



INSTITUTO  
SUPERIOR DE  
AGRONOMIA  
*Universidade de Lisboa*

Departamento de Ciências e  
Engenharia de Biosistemas

# HIDROLOGIA

## 5. ÁGUA NO SOLO. INFILTRAÇÃO E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

### REDISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

---

- Equação de Richards
- Métodos de Thorntwaite e de Témez

$\Delta t < 1$  dia

O acompanhamento da evolução do teor de água no solo é feito resolvendo numericamente a **Equação de Richards**



Discretização temporal e espacial fina

$$\left\{ \begin{array}{l} q = - \overline{K_{\theta}} \frac{\Delta H}{\Delta z} \\ - \frac{\Delta q}{\Delta z} = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \end{array} \right.$$

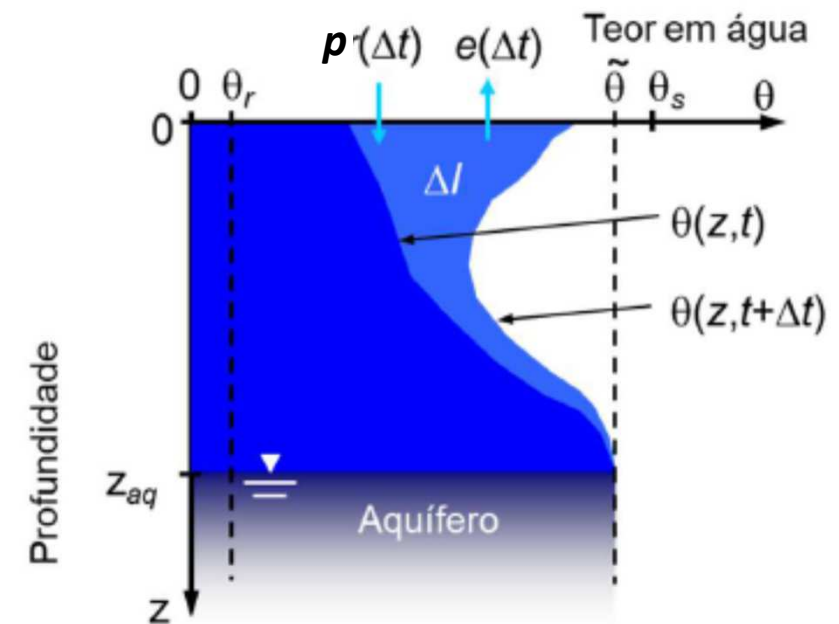
É aplicada sucessivamente no sentido descendente a partir da superfície do solo. É necessário especificar as **condições iniciais** ( $\theta_i$ ) e **de fronteira**:

$p(\Delta t)$  – intensidade de precipitação durante  $\Delta t$

$e(\Delta t)$  – intensidade de evapotranspiração

$z_{aq}$  – profundidade da toalha freática

## REDISTRIBUIÇÃO



$\Delta I$  – volume infiltrado

## Estimativa das propriedades da água do solo

### Equações de Brooks e Corey

$$\begin{cases} K = \tilde{K}(\theta^*)^p \\ K = \tilde{K} \end{cases} \text{ para } \begin{cases} \theta \geq \theta_r \\ \theta \geq \theta_s \end{cases}$$

$$\begin{cases} \theta^* = \frac{\theta - \theta_r}{\tilde{\theta} - \theta_r} \\ \theta^* = 0 \end{cases} \text{ para } \begin{cases} \theta \geq \theta_r \\ \theta \leq \theta_s \end{cases}$$

$$h_c = h_{ce}(\theta^*)^{-M} \text{ para } h_c \geq h_{ce} \text{ e } M = 1/\lambda$$

$$K = \tilde{K} \left( \frac{h_{ce}}{h_c} \right)^\eta \text{ com } \eta = p/M$$

$\lambda$  – índice de poros do solo

$$p = 3 + 2/\lambda$$

$$M = 1/\lambda$$



$$\eta = (3 + 2M)/M$$

**Quadro 2** Propriedades hidráulicas do solo, de acordo com as classes de textura (classificação USDA) (Fonte: Rawls e Brakensiek, 1989)

Classe de textura	Porosidade $\phi$	Teor em água residual $\theta_r$	Pressão de entrada de ar $h_{e\text{e}}^{(1),(2)}$	Índice de distribuição dos poros $\lambda^{(1)}$	Condutividade hidráulica à saturação natural $\tilde{K}^{(3)}$
	( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ )	(cm)	(-)	( $\text{cmh}^{-1}$ )
Arenoso (Sand)	0.437 <sup>(4)</sup> (0.374-0.500)	0.020 (0.001-0.039)	3.63 (0.68-19.37)	0.592 (0.334-1.051)	10.500
Arenoso-franco (Loamy sand)	0.437 (0.368-0.506)	0.035 (0.003-0.067)	4.34 (0.90-20.92)	0.474 (0.271-0.827)	3.055
Franco-arenoso (Sandy loam)	0.453 (0.351-0.555)	0.041 (-0.024-0.106)	7.33 (1.72-31.12)	0.322 (0.186-0.558)	1.295
Franco (Loam)	0.463 (0.375-0.551)	0.027 (-0.020-0.074)	5.58 (0.82-38.2)	0.220 (0.137-0.355)	0.660
Franco-limoso (Silt loam)	0.501 (0.420-0.582)	0.015 (-0.028-0.058)	10.38 (1.79-60.2)	0.211 (0.136-0.326)	0.340
Franco-argilo-arenoso (Sandy clay loam)	0.398 (0.332-0.464)	0.068 (-0.001-0.137)	14.04 (2.78-70.75)	0.250 (0.125-0.502)	0.215
Franco-argiloso (Clay loam)	0.464 (0.409-0.519)	0.075 (-0.024-0.174)	12.94 (2.9-57.85)	0.194 (0.100-0.377)	0.115
Franco-argilo-limoso (Silty clay loam)	0.471 (0.418-0.524)	0.040 (-0.038-0.118)	16.28 (3.34-79.35)	0.151 (0.090-0.253)	0.075
Argilo-arenoso (Sandy clay)	0.430 (0.370-0.490)	0.109 (0.013-0.205)	14.58 (2.48-85.8)	0.168 (0.078,0.364)	0.060
Argilo-limoso (Silty clay)	0.479 (0.425-0.533)	0.056 (-0.024-0.136)	17.10 (3.52-83.1)	0.127 (0.074-0.219)	0.045
Argiloso (Clay)	0.474 (0.427-0.523)	0.090 (-0.015-0.195)	18.65 (3.72-93.6)	0.131 (0.068-0.253)	0.030

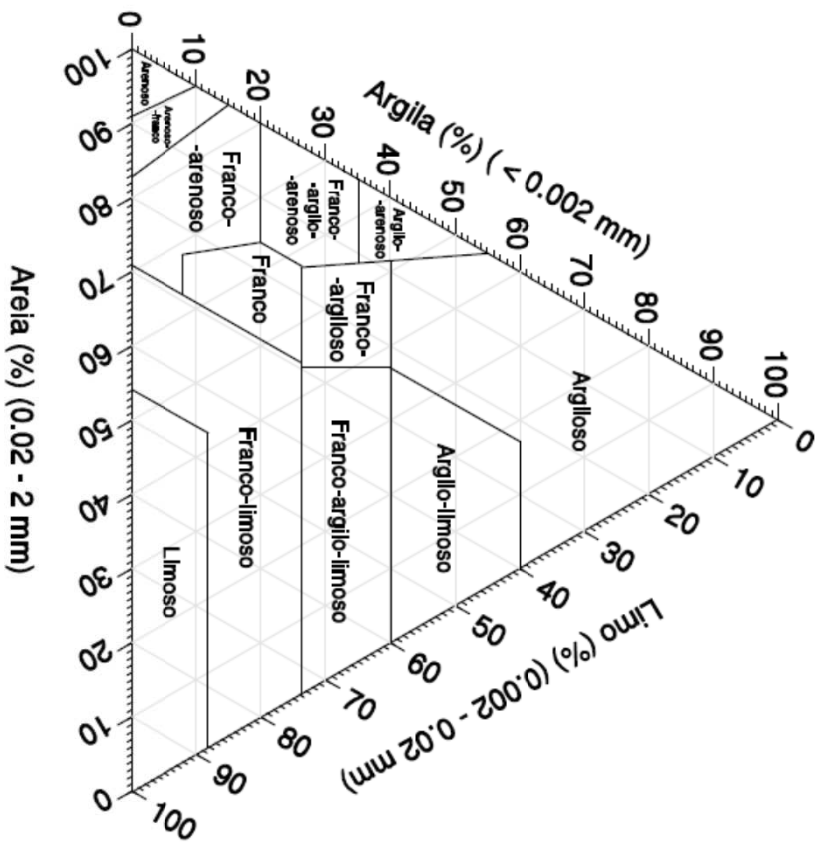


Figura 6 Diagrama para classificação da textura utilizado em Portugal, adaptado aos limites internacionais das fracções granulométricas, por M. Pereira Gomes e Antunes da Silva (Fonte: Costa, 1985)

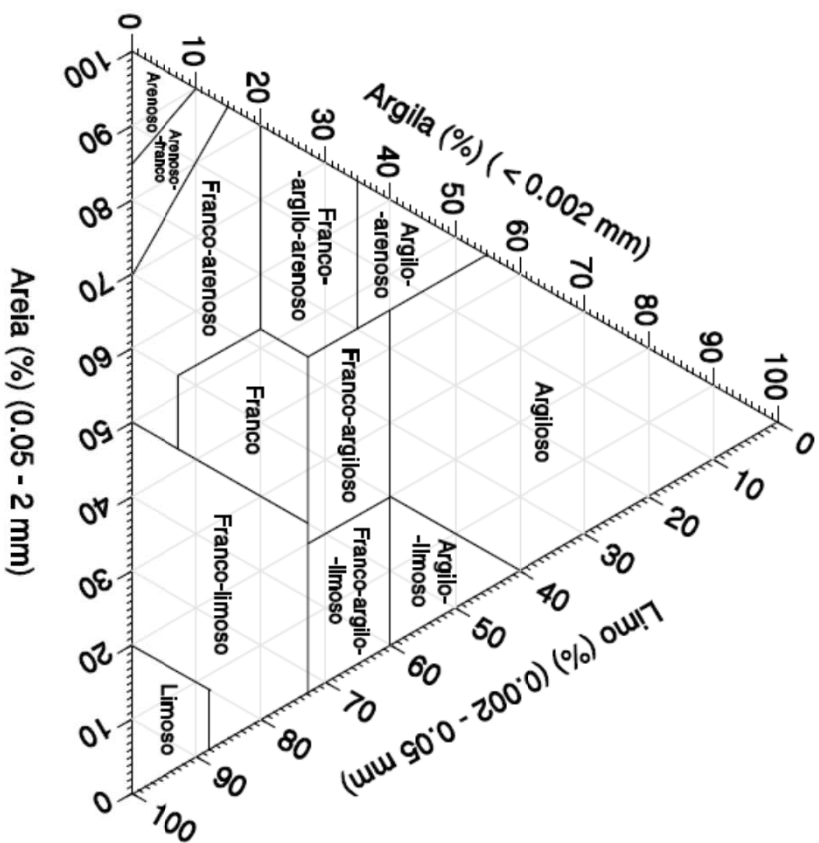
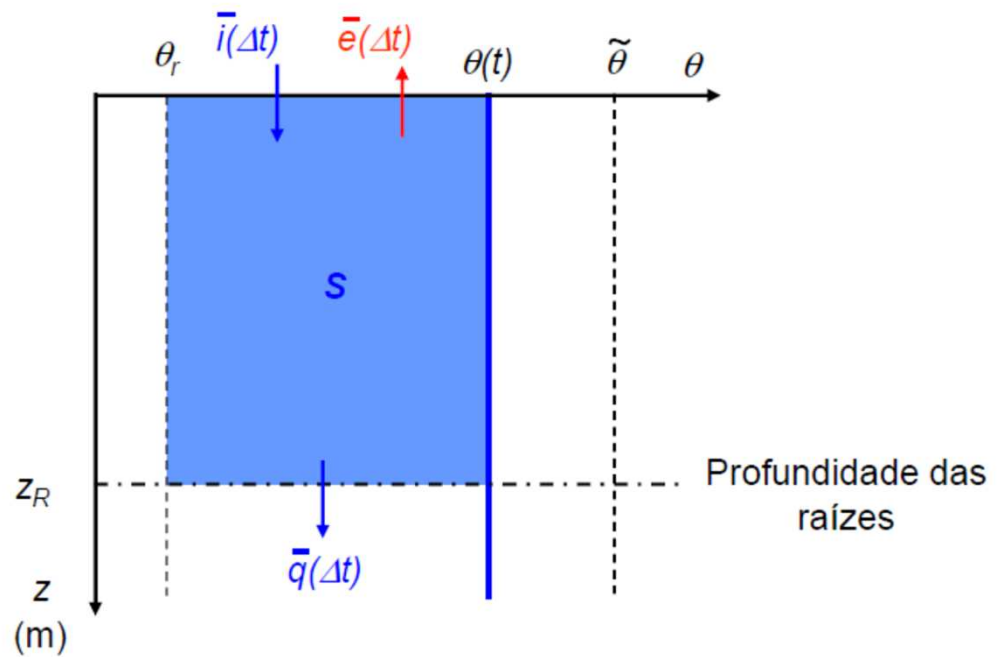


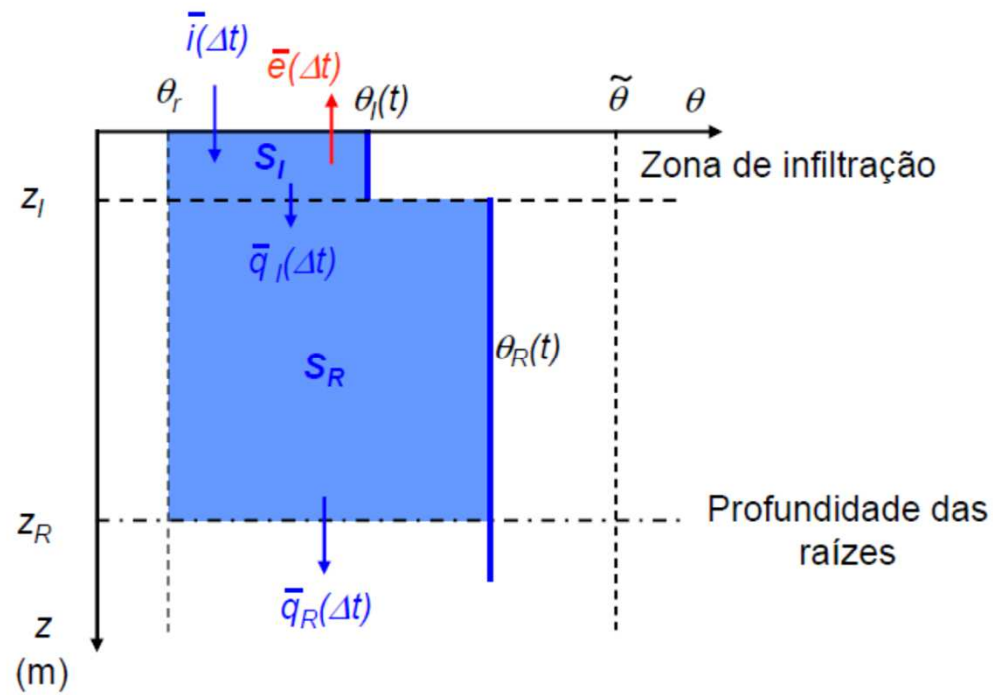
Figura 7 Diagrama para classificação da textura segundo o esquema adaptado no Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) (Fonte: Costa, 1985)

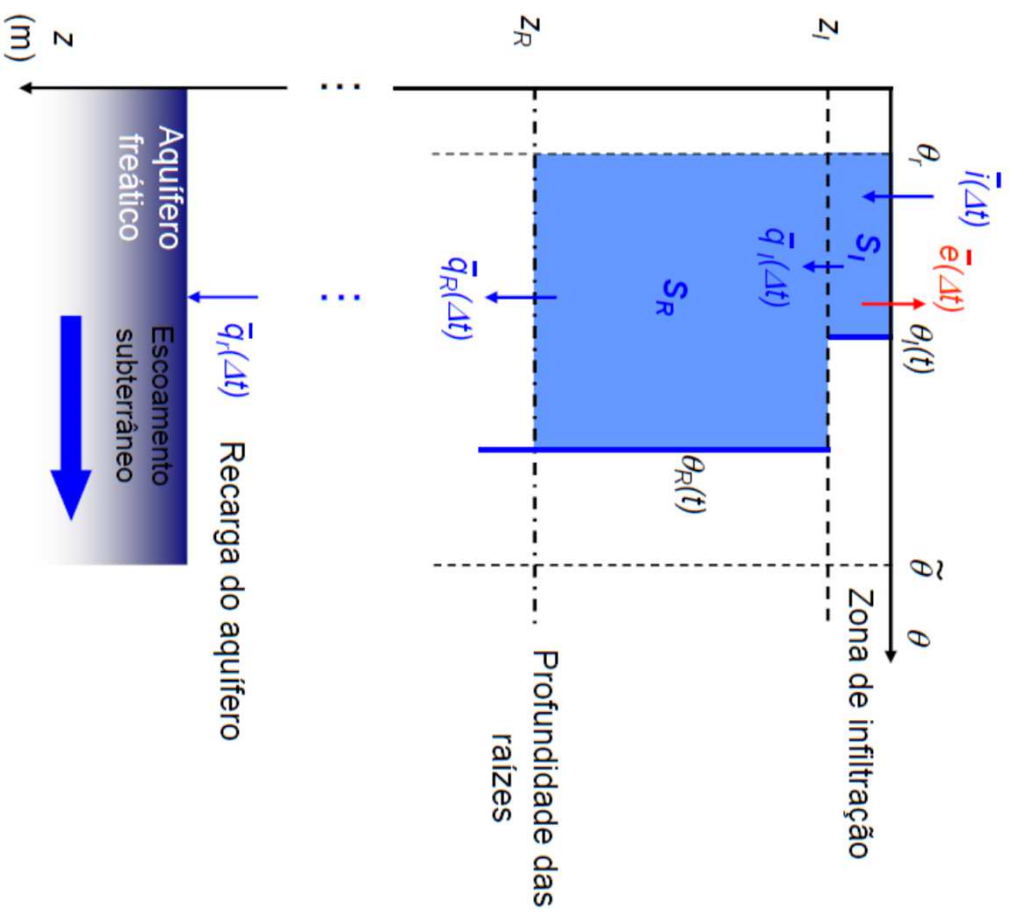
$\Delta t = 1 \text{ dia}$

Neste caso é aceitável substituir o perfil real de teor em água do solo por um perfil uniforme



Mas é mais realista considerar **dois estratos**, um superficial, activo no processo de infiltração e de evaporação, e o outro até ao limite explorado pelas raízes

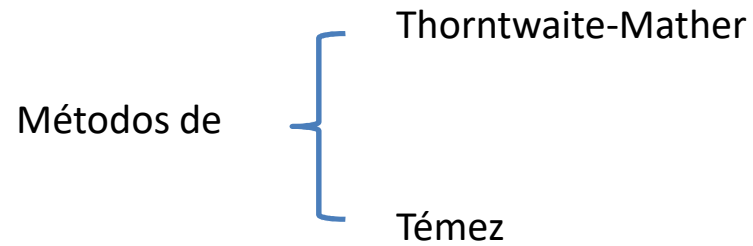




Representação da coluna de meio poroso não saturado até atingir o aquífero freático



$\Delta t = 1 \text{ mês}$



- correspondem à aplicação do balanço hidrológico
- são uma forma simplificada de acompanhar o teor em água do solo, permitindo calcular a ET e os escoamentos superficial e subterrâneo

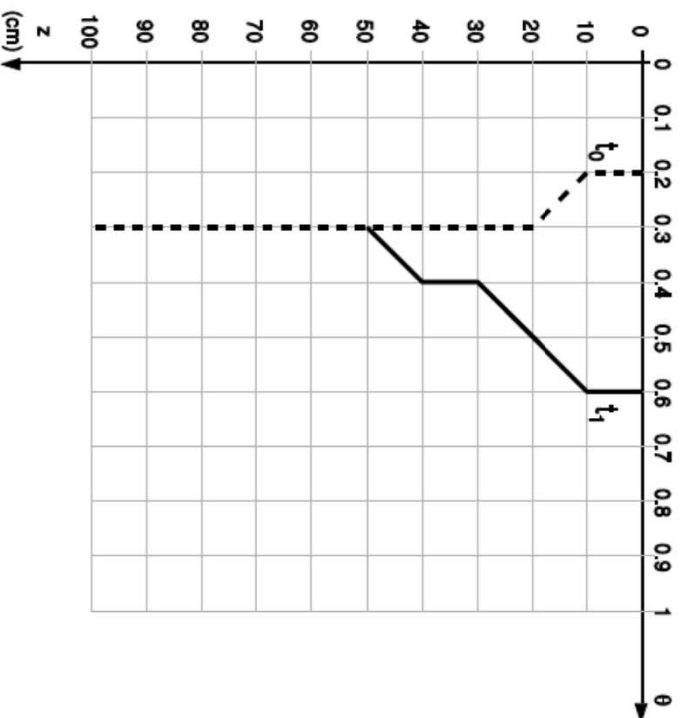
$$\Delta t = 1 \text{ ano}$$

Neste caso não é necessário acompanhar a evolução do armazenamento de água no solo

$$\Delta S = 0$$

## Exercícios

1. A figura representa dois perfis hídricos medidos antes ( $t_0$ ) e depois ( $t_1$ ) de uma chuvada.



- Qual foi a altura de água infiltrada?
- Sabendo que para a chuvada o coeficiente de escoamento é de 30%, estime qual foi a quantidade de água precipitada.

Utilizaram-se tensiómetros para medir a carga hidráulica de um solo, a diferentes profundidades, antes e imediatamente após uma chuvada (ver Quadro)

**Quadro 2** Carga hidráulica a diferentes profundidades

	Antes da chuvada	Depois da chuvada
<b>z (cm)</b>	<b>H (cm)</b>	<b>H (cm)</b>
5	-625	-35
20	-424	-58
40	-285	-109
60	-191	-174
80	-125	-125
100	-111	-111
110	-110	-110

As características hidrodinâmicas do solo são dadas pelas equações de Brooks e Corey:

$$h_c = h_{ce} \left( \frac{\theta - \theta_r}{\bar{\theta} - \theta_r} \right)^{-M}$$

e

$$K = \tilde{K} \left( \frac{\theta - \theta_r}{\bar{\theta} - \theta_r} \right)^p$$

com:  $\tilde{K} = 40 \text{ mm d}^{-1}$ ,  $h_{ce} = 15 \text{ cm}$ ,  $\bar{\theta} = 0.4$ ,  $\theta_r = 0.06$  e  $M = 3.5$

- Trace os perfis de pressão efectiva e da carga hidráulica, para ambas as situações. Analise o sentido dos fluxos de água.
- Determine o teor em água 12 h após o fim da chuvada, considerando que a evaporação do solo é de 4 mm/dia, distribuída uniformemente durante o dia e que não ocorre extracção radicular