

Hidrologia

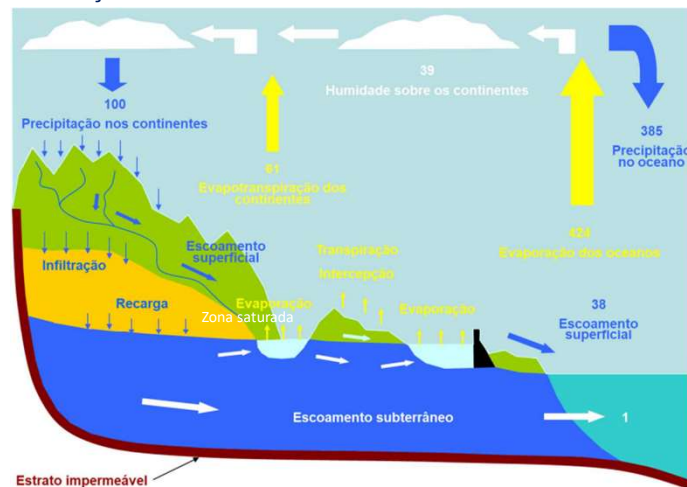
Aula 2 e 5

1. Ciclo e balanço hidrológico
 - 1.1 Ciclo hidrológico
 - 1.2 Bacia hidrográfica
 - 1.2.1 Conceitos
 - 1.2.2 Características fisiográficas
 - 1.2.3 Balanço Hidrológico à Escala da Bacia Hidrográfica
 - 1.3. Balanço hidrológico de Portugal Continental
 - 1.4. Modelos hidrológicos e a sua classificação

Secção de Engª Rural

1. CICLO HIDROLÓGICO E BALANÇO HIDROLÓGICO

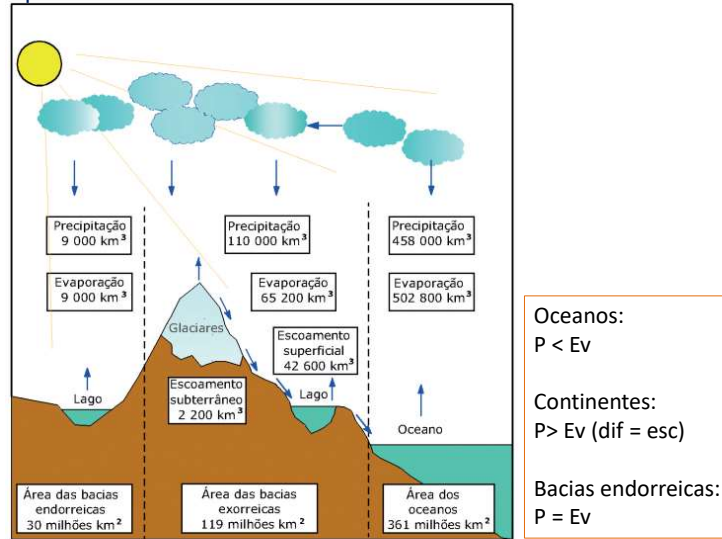
O Ciclo Hidrológico descreve os diversos caminhos através dos quais a água na natureza **circula** e se **transforma**, constituindo um sistema de grande complexidade. Não tem início nem fim. O ponto de início para a sua descrição é arbitrário.



Ciclo hidrológico, com o balanço hidrológico mundial em unidade relativas ao valor de 100 para a precipitação sobre o meio terrestre (Adaptado de: Chow, et al., 1988)

- A evaporação ocorre continuamente;
- Motor do ciclo: energia solar;
- Neste ciclo não há perdas;

A Figura apresenta valores médios, uma vez que a precipitação, evaporação e o escoamento apresentam valores muito irregulares espacialmente e temporalmente

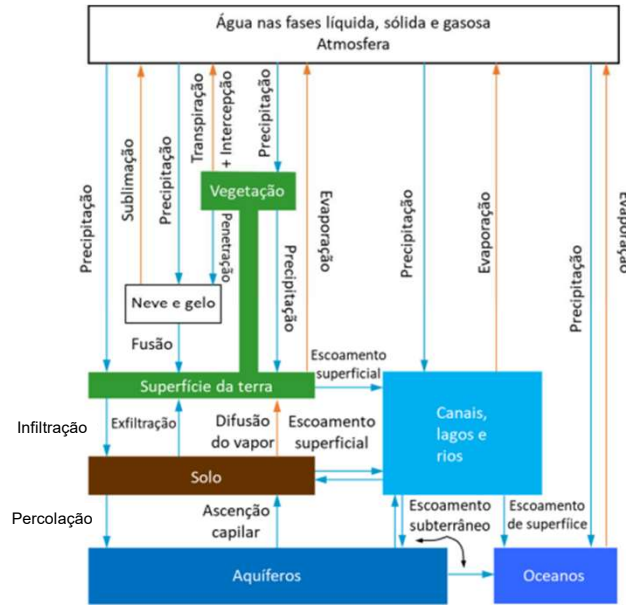


Oceanos:
P < Ev

Continentes:
P > Ev (dif = esc)

Bacias endorreicas:
P = Ev

Representação quantitativa do ciclo hidrológico (adaptada de Shiklomanov, 1998) | pág. 40.



Representação esquemática do ciclo hidrológico

Chow et al (1988) sugerem que, devido à complexidade dos fenómenos hidrológicos, o ramo terrestre do ciclo hidrológico pode ser considerado um sistema, tendo como processos a *precipitação, a evaporação, o escoamento e outras fases do ciclo hidrológico*.



Um sistema é definido pelas suas **fronteiras**

Na componente terrestre do ciclo hidrológico, o sistema preferencial corresponde à **bacia hidrográfica**

Secção de Engª Rural

1.2. A BACIA HIDROGRÁFICA

1.2.1 CONCEITOS

A bacia hidrográfica constitui a **unidade especial preferencial para a análise do balanço hidrológico**.

A bacia hidrográfica pode definir-se como a *superfície limitada pelo contorno no interior do qual a precipitação se dirige para uma determinada secção de escoamento de referência*.

Cada bacia hidrográfica define-se relativamente a uma **secção de um curso de água** – secção de referência da bacia hidrográfica.

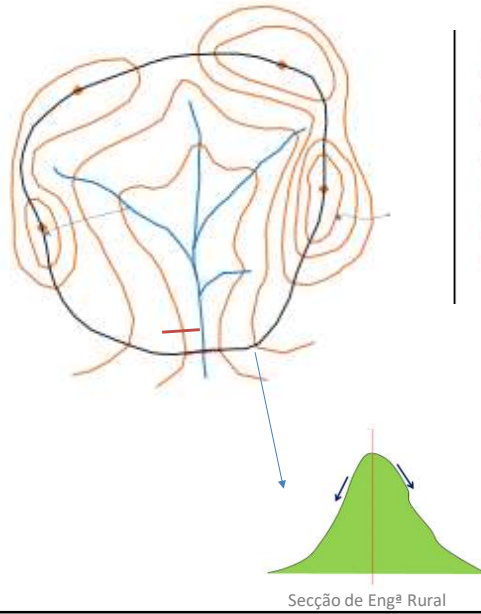


É um **sistema impermeável a fluxos laterais** (a água não atravessa os contornos)

Secção de Engª Rural

6/48

Delimitação de bacias hidrográficas numa carta



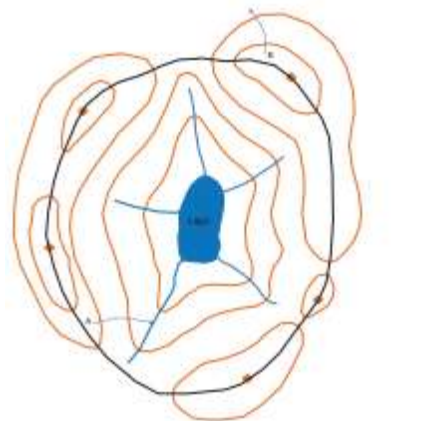
Identificar os **vales** e as **cumeadas**, a partir das concavidades das curvas de nível.

O contorno da bacia hidrográfica é definido pela **linha de separação de águas** entre bacias adjacentes.

- Curva de nível
- Linha de água
- Secção de referência
- Limite da bacia hidrográfica

Secção de Engª Rural

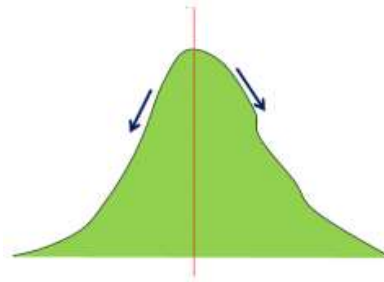
Bacia Endorreica



- Curva de nível
- Linha de água
- Secção de referência
- Limite da bacia hidrográfica

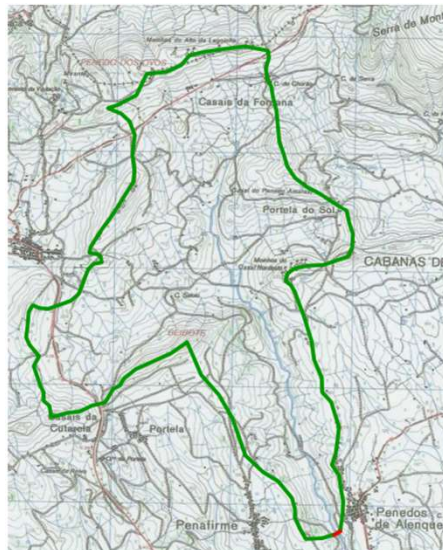
Secção de Engª Rural

Linha de festo ou de cumeada é a linha que une os pontos de cota mais elevada. É a linha de separação das águas



Talvegue ou linha de reunião de águas é a linha que une os pontos de cota mais baixa ao longo de um vale. É a linha seguida pelos cursos de água.

Secção de Engª Rural



Delimitação topográfica da bacia de Penafiel de Alenquer (a vermelha a localização do posto limnigráfico)

Secção de Engª Rural

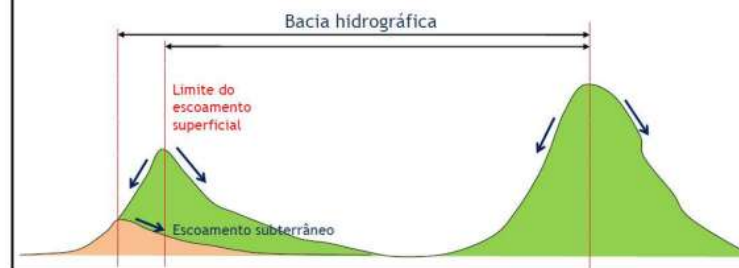
Bacias hidrográficas de um mesmo curso de água mas em diferentes secções de referência



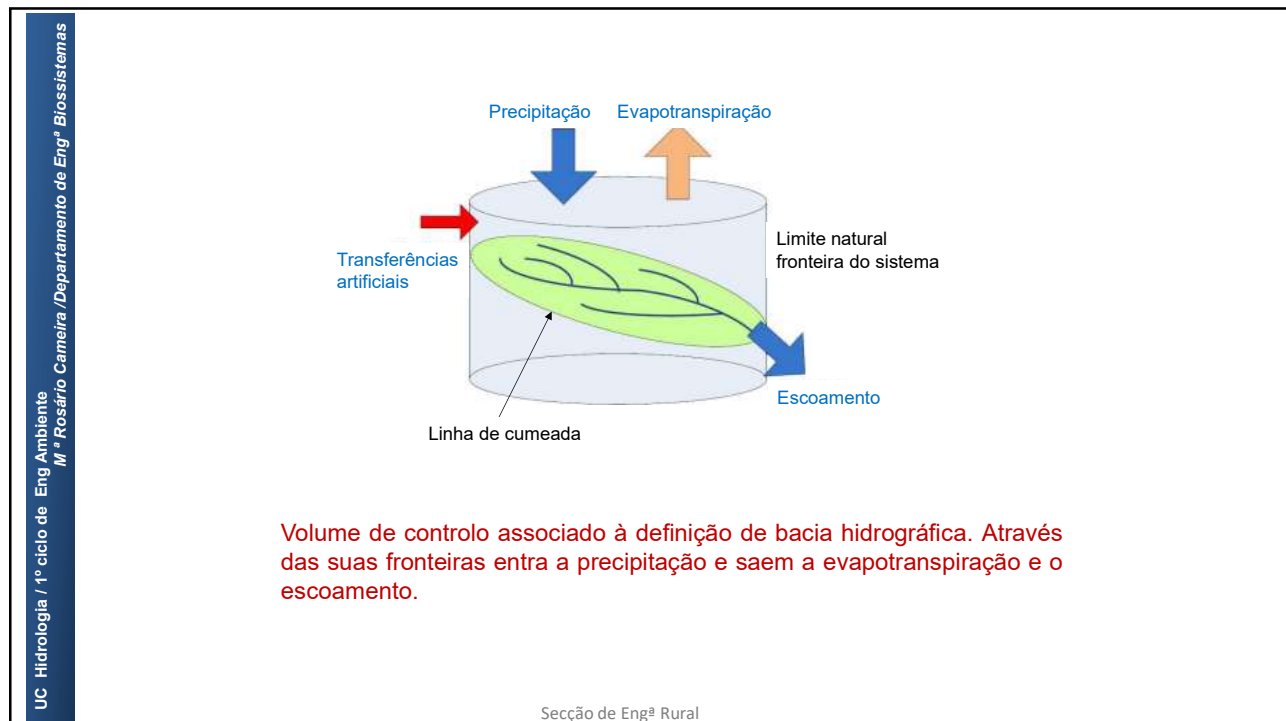
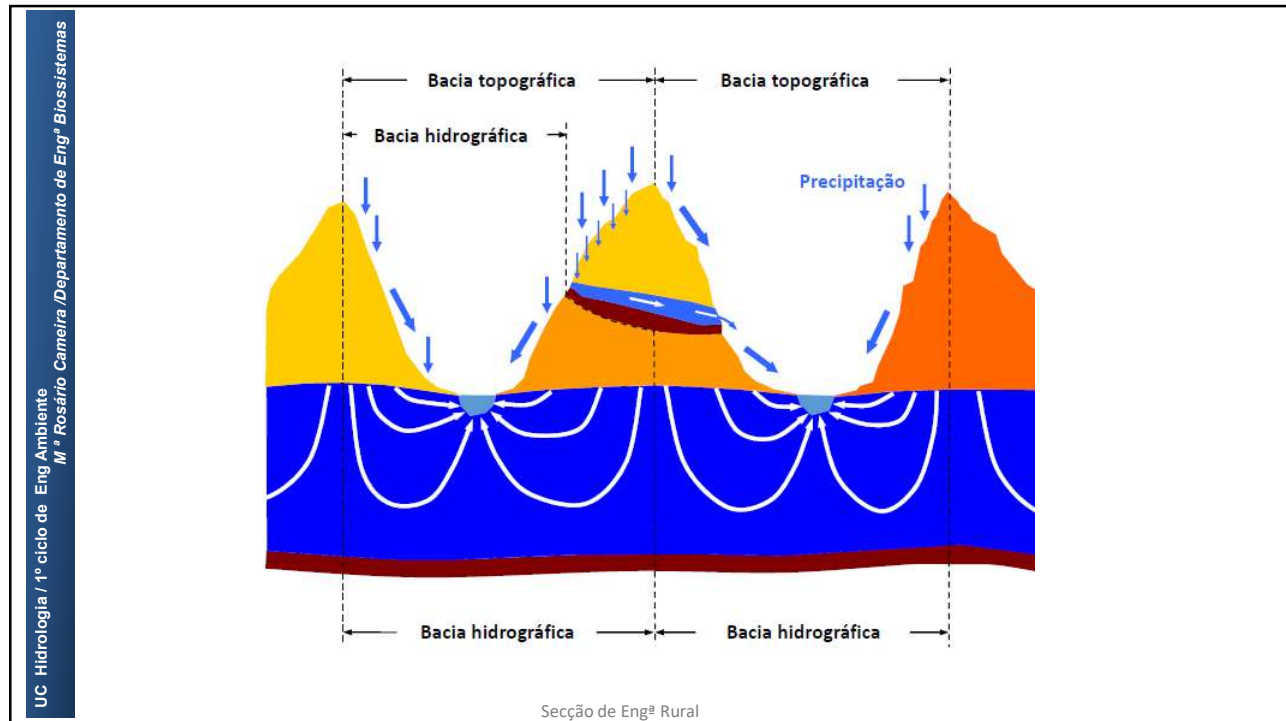
Secção de Eng^a Rural

Problemas com a definição dos limites

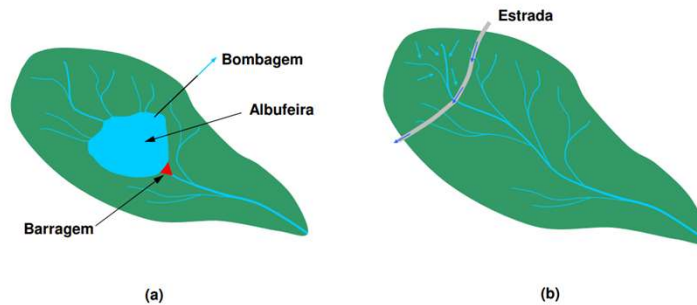
- Na realidade, podem ser significativas as transferências de água entre bacias hidrográficas promovidas pelo **escoamento subterrâneo**. A consideração dos movimentos subterrâneos da água introduz dificuldades acrescidas na análise dos processos hidrológicos.



Secção de Eng^a Rural



Exemplos de transferências artificiais entre bacias hidrográficas:



Bacia hidrográfica e bacia topográfica: (a) bombagem de água de uma albufeira, de uma bacia hidrográfica para outra; (b) saída de água de uma bacia hidrográfica para outra, através de estrada que atravessa a fronteira.

Secção de Engª Rural

1.2.2 CARACTERÍSTICAS FISIGRÁFICAS

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é função das características climáticas da região e das características fisiográficas das bacias

Características fisiográficas das bacias:

- Características geométricas: tamanho, forma
- Características do sistema de drenagem;
- Características do relevo: declive, orientação;
- Características físicas: geologia, tipo e uso dos solos incluindo cobertura vegetal e ocupação humana.

Exemplo →

Uma BH estreita e longa (fator de forma baixo), está menos sujeita à ocorrência de cheias pois a contribuição dos afluentes atinge o curso de água principal em diferentes secções do mesmo

Exemplo →

A presença de floresta elimina o choque direto das gotas de chuva com a superfície do solo e favorece a infiltração. Reduz a velocidade de escoamento superficial contribuindo para a redução da erosão e ocorrência de cheias e também para o aumento das reservas hídricas subterrâneas

Importância do conhecimento das características fisiográficas:

- comparar bacias hidrográficas;
- interpretar fenómenos hidrológicos passados;
- efetuar “previsões” de descarga de um rio;

Secção de Engª Rural

□ Principais características fisiográficas das bacias hidrográficas

São as características que podem ser extraídas de mapas, fotografias aéreas e imagens de satélite

1) Geométricas

a) Área de drenagem da bacia

- É representada por uma área plana resultante da projeção horizontal;
- Determina o potencial de produção de volume de escoamento, desde que a chuvada cubra toda a bacia

>>>> área => >>> produção de escoamento superficial

- É normalmente determinada por:
 - planimetria em mapas à escala,
 - através de cálculos matemáticos em mapas digitais arquivados em SIG;
 - fórmulas empíricas

$$q_p = c A^n$$

Em que

q_p é o caudal de ponta,

A é a área e

c e n são parâmetros de ajustamento

Secção de Engº Rural

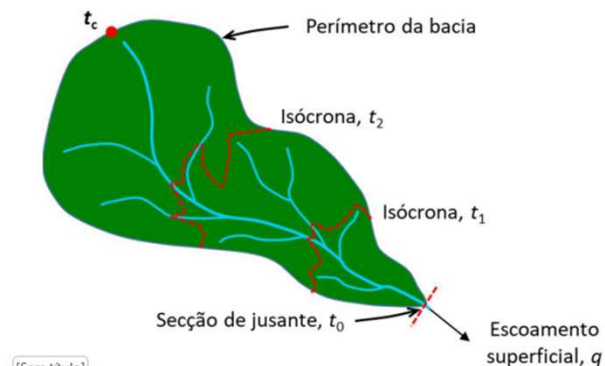
b) Forma da bacia

Influencia o tempo de concentração da bacia.

Tempo de concentração de uma bacia hidrográfica

Tempo correspondente ao trajeto da água desde o ponto mais remoto da bacia até à secção de referência. Só ao fim deste tempo toda a bacia contribui com escoamento superficial para a secção.

O seu conhecimento é fundamental para o estudo das cheias.



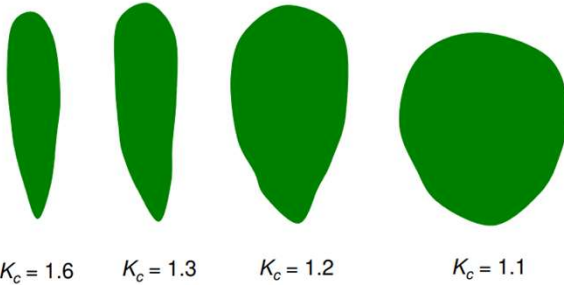
Secção de Engº Rural

A forma da bacia é analisada principalmente através do cálculo de índices que relacionam a forma da bacia com formas geométricas conhecidas. Os índices mais utilizados são:

i) Coefficiente de compactidade ou índice de Gravelius, K_c

É a relação entre o perímetro da bacia, P , e o perímetro de uma bacia de igual área, A , mas de forma **circular**:

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$



É sempre maior ou igual à unidade. Quanto maior é, menos compacta é a bacia.

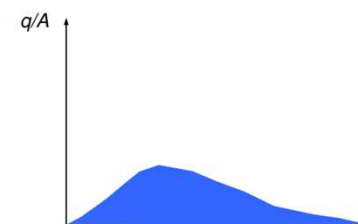
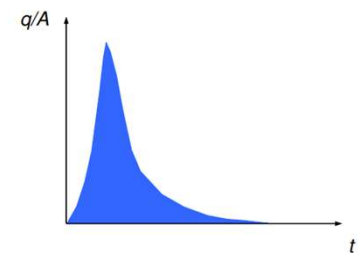
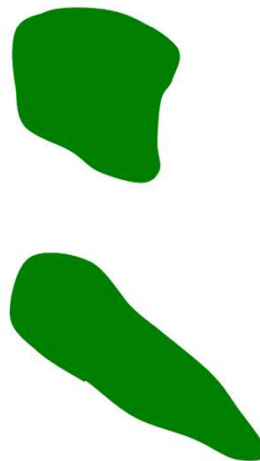
Se imaginarmos uma precipitação instantânea e uniforme sobre a bacia, o escoamento a que ela dará origem surgirá na secção de saída concentrado no tempo ou mais distribuído ao longo do tempo conforme a bacia tenha uma forma próxima da circular ou uma forma irregular.

Assim um valor de K_c mais próximo de 1, indicará, em igualdade de circunstâncias, uma maior tendência para pontas de cheia mais altas nessa bacia.

$K_c < 1.33 \Rightarrow$ bacias arredondadas

Secção de Engª Rural

Influência da forma da bacia na produção de escoamento

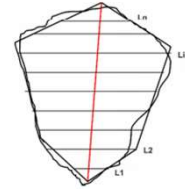


K_c	Característica da bacia
1,00 – 1,25	Bacia com alta propensão a grandes enchentes
1,25 – 1,50	Bacia com tendência mediana a grandes enchentes
> 1,50	Bacia não sujeita a grandes enchentes

Secção de Engª Rural

ii) Fator de forma , Kf

- É a relação entre a largura média de uma bacia , I, é o comprimento axial da bacia, L;
- Indica também a maior ou menor tendência para a ocorrência de cheias na bacia hidrográfica;
- Muito utilizado na obtenção de hidrogramas unitários sintéticos.



Considera-se como comprimento axial da bacia, L, o comprimento do respetivo curso de água principal (mais longo) mais o comprimento medido desde a cabeceira desta até à linha de cumeada mais próxima.

Largura média da bacia é definida como:

$$I = \frac{A}{L}$$

Logo, o fator de forma é dado por:

$$k_f = \frac{I}{L} = \frac{A}{L^2}$$

Kf	Característica da bacia
1,00 – 0,75	Bacia com alta propensão a grandes enchentes
0,75 – 0,50	Bacia com tendência mediana a grandes enchentes
< 0,50	Bacia não sujeita a grandes enchentes

Obs:

- Uma bacia com fator de forma baixo (formas estreitas e irregulares) é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho porém com maior fator de forma; Os escoamentos surgem na secção de saída mais distribuídos ao longo do tempo;
- No limite, $k_f = 1$, o que corresponde a uma bacia quadrada

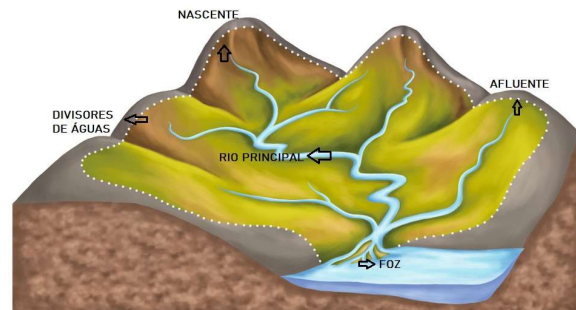
Secção de Engª Rural

2. Sistema de Drenagem:

- É constituído pelos cursos de água; rio principal e seus afluentes.

Classificação dos cursos de água:

- Perenes:**
contém água durante todo o tempo.
- Intermitentes:**
em geral, escoam durante as estações de chuvas e secam nas de estiagem.
- Efêmeros:**
existem apenas durante ou imediatamente após os períodos de precipitação.



Secção de Engª Rural

- O estudo das ramificações e do desenvolvimento do sistema de drenagem é importante pois indica a velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica;
- O sistema de drenagem é analisado principalmente em relação a:
 - ordem dos cursos de água e
 - densidade de drenagem.

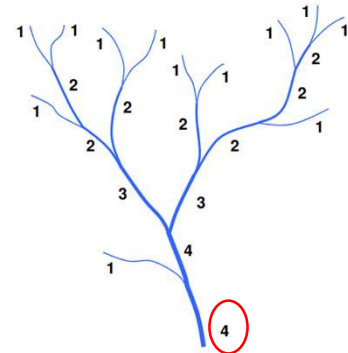
i) **Ordem dos cursos de água**: classificação que reflete o grau de ramificação ou bifurcação dentro da bacia.

Classificação de Strahler para determinação da ordem dos cursos de água

- REGRA 1 – Os primeiros tributários (afuentes) recebem a ordem 1;
- REGRA 2 – Dois cursos de água de ordem i ao se encontrarem formam um curso de água de ordem $i + 1$.

Obs: Quanto maior a ordem da bacia, mais desenvolvida a rede de drenagem e maior a tendência para o pico de cheia.

Ordem dos cursos de água (Strahler):



Secção de Engª Rural

L.:

ii) **Densidade de drenagem (Dd)**:

indica o desenvolvimento do sistema de drenagem de uma bacia hidrográfica.

Este índice é expresso pela relação entre o comprimento total dos cursos de água (L_T) e a área da bacia (A).

$$D_d = \frac{L_T}{A}$$

Inclui os cursos efêmeros

A densidade de drenagem fornece uma indicação da eficiência da drenagem da bacia.

Bacias com drenagem pobre $\rightarrow D_d < 0,5 \text{ km/km}^2$

Bacias com drenagem regular $\rightarrow 0,5 \leq D_d < 1,5 \text{ km/km}^2$

Bacias com drenagem boa $\rightarrow 1,5 \leq D_d < 2,5 \text{ km/km}^2$

Bacias com drenagem muito boa $\rightarrow 2,5 \leq D_d < 3,5 \text{ km/km}^2$

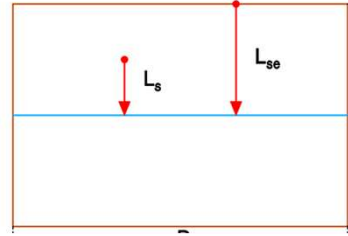
Bacias excepcionalmente bem drenadas $\rightarrow D_d \geq 3,5 \text{ km/km}^2$

Secção de Engª Rural

iii) *Percurso médio do escoamento superficial, L_s e comprimento médio da encosta, L_{se}*

$$L_s = \frac{1}{4D_d}$$

$$L_{se} = \frac{1}{2D_d}$$



Bacia em drenada:
 D_d alta e L_{se} baixo;



o escoamento superficial é rapidamente canalizado para linhas de água bem definidas e surge mais rapidamente concentrado na secção de referência da bacia.

Bacia mal drenada:
 D_d baixo e L_{se} alto.



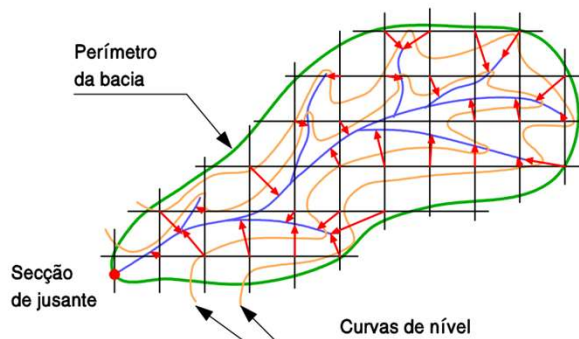
A precipitação vai originar sobretudo um escoamento subsuperficial e um escoamento subterrâneo, que se processam com maior lentidão, não originando por isso pontas de cheia elevadas.

Secção de Eng.º Rural

3. Do relevo

i) *Declive médio da bacia, S_b*

1. Método baseado na sobreposição de uma malha

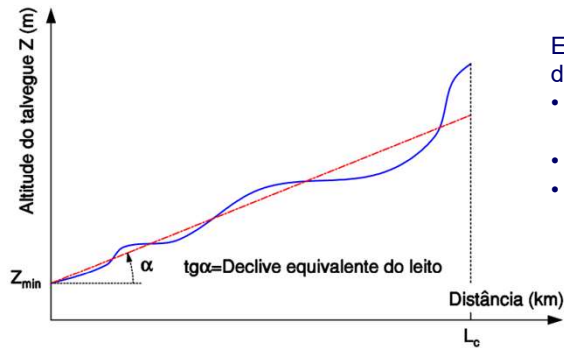


Quanto maior for o declive dos terrenos, maior será a velocidade com que se dá o escoamento superficial e menor será o tempo que a água leva a atingir o sistema de drenagem, facilitando o aparecimento de maiores pontas de cheia.

$$S_b = \frac{\sum_{i=1}^N S_{b_i}}{N}$$

Secção de Eng.º Rural

i) Perfil longitudinal do curso de água e respetivo declive médio



Existem vários métodos para calcular o declive do curso de água principal:

- Com base nas cotas dos extremos (ver exercício);
- Com base na área equivalente;
- Com base na declividade equivalente

Quanto maior o declive, maior o escoamento e menor o tempo de concentração

Secção de Eng^a Rural

Características físicas

Cobertura do solo

- percentagem de ocupação florestal, agrícola, de planos de água, de zonas impermeáveis, etc.
- coeficiente de escoamento (*ver aula sobre infiltração*)

Geologia e tipo de solos dela resultante

- águas subterrâneas e de superfície
- classificação hidrológica, classes A, B, C e D

As características dos solos que mais condicionam o movimento da água na bacia são a capacidade de infiltração (crescente com a granulometria) e a capacidade de retenção (decrecente com a granulometria) – *ver aula sobre a infiltração*

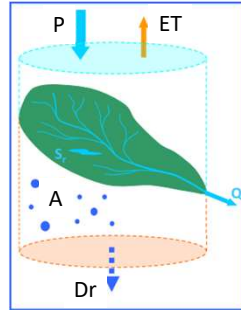
Ver texto extraído de Hipólito et al. no FENIX

Secção de Eng^a Rural

1.2.3 BALANÇO HIDROLÓGICO À ESCALA DA BACIA HIDROGRÁFICA

A equação geral do balanço hidrológico, aplicada a um determinado período de tempo Δt , pode ser simplificada se:

a) A área de aplicação for a bacia hidrográfica



- Só há uma entrada de água
- Relativamente ao escoamento, só há uma saída de água

$$P = ET + Q + Dr + \Delta A$$

P, ET, Q e Dr são quantidade
(por exemplo mm ou m^3)

$$p \Delta t = et \Delta t + q \Delta t + dr \Delta t + \Delta A$$

p, et, q e dr são taxas (por exemplo mm/h ou m^3/h)

b) O período de tempo for o ano hidrológico

$$\text{Se } \Delta t \text{ for o ano hidrológico} \Rightarrow \Delta A \approx 0 \Rightarrow P = ET + Q + Dr$$

NOTA: Em Portugal, os serviços oficiais consideram que o ano hidrológico começa a 1 de Outubro e termina a 30 de Setembro.

1.3. BALANÇO HIDROLÓGICO EM PORTUGAL CONTINENTAL

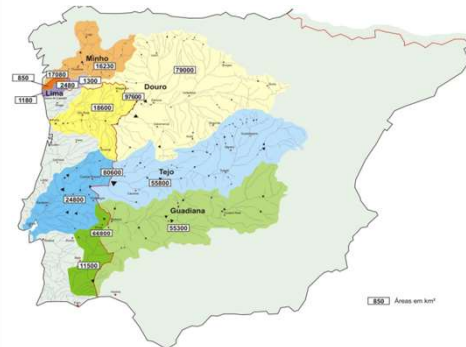
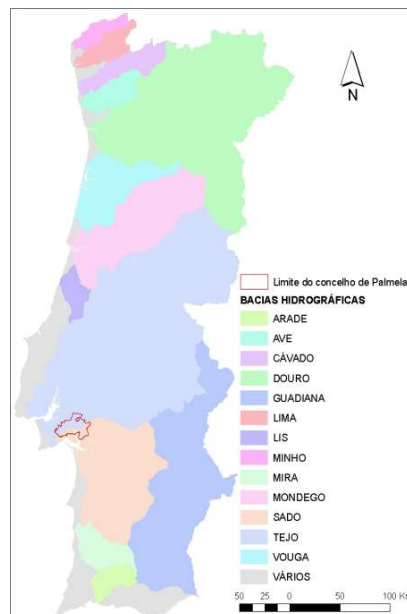
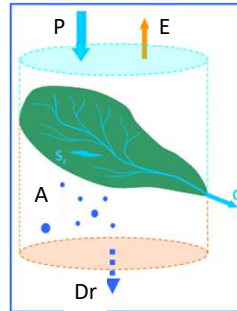


Figura 19 Bacias Hidrográficas Luso-Espanholas (Fonte: INAG, 2001)

Valores médios dos termos da equação do balanço hidrológico para Portugal continental

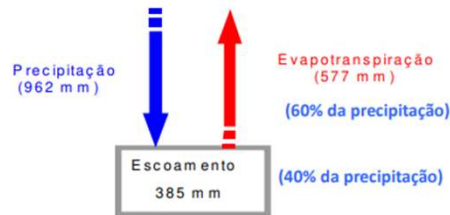
Precipitação P (mm)	Escoamento Q		Percolação Dr		Evapotranspiração	
	(mm)	(% de P)	(mm)	(% de P)	(mm)	(% de P)
917	370	40,3	48	5,2	499	54,4

Fonte: Henriques (1985), considerando a área de Portugal = 88 916 km²

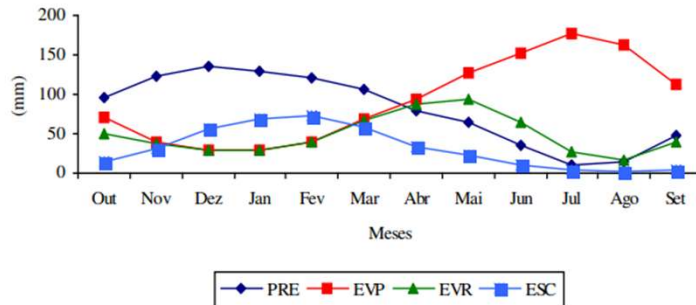


Secção de Engª Rural

Síntese do balanço hidrológico para Portugal continental (Plano Nacional da Água, 2001)



Síntese do balanço hidrológico à escala mensal para Portugal continental (INAG, 2001)



Secção de Engª Rural

Considerando a precipitação média anual, Portugal não pode ser considerado como um país desfavorecido em recursos hídricos (ver Quadro abaixo).

No entanto, dada a variabilidade climática sazonal, característica de Portugal Continental, a distribuição da precipitação e do escoamento superficial ao longo do ano não é uniforme.

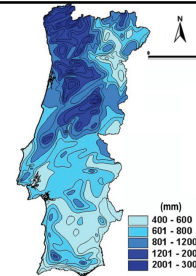
Quadro 4 Valores Médios Anuais da Precipitação e Escoamento

Território ^a	Precipitação		Escoamento	
	Altura (mm)	Volume (km ³)	Altura (mm)	Volume por habitante e dia (m ³) ^d
Portugal	917	32.9 ^b 68.5 ^c	370	10.0 20.9
Espanha	630	106	210	8.3
Europa	734	3100	319	16
América do Norte	670	6000	297	51

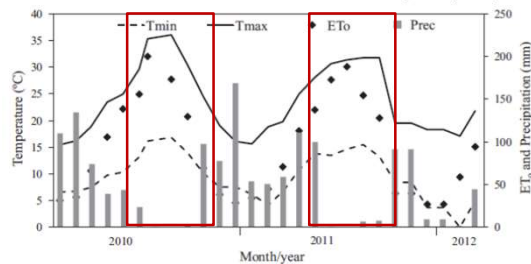
Secção de Eng.º Rural

Variabilidade espacial

- A aparente riqueza hídrica do nosso país, onde as disponibilidades anuais médias excedem as necessidades de água, esconde situações de escassez hídrica localizada ocorrendo ciclicamente durante períodos secos.



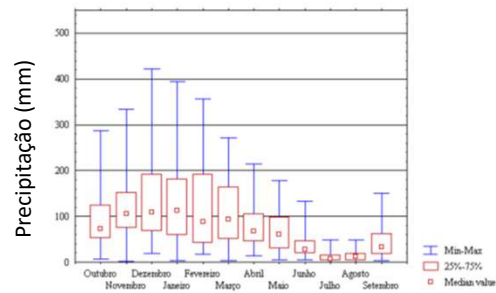
Variabilidade temporal anual ETo e precipitação: exemplo Beja



- a distribuição irregular ao longo do ano gera problemas de escassez de água no período de abril a setembro, com particular incidência no sul e interior centro e norte.

A precipitação no semestre húmido (Outubro a Março) é de 75% da precipitação anual e, portanto, cerca de três vezes superior à precipitação do semestre seco. Esta assimetria é ainda maior para as regiões mais secas, atingindo o valor de 77% para o Guadiana e 81% para o Algarve. Relativamente ao escoamento, no semestre seco atinge em regra valores inferiores a 25% do escoamento anual, reduzindo-se a valores da ordem dos 15% para as regiões mais secas (Henriques, 1985)

Secção de Eng.º Rural

Variabilidade temporal inter anual

- Dispersão
- Assimetria

Secção de Eng^a Rural**1.4. MODELOS HIDROLÓGICOS E A SUA CLASSIFICAÇÃO**

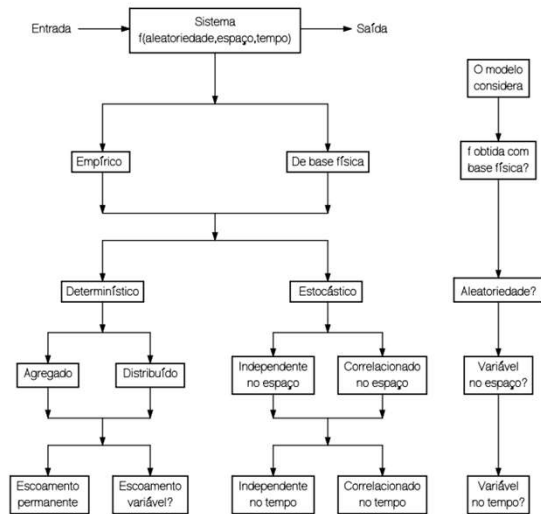
Dada a complexidade dos sistemas hidrológicos, é frequente recorrer-se a modelos que nos ajudem no estudo dos fenómenos em presença. A construção de um modelo é feita através da formulação de um conjunto de hipóteses básicas que, eliminando pormenores e simplificando certos aspectos do sistema, nos permite estudar os fenómenos mais facilmente, se bem que de uma forma aproximada.

Os modelos hidrológicos podem dividir-se em dois grandes tipos (Woolhiser e Brakensiek, 1982):

Físicos: é uma representação física do sistema, considerada como mais simples que o prototipo (o sistema) e com propriedades idênticas às daquele

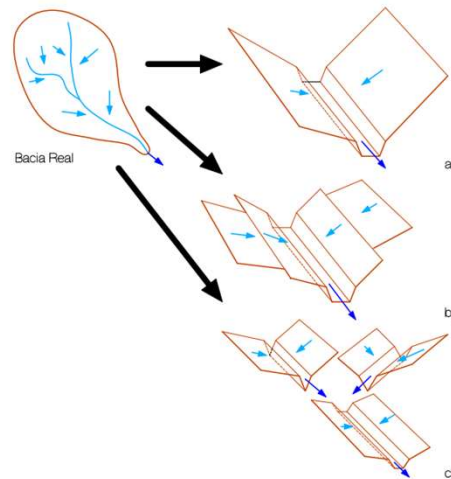
Matemáticos: é uma representação simbólica de uma situação idealizada da realidade, contendo as propriedades estruturais mais importantes do sistema. Os modelos físicos podem dividir-se em modelos analógicos e semelhantes.

Secção de Eng^a Rural



Classificação de modelos hidrológicos matemáticos (adaptado de Chow *et al.*, 1988)

Secção de Eng^a Rural



Bacia hidrográfica real e modelação desta aumentando, de (a) para (c), a desagregação espacial (as setas pequenas indicam o sentido do escoamento)

Secção de Eng^a Rural

1. O escoamento médio anual de uma bacia com 1000 km^2 é de $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e a precipitação média anual é de 105 cm. Estime a evapotranspiração média anual, indicando as simplificações efetuadas. (577 mm)

4. Sabendo que a precipitação anual média sobre os oceanos (70% da área do globo) é de 1264 mm e que sobre os continentes é 760 mm, calcule a evaporação anual média de todo o globo em mm. (1117.3 mm ano⁻¹)

7. Um temporal sobre uma bacia de 510 km^2 originou uma altura de precipitação de 225 mm. Se 20% da precipitação se transformou em escoamento de cheia, qual o volume de armazenamento necessário para conter inteiramente esse escoamento? (23 x 10⁶ m³)

Secção de Eng^a Rural

8. Numa albufeira com uma área de 10 km^2 registaram-se, durante um período de 5 dias os seguintes valores:

- Caudal afluente = $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
- Caudal efluente = $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
- Nível de água no 1º dia = 25 m
- Nível da água no 6º dia = 25.4 m
- Precipitação = 0 mm.

a) calcule o volume de água evaporada na albufeira durante os cinco dias; (1 184 000 m³)

b) calcule a altura média diária de evaporação da albufeira nesse período; (23.6 mm dia⁻¹)

12. A precipitação (P) e a evapotranspiração (E) média anual numa bacia de $A = 350 \text{ ha}$ são 1250 e 800 mm, respetivamente.

a) Calcule o volume total de escoamento em mm e em m³. Considere desprezável a variação anual do armazenamento ($\Delta A = 0$). (450 mm; 1 575 000 m³)

b) Admitindo que esta bacia abastece uma povoação a jusante, em que o consumo médio diário é de 300 L d^{-1} pessoa⁻¹, calcule o número total de pessoas que a bacia pode abastecer. (14 383)

Secção de Eng^a Rural

13. A área de determinada bacia hidrográfica é 102 km² e a soma dos desenvolvimentos de todos os seus cursos de água é 300 km. Estime o percurso médio de escoamento sobre o terreno.

14. Para o estudo das características fisiográficas de duas bacias foram efetuados levantamentos topográficos que produziram os resultados dados na tabela abaixo. Com base nestes elementos, calcular a densidade de drenagem, o coeficiente de compacidade e o fator de forma da bacia hidrográfica. Interpretar os resultados.

parâmetro	bacia A	bacia B
área de drenagem (km ²)	320	450
perímetro da bacia hidrográfica (km)	71	120
comprimento do rio principal (km)	22	63
comprimento total dos cursos d'água na bacia (km)	112	315

Secção de Eng^a Rural

15. Para o traçado do do perfil longitudinal de determinado curso de água determinaram-se os seguintes pontos, onde x representa a distância à secção de referência e Z a cota.

X (km)	0	2	4	7
Z(m)	103	110	130	205

Determine o declive médio do curso de água

Secção de Eng^a Rural

Referências Bibliográficas

- Chow, V.T., D.R. Maidment e L.W. Mays (1988). Applied Hydrology, McGraw-Hill Book Company.
- INAG (2001). Plano Nacional da Água. Parte I - Enquadramento e contextualização. Volume II - Caracterização e diagnóstico da situação dos recursos hídricos. Capítulo 4: Usos, consumos e necessidades de água. Versão de trabalho. Instituto da Água, Lisboa. Abril de 2001.
- David, J.S. e L.S. Pereira (1982). Perspectiva Global de Comportamento da Água nos Solos. Influência do Solo nas Disponibilidades Hídricas e no Movimento da Água. Perspectiva Global sobre os Problemas de Balanço Hidrológico, Seminário sobre a Água no Solo. Perspectiva Hidrológica, Agronómica e Sanitarista.
- Direcção-Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos (DGRAH), 1981. Índice Hidrográfico e Classificação Decimal dos Cursos de Água de Portugal.
- Eagleson, P.S. (1970). Dynamic Hydrology, McGraw-Hill, Inc.
- Feio, M. e V. Henriques (1986). As Secas de 1980-81 e de 1982-83 e as Principais Secas Anteriores, Memórias do Centro de Estudos Geográficos, nº 10.
- Freeze, R.A. (1975). A Stochastic-Conceptual Analysis of One-Dimensional Groundwater Flow in Nonuniform Homogeneous Media, Water Resour. Res., 11(5), 725-741.
- Henriques, A.G. (1985?). Avaliação dos Recursos Hídricos de Portugal Continental, Instituto de Estudos para o Desenvolvimento, nº 9.
- Hipólito, J.R. e Vaz, A.C. 2017. Hidrologia e Recursos Hídricos. IST Press, Lisboa. ISBN: 978-972-8469-86-3;
- Lencastre, A e Franco, F.M. 2003. Lições de Hidrologia. Fundação Armando Lencastre, Lisboa. ISBN: 972-8152-59-0
- Quintela, A., E. Santos e J. Hipólito (1986). Hidrologia de Superfície, em: Introdução ao Planeamento e Gestão de Recursos Hídricos, 1 - Introdução à Gestão dos Recursos Hídricos, Projecto Metodologias para a Avaliação de Políticas de Recursos Hídricos, LNEC.
- Shaw, E.M. (1983). Hydrology in Practice, Van Nostrand Reinhold (UK) Co. Ltd