



# HIDROLOGIA

## 4. infiltração

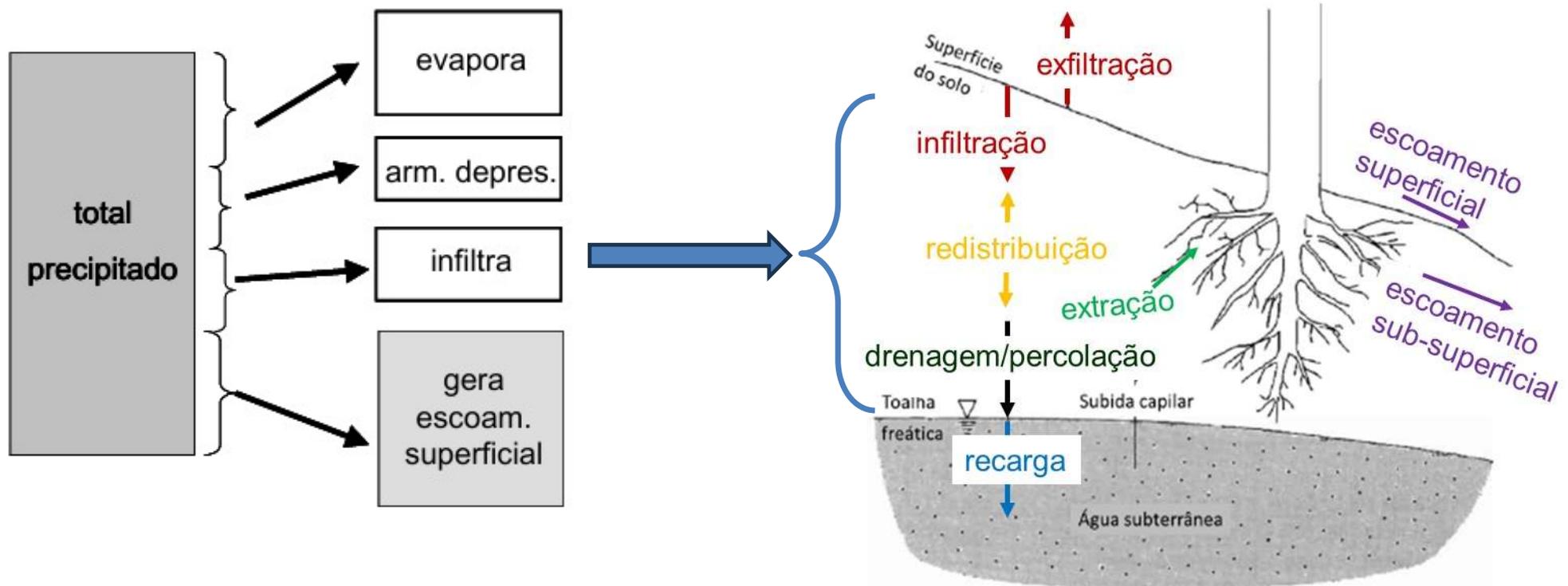
---

4.1 Conceitos

4.2 Modelação

## 4.1 Conceitos

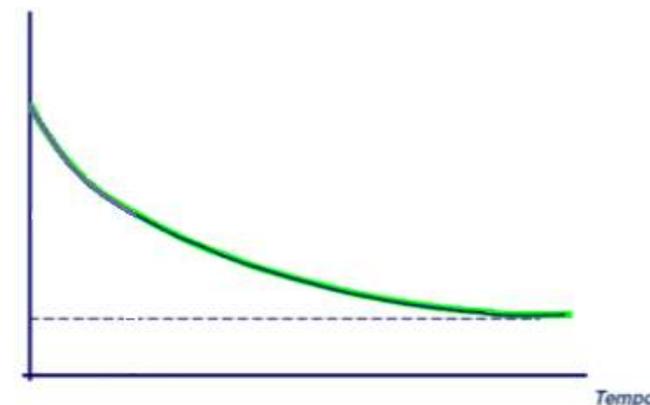
- é o processo de entrada de água pela superfície do solo (Lencastre e Franco, 2003);
- é o processo mais significativo das perdas da precipitação para o escoamento.



## Interesse do estudo da infiltração e sua quantificação

- Transformação da precipitação total em *precipitação eficaz ou efectiva*, responsável pelo escoamento superficial (  $\Rightarrow$  cheias, erosão, armazenamento em reservatórios);
- Análise da recarga de aquíferos;
- Determinação da quantidade de água armazenada no solo disponível para as plantas (rega)

- **Capacidade de infiltração ( $C_i$ ):** potencial que determinado solo tem para infiltrar água. Mede-se em  $\text{mm h}^{-1}$ . É mais elevada no início de um evento de precipitação, diminuindo ao longo do tempo até atingir um valor constante.



- **Taxa de infiltração ( $T_i$ ):** fluxo de água que efetivamente se infiltra no solo

➤ Se  $p < C_i$ ,  $T_i = p$

São taxas  $\Rightarrow \text{mm h}^{-1}$

➤ toda a água infiltra-se e não há escoamento (**infiltração efectiva = precipitação**)

➤ ocorre enquanto o solo não se encontra saturado à superfície ( $\theta < \theta_s$ )

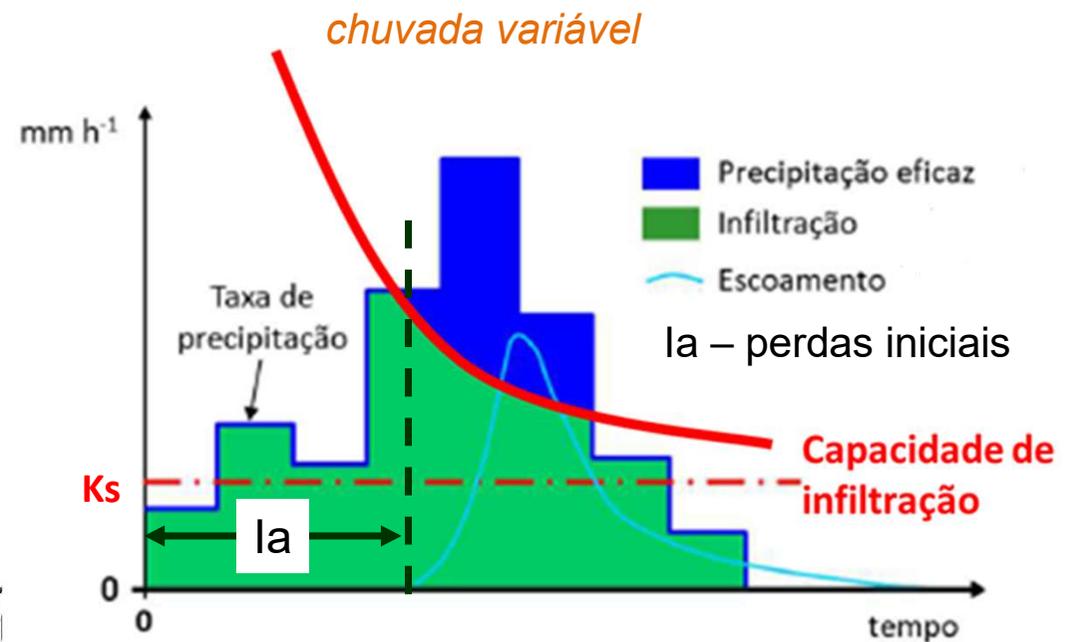
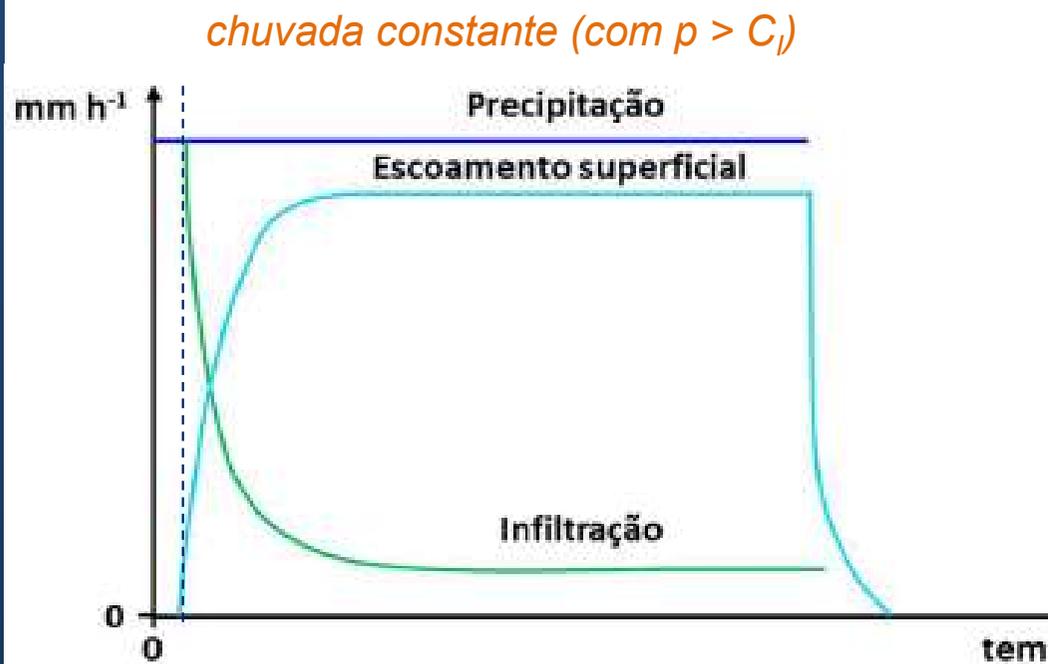
➤ Se  $p > C_i$ ,  $T_i = C_i$

São taxas  $\Rightarrow \text{mm h}^{-1}$

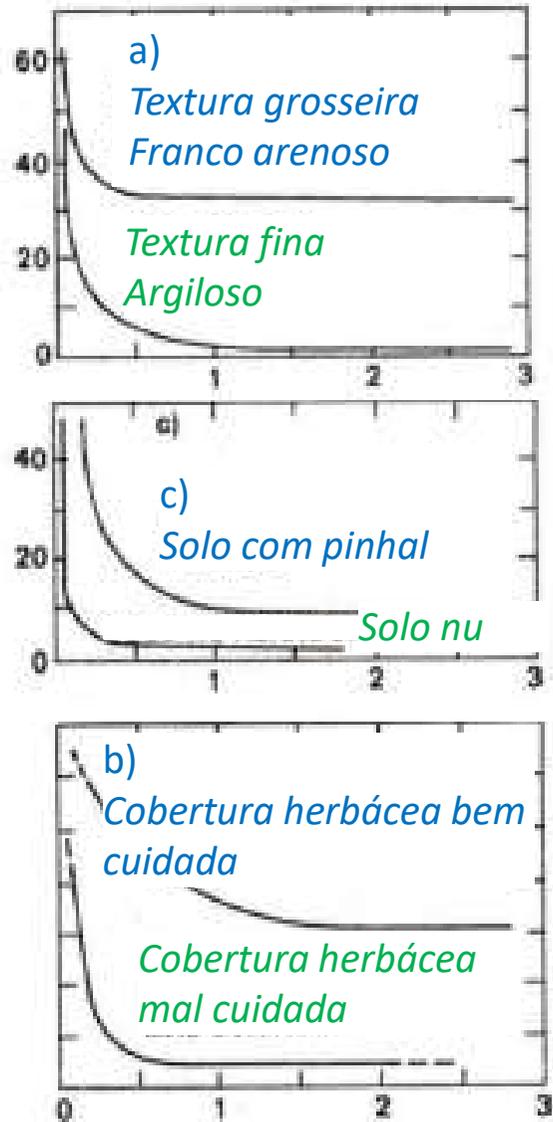
➤ ocorre quando o solo se encontra saturado à superfície ( $\theta = \theta_s$ )

➤ ocorre acumulação de água à superfície (empoçamento), **podendo ocorrer escoamento superficial**

- Durante uma chuvada o solo pode infiltrar a água até à **capacidade de infiltração** ( $\text{mm h}^{-1}$ );
- A partir desse valor a água não infiltra e começa o **escoamento superficial**.



Taxa de infiltração (mm h<sup>-1</sup>)



## Fatores que afetam a capacidade de infiltração

- Textura do solo
- Estrutura e compactação do solo
- Cobertura vegetal
- Humidade do solo no início da chuvada
- Retenção superficial

## 4.2 Modelação da infiltração

A obtenção do hietograma de precipitação eficaz com base no hietograma de precipitação total implica a **modelação da infiltração** (mesmo que de forma indirecta e/ou agregada a outros processos hidrológicos, como a interceção e a retenção superficial)

### Modelos empíricos

- À escala da bacia hidrográfica

{ Método do Índice  $\phi$   
método do Índice  $\phi$ , modificado  
método do *Soil Conservation Service*



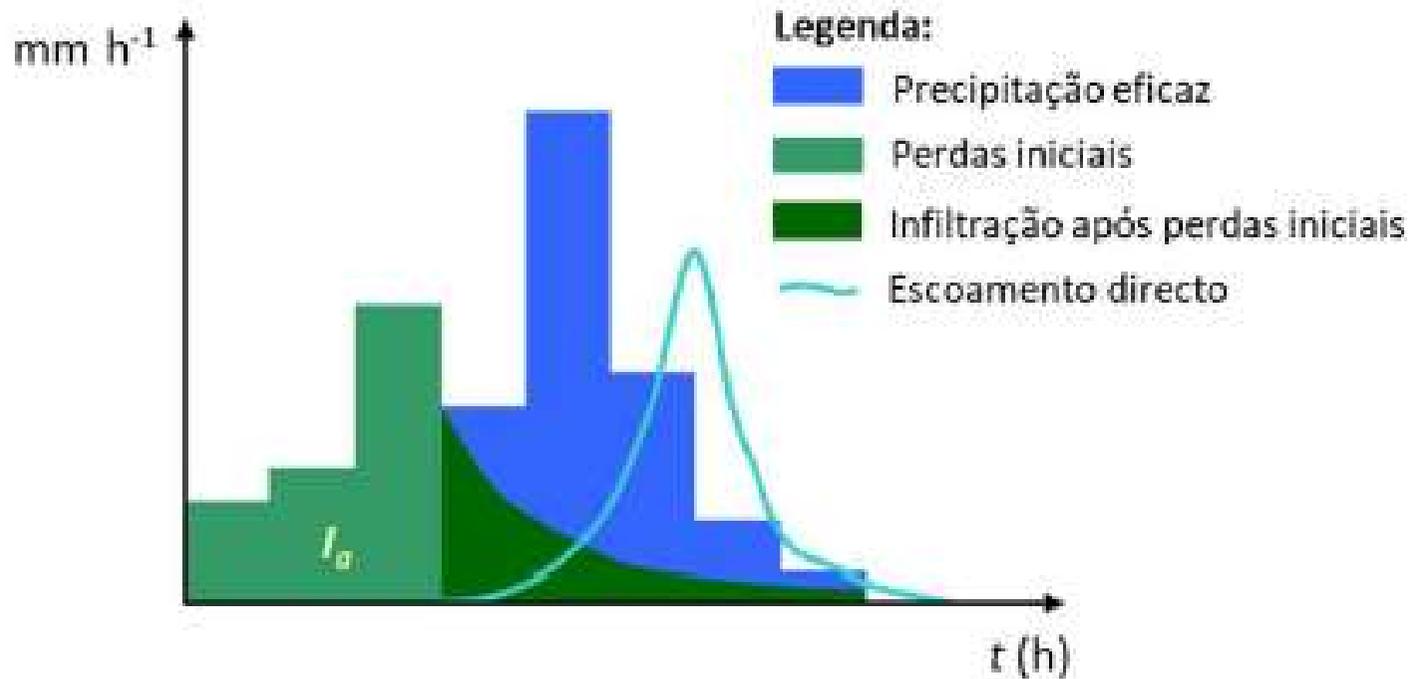
## ☐ Modelo empírico à escala da bacia hidrográfica

### Método do Soil Conservation Service (SCS)

- Inicialmente foi desenvolvido para estimar o **volume de escoamento direto** e o **caudal de ponta** produzidos por uma chuvada intensa;
- Passou a ser também aplicado com **intervalos de tempo diários**, pois nas chuvadas intensas o volume total de precipitação é próximo do volume diário;
- As **perdas** (para o escoamento) ocorrem com uma **taxa variável**, predominantemente decrescente, apenas **após o preenchimento de uma capacidade inicial**;
- Adequado para **bacias hidrográficas rurais** e, em menor grau, para bacias urbanizadas de pequena a média dimensão;

Resultado da aplicação do método do SCS para obtenção do hietograma de precipitação eficaz ao nível de uma bacia hidrográfica

Continua na aula prática



- Para além de caracterizar diretamente o *escoamento resultante da chuvada*, modela também, de forma indireta e agregada, outros processos hidrológicos, como a *interceção*, a *infiltração até ao empoçamento* e a *retenção superficial*.



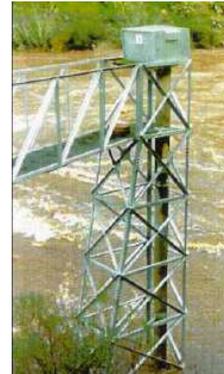
$$P - (ET + \textcircled{Q} + Dr) = \Delta A_z$$

## 5. Escoamento

- 5.1 Introdução
- 5.2 Mecanismos de formação do escoamento
- 5.3 Medição do escoamento



## HIDROLOGIA



- ❑ **Volume de Escoamento,  $V_Q$** , de uma bacia hidrográfica: quantidade de água que atravessa uma **secção de um curso de água** num determinado intervalo de tempo (ano, mês, dia, etc).
- ❑ **Unidades do escoamento:**
  - *volume* ( $m^3$ ,  $hm^3$ ,  $km^3$ );
  - *altura de água* uniformemente distribuída sobre a área da bacia hidrográfica (mm)



Exemplo:

Área da bacia =  $50 \text{ km}^2$

Volume de escoamento =  $1\,100\,000 \text{ m}^3$



$$H Q = \frac{1\,100\,000}{50\,000\,000} = 22 \text{ mm}$$

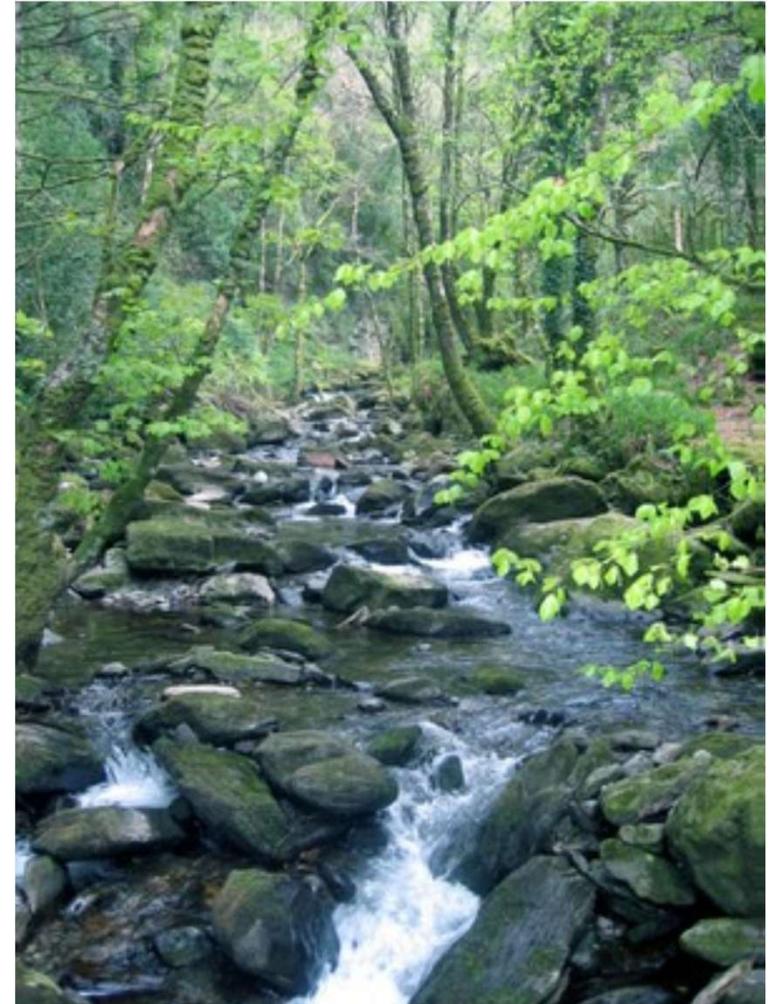
- ❑ **Caudal de escoamento,  $Q$** , de um curso de água: exprime a relação entre o volume de água,  $V_Q$ , que passa numa **secção desse curso de água** e que resulta da contribuição de toda a bacia hidrográfica a montante, e o respetivo tempo de passagem.
- ❑ **caudal específico,  $q_{esp}$** : relação entre o caudal na secção  $Q$  e a área da região de contribuição,  $A$

É um caudal por unidade de superfície, permitindo fazer comparações de caudais provenientes de bacias com áreas distintas

$$q_{esp} = \frac{Q}{A}$$

Exemplos de unidades:

$m^3 s^{-1} km^{-2}$ ,  $m^3 s^{-1} ha^{-1}$ ,  $L s^{-1} ha^{-1}$



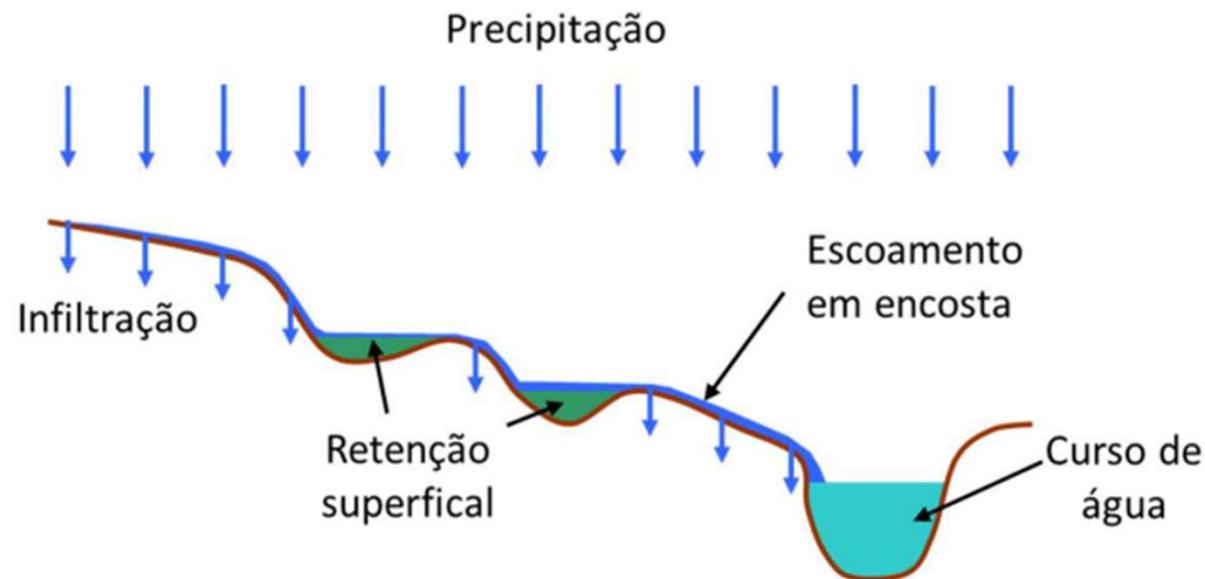
## Componentes do escoamento

- Superficial, em encosta ou direto
- Sub-superficial
- Subterrâneo ou de base
- Resultante da precipitação sobre a própria rede hidrográfica

### 5.2.1 escoamento em encosta, escoamento superficial ou direto (*overland flow*)

#### Escoamento Hortoniano

Escoamento correspondente à fração da precipitação que não se consegue infiltrar, por apresentar uma *intensidade superior à capacidade de infiltração do solo após o empoçamento e interceptação*



Area Disciplinar de Eng<sup>a</sup> Rural

- O escoamento em encosta também se designa por escoamento superficial e escoamento direto;
- Resulta da precipitação eficaz ou útil, ou seja, da fração de precipitação que, depois de satisfeitos os processos de intercepção, infiltração e retenção superficial na bacia, chega à rede hidrográfica;

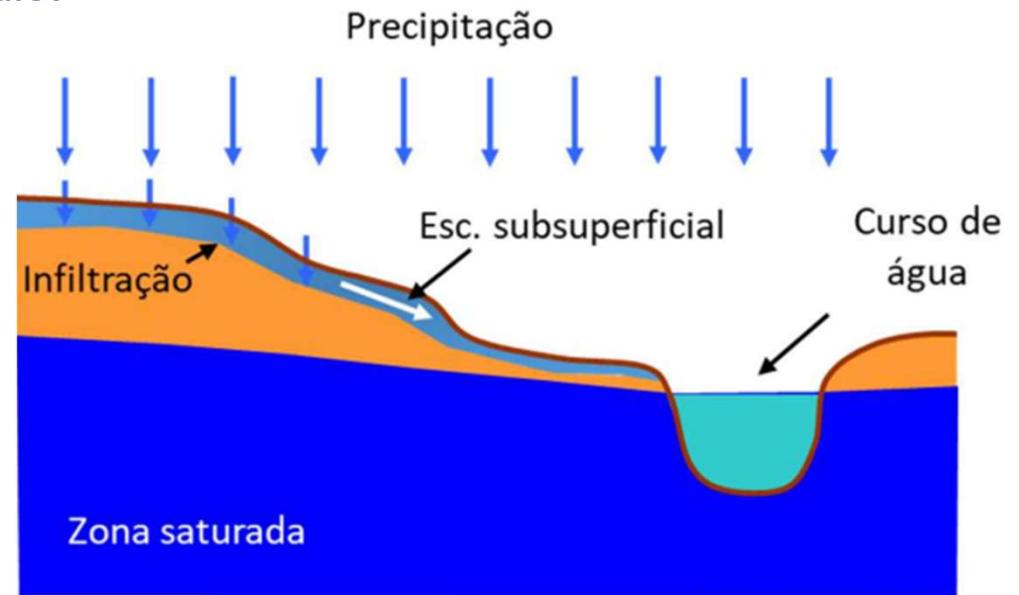
Corresponde à componente mais significativa do escoamento nos períodos de precipitação intensa

## 5.2.2 Escoamento subsuperficial (*subsurface flow, interflow*)

Corresponde ao escoamento em meio poroso, saturado ou não, relativamente próximo da superfície do solo, que acaba por voltar à superfície (exfiltração) e alimentar o curso de água. Também se designa por escoamento intermédio.

Escoamento essencialmente lateral, que pode ter origem em:

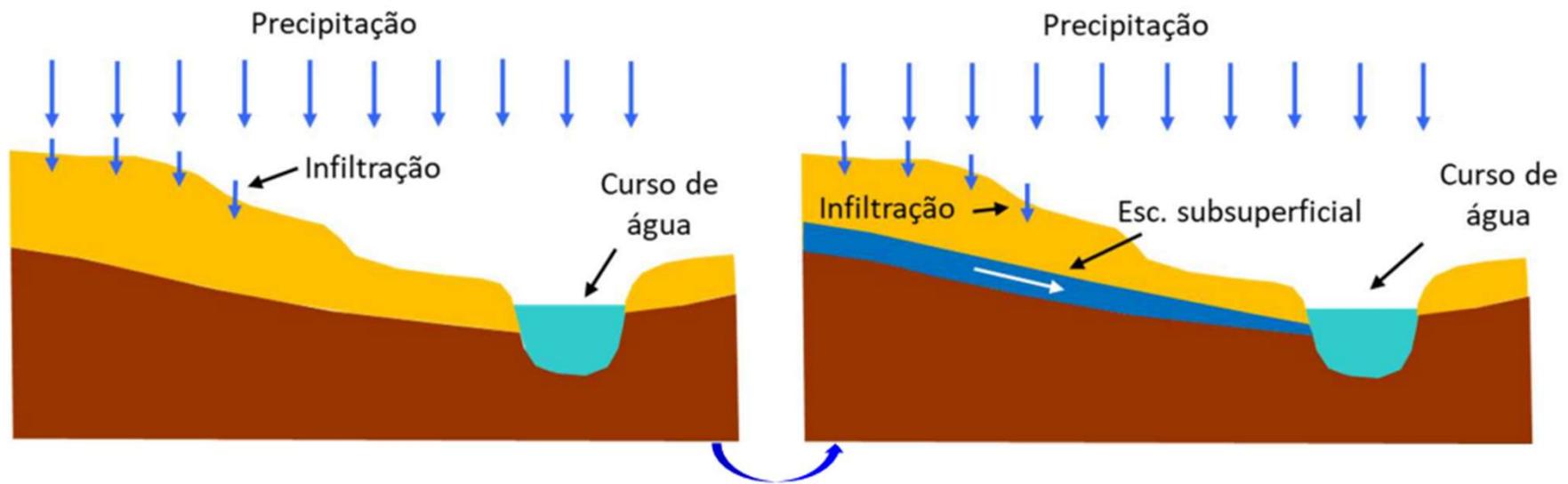
- i) solo anisotrópico, com elevada condutividade hidráulica lateral, superior à condutividade vertical, dando origem a escoamento em solo não saturado



**Figura 5** Formação do escoamento subsuperficial em solo anisotrópico

Este escoamento chega aos cursos de água apenas com um ligeiro atraso em relação ao escoamento direto e termina logo após a cessação deste.

ii) solo com estrato pouco permeável próximo da superfície, que dá origem à formação de uma toalha freática temporária e a escoamento em solo saturado.



Formação do escoamento subsuperficial em solo com estrato pouco permeável à superfície

### 5.2.3 Escoamento subterrâneo ou de base

- É originado pela água infiltrada que atingiu a zona de saturação;
- Resulta da infiltração e drenagem profunda da precipitação;
- Representa contribuição para o escoamento superficial das reservas hídricas subterrâneas acumuladas nas formações geológicas por onde passa o curso de água.

É uma componente com pouca importância quando ocorrem elevadas precipitações, mas representa a quase totalidade do escoamento quando as outras componentes se esgotam

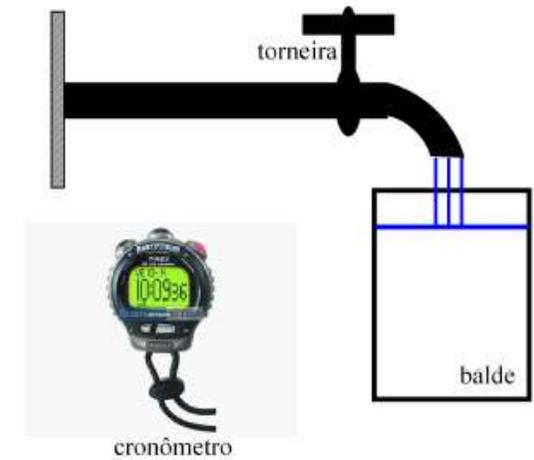
### 5.4.1 Medição de caudais

Existem diversos métodos para a medição de caudais, sendo os mais comuns:

- método da **medição volumétrica direta**
- método da **medição da velocidade com flutuadores e traçadores**
- método da **área da secção – velocidade média**
- método **estrutural**

## Método da medição volumétrica direta

- Consiste em receber toda a corrente num recipiente aferido, durante um certo tempo, e em obter o caudal médio dividindo por esse tempo o volume escoado;
- Método rigoroso, mas pouco prático para caudais elevados;
- Emprega-se sobretudo em laboratório, na **calibração** de outros instrumentos de medição de caudais, em especial orifícios e descarregadores;
- Em cursos de água naturais só tem interesse na medição de **caudais baixos**, inferiores a  $10 \text{ L s}^{-1}$ .



$$Q = \frac{V}{t}$$

## Método da medição da velocidade com flutuadores

**Flutuador simples** – em troços rectilíneos de secção transversal e declive constante com pelo menos 10 m de comprimento (tempo de percurso > 20 s)

- Medições podem ser afectadas pela velocidade do vento
- Flutuador deve deslocar-se o mais possível no centro, de modo a medir o filão de corrente

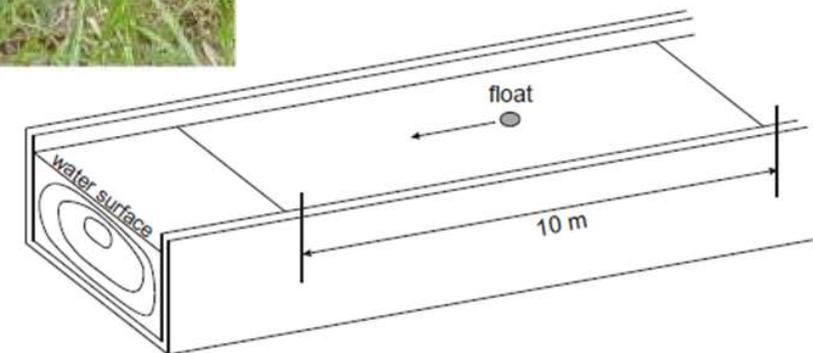
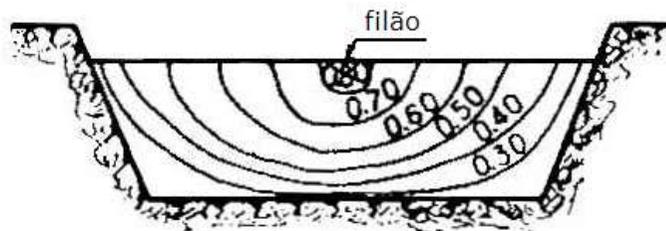
$$v = \Delta x / \Delta t$$



$$\bar{v} = k v_{\text{filão}}$$

$$k < 1$$

$$Q = A \bar{v}$$



$$\bar{v} = k v_{\text{filão}}$$

a)  $\bar{v} = 0.8 v_{\text{filão}}$

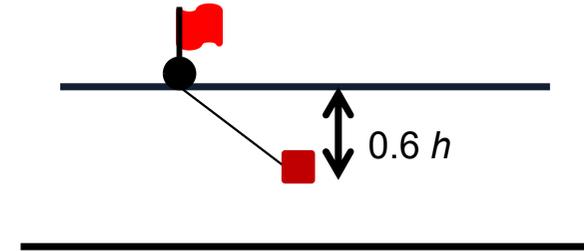
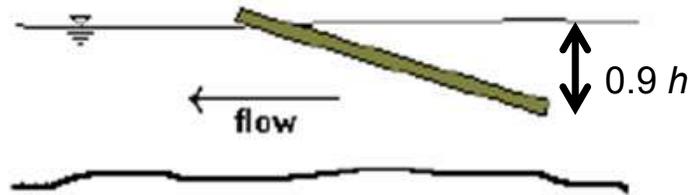
b) U.S. Bureau of Reclamation

Profundidade média (m)	k
0.30	0.66
0.61	0.68
0.91	0.70
1.22	0.72
1.52	0.74
1.83	0.76
2.74	0.77
3.66	0.78
4.57	0.79
> 6.10	0.80

Profundidade média = área da secção / largura à superfície

**erro de 10 a 20%**

**Vara lastrada / flutuador duplo** - dão directamente a velocidade média, sem necessidade de coeficientes de correcção



### Outros métodos similares

- Medição da velocidade com corantes

$$v = \frac{x}{t}$$

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

$t_1$  – tempo levado pela frente da mancha  
 $t_2$  – tempo levado pelo final da mancha  
 $x \sim 3 \text{ m}$

- Medição do caudal a partir da concentração de um traçador (sal, substância radioactiva, etc)

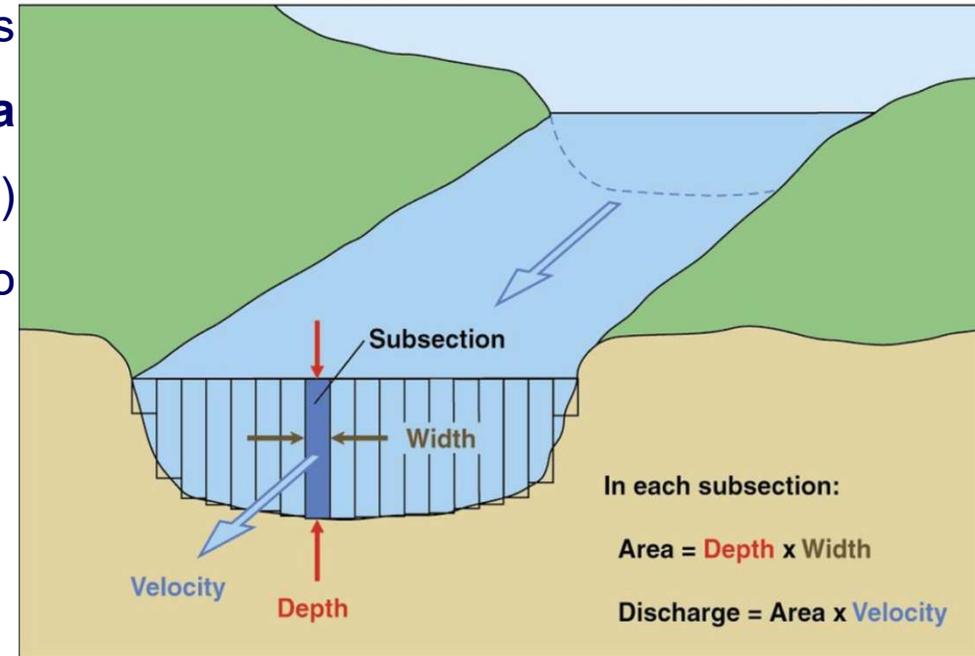
$$Q = q \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0}$$

$Q$  – caudal  
 $q$  – caudal de injeção da solução de substância traçadora com concentração  $C_1$   
 $C_2$  – concentração de traçador medida a uma distância  $> 5 \text{ m}$  do ponto de injeção  
 $C_0$  – concentração de traçador inicial

## Método da área da secção – velocidade média

É o método mais utilizado na medição de caudais em cursos de água em Portugal: conhecida a **área da secção transversal** de um curso de água **A** (m) e a **velocidade média** através dessa secção  $\bar{v}$  (m/s), o valor do caudal é:

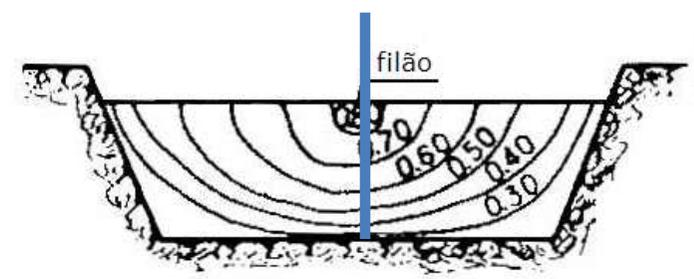
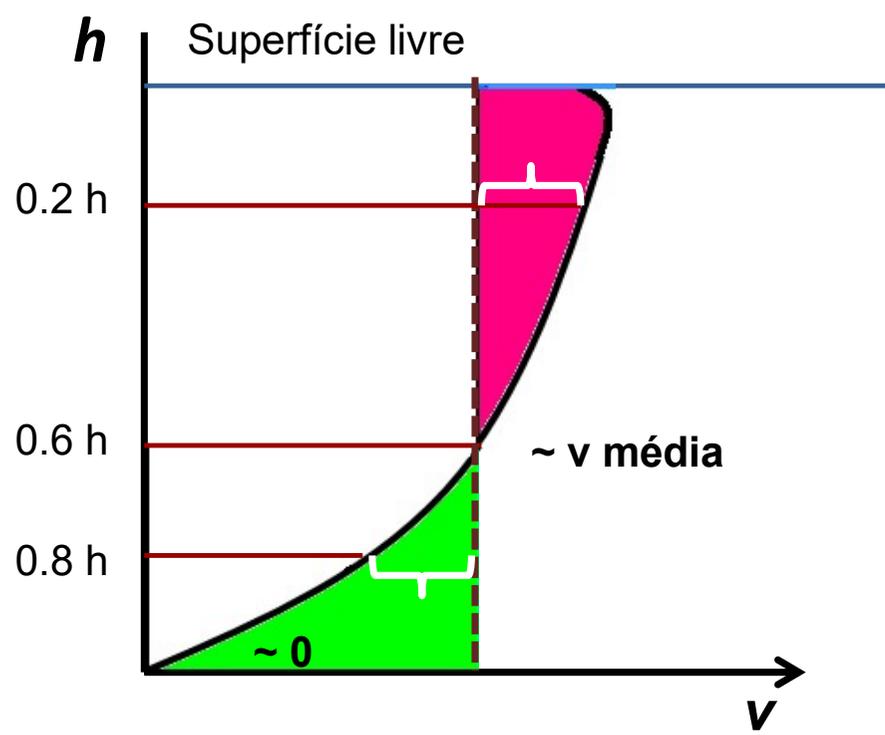
$$Q = \bar{v} A$$



De um modo geral, consegue-se maior rigor na medição dividindo a secção em  $i$  partes com área  $A_i$  e velocidade média  $\bar{v}_i$ , calculando o caudal  $Q_i$  em cada uma delas, e somando estes:

$$Q = \sum Q_i = \sum \bar{v}_i A_i$$

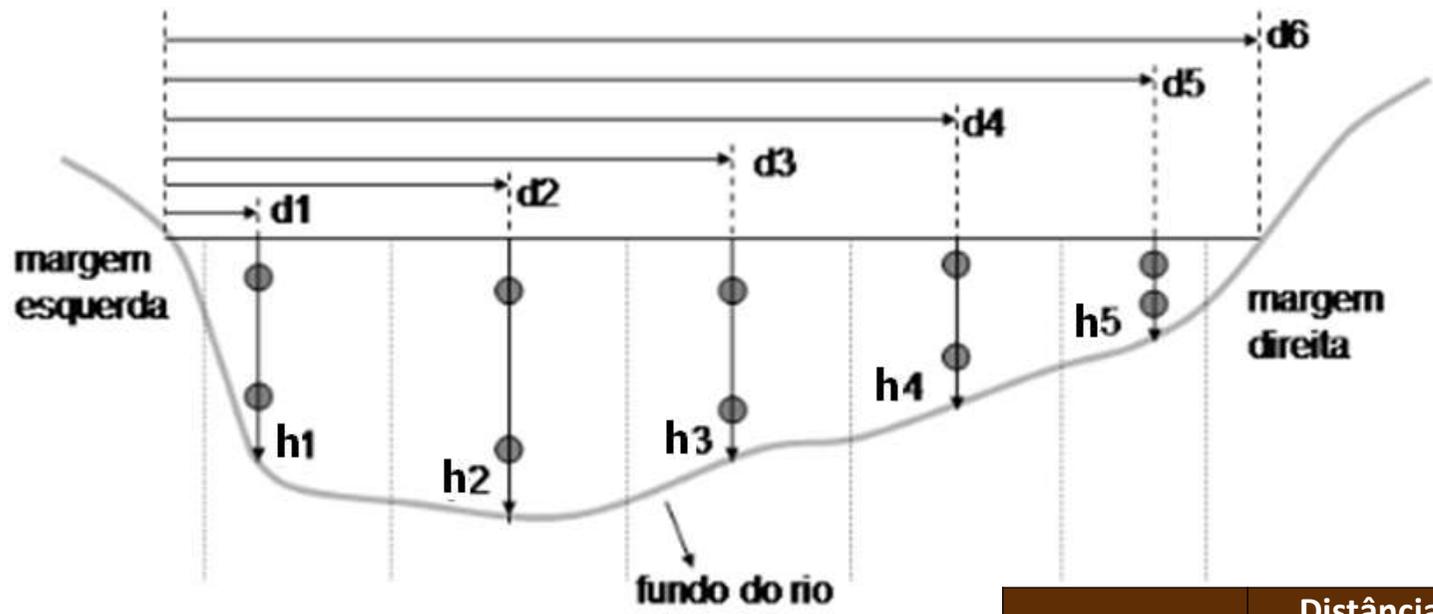
## Perfil de velocidades



### Profundidades das medições

- 0.6 h
- 0.2 h
- 0.8 h

## Medição da velocidade em perfis

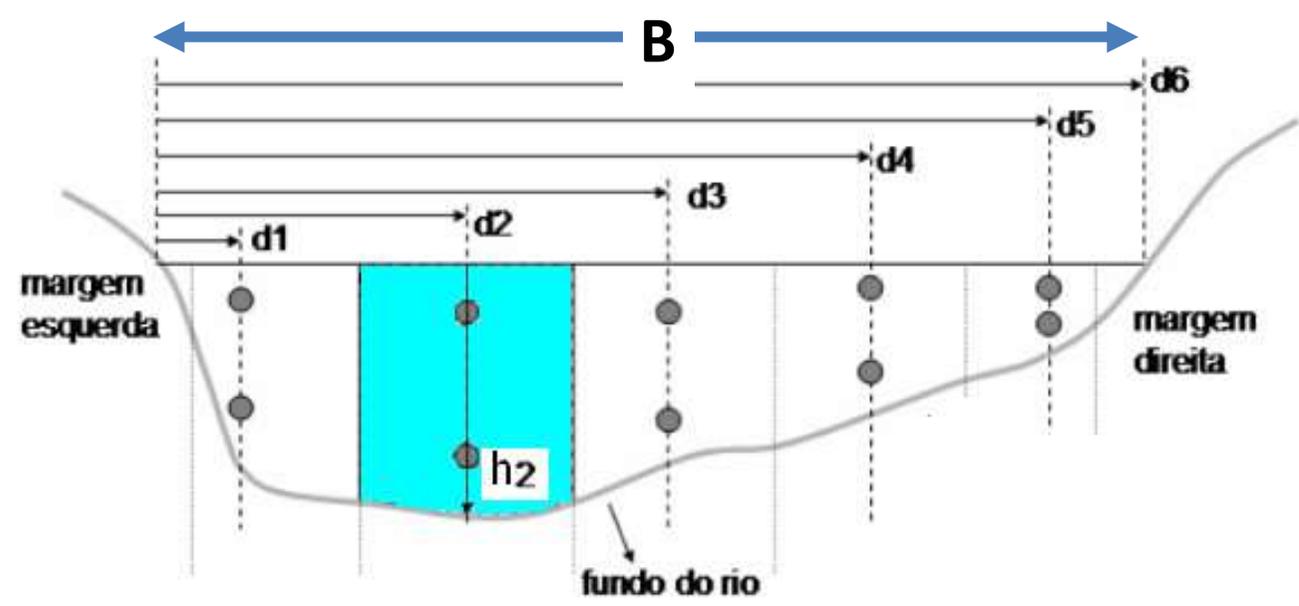


Profundidade	Nº medições	Posição
0.15 m - 0.60 m	1	0.6 h
0.60 m - 1.20 m	2	0.2 h e 0.8 h
> 1.20 m	3	0.2 h, 0.6 h e 0.8 h



$$\bar{v} = \frac{1}{2} \left( \frac{v_{0.2h} + v_{0.8h}}{2} + v_{0.6h} \right)$$

Largura	Distância entre perfis
< 3 m	0.3 m
3 – 6 m	0.5 m
6 – 15 m	1.0 m
15 – 30 m	2.0 m
30 – 50 m	3.9 m
50 – 80 m	4.0 m
80 – 150 m	6.0 m
150 – 250 m	8.0 m
> 250 m	12.0 m



$$A_i = \frac{d_{i+1} - d_{i-1}}{2} h_i$$

$$Q_i = A_i \bar{v}_i$$

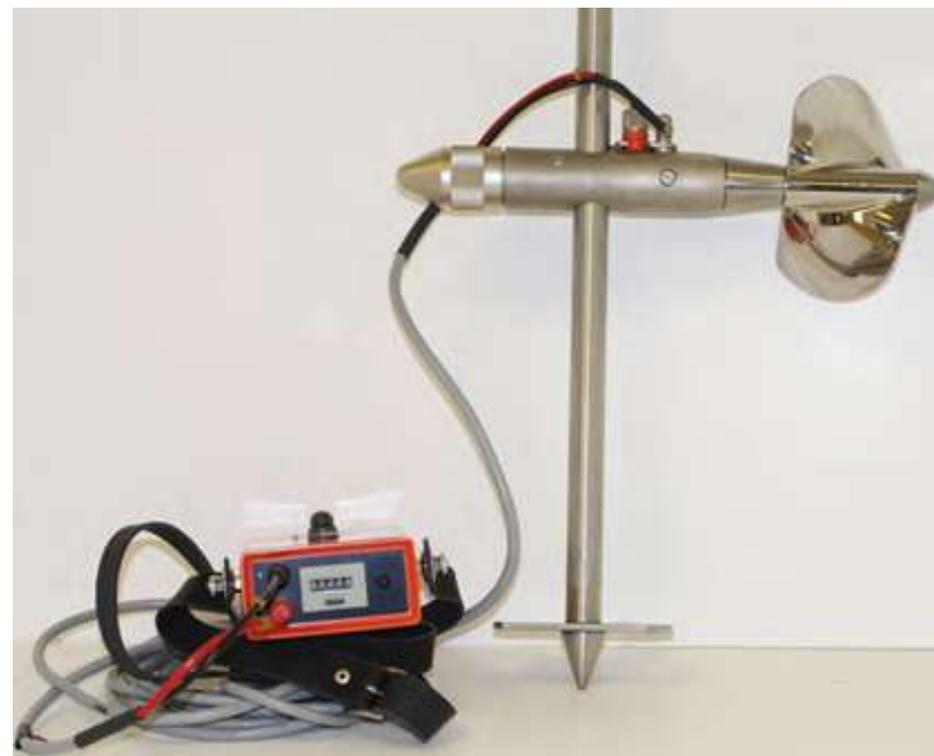
$$\begin{aligned} d_0 &= 0 & d_n &= B \\ h_0 &= h_n & &= 0 \\ v_0 &= v_n & &= 0 \end{aligned}$$

$$Q_T = \sum_{i=1}^{n-1} Q_i$$

## Medição da velocidade

Existem diversos métodos para a medição da velocidade da água, uns de utilização mais generalizada, outros de utilização mais restrita por serem dispendiosos ou por serem ainda de carácter experimental.

O método correntemente mais utilizado consiste na utilização de **molinetes**, constituídos por uma turbina de câmara livre, com um contador de rotações. A correspondência entre a **rotação** do molinete e a **velocidade instantânea** da corrente tem de ser obtida laboratorialmente.



## Molinetes

### De eixo vertical

- possuem cúpulas rotativas
- operam a velocidades mais baixas
- manutenção e reparação mais simples



### De eixo horizontal

- possuem hélice
- perturbam menos o fluxo
- menos afectados por partículas em suspensão



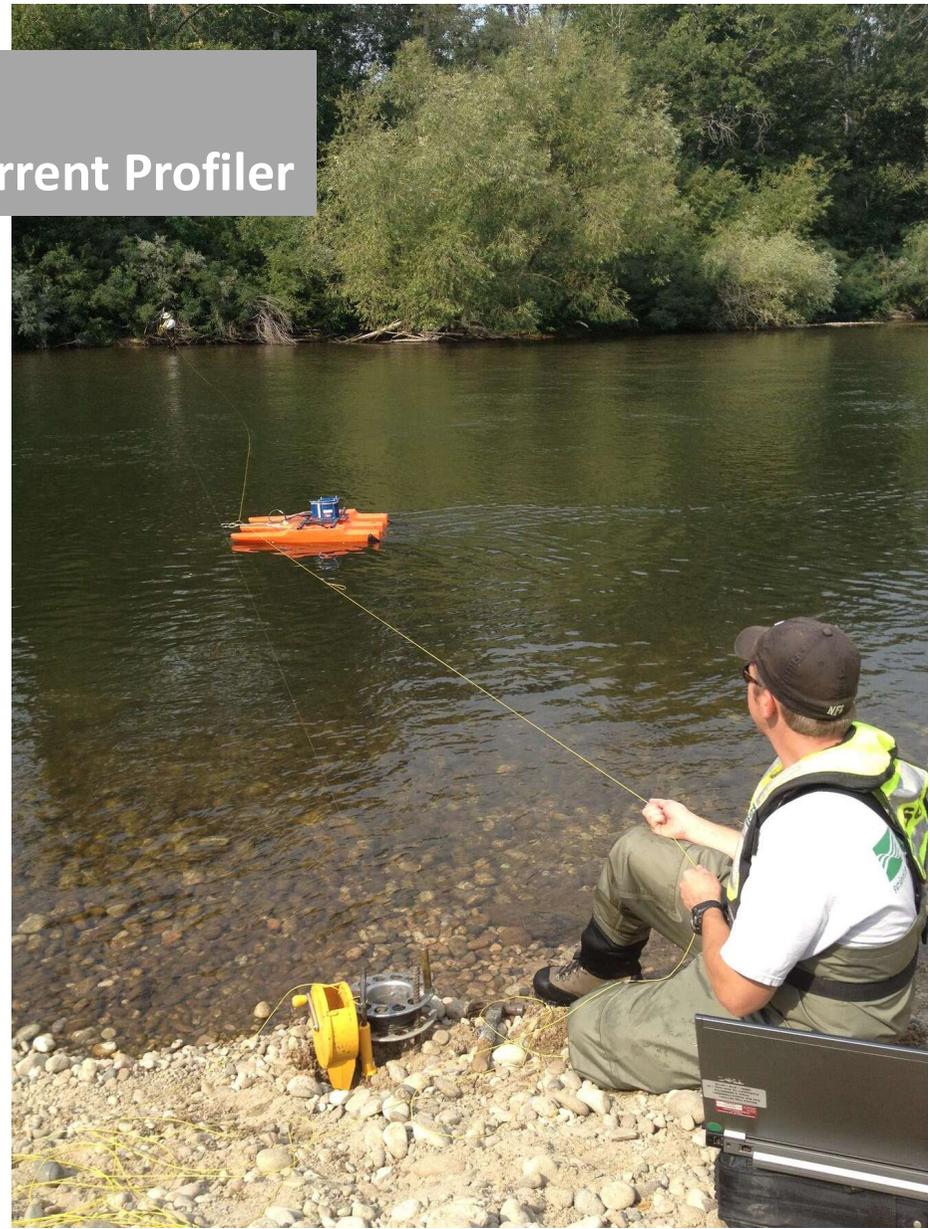
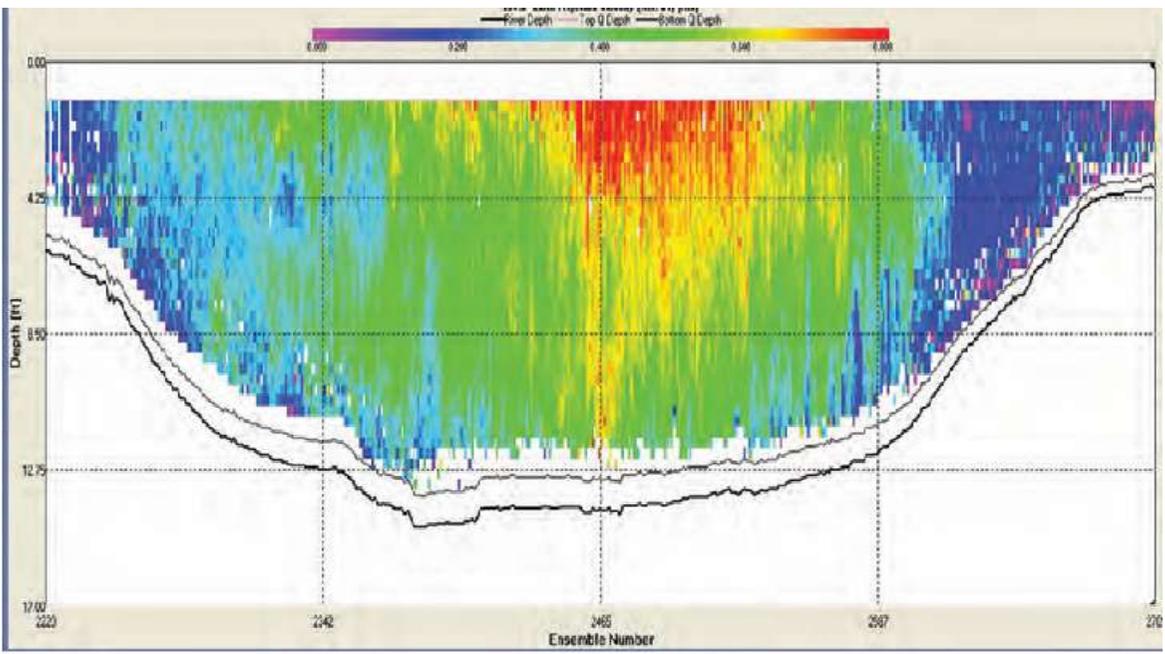


Wading method in an open channel





# ADCP Acoustic Doppler Current Profiler



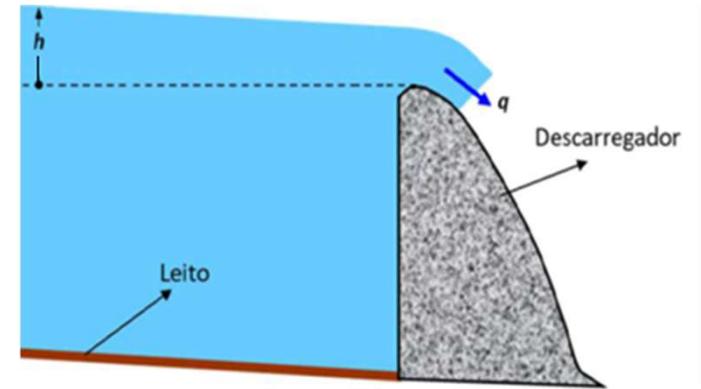
## Método estrutural

Consiste na utilização de estruturas hidráulicas fixas para a medição dos caudais, nomeadamente orifícios ou descarregadores, de soleira delgada ou espessa

No caso dos descarregadores:

$$Q = \mu L \sqrt{2g} h^{3/2}$$

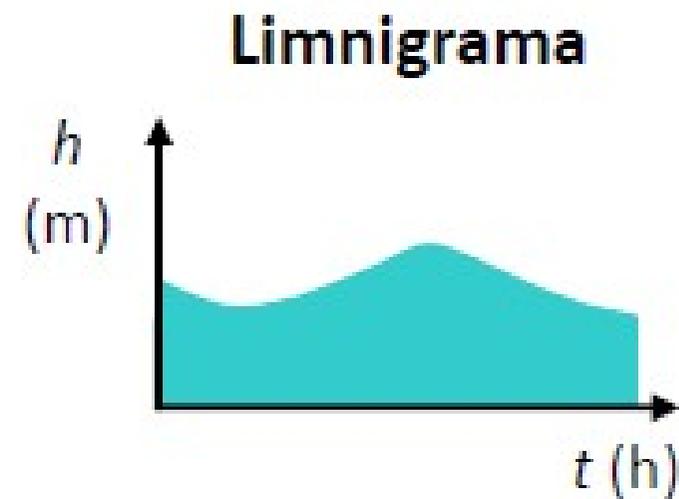
em que  $\mu$  é um coeficiente de vazão (dependente do tipo de descarregador),  $L$  é o comprimento do descarregador,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $h$  é a carga hidráulica (= altura de água acima da soleira do descarregador).



Curso de água com descarregador (esq.) e com descarregador e estação hidrométrica (dir.)

## 5.4.2 Medição de alturas

- As alturas de água são de mais fácil medição que os caudais
- A sua evolução temporal  $h(t)$  designa-se de *limnigrama*

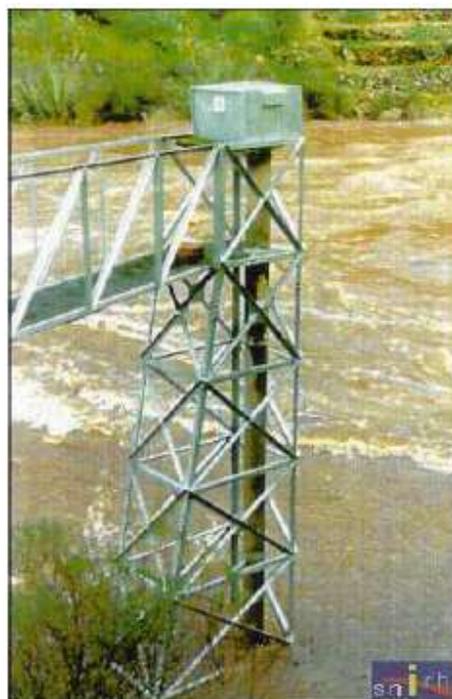


Os aparelhos mais utilizados para a medição da altura de água são:

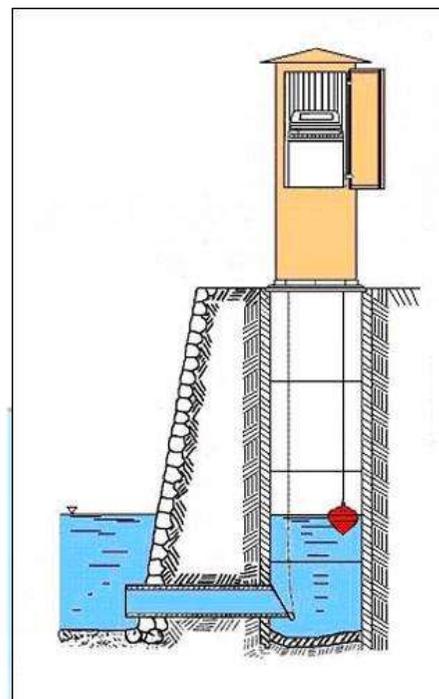
- escalas hidrométricas (ou limnimétricas)
- limnógrafo de flutuador (mais comum)
- limnógrafo de pressão



**Figura 8** Escala limnimétrica



**Figura 9** Estação hidrométrica com limnógrafo de flutuador

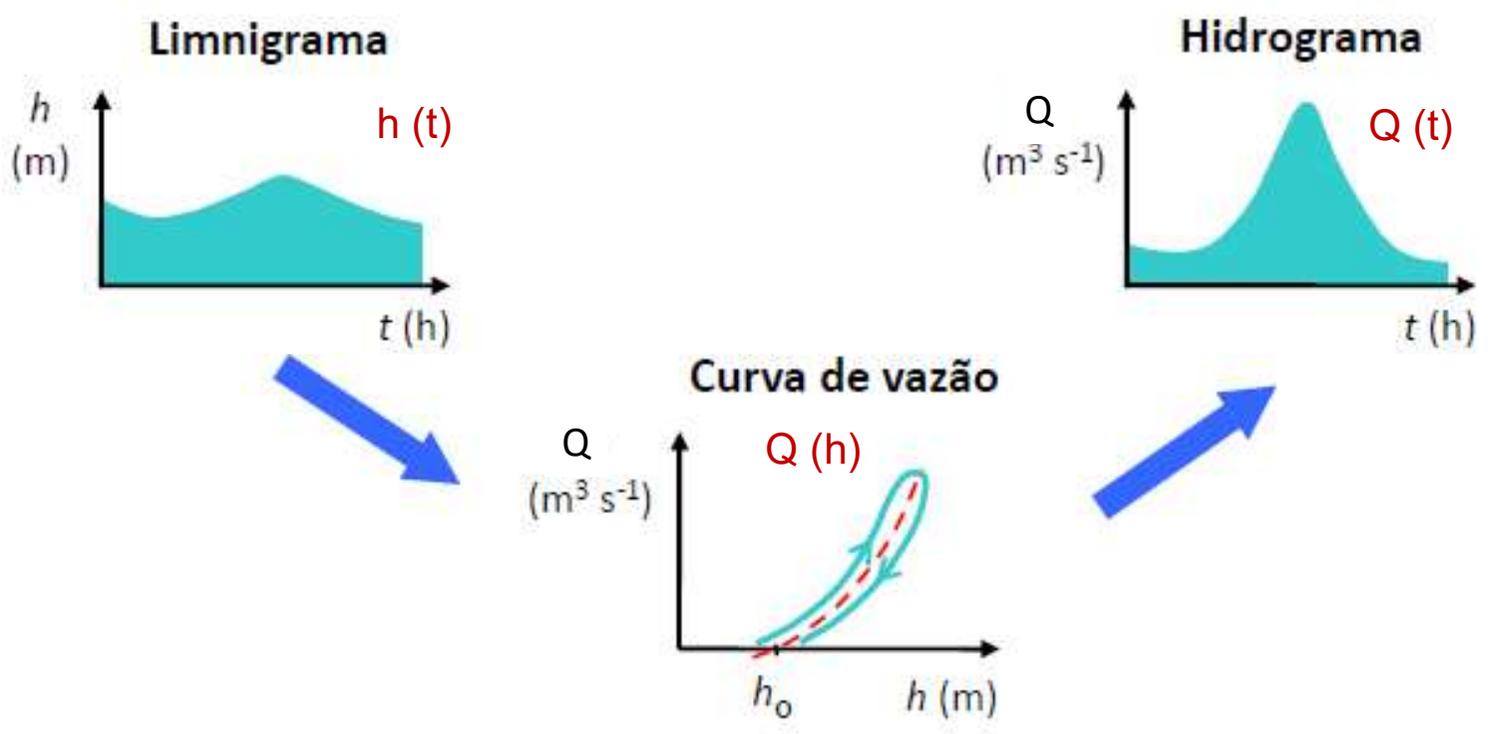


**Figura 10** Esquema de estação hidrométrica com limnógrafo de flutuador



Limnógrafo de pressão

Para se obter o **hidrograma** [  $Q = f(t)$  ] a partir do **limnigrama** [  $h = f(t)$  ] é necessário recorrer à **curva de vazão** [  $Q = f(h)$  ]



**Curva de vazão** – relação biunívoca entre o caudal escoado numa secção e a correspondente altura de água

Obtém-se experimentalmente, medindo o valor de caudal **Q** e a correspondente altura de água na secção **h**, medida em escala limnimétrica colocada próximo de uma das margens.

Aos pontos obtidos ajusta-se um modelo analítico, do tipo:

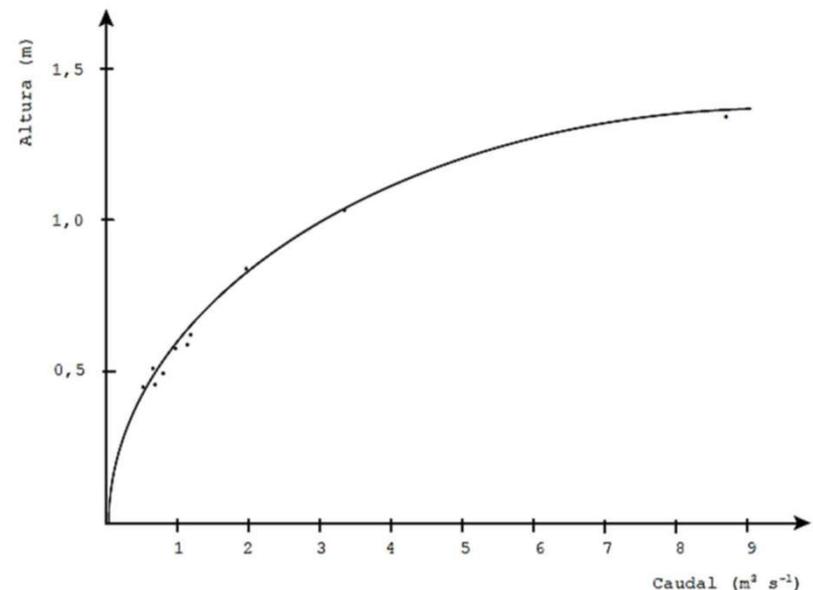
$$Q = a(h - h_o)^b$$

**Q** - caudal

**h** - altura hidrométrica

**h<sub>o</sub>** - altura do zero da escala hidrométrica em relação ao nível de água a que corresponde o caudal nulo, que em geral é a cota mais baixa da secção, isto é o fundo do leito

**a** e **b** - parâmetros de ajustamento



## 5.4.4 Rede hidrométrica

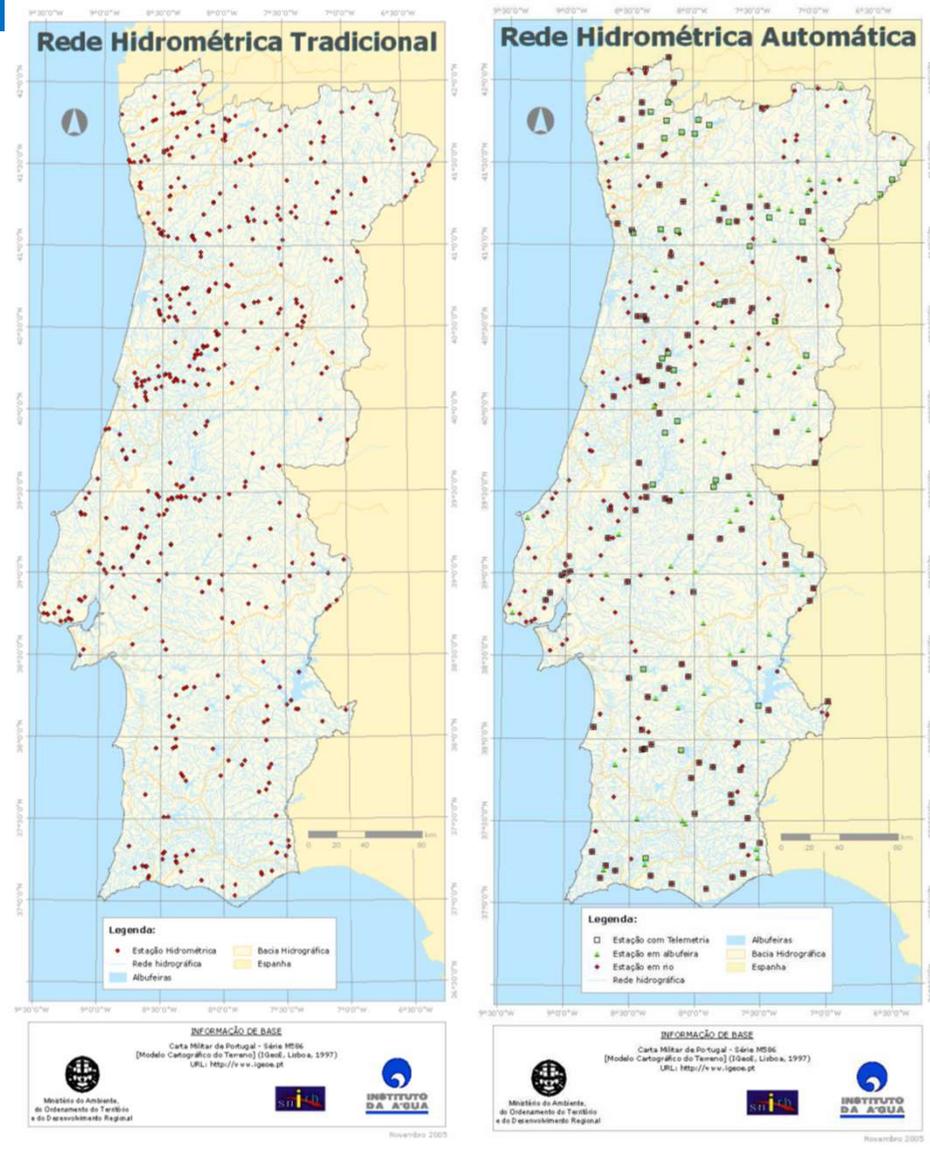
**Estação hidrométrica:** instalação numa secção de um curso de água onde se efetua um registo periódico de níveis, e onde se definiu uma curva de vazão para conversão dos respetivos valores em caudais.

As estações hidrométricas podem ser **limnimétricas**, quando providas unicamente de uma escala hidrométrica para leitura periódica de níveis, e **limnigráficas**, quando providas de um limnígrafo para registo contínuo de níveis ou sondas de pressão .

O conjunto de estações hidrométricas de uma região ou país constitui a respetiva **rede hidrométrica**

## 5.4.5 Medição do escoamento em Portugal

O organismo responsável pelas medições e sua publicação é a Agência Portuguesa do Ambiente (**APA**).



https://snirh.apambiente.pt/

Home > Dados de Base > Monitorização

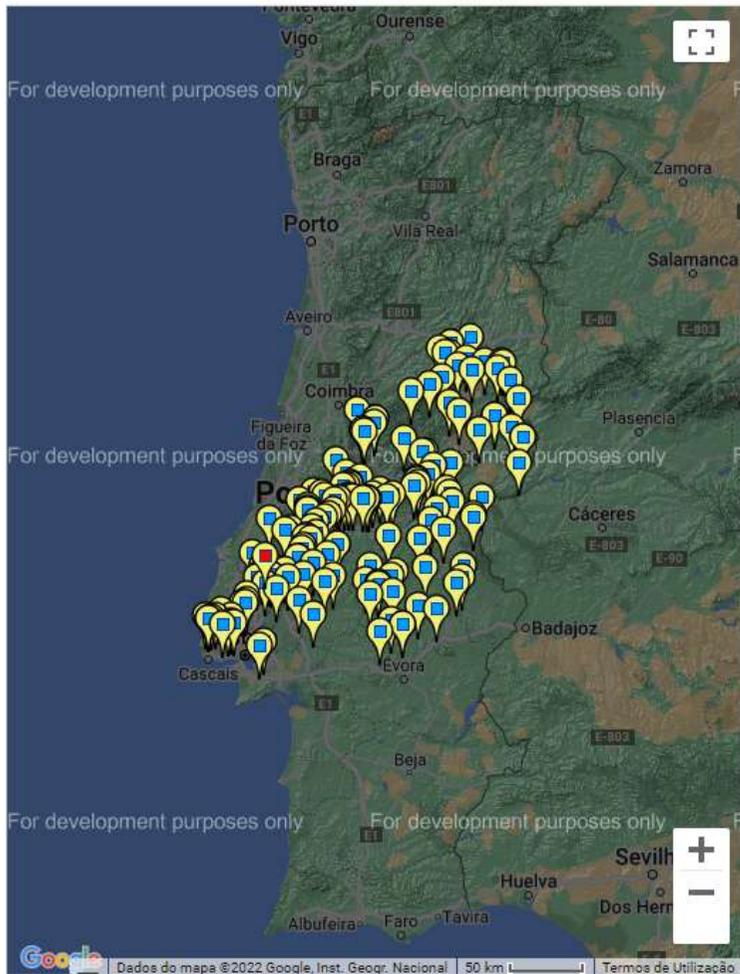
Filtros Activos: Redes e Bacias Hidrográficas

Redes | Bacias Hidrográficas | Águas Subterrâneas | Personalizar | Pesquisa Avançada

Dados de Base

Redes de Monitorização seleccionadas (# estações)

Hidrométrica (177)



Estações da Rede Seleccionada

- PONTE MEIMOA (12N/01H)
- PONTE MIRAFLORES (21B/06H)
- PONTE MUGE (19E/03H)
- PONTE MUNHECA (14N/02H)
- PONTE NOVA (17F/02H)
- PONTE OTA (19D/04H)
- PONTE PANASCO (17I/01H)

Seleccionar Estações

Estações Seleccionadas para Análise

- PONTE OTA (19D/04H)

Limpar Lista | Limpar Sel. | VALIDAR Lista

Ao alterar as estações seleccionadas click VALIDAR Lista para identificar as estações no mapa/listar parâmetros.

Parâmetros com Dados

- Caudal instantâneo máximo anual
- Caudal médio diário
- Escoamento mensal
- Nivel hidrométrico Instantâneo
- Nivel instantâneo máximo anual
- Nivel médio diário

Período de Análise (dia/mês/ano)

De: 14/07/1994 | A: 27/06/2022

Ano Hidrológico | Semestre | Este Mês

Informação Disponível

Características das Estações | Parâmetros

Selecione estações e parâmetros até um máximo de 50 conjuntos. Ver/Guardar Dados

Selecione um parâmetro e uma estação. Relatório

Área Disciplinar de Eng<sup>a</sup> Rural