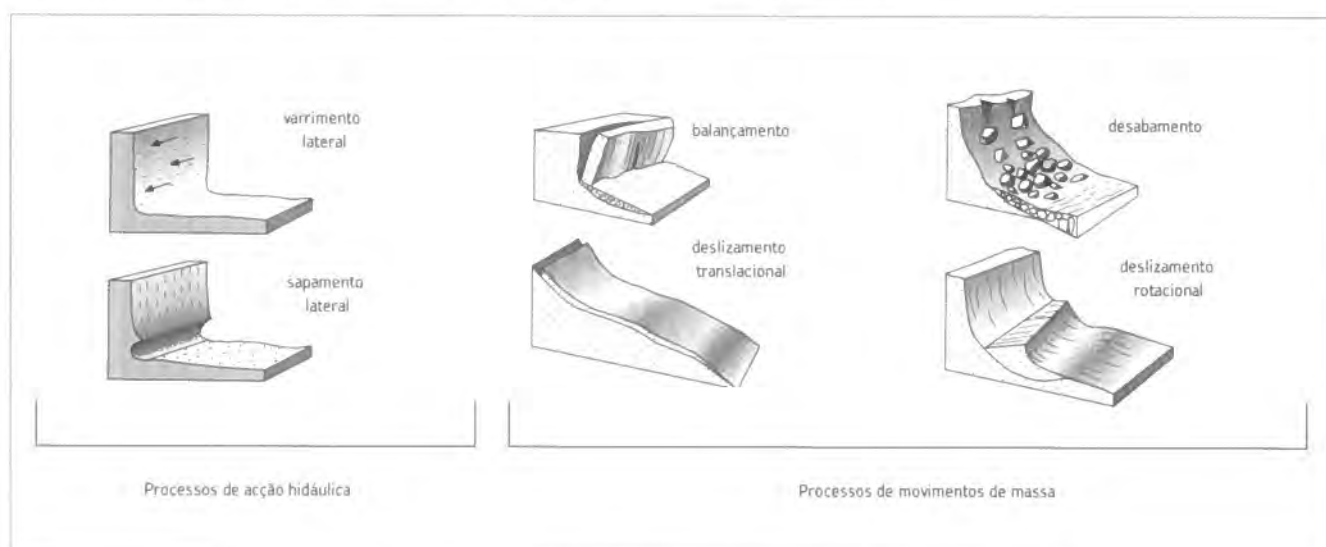


FIGURA. 34 – Processos básicos de erosão das margens dos canais fluviais (Thorne, 1999).

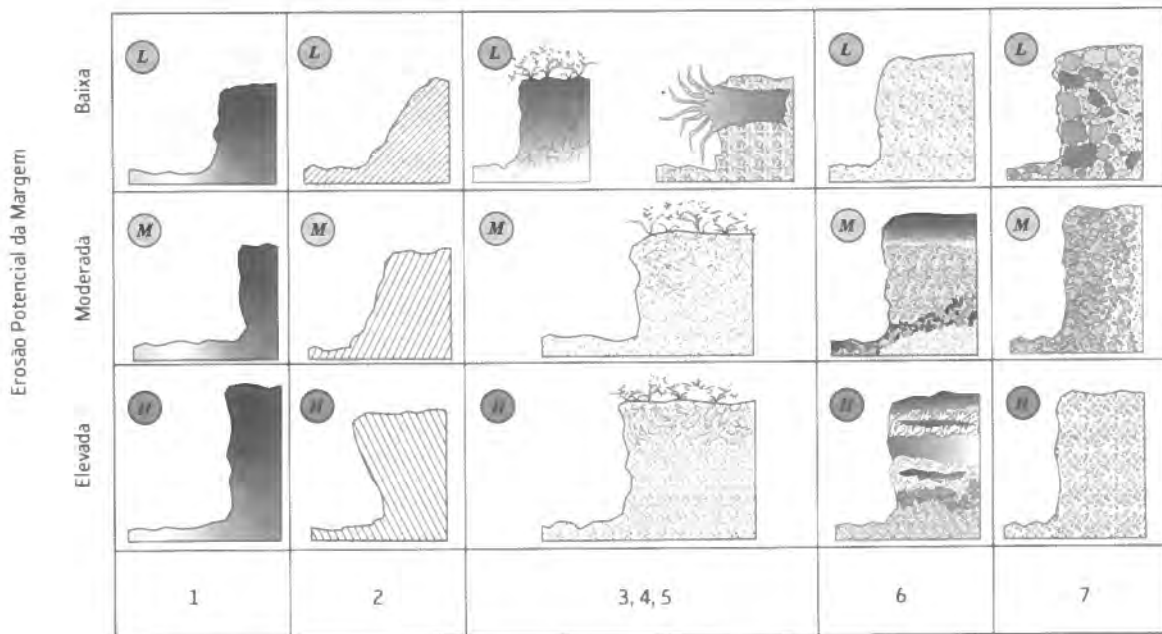


FIGURA. 35 – Componentes que integram o Índice de Perigo de Erosão das Margens (Rosgen, 1996, modificado).

QUADRO 20 – COMPONENTES USADAS PARA DESENVOLVER O ÍNDICE DE PERIGO DE EROSÃO DAS MARGENS (ROSGEN, 1996)

Classe de Perigo	Índice de Perigo	1	5	3	2	4	Total
Muito baixo	1,0 a 1,9	1,0-1,1	1,0-0,9	100-80	0-20	100-80	5 - 9,5
Baixo	2,0 a 3,9	1,11-1,19	0,89-0,5	79-55	21-60	79-55	10-19,5
Moderado	4,0 a 5,9	1,2-1,5	0,49-0,3	54-30	61-80	54-30	20-29,5
Elevado	6,0 a 7,9	1,6-2,0	0,29-0,15	29-15	81-90	29-15	30-39,5
Muito elevado	8,0 a 9,0	2,1-2,8	0,14-0,05	14-5,0	91-119	14-10	40-45
Extremo	10	> 2,8	< 0,05	< 5	< 119	< 10	46-50

Ajustamentos para as características 6 e 7:

(7) Fundo rochoso (muito baixo), blocos (baixo), calhaus (subtrair 10 pontos a menos que cascalho/areia >50%, então não fazer ajustamentos), cascalho (somar 5-10 pontos dependendo da % de areia), areia (somar 10 pontos), silte/argila (não fazer ajustamento);

(6) Estratificação: somar 5-10 pontos dependendo do número e posição dos níveis.

5. Análise integrada dos troços e secções transversais dos canais

Das inúmeras classificações de canais fluviais existentes analisam-se as de Schumm (1977), Morisawa (1985) e a de Rosgen (1996). A classificação de Morisawa (baseada na de Schumm, 1977 e de Miall, 1977) é descritiva e sinte-

tiza as características essenciais de cinco tipos de canais fluviais (quadro 21).

A classificação de Schumm (1977) é utilizada pelos diversos autores porque sintetiza, de forma simples e clara, os critérios que definem o maior ou menor grau de estabilidade dos canais aluviais (quadro 22).

A classificação de Rosgen é bem mais elaborada e completa e tem as seguintes vantagens sobre as restantes:

(i) utiliza, de forma integrada, várias classificações de autores consagrados no campo da geomorfologia fluvial;

(ii) resulta de 27 anos de investigação e trabalho de campo, em centenas de cursos de água nos mais variados ambientes morfogenéticos, tendo sofrido melhorias e ajusta-

QUADRO 21 – CLASSIFICAÇÃO DOS CANAIS FLUVIAIS, SEGUNDO MORISAWA (1985)

Tipo de canal	Morfologia	Sinuosidade	Tipo de carga sólida	Relação largura/ profundidade
Rectilíneo	canal único com fundões e baixios, talvegue meandrizado	<1,05	em suspensão, mista ou carga de fundo	<40
Sinuoso	canal único com fundões e baixios, talvegue meandrizado	>1,05 e <1,5	mista	<40
Meandrizado	canal único com meandros	>1,5	em suspensão ou mista	<40
Entrelaçado	2 ou mais canais com barras e pequenas ilhas	>1,3	carga de fundo	>40
Anastomosado	2 ou mais canais com ilhas grandes e estáveis	>2,0	em suspensão	<10

QUADRO 22 – CRITÉRIOS PARA A DEFINIÇÃO DO GRAU DE ESTABILIDADE DOS CANAIS ALUVIAIS, SEGUNDO SCHUMM (1977)

Modo de transporte e tipo de canal	% de sedimentos (mediana)	% da carga de fundo em relação ao total de sedimentos	Grau de estabilidade do canal		
			Estável	Em assoreamento	Em erosão
Carga em suspensão	> 20	< 3	Canal de tipo 1 estável; L/P < 10; sinuosidade usualmente > 2; declive relativamente baixo	Canal de tipo 1 em assoreamento; grande deposição nas margens causa estreitamento do canal; a deposição inicial no fundo do leito é menor	Canal de tipo 1 em erosão; erosão do fundo do leito predominante; alargamento inicial do canal é menor
Mista	5 - 20	3 - 11	Canal de tipo 2 estável; L/P > 10 e < 40; sinuosidade usualmente < 2 e > 1,3; declive moderado	Canal de tipo 2 em assoreamento; grande deposição inicial nas margens seguida pela deposição no fundo do leito	Canal de tipo 2 em erosão; erosão do fundo do leito inicial seguida pelo alargamento do canal
Carga de fundo	< 5	> 11	Canal de tipo 3 estável; L/P > 40; sinuosidade usualmente < 1,3; declive relativamente elevado	Canal de tipo 3 em assoreamento; deposição no fundo do leito e formação de ilhas	Canal de tipo 3 em erosão; pequena erosão do fundo do leito; alargamento do canal predominante

L / P relação largura profundidade; canal de tipo 1: canal cujos sedimentos são transportados predominantemente em suspensão; canal de tipo 2: canal cuja carga sólida é mista; canal de tipo 3: canal com carga de fundo predominante (Schumm, 1977, modificado).

mentos que, não só a melhoraram, mas também provaram a sua validade no ordenamento das áreas ribeirinhas;

(iii) apresenta quatro níveis de análise, podendo esta ser efectuada apenas no nível I (o mais simples) ou em cada um dos outros níveis, de forma sequencial, e cada vez mais complexa, consoante os objectivos do estudo (fig. 36);

(iv) permite compreender e definir, de forma aprofundada, as características e comportamento do curso de água em análise;

(v) como utiliza uma análise geomorfológica quantitativa, permite monitorizar as mudanças que o rio vai apresentando e perceber a sua tendência evolutiva;

(vi) mesmo que o rio tenha sofrido muitos e variados tipos

de intervenção antrópica permite detectar quais seriam as suas características naturais;

(vii) permite propor soluções de intervenção, com variadas finalidades, indo ao encontro das características de funcionamento do rio e não contra elas.

Perante um determinado problema, (por exemplo, um rio que apresenta um recuo cada vez mais acelerado das margens e de rompimento destas, durante situações de cheia, provocando grandes prejuízos na planície de inundação adjacente), a metodologia utilizada por Rosgen vai responder, ao longo dos vários níveis da sua classificação, às perguntas: a) qual a causa do problema?; b) qual está a ser a resposta do rio?; c) quais são as consequências da resposta do rio?; d) como é que podemos remediar o problema? e e) como é que podemos impedir que o problema volte a acontecer?

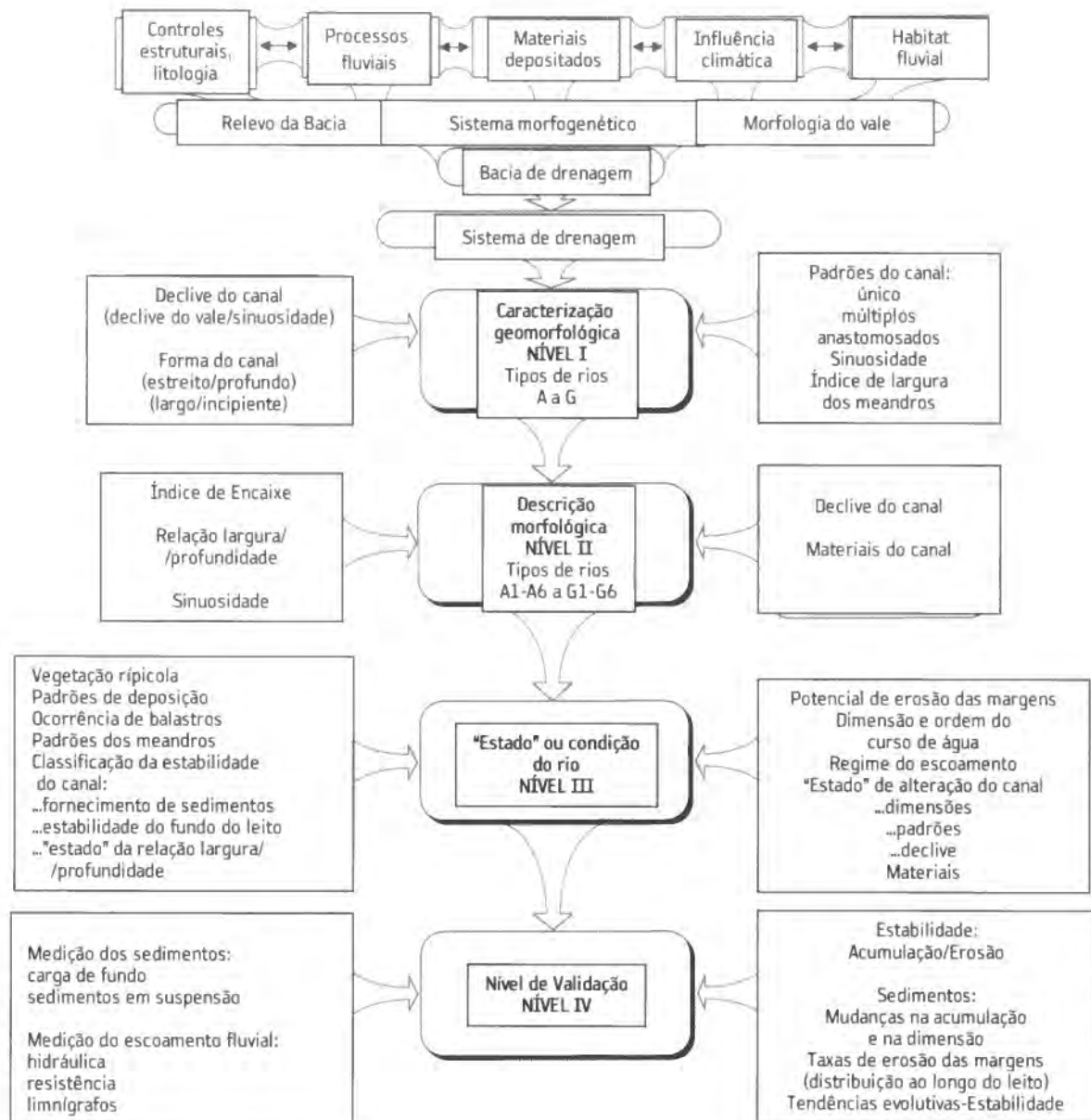


FIGURA. 36 – Classificação de Rosgen, com os quatro níveis de análise e respectivas componentes (Rosgen, 1996).

O nível I da classificação de Rosgen pode ser desenvolvido sem trabalho de campo, utilizando mapas topográficos e/ou ortofotomapas de escala adequada às dimensões do rio (ou do trecho do rio) em análise. Utiliza, basicamente, os tipos de canais, a sinuosidade, o declive do canal, a relação largura/profundidade e o índice de incisão do canal. O cruzamento destas características permite definir 8 tipos básicos de cursos de água (quadro 23 e fig. 37).

O nível II já implica trabalho de campo e junta às características anteriores a composição dos sedimentos do canal. O trecho do rio em análise é classificado numa de seis classes possíveis (fundo rochoso, blocos, calhaus, cascalho, areia, silte/argila), utilizando a mediana da distribuição estatística dos sedimentos. O cruzamento das características do nível I com as do nível II permite definir 41 tipos

de cursos de água (quadro 24).

O nível III avalia o estado do rio, a partir: (i) do regime fluvial (constância do escoamento: permanente, sazonal ou efêmero; tipo de alimentação do escoamento: pluvial, nival, glaciária; escoamento artificializado, por exemplo, com uma barragem a montante); (ii) cruzamento da largura do canal com a hierarquia fluvial (método de Strahler); (iii) padrões de meandros; (iv) formas de acumulação do canal (barras); (v) tipo de vegetação ripícola; (vi) Índice de Perigo de Erosão das Margens; (vii) tipos de bloqueio ao escoamento (naturais e/ou antrópicos); (viii) estabilidade do canal.

O nível IV implica validação e monitorização dos dados dos níveis anteriores e tem sido aplicado com sucesso à reabilitação dos cursos de água.

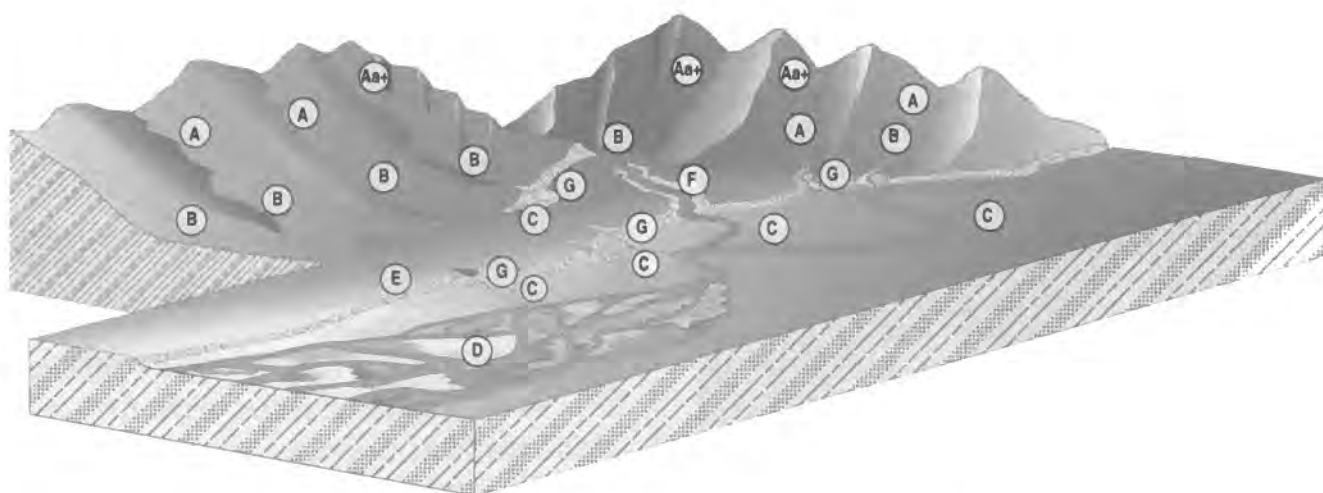
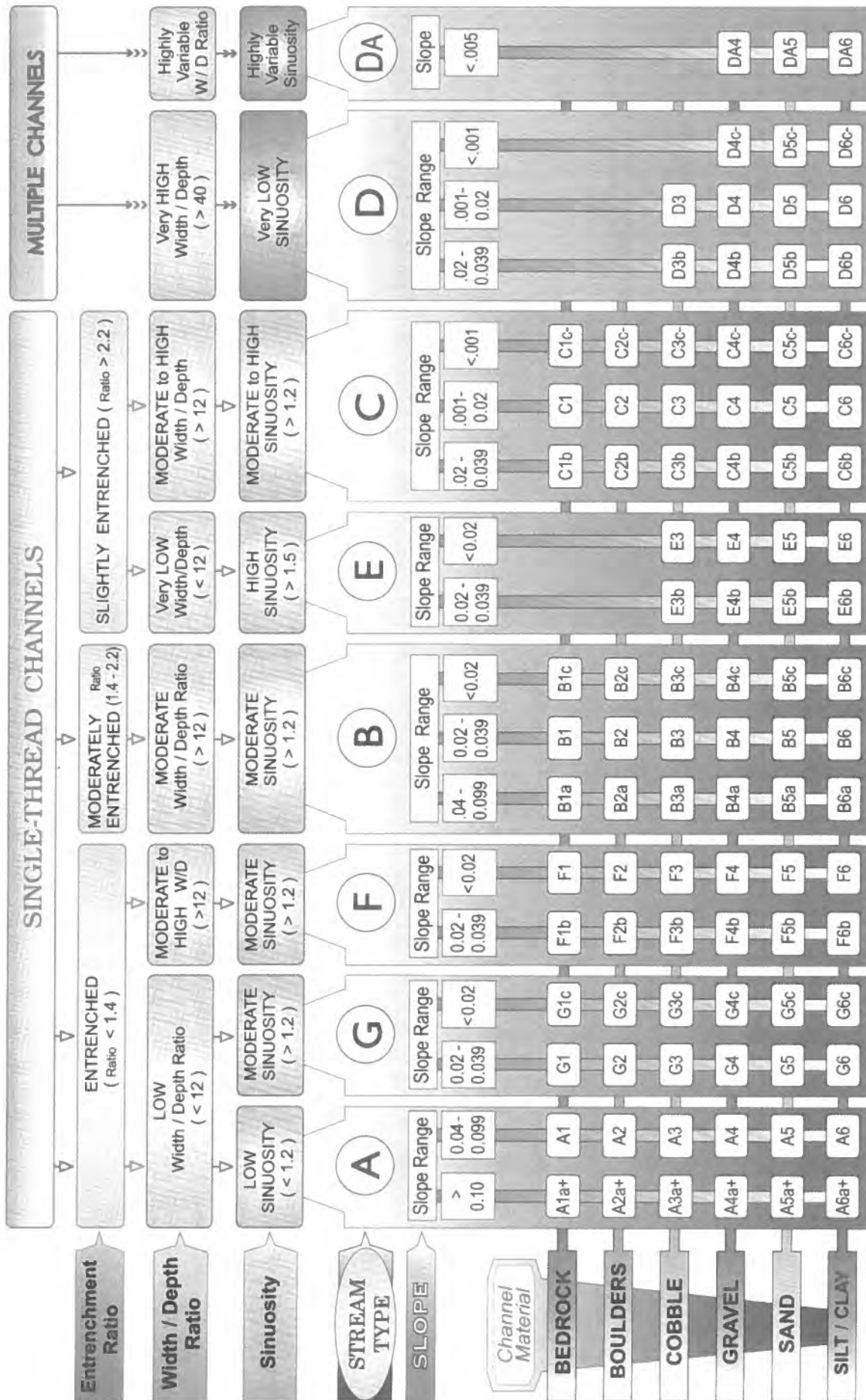


FIGURA. 37 – Posição relativa dos oito tipos básicos de cursos de água segundo a classificação de Rosgen (1996).

QUADRO 23 - CLASSIFICAÇÃO DE ROSGEN: DESCRIÇÃO GERAL DO NÍVEL I

TIPO FLUVIAL	DESCRIÇÃO GERAL DOS CANAIS FLUVIAIS	CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA
Aa+	Muito inclinados, profundamente encaixados, transporte de balastros. Tipo torrentes.	Relevo muito acidentado. Leito por vezes rochoso, potencial transporte de balastros. Cursos de água profundamente encaixados. Degraus verticais com fundões profundos. Quedas de água.
A	Inclinados, encaixados, em cascatas, com fundões profundos. Energia elevada com transporte de balastros. Muito estáveis se possuírem leitos rochosos ou dominarem os blocos.	Relevo acidentado. Formas de erosão, ou acumulação ou leitos rochosos. Cursos de água confinados e encaixados com cascatas. Fundões profundos frequentemente espaçados, associados a uma morfologia do leito com degraus e fundões.
B	Moderadamente encaixados, inclinação moderada, os baixios dominam o canal, com fundões espaçados e pouco frequentes. Forma muito estável em planta e em perfil. Margens estáveis.	Relevo moderado. Índices moderados de encaixe e de largura/profundidade. Vales suavemente inclinados e estreitos. Predominam os rápidos com fundões.
C	Fraca inclinação, meandrizados, barras de meandro, sequência baixios/fundões, canais aluviais com planícies de inundação bem definidas e amplas.	Vales amplos com terraços, em associação com planícies de inundação e solos aluvionares. Canais ligeiramente encaixados com meandros bem definidos. Leitos com sequência de baixios e fundões.
D	Canais entrelaçados com barras longitudinais e transversais. Canais muito amplos com margens em erosão.	Vales amplos com leques aluviais íngremes. Depósitos glaciários e formas de acumulação. Ajustamento lateral activo com fornecimento abundante de sedimentos. Padrões de divergência e convergência do escoamento e sedimentos no leito, processos de acumulação, elevada carga de fundo e de erosão das margens.
DA	Canais anastomosados (canais múltiplos) estreitos e profundos, com extensas planícies de inundação, com vegetação e áreas húmidas associadas. Relevo muito suave com canais de sinuosidade e relação largura/profundidade muito variáveis. Margens do canal muito estáveis.	Vales amplos e de fraco declive com aluviões finas e/ou solos pantanosos. Padrão anastomosado, com deposição de material fino em barras com um coberto vegetal desenvolvido, lateralmente estáveis, ligadas a amplas planícies de inundação com áreas húmidas. Carga de fundo muito reduzida e sedimentos abundantes provenientes da lavagem de material fino.
E	Curso de água com fraco gradiente, meandrizado, com sequência de baixios e fundões, com um baixo índice de largura/profundidade e fraca deposição. Muito eficientes e estáveis. Meandros muito largos.	Vales amplos com campinas. Planícies aluviais. Canais muito sinuosos com barras estáveis com abundante coberto vegetal. Morfologia de baixios e fundões com índices de largura/profundidade muito baixos.
F	Canais de meandros encaixados com baixios e fundões, em baixos gradientes com com índices elevados de largura/profundidade.	Encaixe em material muito meteorizado. Declives suaves com índices elevados de largura/profundidade. Canais meandrizados com elevadas taxas de erosão das margens. Morfologia de baixios e fundões.
G	Canais encaixados "ravinados" com fundões inclinados e um baixo índice de largura/profundidade em declives moderados.	Canais "ravinados", fundões inclinados, declives moderados, e baixos índices de largura/profundidade. Vales estreitos ou profundamente encaixados em materiais aluviais ou coluviais, i.e., leques ou deltas. Instáveis, com problemas de controle de declive e elevadas taxas de erosão das margens.

QUADRO 24 - CLASSIFICAÇÃO DOS CURSOS DE ÁGUA ATÉ AO NÍVEL II (ROSGEN, 1996).



KEY to the ROSGEN CLASSIFICATION of NATURAL RIVERS. As a function of the "continuum of physical variables" within stream reaches, values of **Entrenchment** and **Sinuosity** ratios can vary by +/- 0.2 units; while values for **Width / Depth** ratios can vary by +/- 2.0 units.

MÓDULO IV

DINÂMICA FLUVIAL E INTERVENÇÃO HUMANA

1. Influência antrópica nos sistemas fluviais

A intervenção humana nos sistemas fluviais é um dos factores mais importantes que têm vindo a influenciar, de forma crescente, o funcionamento destes sistemas. Os objectivos e tipos de intervenção antrópica ao longo do tempo (quadro 25).

As consequências da intervenção humana nos sistemas fluviais. Análise e discussão de quatro tipos primordiais de intervenção: (i) desflorestação, (ii) construção de barragens, (iii) artificialização de canais fluviais, (iv) urbanização.

QUADRO 25 – AS SEIS FASES DA INTERVENÇÃO HUMANA NOS SISTEMAS FLUVIAIS, SEGUNDO DOWNS E GREGORY (2004)

FASE CRONOLÓGICA	OBJECTIVO DA INTERVENÇÃO	MÉTODO EMPREGUE
1. Civilizações hidráulicas	<ul style="list-style-type: none"> - regularização doscaudais - irrigação - arroteamento 	<ul style="list-style-type: none"> - construção de barragens - canais de irrigação - construção de diques - drenagem de terrenos
2. Idade Média e Idade Moderna	<ul style="list-style-type: none"> - regularização doscaudais - enxugo de paúis - açudes para a pesca - moinhos de água - navegação - transporte de troncos de madeira 	<ul style="list-style-type: none"> - drenagem de terrenos - estruturas no canal fluvial - canais de drenagem - dragagem - canalização artificial dos rios localizada
3. Revolução Industrial	<ul style="list-style-type: none"> - moinhos industriais - arrefecimento da água - produção de energia - irrigação - abastecimento de água 	<ul style="list-style-type: none"> - construção de barragens - construção de canais artificiais - canais de derivação - canalização dos rios
4. Final do séc. XIX a meados do séc. XX	<ul style="list-style-type: none"> - regularização dos caudais - projectos múltiplos de uso dos rios - defesa contra as cheias 	<ul style="list-style-type: none"> - construção de grandes barragens - canalização dos rios - canais de derivação - estruturas de revestimento das margens - planeamento de bacias hidrográficas
5. Segunda parte do séc. XX	<ul style="list-style-type: none"> - regularização dos caudais - projectos integrados da utilização da água dos rios - controle das cheias - conservação dos sistemas fluviais - recuperação de corredores ribeirinhos 	<ul style="list-style-type: none"> - construção generalizada de grandes barragens - planos de bacia hidrográfica - canalização dos rios - revestimento estrutural e biológico das margens - canais de derivação - técnicas de mitigação, melhoria e recuperação dos rios
6. Final do séc. XX ao início do séc. XXI	<ul style="list-style-type: none"> - conservação - gestão do risco de cheia - reordenamento das áreas ribeirinhas - projectos sustentáveis do uso dos rios 	<ul style="list-style-type: none"> - planeamento integrado de bacias hidrográficas - técnicas de mitigação, melhoria e recuperação dos rios - técnicas de renaturalização - revestimentos híbridos e biológicos das margens

1.1. Desflorestação

A mais antiga acção humana nas bacias hidrográficas, cujos impactes remontam, pelo menos, ao Holocénico médio. A desflorestação induz modificações nos hidrogramas de cheia, devido à diminuição da interceptação das gotas de chuva pela folhagem e da capacidade de infiltração dos solos, que incurta o tempo de concentração e aumenta as pontas de cheia. À medida que o escoamento ao longo das vertentes se torna mais concentrado e mais elevado, o volume de sedimentos mobilizados nas vertentes aumenta, elevando brutalmente a carga sólida ao longo dos canais. O excesso de sedimentos acentua a tendência para os canais se tornarem mais largos, menos profundos, menos sinuosos e mais entrelaçados.

1.2. Construção de barragens

Os impactes das barragens dependem do tipo, objectivo e dimensão destas estruturas hidráulicas e respectivas albufeiras. Os impactes afectam, por um lado, a albufeira e a sua área envolvente e, por outro, o curso de água a jusante da barragem. Porém, no caso dos transvazes, elas afectam outras bacias hidrográficas, que não apenas aquela onde foram construídas. Discussão dos impactes principais das grandes barragens (paredão >15m de altura ou >1hm³ de capacidade da albufeira), a nível do regime fluvial e do transporte de sedimentos:

i) impactes no regime fluvial

- diminuição do escoamento a jusante da barragem (fig. 38)
- diminuição da frequência das cheias
- diminuição da magnitude média das cheias (fig. 38)
- aumento dos caudais mais baixos (fig. 38)
- diminuição da variabilidade anual e sazonal dos caudais
- mudança mensal dos caudais extremos (fig. 38)
- aumento da infiltração e da recarga dos aquíferos a montante (albufeira)
- diminuição da recarga dos aquíferos a jusante, devido à diminuição das cheias
- diminuição do caudal sólido e dos nutrientes a jusante da barragem, devido à diminuição das situações de transbordo

ii) impactes na morfologia do canal fluvial

- modificação do nível da base do curso de água a montante da barragem
- diminuição da inclinação do canal fluvial e da velocidade do escoamento a montante
- deposição de sedimentos na albufeira (retem a carga de fundo e a maior parte dos sedimentos em suspensão)
- estreitamento e aprofundamento do canal fluvial a jusante da barragem
- desenvolvimento generalizado da vegetação no leito me-

nor (colonização das barras) ou nas suas margens, devido à diminuição do escoamento e das cheias bem como ao aumento dos caudais de estiagem.



FIGURA. 38 – Modificação do regime do Rio Nilo devido à construção da barragem do Assuão (Newson, 1995, modificado).

1.3. Artificialização dos canais fluviais

Apresentação dos principais tipos de intervenção nos canais fluviais e seus impactes (segundo Knighton, 1998):

MÉTODO: rectilinearização do canal

OBJECTIVO: protecção contra as cheias (melhoria da evacuação dos caudais de ponta) e desenvolvimento de infraestruturas

DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO: diminuição do comprimento do rio, através do cut-off artificial de meandros e dragagem do canal

IMPACTES: aumento do declive do canal devido à diminuição do comprimento do traço. A velocidade do escoamento e a capacidade de transporte aumentam. Erosão regressiva acentuada. A erosão das margens e do fundo do leito aumentam a carga sólida que chega a jusante do traço intervenido, acabando por diminuir o declive e promovendo a acumulação.

MÉTODO: alargamento do canal

OBJECTIVO: aumento da capacidade de vazão, para reduzir a hipótese de transbordo

DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO: alargamento e / ou aprofundamento do canal

IMPACTES: o alargamento reduz a velocidade diminuindo a capacidade de transporte sedimentar e promovendo a formação de bancos de sedimentos

MÉTODO: construção de diques e muros de protecção ao longo do canal

OBJECTIVO: protecção contra as cheias e manutenção de canais de irrigação

DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO: levantamento das margens do canal

IMPACTES: reduz a frequência das cheias nas planícies de inundação e as taxas de sedimentação, induzindo profundas modificações nos ecossistemas das áreas húmidas. Pode aprisionar os caudais de cheia de maior magnitude, mas a concentração do escoamento no canal pode levar à sua incisão

MÉTODO: estabilização do canal e trabalhos de protecção das margens

OBJECTIVO: controlar a erosão das margens

DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO: uso de várias estruturas (pavimentação, gabiões, esporões, diques, etc.)

IMPACTES: modifica a largura e a rugosidade do canal, com implicações secundárias na incisão e consequente libertação de sedimentos, ajustando o declive do canal. Pode promover a sedimentação adjacente às margens, potenciando as cheias se a capacidade de vazão do canal for diminuída

MÉTODO: limpeza do canal

OBJECTIVO: melhorar a passagem das águas das cheias e a navegação

DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO: remoção de obstáculos do leito do rio

IMPACTES: diminui a resistência e aumenta a velocidade do escoamento, promovendo a degradação do fundo do canal, o alargamento e o aumento na capacidade de vazão

MÉTODO: dragagem

OBJECTIVO: manter os canais navegáveis

DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO: remoção de sedimentos do fundo do canal, especialmente ao longo do talvegue e de baixios

IMPACTES: pode promover a degradação do canal, devido ao rebaixamento do nível de base no troço intervencionado, e a erosão regressiva que, por sua vez, contribui para uma chegada adicional de sedimentos ao troço dragado. A dragagem pode promover o colapso das margens e a progressão desta situação para montante ao longo dos tributários

MÉTODO: colocação de represas e comportas

OBJECTIVO: regulação de desníveis para a navegação

DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO: implantação de estruturas hidráulicas amovíveis no canal

IMPACTES: modifica o declive do fundo do canal e reduz a passagem de sedimentos. Promove o alongamento dos baixios.

1.4. Urbanização

O processo de urbanização tem diferentes impactes consoante as condições naturais anteriores, a área ocupada e o

tipo de urbanização. A impermeabilização dos solos é uma das principais consequências, com a diminuição drástica da infiltração, mas se o substrato geológico for, à partida, de permeabilidade reduzida a muito reduzida, esse efeito não é tão acentuado no aumento do escoamento superficial. Contudo, os efeitos no escoamento são conhecidos: com valores de precipitação semelhantes, a área urbana produz um maior escoamento directo, que se reflete no aumento das pontas de cheia e na maior velocidade do escoamento, devido ao sistema de drenagem artificial e à intervenção nos canais fluviais (diminuição da rugosidade). Este processo leva a um aumento potencial da erosão que se traduz no alargamento e aprofundamento do canal (fig. 39), com a deposição de sedimentos a jusante da área intervencionada.

Relativamente ao transporte de sedimentos, definem-se duas fases: (i) na fase de construção, a movimentação de solos (terraplanagens, taludes, abertura de fundações) leva ao disparo da carga sólida que chega ao canal, pelo que a capacidade de vazão se reduz com a deposição de sedimentos no leito; (ii) depois da construção dos edifícios e da colocação de asfalto nas ruas há um decréscimo acentuado de sedimentos, podendo até a sua quantidade ser inferior a que existia antes do processo de urbanização (fig. 39).

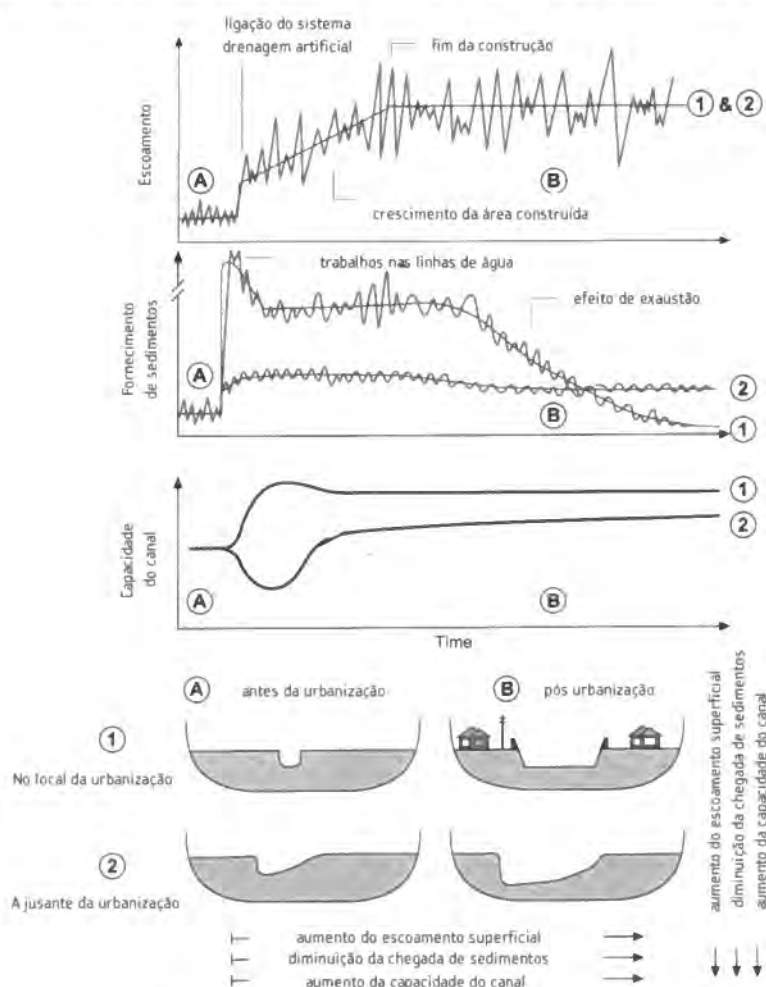


FIGURA. 39 - Modificações no escoamento, no transporte de sedimentos e na morfologia dos canais devido ao processo de urbanização. A - antes da urbanização; B - depois da urbanização; 1 - no local da urbanização; 2 - a jusante da urbanização (Brierley e Fryirs, 2005).

1.5. A acção humana como factor agravante das cheias

Discussão das acções humanas que agravam as consequências das cheias e potenciam o risco. Exemplos. As acções ao nível da bacia-vertente: (i) destruição do coberto vegetal nas áreas declivosas (arroteamentos, fogos florestais, mineração); (ii) práticas agrícolas inadequadas; (iii) impermeabilização dos solos. As acções ao nível dos leitos de cheia e menor: (i) ocupação indevida ou desajustada dos leitos de cheia; (ii) estrangulamentos dos canais fluviais; (iii) obstáculos perpendiculares ao sentido do escoamento; (iv) entulhamento ou encanamento dos cursos de água; (v) falta de limpeza dos canais fluviais e vazamento indevido de lixos e entulhos; (vi) sistemas de águas pluviais e residuais inadequados.

2. Consequências das cheias

2.1. O risco de cheia

“Uma cheia, numa região remota e despovoada, é um evento físico extremo com interesse apenas para os hidrólogos. Planícies de inundação inteiras podem ser drasticamente modificadas, mas não destruídas, pelos fenómenos que as criaram. De facto, muitos dos ecossistemas dessas planícies dependem da inundação periódica. Termos como “perda” e “risco” são, essencialmente, uma interpretação humana das consequências negativas, económicas e sociais, dos eventos naturais” (Smith e Ward, 1998).

As cheias podem assim ser analisadas como um perigo natural (ou induzido pela acção humana). Um perigo natural (P) é a probabilidade de ocorrência, num determinado período de tempo e numa determinada área, de um fenómeno natural potencialmente danoso (como, por exemplo, as cheias). A vulnerabilidade (V) é o grau de perda (ou danos)

resultante de uma dada magnitude de P, expressa numa escala de 0 (sem danos) a 1 (perda total). Os elementos em risco (E) são a população, propriedades, actividades económicas, incluindo serviços públicos, etc., expostos ao risco numa dada área (Carrara, 1984, em Aswathanarayana, 1995). O risco (R) = $P \times V \times E$.

No caso das cheias, a variável P (também designada por perigosidade natural) depende, essencialmente, da magnitude do evento e da sua duração. A crescente intervenção humana nas várias componentes nas bacias hidrográficas tem influenciado não só as variáveis E e V (por exemplo, através da densificação da ocupação das planícies de inundação), mas também a frequência e a magnitude das cheias (P).

O impacto de uma cheia numa comunidade pode ter consequências catastróficas. As cheias mais mortíferas, ocorridas no Planeta, e suas causas (quadro 26).

A EM-DAT considera que um fenómeno natural de características extremas é um desastre natural se provocar, pelo menos, uma de quatro consequências possíveis: (i) dez ou mais vítimas mortais, (ii) cem ou mais pessoas afectadas no imediato, (iii) se existir um pedido de ajuda internacional; (iv) se existir a declaração do estado de emergência. Utilizando este critério, verifica-se que, à escala global, as cheias são o desastre natural mais frequente (34% do total) e que afecta mais pessoas (51% do total, fig. 40), mas não são o que mais vítimas mortais provoca (7500 mortos / ano), sendo largamente ultrapassadas pelas secas e pelos sismos, que têm uma incidência territorial mais lata (as cheias estão circunscritas aos fundos de vale). Segundo o Dartmouth Flood Observatory (DFO) a duração média do fenómeno das cheias é de 9,5 dias, sendo a mediana de 5 dias. A Ásia é o continente mais afectado (fig. 41), essen-

QUADRO 26 - AS CHEIAS MAIS MORTÍFERAS (>100 000 VÍTIMAS MORTAIS) DE QUE HÁ REGISTOS E SUAS CAUSAS

	LOCALIZAÇÃO	DATA	Nº DE MORTOS	CAUSA
1	Rio Amarelo (China)	1931	1 000 000 a 3 700 000	Cheia de derrocada natural. Colapso de barreira de gelo na Mongólia. A parede de água arrastou grandes quantidades de silte (60% do volume da cheia).
2	Rio Amarelo (China)	1887	900 000 a 2 000 000	?
3	Rio Amarelo (China)	1938	500 000 a 900 000	Cheia de derrocada artificial. Para impedir o avanço japonês, as tropas chinesas rebentaram os diques que sustinham o rio.
4	Rio Amarelo (China)	1642	300 000	Cheia de derrocada artificial. Rebeldes chineses destruíram os diques ao longo da cidade de Kaifeng, inundando os arredores.
5	Rio Ru (China)	1975	230 000	Cheia de derrocada artificial. Rebentamento da barragem de Banquia e de várias outras em consequência de chuvas abundantes devidas a um furacão. É a pior sequência de colapsos de barragens conhecida.
6	Rio Yang-Tsé Kiang (China)	1931	145 000	?
7	Holanda e Inglaterra	1099	100 000	O efeito combinado de tempestades e storm surge provocou inundações costeiras

Fonte: http://www.epicdisasters.com/index.php/site/comments/the_worlds_worst_floods_by_death_toll/

cialmente no verão, muito dependente das chuvas da monção, acompanhadas pela fusão da neve nas montanhas e pelo efeito combinado do escoamento fluvial com o *storm surge* nas áreas costeiras.

Em Portugal, ainda segundo o critério da EM-DAT, as cheias são o desastre natural mais frequente, sendo o 2º mais mortífero, o 2º que afecta mais pessoas e o 3º que maiores prejuízos financeiros provoca (quadro 27).

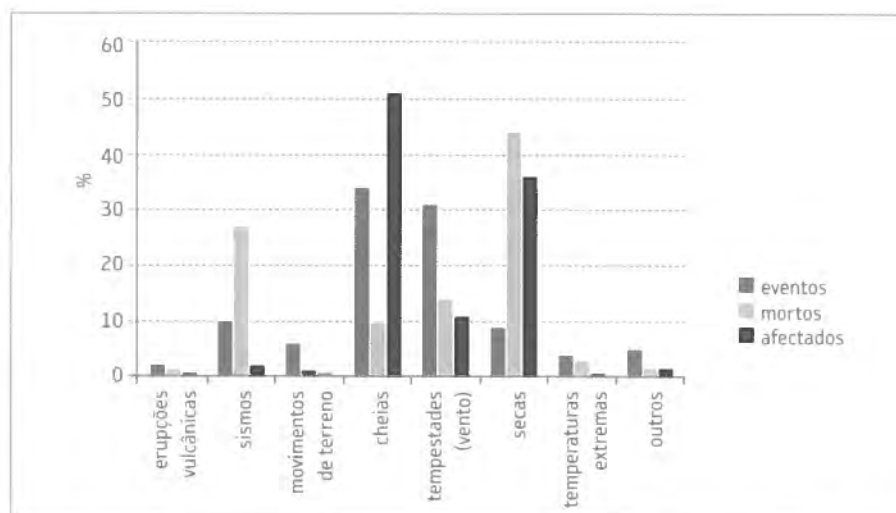


FIGURA. 40 – Desastres naturais, à escala global, entre 1974 e 2003. Fonte: EM-DAT.

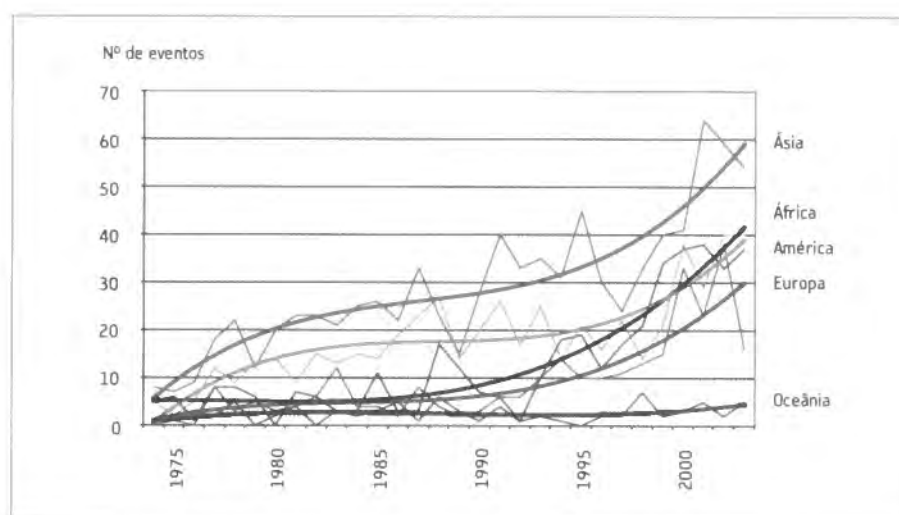


FIGURA. 41 – Tendência evolutiva das cheias, nos vários continentes, entre 1974 e 2003 (Hoyois e Guha-Sapir, 2004, modificado).

QUADRO 27 – DESASTRE NATURAIS EM PORTUGAL, ENTRE 1967 E 2007 FONTE: EM-DAT.

TIPO DE DESASTRE	Nº DE EVENTOS	Nº DE MORTOS	Nº DE AFECTADOS	PREJUÍZOS (000 US)
Sismos	3	79	24 000	72 000
Movimentos de terreno	1	29	55	16 300
INUNDAÇÕES	11	551	52 806	143 100
Tempestades de vento	6	71	330	91 000
Temperaturas extremas	6	2 747	-	-
Secas	3	-	-	1 443 136
Fogos florestais	8	60	150 186	3 475 000

As consequências nefastas das cheias podem ser avaliadas dividindo-as em diferentes categorias de danos (quadro 28). Os danos directos, que ocorrem no imediato, depois do evento, como resultado do contacto directo das pessoas e dos bens com as águas (e sedimentos) das cheias; os danos indirectos, que se manifestam a uma escala temporal mais longa, mas que podem ser tão ou mais importantes que os directos. Os danos directos e indirectos podem, ou não, ser avaliados financeiramente. No primeiro caso, são considerados danos tangíveis e, no segundo, intangíveis. Os danos tangíveis e intangíveis podem, por sua vez, ser divididos em primários (que resultam directamente da cheia) e secundários (que são consequências indirectas das cheias).

Na análise dos dados existentes, ao nível dos diferentes países, é necessário ter alguma prudência porque: (i) os bancos de dados não são homogêneos nem consistentes (a partir de meados dos anos 90 houve, claramente, uma melhoria da qualidade de informação, o que pode aumentar, artificialmente, o nº de desastres e respectiva avaliação de danos); (ii) os dados não são directamente comparáveis entre os países mais desenvolvidos e os menos desenvolvidos (quer pela qualidade da informação quer pelo tipo e grau de importância dos danos). Neste caso, os danos directos e tangíveis tendem a ser mais importantes nos países mais desenvolvidos, não só porque existe uma menor incidência de vítimas mortais e maiores perdas financeiras, mas também devido aos custos adicionais de recuperação (por exemplo, depois das águas das cheias terem contaminado bons solos agrícolas). Os danos indirectos e intangíveis são provavelmente maiores nos países menos desenvolvidos,

em especial, onde cheias frequentes e devastadores geram impactos especiais para os sobreviventes (o aumento da vulnerabilidade das crianças órfãs depois da morte de ou dos dois progenitores e, em casos extremos, o declínio económico e social, a longo prazo, da área afectada, depois de os seus membros mais activos, ultrapassado o seu limiar de tolerância, a terem abandonado).

2.2. Os benefícios das cheias

Os benefícios das cheias são, na sua maioria, indirectos e intangíveis. Eles fazem parte dos atributos das planícies aluviais, adquiridas durante as cheias de tipo lento, mais frequentes e de baixa a média magnitude, às quais as populações estão adaptadas. Esses benefícios actuam directamente sobre a planície aluvial, sobre o corredor fluvial e sobre o litoral:

(i) este tipo de cheias alimenta e renova a água das áreas húmidas (paúis), algumas das quais são áreas protegidas, e contribuem para a manutenção da diversidade biológica da planície e do corredor fluvial. Estas áreas ribeirinhas (nas quais se incluem os estuários e os deltas) fornecem o abrigo, a alimentação e as condições de nidificação para uma grande diversidade de espécies. Muitos rios, e respectivas planícies de inundação, são usados como corredores migratórios para várias espécies de aves.

(ii) a deposição de sedimentos finos e de nutrientes, nas planícies de inundação e deltas, alimentam terrenos agrícolas de grande fertilidade. Qualquer mudança no tipo de sedimentos depositados pode afectar esta realidade (as areias e os cascalhos tornam inférteis estes terrenos).

QUADRO 28 - AS CATEGORIAS DOS DANOS POTENCIAIS DAS CHEIAS (SMITH E WARD, 1998).



(iii) a vegetação e as aluviões, que vão sendo depositadas pelas cheias nas planícies de inundaç o, servem de filtro para o excesso de nutrientes e de subst ncias poluentes, provenientes das actividades humanas nestas planícies, trazidos pela  guas de escorr ncia superficial antes de atingirem o rio. Este "trabalho" diminui os custos de tratamento da  gua extraída dos rios para abastecimento.

(iv) a ocorr ncia deste tipo de cheias, na  poca do ano respectiva, remove esp cies nocivas para a agricultura, contribuindo para a diminui o da aplica o de insecticidas e da polui o dos solos aluvionares.

(v) as cheias alimentam os aquiferos aluvionares, contribuindo para a renova o das suas reservas de  gua.

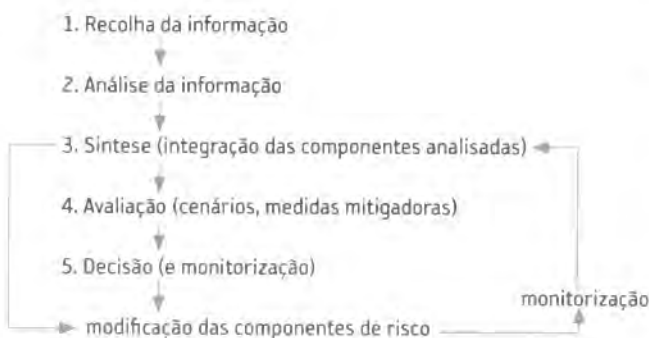
(vi) nos rios onde se d  um grande transporte de sedimentos arenosos e o assoreamento do canal fluvial podem desenvolver-se actividades de extrac o de inertes para a ind stria da constru o, mediante determinadas regras (nem sempre cumpridas).

(vii) o transporte de sedimentos arenosos para o litoral, e a sua retoma pelas correntes de deriva, favorece a alimenta o das praias e, nalguns casos, o desenvolvimento de ilhas-barreira que actuam como defesa natural da linha de costa nas situa o de *storm surge*.

3. Gest o do risco de cheia

3.1. Modelo conceptual de avalia o e gest o do risco de cheia

A avalia o e gest o do risco de cheia tem v rias fases com diferentes objectivos. Apresenta-se o modelo conceptual de Correia *et al*, 1994:



Fase 1. Recolha de informa o. As fontes de informa o: vantagens e inconvenientes da cada fonte de informa o. Os tipos de informa o a recolher: (i) dados biof sicos - hidrol gicos (hidrom tricos, balan o h drico), clim ticos (precipita o acumulada, intensidade, dura o e frequ ncia), geomorfol gicos (geometria da bacia de drenagem,

relevo, solo, subsolo, rede de drenagem), uso do solo e sua evolu o, defini o e delimita o das  reas inundadas; (ii) dados socio-econ micos das  reas inundadas - estrutura e evolu o da popula o, actividades econ micas, recursos e patrim nio, naturais e culturais, potencialmente afectados; (iii) dados sobre a percep o das cheias - question rios (entrevistas, inqu ritos).

Fase 2. An lise da informa o: (i) caracteriza o das componentes biof sicas do risco de cheia (factores desencadeantes e agravantes); (ii) caracteriza o dos factores antr picos agravantes das cheias; (iii) caracteriza o hidrol gica e hidr ulica para a defini o das  reas de risco de cheia; (iv) caracteriza o e espacializa o das vari veis socio-econ micas afectadas; (v) caracteriza o da percep o do risco de cheia por parte da popula o.

Fase 3. S ntese dos resultados: (i) defini o e interac o das condicionantes biof sicas e antr picas, (ii) defini o das  reas a proteger, (iii) integra o das diversas componentes do risco.

Fase 4. Avalia o: (i) da situa o de refer ncia (no per odo analisado); (ii) impactes negativos (e positivos se os houver) das cheias; (iii) formula o de op oes e cen rios (n o fazer nada, ou aplica o de medidas de mitiga o estruturais, n o estruturais ou mistas); (iv) avalia o dos impactes potenciais das medidas propostas: (modifica o das componentes biof sicas, impactes ambientais das medidas estruturais, quem   afectado e como e percep o das medidas por parte da popula o).

Fase 5. Decis o: quando se implementam medidas que actuam sobre as componentes do risco, estas modificam-se, pelo que   necess ria a monitoriza o continuada, para que o processo de gest o do risco de cheia seja sustent vel.

3.2. Tipologia das medidas de mitiga o do risco de cheia

Mitiga o: ac o sustentada que reduz ou elimina o risco a longo prazo, proveniente das cheias, para pessoas e propriedades.

As tr s fases da evolu o dos paradigmas relativos   mitiga o do risco de cheia:

(i) na fase 1, at  aos anos 60, dominaram as medidas de correc o, que visam a resolu o de problemas de inunda o em pontos cr ticos das bacias hidrogr ficas; s o quase todas medidas estruturais (de engenharia). Este tipo de medidas sempre teve grande apoio por parte da popula-

ção e do poder político, porque: a) protegem a vida e os bens em pontos críticos das bacias (defesa de imóveis e propriedade, nas áreas urbanas, e aumento do valor dos terrenos ribeirinhos, nas áreas rurais); b) são visíveis no terreno e mostram algum tipo de acção política contra as consequências nefastas das cheias.

(ii) Na fase 2, dos anos 60 aos anos 80, surgiu uma reacção, a partir dos trabalhos dos geógrafos da "Escola de Chicago", contra a lógica de que a prevenção dos efeitos nefastos das cheias se poderia fazer baseada essencialmente em medidas de tipo estrutural. Estes geógrafos alertaram contra as políticas que "descansavam" no chamado "efeito do dique", e defendiam uma abordagem mais integrada na prevenção do risco de cheia. De facto, ao abrigo da protecção dos diques foi-se verificando uma invasão das planícies de inundação, aumentando a vulnerabilidade e potenciando o risco, no caso de ruptura desses diques (o que, por vezes, acontece, nas cheias de maior magnitude). A nova abordagem defendia a implementação de medidas não estruturais, que englobavam medidas de conservação e uso do solo, o ordenamento do território, a implementação de sistemas de prevenção e alerta e de seguros.

(iii) na fase 3, pós anos 80, surgiram as medidas restaurativas, que baseadas numa análise custo-benefício, por parte do poder político e companhias seguradoras, levam à compra de propriedades e realocização de actividades fora das planícies de inundação, nas situações em que não é sustentável manter as pessoas ou bens nas áreas inundáveis.

Tipos de medidas mitigadoras das cheias: estruturais e não estruturais. Medidas estruturais: (i) obras de correcção nas bacias de drenagem e na conservação dos solos; (ii) barragens e bacias de retenção para amortecimento dos caudais de ponta, (ii) intervenções nos canais fluviais (diques transversais para amortecimento das cheias, esporões, aumento da secção dos canais, rectificação, revestimento e limpeza dos canais, criação de canais de derivação). Medidas não estruturais: (i) (re)ordenamento do território (medidas normativas de prevenção do risco); (ii) previsão e controle de cheias (previsão meteorológica, informação hidrométrica e hidrometeorológica, sistemas de alerta); (iii) planos de emergência (sistemas de alarme e de informação, (re)alojamento das populações); (iv) medidas de informação ao público e de educação ambiental nas escolas; (v) medidas de diminuição do grau de perda (seguros, redução de impostos, barreiras de protecção).

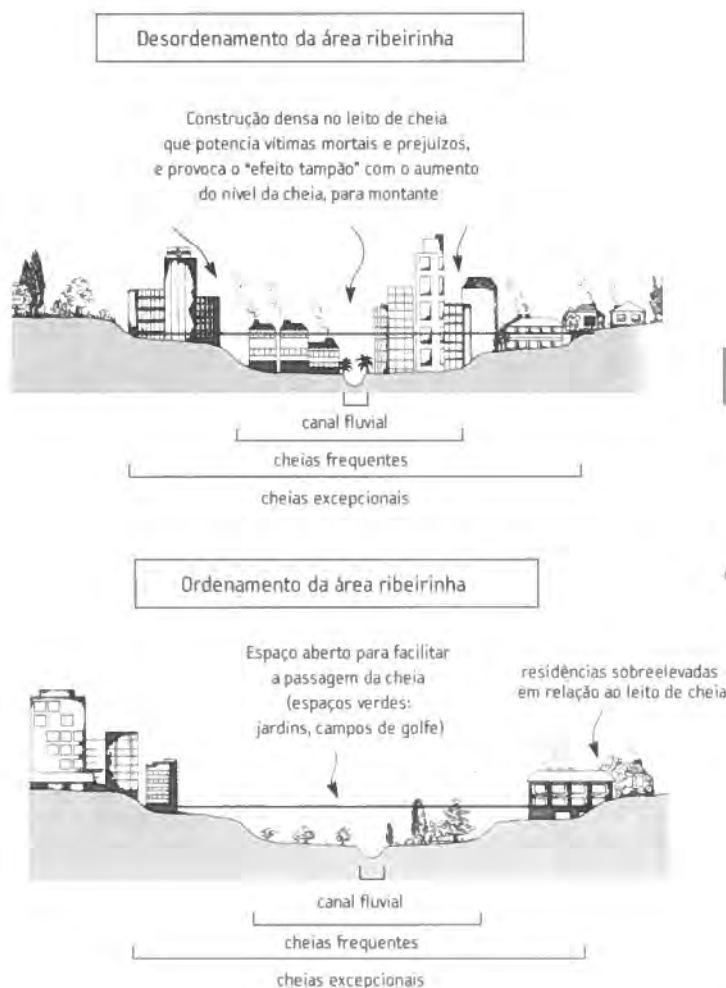


FIGURA. 42 - Ordenamento territorial das áreas ribeirinhas, em função das cheias (Newson, 1995, modificado).

Na União Europeia (CE, 2004), e no que diz respeito à gestão do risco de cheia, todas estas medidas estão organizadas em cinco tópicos essenciais:

(i) prevenção - impedir a construção nos leitos de cheia actuais (e futuros); promover o uso sustentável do solo e de práticas agrícolas e florestais adequadas;

(ii) protecção - aplicar medidas estruturais e não estruturais, para reduzir a probabilidade ou as consequências das cheias numa dada área;

(iii) preparação - informar a população acerca do risco e do que fazer em situação de cheia;

(iv) resposta de emergência - desenvolver planos de emergência em caso de cheia;

(v) recuperação - voltar às condições normais o mais cedo possível, aprender com os erros cometidos, e mitigar os impactes económicos e sociais da população afectada.

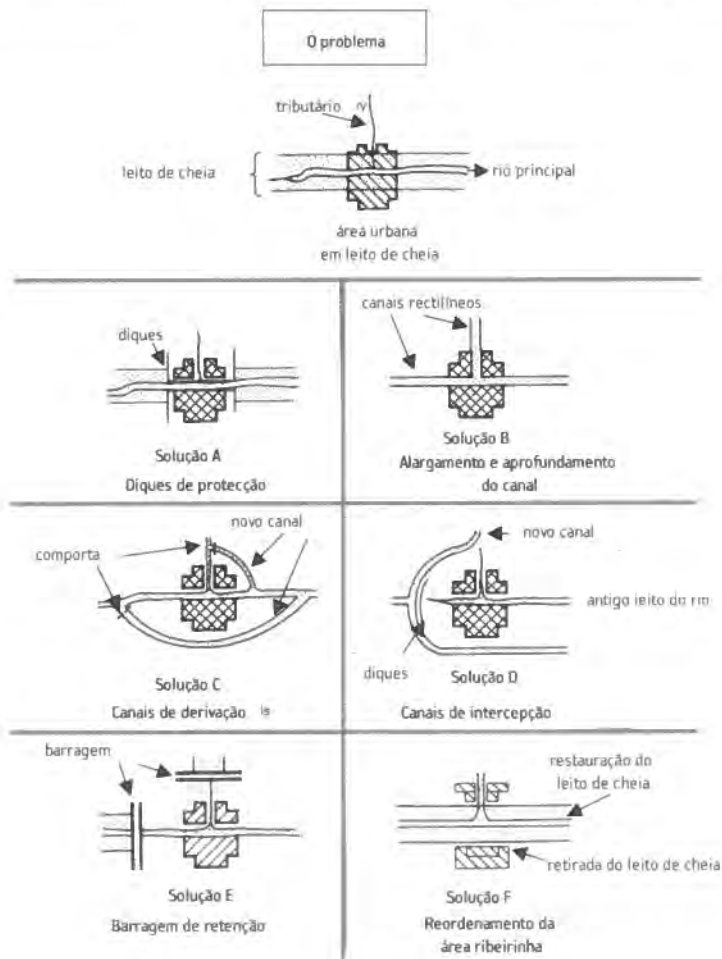
Actualmente, consideram-se três estratégias possíveis na abordagem do risco de cheia, que poderão ser complementares (Almeida, 2008, modificado):

1ª estratégia - manter as pessoas afastadas das cheias, através de medidas não estruturais, essencialmente no domínio do ordenamento do território (à escala da bacia hidrográfica e dos fundos de vale), que incluem zonamentos, proibições ou condicionamentos a determinados usos dos leitos de cheia e reordenamento territorial (fig. 42 e fig. 43, solução F);

2ª estratégia - manter as cheias afastadas das pessoas, através de medidas estruturais, que incluem a construção de estruturas para a conservação do solo e da água, barragens, diques e intervenções nos canais fluviais (fig. 43);

3ª estratégia - viver com as cheias (no caso destas não serem mortíferas nem potencialmente destruidoras das propriedades, fig. 44), que implicam a aceitação do fenómeno e medidas de adaptação e também de mitigação que permitam o regresso rápido à normalidade.

Ideia-chave: as cheias são um fenómeno complexo, condicionado por diversos factores naturais e antrópicos, que implicam o estudo caso a caso. Nem sempre as medidas a implementar devem ser as mesmas e, por vezes, é necessário aplicar medidas de tipo diverso (mistas), que se complementam na resolução do problema a solucionar. A aplicação



FIGURA, 43 – Exemplos de medidas estruturais (soluções A a E) e restaurativas (retirada do leito de cheia, F);
(Nixon, 1963, em Cooke e Doornkamp, 1990)

de qualquer medida (em especial das estruturais) deve ser sempre acompanhada da respectiva avaliação, no sentido de minorar os efeitos desestabilizadores nos canais fluviais.



FIGURA. 44 – Viver com as cheias: exemplo de medidas de protecção em residência afectada por cheias frequentes mas não destruidoras (Smith e Ward, 1998, modificado).

3.3. A legislação portuguesa no domínio das cheias

O trabalho do geógrafo desenvolve-se, basicamente, a nível da 1ª estratégia: manter as pessoas afastadas das cheias, onde se enquadra o domínio do ordenamento do território. Neste contexto, finaliza-se o programa com a análise (crítica) da legislação relativa às cheias, aplicada no território nacional.

A legislação existente:

(i) Decreto-Lei n.º 468/71 de 1971-11-05:

Domínio Público Hídrico

Define, pela primeira vez, as chamadas *zonas adjacentes*, que são *terrenos situados para além das margens dos cursos de água, mas em posição tal que tenham de ser considerados como terrenos ameaçados pelas cheias*.

O respectivo regime consiste fundamentalmente em assegurar, aí, a *intervenção dos serviços hidráulicos no planeamento urbanístico ou no licenciamento da edificação, de modo que possam ser tomados em conta os perigos emergentes da proximidade das águas e da probabilidade da sua acção devastadora*.

(ii) Decreto-Lei n.º 321/83 de 5 de Julho, cria a Reserva Ecológica Nacional (REN). A revisão do regime jurídico da REN é feita pelo Decreto-Lei n.º 93/90 de 1990-03-19, que ficou conhecido pela Lei da REN.

Este Decreto-Lei (DL) foi sofrendo várias alterações, sendo a última correspondente ao Decreto-Lei n.º 180/2006 de 6 de Setembro, em que no Anexo 4 refere as acções insusceptíveis de prejudicar o equilíbrio ecológico das áreas integradas na REN.

A Lei da REN (Decreto-Lei n.º 93/90) integra no Anexo I, n.º2, alínea a), os leitos dos cursos de água e as zonas ameaçadas pelas cheias (ZAC). No Anexo III, alínea j) da mesma lei define-se ZAC como *a área contígua à margem de um curso de água que se estende até à linha alcançada pela maior cheia que se produza no período de um século ou pela maior cheia conhecida no caso de não existirem dados que permitam identificar a anterior*.

Artigo 4.º, n.º1 da Lei da REN: *Nas áreas incluídas na REN são proibidas as acções de iniciativa pública ou privada que se traduzam em operações de loteamento, obras de urbanização, construção de edifícios, obras hidráulicas, vias de comunicação, aterros, escavações e destruição do coberto vegetal*.

(iii) Decreto – Lei n.º 89/87 de 1987-02-26: Estabelece medidas de protecção às zonas ameaçadas pelas cheias, introduzindo alterações ao Decreto – Lei n.º 468/71 (Domínio Público Hídrico).

Este DL veio colmatar um vazio na legislação relativamente às ZAC nas áreas urbanas, uma vez que a REN não se define dentro dos perímetros urbanos.

Modificação do artigo 14º do Domínio Público Hídrico:

1 - *O Governo pode classificar como zona ameaçada pelas cheias, adiante designada por zona adjacente, a área contígua à margem de um curso de água, que se estende até à linha alcançada pela maior cheia com probabilidade de ocorrência no período de um século (cheia dos 100 anos)*.

3 - *Conterá em anexo uma planta delimitando a área classificada e definindo dentro desta as áreas de ocupação edificada proibida e ou áreas de ocupação edificada condicionada*.

8 - *A aprovação de planos ou ante planos de urbanização e de contratos de urbanização, bem como o licenciamento de operações de loteamento urbano ou de quaisquer obras ou edificações, relativos a áreas contíguas a cursos de água que não estejam ainda classificadas como zonas adjacentes, carecem de parecer vinculativo da Direcção-Geral dos Recursos Naturais, quando estejam dentro do limite da maior cheia conhecida ou de uma faixa de 100 m, para cada lado da linha de margem do curso de água, quando se desconheça aquele limite*.

Modificação do artigo 15º do Domínio Público Hídrico:

1 - *Nas áreas delimitadas como zonas de ocupação edificada proibida é interdito:*

a) *Destruir o revestimento vegetal ou alterar o relevo natural, com excepção da prática de culturas tradicionalmente integradas em explorações agrícolas;*

b) Instalar vazadouros, lixeiras, parques de sucata ou quaisquer outros depósitos de materiais;

c) Implantar edifícios ou realizar obras susceptíveis de constituir obstrução à livre passagem das águas;

3 - Podem as áreas classificadas referidas ser utilizadas para instalação de equipamentos de lazer, desde que não impliquem a construção de edifícios, dependendo de parecer vinculativo da Direcção-Geral do Ordenamento do Território e da Direcção-Geral dos Recursos Naturais.

4 - Nas áreas delimitadas como zonas de ocupação edificada condicionada, só é permitida, mediante parecer favorável da Direcção-Geral dos Recursos Naturais, a instalação de edifícios que constituam complemento indispensável de outros já existentes e devidamente licenciados.

5 - As cotas dos pisos inferiores dos edifícios a construir nas áreas referidas no número anterior deverão ser sempre superiores às cotas previstas para a cheia dos 100 anos, devendo este requisito ser expressamente referido no respectivo processo de licenciamento.

(iv) Decreto-Lei nº 364/98 de 1998-11-21: Estabelece a obrigatoriedade de elaboração da carta de zonas inundáveis nos municípios com aglomerados urbanos atingidos por cheias.

Artigo 1.º

1 - Os municípios com aglomerados urbanos atingidos por cheias num período de tempo que, pelo menos, inclua o ano de 1967 e que ainda não se encontrem abrangidos por zonas adjacentes devem elaborar uma carta de zonas inundáveis, que demarque, no interior dos perímetros urbanos, as áreas atingidas pela maior cheia conhecida.

Artigo 2.º

1 - As plantas de síntese dos PMOT devem incluir a delimitação das zonas referidas no artigo anterior.

2 - Quando a escala da planta de síntese não permita a delimitação com o pormenor necessário para atingir os fins do presente diploma, deve ser complementada com cartas a uma escala não inferior a 1:5000.

3 - Os regulamentos dos PMOT devem estabelecer as restrições necessárias para fazer face ao risco de cheia, designadamente, nos seguintes termos:

a) Nos espaços urbanos, minimizando os efeitos das cheias, através de normas específicas para a edificação, sistemas de protecção e de drenagem e medidas para a manutenção e recuperação das condições de permeabilidade dos solos;

b) Nos espaços urbanizáveis, proibindo ou condicionando a edificação.

5 - Os PMOT devem estipular que as cotas dos pisos de habitação são superiores à cota local da máxima cheia conhecida.

b - Fora das áreas urbanas consolidadas o disposto no número anterior é também aplicável aos pisos de comércio e serviços.

(v) Lei n.º 58/2005 de 2005-12-29: Lei da Água

Transpõe para a ordem jurídica nacional a Directiva n.º 2000/60/CE e estabelece as bases e o quadro institucional para a gestão sustentável das águas. É no artigo 4.º desta Lei que estão definidos, entre outros, os seguintes conceitos aplicados, actualmente, no Ordenamento do Território:

«Leito» o terreno coberto pelas águas, quando não influenciadas por cheias extraordinárias, inundações ou tempestades, nele se incluindo os mouchões, lodeiros e areais nele formados por deposição aluvial, sendo o leito limitado pela linha da máxima preia-mar das águas vivas equinociais, no caso de águas sujeitas à influência das marés;

«Margem» a faixa de terreno contígua ou sobranceira à linha que limita o leito das águas com largura legalmente estabelecida;

«Largura da margem» a margem das águas do mar, bem como das águas navegáveis ou fluviáveis sujeitas actualmente à jurisdição das autoridades marítimas ou portuárias, com a largura de 50 m; margem das restantes águas navegáveis ou fluviáveis com a largura de 30 m; margem das águas não navegáveis nem fluviáveis, nomeadamente torrentes, barrancos e córregos de caudal descontínuo, com a largura de 10 m; a largura da margem conta-se a partir da linha limite do leito; se, porém, esta linha atingir arribas alcantiladas, a largura da margem é contada a partir da crista do alcantil;

«Zona adjacente» a zona contígua à margem que como tal seja classificada por um acto regulamentar por se encontrar ameaçada pela mar ou pelas cheias;

«Zona ameaçada pelas cheias» a área contígua à margem de um curso de água que se estende até à linha alcançada pela cheia com período de retorno de 100 anos ou pela maior cheia conhecida no caso de não existirem dados que permitam identificar a anterior.

A legislação futura:

O Comunicado do Conselho de Ministros de 5 de Junho de 2008 informa que foi aprovado, na generalidade, o novo Decreto-Lei da REN. Este novo DL (que à data ainda não saiu em Diário da República) mantém como área de REN os leitos dos cursos de água e as ZAC, integrando ainda áreas afectadas por outro tipo de riscos naturais que anteriormente não pertenciam à REN.

Em 23 de Outubro de 2007 foi aprovada pelo Parlamento europeu a **DIRECTIVA 2007/60 relativa à Avaliação e Gestão dos Riscos de Inundações (DAGRI)**. Esta directiva terá de ser transposta para a lei portuguesa até 2009.

No texto da DAGRI pode ler-se:

(2) As inundações são um fenómeno natural que não pode ser evitado.

No entanto, determinadas actividades humanas (como o aumento das aglomerações humanas e dos bens económicos nas planícies aluviais e a redução da retenção natural de água devido à utilização do solo) e as alterações climáticas contribuem para um aumento da probabilidade de ocorrência de inundações e do respectivo impacto negativo.

(3) É possível e desejável reduzir o risco de consequências prejudiciais associadas às inundações

(14) Os planos de gestão dos riscos de inundações deverão centrar-se na prevenção, protecção e preparação.

Para dar mais espaço aos rios, esses planos deverão ter em conta, sempre que possível, a manutenção e/ou restauração das planícies aluviais, bem como medidas destinadas a prevenir e reduzir os danos para a saúde humana, o ambiente, o património cultural e as actividades económicas.

A DAGRI torna obrigatório:

- (i) a Avaliação Preliminar dos Riscos de Inundação (riscos potenciais);
- (ii) a elaboração de Cartas de Zonas Inundáveis (amplitude da inundação, níveis de água, caudais de cheia);
- (iii) a elaboração de Cartas de Riscos de Inundações (nº de habitantes potencialmente afectados, tipo de actividades económicas potencialmente afectadas, instalações que possam causar poluição acidental em caso de inundação, outras informações);
- (iv) os Planos de Gestão dos Riscos de Inundações (que, entre outros aspectos incluem medidas de ordenamento do território das áreas inundáveis).

Trabalho prático

Tal como foi referido nos métodos de ensino-aprendizagem, na avaliação e na planificação das aulas deste programa, o trabalho prático é efectuado em grupo (3 a 4 alunos), e desenvolve-se ao longo dos quatro módulos que constituem o seminário. O trabalho inicia-se a partir de questões de partida ou de situações-problema postas pelos alunos, devidamente enquadradas no âmbito do seminário, às quais terão de responder ou propor uma solução no final do trabalho. Um aspecto comum aos grupos de trabalho, é o de que este

terá de se desenvolver do geral para o particular, ou seja, neste caso, da escala de uma pequena bacia hidrográfica para o fundo de vale e, daqui, para o canal fluvial.

Exemplo: Avaliação da susceptibilidade às cheias de um troço fluvial.

Fase 1. Análise dos dados hidrométricos da bacia à qual pertence o referido troço fluvial (ou no caso da sua inexistência, de uma série hidrométrica de uma bacia próxima, pertencente à mesma região climática e ao mesmo contexto geomorfológico), com o objectivo de definir o seu comportamento hidrológico face às cheias. Aplicação dos vários critérios de classificação das cheias. Síntese conclusiva.

Fase 2. Análise quantitativa das componentes biofísicas da bacia, a partir de documentos cartográficos a escala adequada. Aplicação dos índices de geometria, rede de drenagem e relevo; classificação da permeabilidade do solo e subsolo e classificação do uso do solo. Cálculo do tempo de concentração da bacia utilizando mais do que um método para permitir a comparação de resultados e a escolha de um valor adequado. Se a bacia não dispuser de uma série hidrométrica, cálculo do caudal de ponta de cheia utilizando mais do que um método empírico para testar a validade dos resultados e escolher o mais adequado.

Fase 3. Reconhecimento de campo dos pontos críticos da bacia, relativamente às cheias, detectados na análise efectuada no ponto 2. Escolha de um troço do rio a estudar com maior pormenor e discussão dos critérios de escolha. Levantamento de campo e caracterização qualitativa e quantitativa das formas do leito maior e do leito menor. Análise longitudinal e transversal. Definição dos processos em presença e do grau de estabilidade do troço do rio.

Fase 4. Levantamento, através de ortofotomapas, completado por trabalho de campo, do tipo de ocupação humana e do uso do leito de cheia. Avaliação das situações de risco potencial e proposta de medidas de mitigação e de ordenamento da área ribeirinha. Elaboração da respectiva cartografia e discussão da validade da proposta.

Fase 5. Integração dos resultados obtidos, nas várias escalas de análise, e síntese com as conclusões mais importantes.



V.
BIBLIOGRAFIA

V.

BIBLIOGRAFIA

A bibliografia existente sobre dinâmica fluvial actual, quer na perspectiva hidrológica quer na perspectiva geomorfológica (especialmente na temática das cheias, como elemento extremo do regime fluvial e modelador essencial dos leitos maiores e menores dos cursos de água), é extremamente vasta. Nas revistas científicas da especialidade, com especial destaque para o *Journal of Hydrology*, *Natural Hazards*, *Geomorphology*, *Earth Surface Processes and Landforms*, *Zeitschrift für Geomorphologie* e *Journal of Flood Risk Management* entre outras, podem ser consultadas dezenas de artigos sobre esta temática. Contudo, a autora deste programa, optou essencialmente por livros de referência, publicados ou coordenados por autores consagrados, por mostrarem o “estado da arte” nesta matéria. Esses livros dividem-se em dois grupos fundamentais: o primeiro, comporta os “livros tradicionais”, ou seja, escritos por um a três autores, que apresentam uma sequência temática por capítulos; o segundo, comporta os livros, cuja estrutura, embora organizada por partes e/ou capítulos, é, de facto, uma colectânea de artigos mais desenvolvidos do que nas revistas da especialidade.

A bibliografia, que a seguir se apresenta, está organizada em dois conjuntos: o primeiro integra os livros de referência desta disciplina, que, no conjunto, percorrem todos os pontos do programa; o segundo integra os títulos específicos de cada ponto do programa.

Os títulos citados são apenas os que foram directamente utilizados na elaboração deste programa.

1. BIBLIOGRAFIA FUNDAMENTAL

• Baker, V.R.; Kochel, R.C.; Patton, P.C. (eds), (1988) - *Flood Geomorphology*. John Wiley & Sons, New York.

Um livro essencial, apesar dos seus vinte anos. Divide-se em cinco partes, compostas por vários artigos. A primeira, intitulada “Controles externos das cheias” mostra a dependência das cheias relativamente aos factores climáticos e a algumas das características das bacias hidrográficas (morfometria). A segunda “Processos das Cheias” centra-se nos processos de erosão, transporte e deposição ocorridos durante as cheias. A terceira “Cheias, Clima e Paisagem” mostra as diferenças das cheias em alguns tipos de clima específicos (climas áridos, climas frios) bem como os impactes das grandes cheias na paisagem. A quarta “Paleocheias” mostra a reconstituição de cheias antigas através dos depósitos por elas deixados (*slackwater deposits*). A quinta “Planeamento ambiental” tem artigos sobre rebentamento de barragens, sobre a contribuição dos estudos geomorfológicos no controle das cheias e sobre a gestão de áreas ribeirinhas.

• Brierley, G.J. & Fryirs, K.A. (2005) - *Geomorphology and River Management*. Blackwell Publishing, Oxford.

Um verdadeiro “estado da arte” sobre a matéria. Divide-se em três partes: a Parte A discute as escalas espaciais e temporais dos processos e formas fluviais, bem como as bases ecológicas para a gestão ribeirinha. A Parte B centra-se nas bases geomorfológicas para a gestão ribeirinha, concretamente, nas formas e processos das planícies de inundação e canais fluviais e nas consequências da intervenção humana no sistema fluvial. A Parte C mostra as aplicações dos estudos geomorfológicos na reabilitação dos rios e áreas ribeirinhas.

• Gordon, N.D.; McMahon, T.A.; Finlayson, B.L. (1994) - *Stream Hydrology*, John Wiley & Sons, Chicester.

Com uma abordagem prática e integrada no estudo dos rios, este livro divide-se em 9 capítulos, ao longo dos quais se discutem as propriedades da água e dos seus movimentos (elementos de hidráulica fluvial), as principais características das bacias-vertente, os tipos de dados hidrométricos (anuais, mensais e diários), as formas e sedimentos fluviais, como recolher diversos tipos de dados no campo, o seu tratamento estatístico e, por fim, a classificação dos rios aglutinando esses dados e a sua aplicação à gestão das áreas ribeirinhas.

• Lencastre, A.; Franco, F. (2003) - *Lições de Hidrologia*. 3ª edição, Fundação Armando Lencastre, Lisboa.

Continua a ser o melhor livro de autores portugueses sobre hidrologia. Divide-se em 14 capítulos que percorrem todo o ciclo hidrológico, dos quais se destacam os capítulos II (sobre as bacias hidrográficas e suas componentes), VIII (sobre a circulação da água nos solos e nas rochas) e XI sobre o escoamento de superfície, com especial realce para o ponto sobre cheias e metodologias de cálculo.

• Rosgen, D. (1996) - *Applied River Morphology*, 2ª ed., Wildland Hydrology, Pagosa Springs - Colorado.

Um livro prático de geomorfologia fluvial, em que o autor explica os quatro níveis da sua classificação dos rios e canais fluviais, com numerosos exemplos ilustrados e esquemas de campo. Divide-se em 8 capítulos, em que nos dois primeiros se dão algumas noções de geomorfologia fluvial, no terceiro se explica a metodologia da classificação de Rosgen, nos capítulos 4 a 7 se explicam os quatro níveis classificativos e no oitavo se mostram exemplos de aplicação.

• Smith, K. e Ward, R. (1998) - *Floods. Physical Processes and Human Impacts*. John Wiley & Sons, Chicester.

O melhor livro sobre cheias. Divide-se em três secções num total de dez capítulos. A Secção I discute o fenómeno das cheias como evento físico e como perigo natural, bem como as consequências e os impactes das cheias. A Secção II discute as causas das cheias e as suas características espaciais, nas várias regiões climáticas do planeta, bem como a avaliação dos caudais de cheia. A Secção III discute os vários tipos de defesas contra as cheias, sistemas de previsão e alerta e medidas de mitigação. Este livro tem também capítulos sobre inundações costeiras.

• Thorne, C.R.; Hey, R.D. & Newson, M.D. (eds.), (2003) - *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley & Sons, Chicester.

Uma compilação de artigos-síntese de vários especialistas que fazem deste livro um bom "estado da arte". O livro divide-se em 5 secções: a primeira é uma introdução em que se mostra como os estudos geomorfológicos podem ser utilizados por engenheiros nas intervenções sobre o sistema fluvial e na gestão ribeirinha. A Secção II é dedicada aos ritmos evolutivos dos canais fluviais. A Secção III tem artigos sobre os processos que afectam a evolução dos fundos de vale e dos canais fluviais. A Secção IV dedica-se à morfologia dos canais fluviais e respectiva dinâmica. A Secção V mostra casos de estudo e de aplicação do conhecimento geomorfológico na estabilização e reabilitação dos canais fluviais.

• Ward, A. D.; Trimble, S. W. (2004) - *Environmental Hydrology*. 2ª ed., Lewis Publishers, Boca Raton-Florida.

Um livro de hidrologia muito didáctico pelos exercícios de aplicação que apresenta e que percorre todas as componentes do ciclo hidrológico. Tem 14 capítulos, dos quais se salientam o capítulo 5 sobre escoamento superficial e sub-superficial, o capítulo 6 sobre processos fluviais e o capítulo 12 sobre os impactes da acção humana nas componentes do ciclo hidrológico.

2. BIBLIOGRAFIA ESPECÍFICA

MÓDULO I - AS CHEIAS:

ELEMENTO EXTREMO DO REGIME FLUVIAL

- Correia, F. N. (1983) – *Métodos de Análise e Determinação de Caudais de Cheia*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Dartmouth Flood Observatory - <http://www.dartmouth.edu/~floods/>
- Guilcher, A. (1965) - *Précis d'Hydrologie Marine et Continentale*, Masson & Cie, Éditeurs, Paris.
- Hayden, B. P. (1988) - "Flood climates", in Baker, V. R.; Kochel, R. C.; Patton, P. C.; eds., *Flood Geomorphology*. Wiley, New York, 13-26.
- Henriques, A.G. (1981) – *Análise da Distribuição de Frequência de Caudais Instantâneos Máximos Anuais. Aplicação à Previsão de Caudais de Cheia*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Henriques, A.G. (1983) – *Modelação de Distribuição de Frequências de Caudais Instantâneos Máximos Anuais para Previsão de Caudais de Cheia*. Estudo Regional Aplicado a Portugal Continental. Blumenau, Simpósio Luso-Brasileiro sobre modelação e simulação em Hidráulica e Recursos Hídricos.
- Henriques, A.G. (1985) - Cálculo de Caudais de Cheia em Cursos de Água em Portugal com Base em Séries de Caudais Instantâneos Máximos Anuais, *Recursos Hídricos*, 6 (2), 59-68.
- Herschy, R.W. e Fairbridge, R.W. (edits), (1998) - *Encyclopedia of Hydrology and Water Resources*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Hidrotécnica Portuguesa (1979) – *Regularização do Rio Tejo, Plano Geral, Volume Síntese*. Direcção-Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos, M.H.O.P., Lisboa.
- Loup, J. (1974) - *Les Eaux Terrestres. Hydrologie Continentale*. Masson & Cie, Éditeurs, Paris.
- Pardé, M. (1968) - *Fleuves et Rivières*. 5ª ed., A. Colin, Paris.
- Penning-Rowsell, E. e Peerbolte, B. (1994) – "Concepts, Policies and Research", in Penning-Rowsell, E. e Fordham, M. (edits.), *Floods Across Europe*. Middlesex University Press, London, 1-17.
- Ramos, C. (1993) - As Cheias de Dezembro de 1989 em Pequenas Bacias-vertente da Margem Direita do Baixo Tejo, in *Estudos de Geografia Física e Ambiente*, Linha de Acção de Geografia Física, Relatório 32, Centro de Estudos Geográficos, Lisboa, 119-132.
- Ramos, C. (2005) – *Programa de Hidrogeografia*, Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa, DILIF – 3, Lisboa.
- Shahin, M.; Van Dorscht, H.J.; De Lange, S.J. (1993) – *Statistical Analysis in Water Resources Engineering*. A. A. Balkema, Rotterdam.
- Smith, K. e Ward, R. (1998) – *Floods. Physical Processes and Human Impacts*. John Wiley and Sons, Chicester.
- Thorndycraft, V.R.; Benito, G.; Barriendos, M.; Llasat, M.C. (2003) – *Palaeofloods, Historical Data & Climatic Variability*. Proceedings of the PHEfra International Workshop, CSIC, Madrid.
- Ward, R. C. (1978) – *Floods: A Geographical Perspective*. Macmillan, London.
- Wilson, E. W. e Moore, J. E. (1998) – *Glossary of Hydrology*. American Geological Institute, Alexandria-Virginia.

MÓDULO II - BACIAS HIDROGRÁFICAS E SUAS COMPONENTES COMO FACTORES CONDICIONANTES DAS CHEIAS

- Azevêdo, T.M.; Nunes, E.; Ramos, C. (2004) – “Some Morphological Aspects and Hydrological Characterization of the Tagus Floods in the Santarém Region, Portugal”, *Natural Hazards*, 31 (3), Kluwer Academic Publishers, p. 587-601.
- Carvalho, R. (1998) - *Hidrologia e Recursos Hídricos*, vol.1 - O Ciclo Natural da Água, Ed.Estúdios Cor, S.A., Lisboa.
- Chow, V.T.; Maidment, D.R.; Mays, L.W. (1988) - *Applied Hydrology*. McGraw-Hill International Editions, Singapore.
- Christofolletti, A. (1969) - Análise Morfométrica das Bacias Hidrográficas, *Notícia Geomorfológica*, 9 (18), 35-64.
- Christofolletti, A. (1987) - Análise Topográfica da Bacias de Drenagem, *Geociências*, 5-6, 1-29.
- Claver Farias, I. (coord.) - (1984) - *Guia para la Elaboracion de Estudios de el Medio Físico: Contenido y Metodologia*. 2ª ed., M.O.P.U., C.E.O.T.M.A., Madrid.
- Correia, F.N. (1984) - *Proposta de um Método para a Determinação de Caudais de Cheia em Pequenas Bacias Naturais e Urbanas*, I.T.H. 6, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Costa, F.E.; Brites, J.A.; Pedrosa, M.Y.; Silva, A.V. (1985) - *Notícia Explicativa da Carta Hidrogeológica da Orla Algarvia + 6 mapas à escala 1/100.000*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Costa, F.E. (coord.), (1989) - *Notícia Explicativa da Carta Hidrogeológica do Sul de Portugal + 2 mapas à escala 1/200.000*, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- DeBarry, P.A. (2004) - *Watersheds: Processes, Assessment and Management*. Wiley, New York.
- Garcez, L.N. e Alvarez, G.L. (1999) - *Hidrologia*, 2ª ed., Edit. Edgard Blucher, Ltda., São Paulo.
- Gregory, K. e Walling, D. (1973) - *Drainage Basin Form and Process*, E. Arnold, London.
- Hamblin, W.K., Christiansen, E.H. (2001) - River Systems, in *Earth's Dynamic Systems*, 9ª ed., Prentice Hall, New Jersey, 284-321.
- IPR (2005) - *Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem*. 2ª edição, Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), Rio de Janeiro.
- Lencastre, A.; Franco, F. (2003) - *Lições de Hidrologia*. 3ª edição, Fundação Armando Lencastre, Lisboa.
- Leopold, L.; Wolman, M.; Miller, J. (1964) - *Fluvial Processes in Geomorphology*, W.H.Freeman, San Francisco.
- Linsley, R. K., Kohler, M., Paulhus, J.L.H. (1988) - *Hydrology for Engineers*. McGraw-Hill, New York.
- Loureiro, J.M. (1984) - Expressão para o Cálculo do Caudal Máximo de Cheia em Cursos de Água de Portugal, *Recursos Hídricos*, 5 (1), 53-78.
- Miller, A.J. e Gupta, A. (1999) - *Varieties of Fluvial Form*. John Wiley & Sons, Chicester.
- Newson, M. (1994) - *Hydrology and the River Environment*. Clarendon Press, Oxford.
- Oliveira, R. (1996) - *Determinação de Hidrogramas de Cheia em Pequenas Bacias hidrográficas, Curso de Drenagem de Águas Superficiais em Vias de Comunicação*, LNEC, Lisboa.
- Petts, G. E. e Bravard, J.P. (1993) - "Le Réseau Hydrographique dans le Bassin Versant". In Amoros, C. e Petts, G.E., *Hydrosystèmes Fluviaux*, Masson, Paris, 21-41.
- Portela, M. M. e Dias, A.T. (2003) - *Regionalização de Caudais de Cheia em Portugal Continental*, 14p. http://www.civil.ist.utl.pt/~mps/Mod_hid/Bibliografia/artigo%20regionalizacao.pdf
- Quintela, A.C. (1984) - Hidrologia de Águas Superficiais, in D.G.R.A.H. - *Curso Internacional de Hidrologia Operativa*. vol. II, Lisboa, 505-731.
- Ramos, C. (1994) - *Condições Geomorfológicas e Climáticas das Cheias da Ribeira de Tera e do Rio Maior (Bacia Hidrográfica do Tejo)*, Dissertação de Doutoramento, Departamento de Geografia, F.L.U.L., Lisboa, 520p.
- Reis, E. (1996) - *Aplicação dos Sistemas de Informação Geográfica na Análise Morfométrica das Bacias Hidrográficas*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

- Reis, E. (2006) - *As Bacias Hidrográficas das Ribeiras da Serra de Grândola. Dinâmica Hidrológica e Factores Condiçionantes*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Shaw, E.M. (1994) - *Hydrology in Practice*. 3ª ed., Chapman & Hall, London.
- Temez, J.R. (1978) - *Cálculo Hidrometeorológico de Caudales Máximos en Pequeñas Cuencas Naturales*. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Dirección General de Carreteras, Madrid.
- Wanielista, M.; Kersten, R.; Eaglin, R. (1997) - *Hydrology. Water Quantity and Quality Control*. 2ª ed., John Wiley & Sons, New York.
- Ward, A. D.; Trimble, S. W. (2004) - *Environmental Hydrology*. 2ª ed., Lewis Publishers, Boca Raton-Florida.
- Villela, S.M. e Mattos, A. (1975) - *Hidrologia Aplicada*, Edit. McGraw Hill do Brasil Lda., São Paulo.

MÓDULO III - FUNDOS DE VALE: FORMAS, PROCESSOS E DINÂMICA

- Arbogast, A. F. (2007) - "Fluvial Systems and Landforms", in Arbogast, A. F., *Discovering Physical Geography*, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken - USA, 454-493.
- Beven, K. e Carling, P. (eds.), (1989) - *Floods: Hydrological, Sedimentological and Geomorphological Implications*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Bravard, J.P. e Gilvear, D.J. (1993) - Structure Hydro-Géomorphologique des Hydrosystèmes. In Amoros, C. e Petts, G.E., *Hydrosystèmes Fluviaux*, Masson, Paris, 83-103.
- Brierley, G.J. & Fryirs, K.A. (2005) - *Geomorphology and River Management*. Blackwell Publishing, Oxford.
- Brooks, A. (2003) - "River Dynamics and Channel Maintenance". In Thorne, C.R.; Hey, R.D. & Newson, M.D. (eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley and Sons, Chichester, 293-307.
- Christofoletti, A. (1988) - *Geomorfologia Fluvial, Vol.1 - O canal fluvial*, 2ª ed., Edgar Blucher Lda., São Paulo.
- Cooke, R. U. e Doornkamp, J. C. (1990) - *Geomorphology in Environmental Management*. 2nd ed., Clarendon Press, Oxford.
- Dunne, T. e Leopold, L. (1978) - *Water in Environmental Planning*, W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- Frissell, C. A.; Wiss, W. J.; Warren, C. E.; Huxley, M. D. (1986) - A Hierarchical Framework for Stream Classification: Viewing Streams in a Watershed Context. *Environmental Management*, 10: 199-214.
- Gilvear, D.J. e Bravard, J.P. (1993) - "Dynamique Fluviale". In Amoros, C. e Petts, G.E., *Hydrosystèmes Fluviaux*, Masson, Paris, 61-82.
- Hooke, J.M. (2003) - "Styles of Channel Change". In Thorne, C.R.; Hey, R.D. & Newson, M.D. (eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley and Sons, Chichester, 237-268.
- Knighton, D. (1998) - *Fluvial Forms and Processes: a new perspective*. Arnold, London.
- Knighton, D. e Nanson, G. (1993) - "Anastomosis and the Continuum of Channel Pattern". *Earth Surface Processes and Landforms*, 18, 613-625.

- Kondolf, G.M.; Montgomery, D.R.; Piégay, H.; Schmitt, L. (2003) – Geomorphic Classification of Rivers and Streams. In Kondolf, G.M. e Piégay, H., *Tools in Fluvial Geomorphology*, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken – USA, 171-204.
- Lawer, D.M.; Thorne, C.R.; Hooke, J.M. (2003) – “Bank Erosion and Instability”. In Thorne, C.R.; Hey, R.D. & Newson, M.D. (eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley and Sons, Chichester, 137-172.
- Miall, A.D. (1977) – “A Review of the Braided River Depositional Environment”. *Earth Science Reviews*, 13, 1-62.
- Morisawa, M. (1985) - *Rivers, Form and Process*. Longman, London.
- Newson, M. (1995) - *Land, Water and Development*, 2ª ed., Routledge, London.
- O' Connor, J. E.; Jones, M. A.; Haluska, T. L. (2003) – Flood Plain and Channel Dynamics of the Quinault and Queets Rivers, Washington, USA. *Geomorphology*, vol. 51, nº 1-3, 31-59.
- Ramos, C.; Ramos-Pereira, A.; Azevêdo, T. M.; Nunes, E. (2006) – “Dinâmica fluvial: as mudanças de traçado do Tejo na sua planície aluvial”. *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, Vol.III, APGeom, Coimbra, 41-48.
- Ramos-Pereira, A.; Ramos, C.; Reis, E.; Azevêdo, T. M.; Nunes, E.; Freitas, C.; Andrade, C. (2002) – “A Dinâmica da Planície Aluvial do Baixo Tejo no Holocénico Recente: Aplicação de métodos de análise geomorfológica e sedimentológica”, *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, Vol.I, APGeom, Lisboa, 67-76.
- Rosgen, D. (1994) – “A Classification of Natural Rivers”. *Catena*, 22, 169-199.
- Rosgen, D. (1996) – *Applied River Morphology*, 2ª ed., Wildland Hydrology, Pagosa Springs – Colorado.
- Schumm, S. A. (1977) – *The Fluvial System*. Wiley, New York.
- Small, R.J. (1993) - *Geomorphology and Hydrology*. Longman, London.
- Thompson, R.D.; Mannion, A.M.; Mitchell, C.W.; Parry, M.; Townshend, J.R.G. (1993) – *Processes in Physical Geography*, Longman, Scientific & Technical, New York.
- Thorne, C.R. (1999) – *Stream Reconnaissance Handbook: Geomorphological Investigation and Analysis of the River Channels*. John Wiley and Sons, Chichester.
- Thorne, C.R. (2003) – “Channel Types and Morphological Classification”. In Thorne, C.R.; Hey, R.D. & Newson, M.D. (eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley and Sons, Chichester, 175-222.
- Yalin, M.S. (1992) - *River Mechanics*. Pergamon Press, Oxford.

MÓDULO IV - DINÂMICA FLUVIAL E INTERVENÇÃO HUMANA

- Akan, A.O. e Houghtalen, R.J. (2003) – *Urban Hydrology, Hydraulics and Stormwater Quality*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Almeida, A. B. (2008) – “Gestão do Risco de Cheias”. In *Avaliação e Gestão dos Riscos de Inundações Fluviais e Costeiras - Nova Directiva Europeia*, Fundação para a Formação Contínua em Engenharia Civil (FunDec), Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Instituto Superior Técnico, Lisboa, CD-ROM, 30p.
- Aswathanarayana, U. (1995) - *Geoenvironment*, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Bravard, J.P. e Petts, G. E. (1993) – “Interférences avec les Interventions Humaines”. In Amoros, C. e Petts, G.E., *Hydrosystèmes Fluviaux*, Masson, Paris, 233-253.
- Carvalho, R. (1999) – *Hidráulica Fluvial*. Ed.Estúdios Cor, S.A., Lisboa.
- Cooke, R. U. e Doornkamp, J. C. (1990) – “Rivers and Floodplains”. In Cooke, R. U. e Doornkamp, J. C. ,*Geomorphology in Environmental Management*. 2nd ed., Clarendon Press, Oxford, 141-178.
- Correia, F.N.; Saraiva, M.G.; Rocha, J.; Fordham, M.; Bernardo, M.F.; Ramos, I.; Marques, Z.; Soczka, L. (1994) – “The Planning of Flood Alleviation Measures: Interface With The Public”, in Penning-Rowell, E. e Fordham, M. (edits.), *Floods Across Europe*. Middlesex University Press, London, 167-193.
- CE (2004) – *Flood Risk Management: Flood Prevention, Protection and Mitigation*. Commission of the European Communities, COM (2004) 472, Final, Brussels.
- Chien, N. (1985) - Changes in River Regime After the Construction of Upstream Reservoirs, *Earth Surface Process and Landforms*, 10 (2) 143-160.
- Correia, F.N. (1984) - *Alguns Procedimentos Adoptados pela Soil Conservation Service para o Estudo do Impacto da Urbanização nos Caudais de Cheia*, I.T.H. 9, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Downs, P.W. e Gregory, K.J. (2004) – *River Channel Management*. Oxford University Press Inc., New York.
- Ghio, M. (1995) - Les Activités Humaines Augmentent-elles les Crues?, *Annales de Géographie*, 581-582, 119-147.
- Green, C.; Veen, A.; Wierstra, E.; Penning-Rowell, E. (1994) – “Vulnerability Refined: Analysing Full Flood Impacts”, in Penning-Rowell, E. e Fordham, M. (edits.), *Floods Across Europe*. Middlesex University Press, London, 32-68.
- G.T.C. (1989) - *Estudo das Causas das Cheias na região de Lisboa: Relatório Síntese da Bacia Hidrográfica do Rio de Loures e da R^a de Odivelas*, M.P.A.T., Lisboa.
- Hoyois, P. e Guha-Sapir, D. (2004) – “Disasters Caused by Flood: Preliminary Data for a 30 Year Assessment of Their Occurrence and Human Impact”. In *Health and Flood Risk Workshop. A Strategic Assessment of Adaptation Processes and Policies*, Tyndall Centre For Climate Change Research, Norwich, 15p.
- Klaus, J.; Pflugner, W.; Schmidtke, R.; Wind, H.; Green, C. (1994) – “Models for Flood Hazard Assessment and Management”, in Penning-Rowell, E. e Fordham, M. (edits.), *Floods Across Europe*. Middlesex University Press, London, 69-106.
- Lima, M.L. e Faisca, L. (1994) – O Ajustamento das Populações ao Risco de Cheias: Estudo Exploratório em Portugal. *Recursos Hídricos*, APRH, vol,15, nº2, 3-19.
- L.N.E.C. (1983) - *Impacto das Actividades Humanas no Comportamento Hidrológico das Bacias Hidrográficas*, LNEC, Lisboa.
- Miller, E.W. e Miller, R.M. (2000) - *Natural disasters: Floods, A reference handbook*. Santa Barbara, California, ABC-CLIO.
- Newson, M.D.; Hey, R.D.; Bathurst, J.C.; Brooks, A.; Carling, P. A.; Petts, G.; Sear, D. A. (2003) – “Case Studies in the Application of Geomorphology to River Management”. In Thorne, C.R.; Hey, R.D. & Newson, M.D. (eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley and Sons, Chicester, 311-370.
- O' Connor, J. e Costa, J. E. (2004) – *The World's Largest Floods, Past and Present: Their Causes and Magnitudes*. USGS, Reston – Virginia.
- Oliveira, P. e Ramos, C. (2002) – “Inundações na cidade de Lisboa ao longo do século XX e seus factores agravantes”. *Finisterra, Revista Portuguesa de Geografia*, XXXVIII (74), C.E.G., p.33-54.
- Ramos, C. e Reis, E. (2002) – “Floods in Southern Portugal: their physical and human causes, Impacts and Human response”, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol.7, nº 3, Kluwer Academic Publishers, p. 267-284.

- Rebelo, F. (1997) – Risco e crise nas inundações rápidas em espaço urbano. Alguns exemplos portugueses analisados a diferentes escalas, *Territorium*, 4, 29-47.
- Smith, K. e Ward, R. (1998) – “Responses to the Flood Hazard”. In *Floods. Physical Processes and Human Impacts*. John Wiley and Sons, Chicester, 205-339.

