



REGA E DRENAGEM

2. 1 NECESSIDADES DE ÁGUA PARA REGA

2.1.2. RELAÇÕES SOLO/ÁGUA

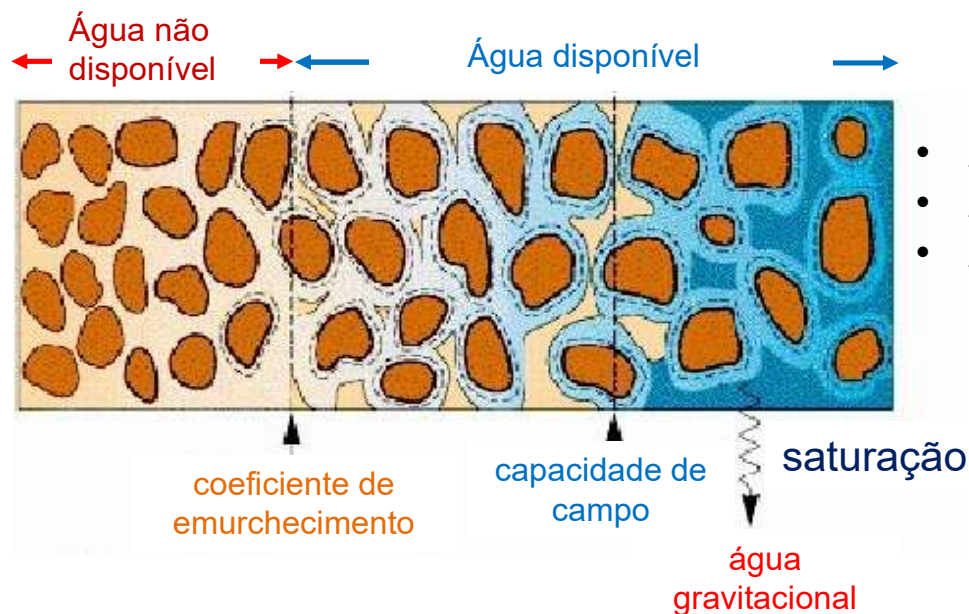
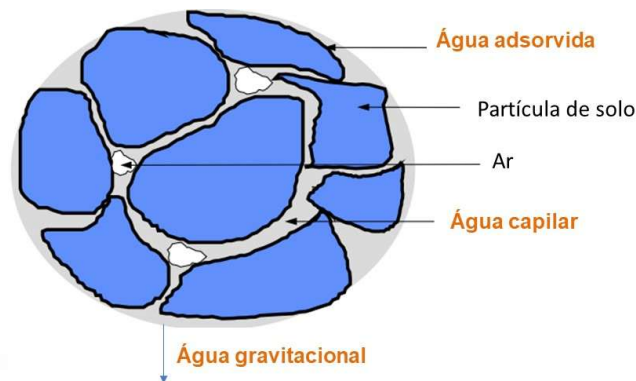
- Conceitos de base relativos à água no solo
- RU, RFU, LRFU, MAD

2.1.3. DOTAÇÃO TOTAL DE REGA

- Balanço hídrico do solo com/sem stress hídrico

1. CONCEITOS

A água do solo pode encontrar-se em três formas



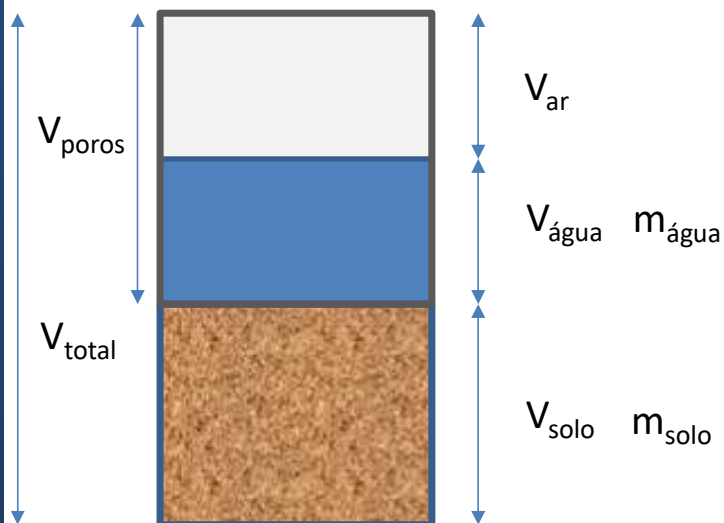
- Água gravitacional
- Água capilar
- Água adsorvida ou higroscópica

0 → -10/-33 kPa	(pF 0 a 2.0/2.5)
-10/-33 kPa → -1550 kPa	(pF 2.0/2.5 a 4.2)
< -1550 kPa	(pF > 4.2)

$$pF = \log |p/\gamma|, \text{ com } p/\gamma \text{ em cm}$$

$$0.8 \text{ atm} \approx pF 3$$

Principais grandezas



ρ_{quartzo} 2650 kg/m³
 d_{ap} 1.2 - 1.6

Grandeza	Eq definição	Unidades
Massa volúmica aparente do solo	$\rho = \frac{m_{\text{solo}}}{V_{\text{total}}}$	kg/m ³
Massa volúmica (real) do solo	$\rho_r = \frac{m_{\text{solo}}}{V_{\text{solo}}}$	kg/m ³
Densidade aparente	$d_{\text{ap}} = \frac{\rho}{\rho_{\text{água}}}$	—
Porosidade do solo	$\phi = \frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{total}}} = 1 - \frac{\rho}{\rho_r}$	— (%)
Grau de saturação	$s = \frac{V_{\text{água}}}{V_{\text{poros}}}$	— (%)
Teor de água ponderal / mássico	$\theta_p = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{solo}}}$	kg / kg
Teor de água volúmico	$\theta = \frac{V_{\text{água}}}{V_{\text{total}}} = d_{\text{ap}} \times \theta_p = s \phi$	m ³ / m ³

Armazenamento total de água

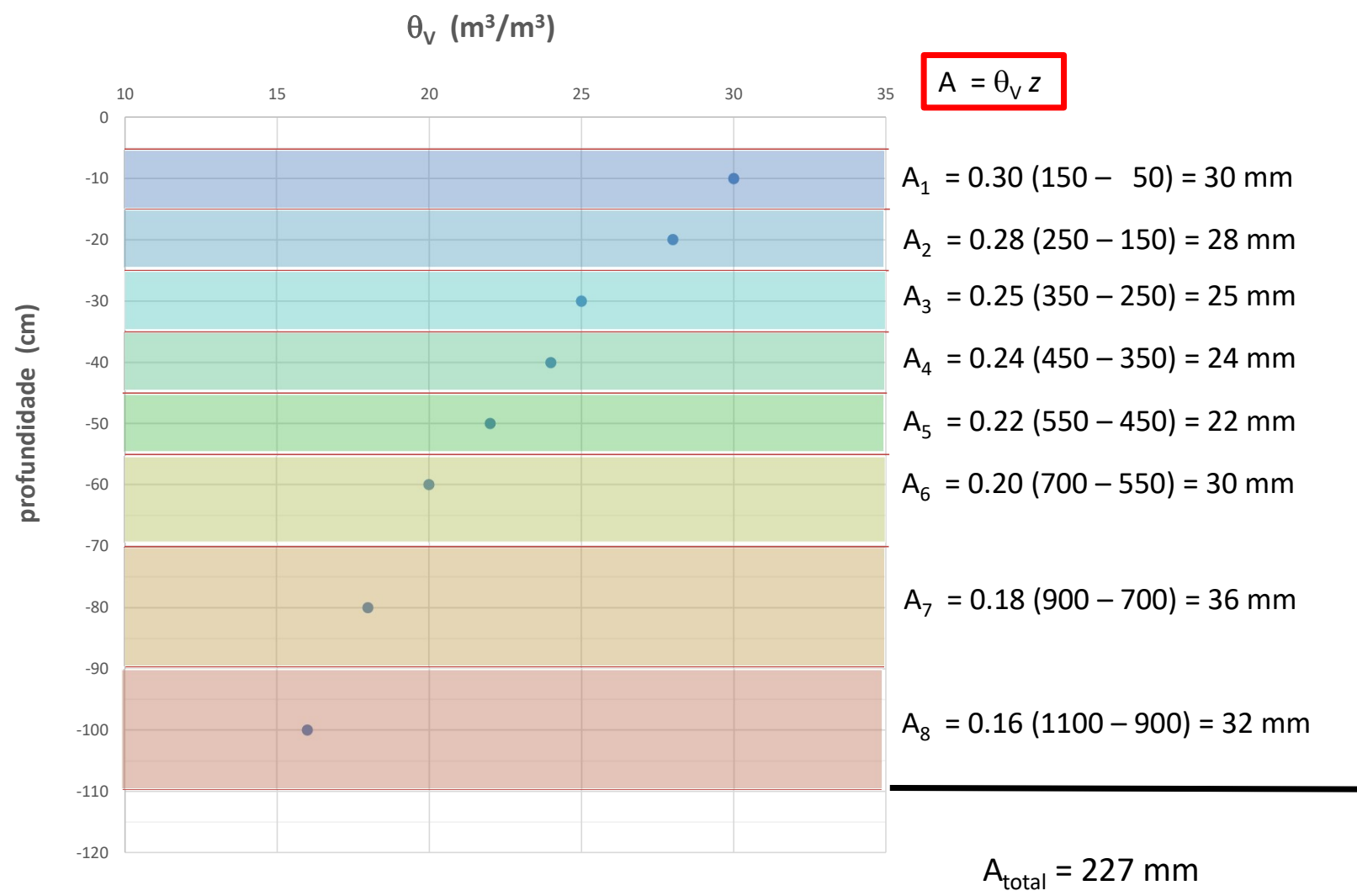
$$V_{\text{água}} = \theta \times V_{\text{total}} = \theta \times A_{\text{sup}} \times z$$

$$\frac{V_{\text{água}}}{A_{\text{sup}}} = A = \theta \times z$$

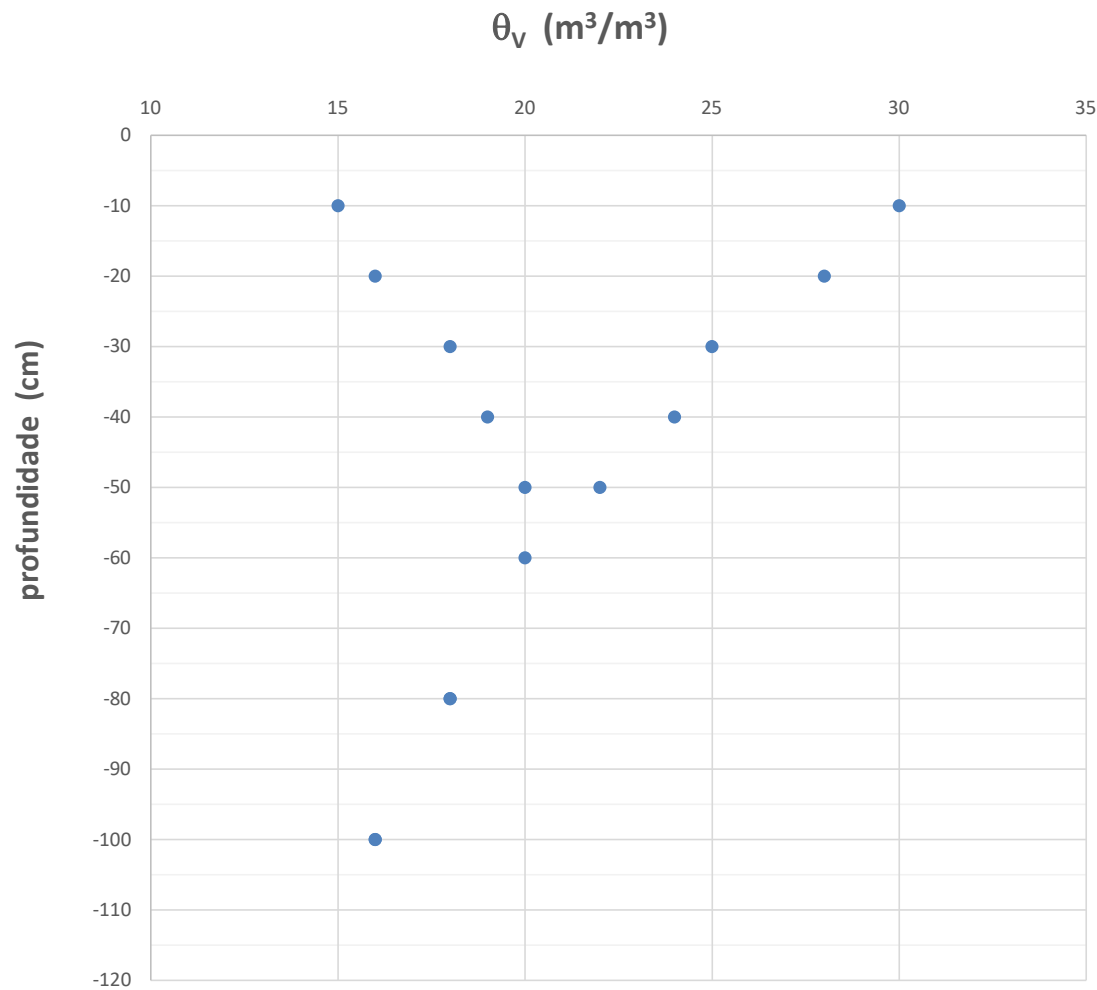
A = armazenamento (total) [L]

↓
mm = L/m²

Armazenamento total de água num perfil de solo



Variação do armazenamento total de água entre duas medições



$A_1 = 30 \text{ mm}$	$A_{1f} = 15 \text{ mm}$	$\Delta A_1 = -15 \text{ mm}$
$A_2 = 28 \text{ mm}$	$A_{2f} = 16 \text{ mm}$	$\Delta A_2 = -12 \text{ mm}$
$A_3 = 25 \text{ mm}$	$A_{3f} = 18 \text{ mm}$	$\Delta A_3 = -7 \text{ mm}$
$A_4 = 24 \text{ mm}$	$A_{4f} = 19 \text{ mm}$	$\Delta A_4 = -5 \text{ mm}$
$A_5 = 22 \text{ mm}$	$A_{5f} = 20 \text{ mm}$	$\Delta A_5 = -2 \text{ mm}$
$A_6 = 30 \text{ mm}$	$A_{6f} = 30 \text{ mm}$	$\Delta A_6 = 0 \text{ mm}$
$A_7 = 36 \text{ mm}$	$A_{7f} = 36 \text{ mm}$	$\Delta A_7 = 0 \text{ mm}$
$A_8 = 32 \text{ mm}$	$A_{8f} = 32 \text{ mm}$	$\Delta A_8 = 0 \text{ mm}$
$A_{\text{total}} = 227 \text{ mm}$	$A_{\text{total}} = 186 \text{ mm}$	$\Delta A_{\text{total}} = -41 \text{ mm}$

Maneiras de exprimir a água no solo

- **Teor de água** (ponderal, volumétrico)
- (Energia) **potencial**

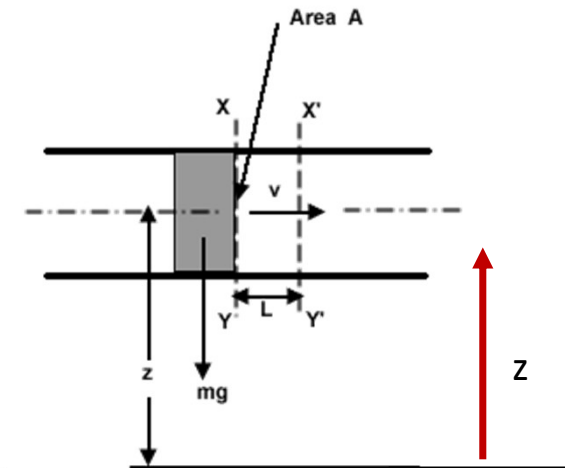
Formas de energia:

- Energia potencial = mgz
- Energia cinética = $\frac{1}{2} mv^2$
- Energia devida à pressão = $p m / \rho$

$$[E=W = F d = pAL= pV = p m/\rho]$$

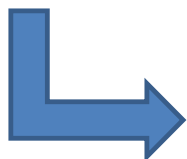
Energia total = energia potencial + energia cinética + energia de pressão

desprezam-se as variações de temperatura (energia interna)



		Energia potencial	Energia cinética	Energia da pressão	Unidade
ϕ :	Energia por unidade de massa	$g z$	$\frac{1}{2} v^2$	p/ρ	$m^2 s^{-2}$
ψ	Energia por unidade de volume	$\rho g z$	$\frac{1}{2} \rho v^2$	p	Pa
H	Energia por unidade de peso	z	$\frac{1}{2} v^2/g$	p/γ	m

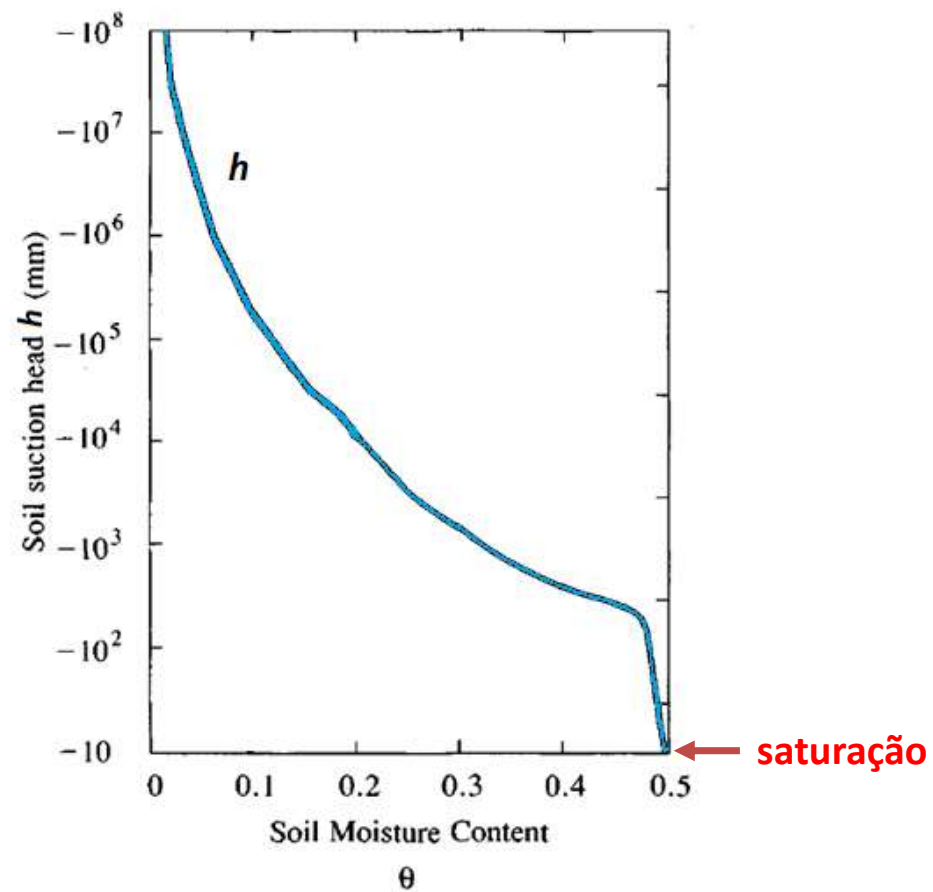
alturas



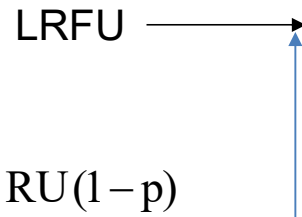
Carga hidráulica

$$H = z + h \quad (+ \cancel{v^2/2g}) \quad \text{despreza-se}$$

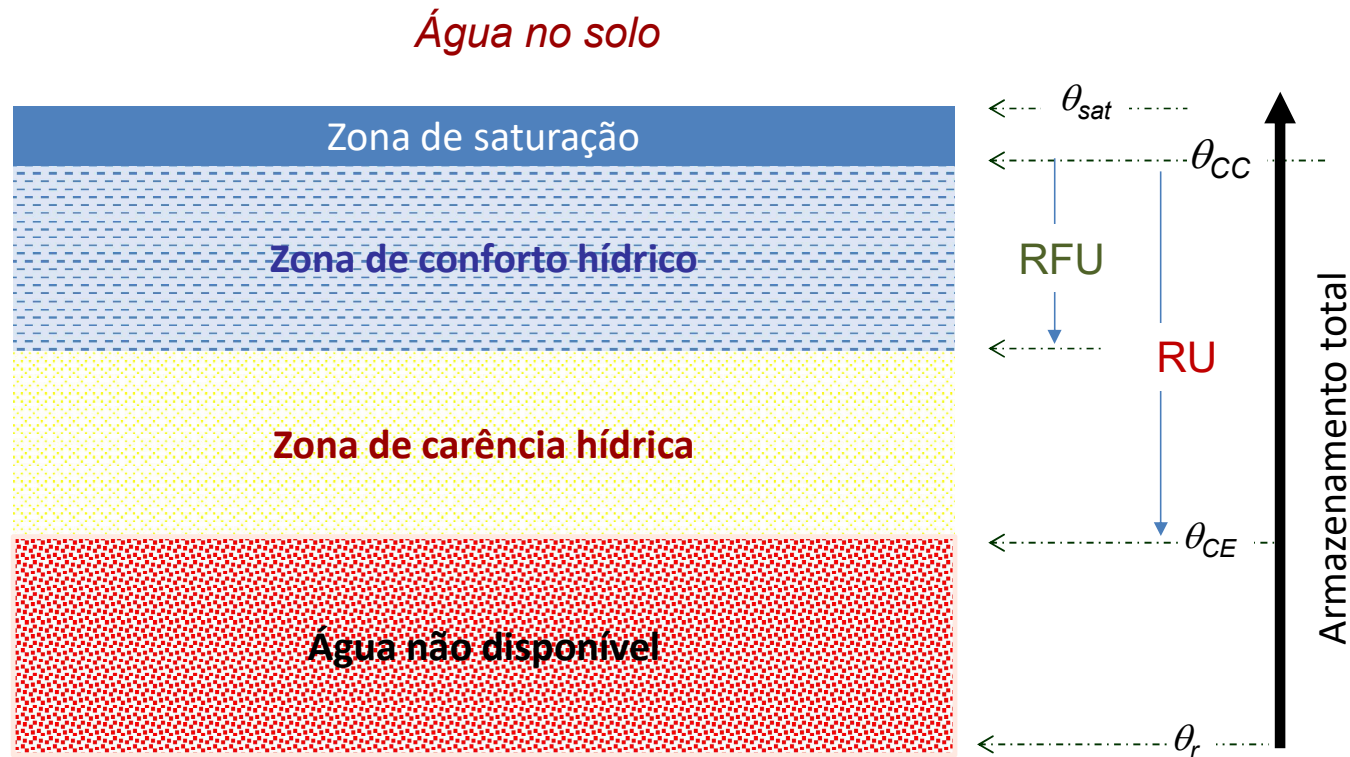
Curva característica – relaciona o teor de água com o potencial hídrico



Limite da reserva facilmente utilizável (LRFU): valor mínimo da água no solo abaixo do qual a planta entra em situação de carência hídrica



$$\text{LRFU} = \text{RU} - \text{RFU} = \text{RU}(1 - p)$$



➤ **Reserva utilizável (RU, mm)**

$$\text{RU} = (\text{CC} - \text{CE}) \times 1000 \times z$$

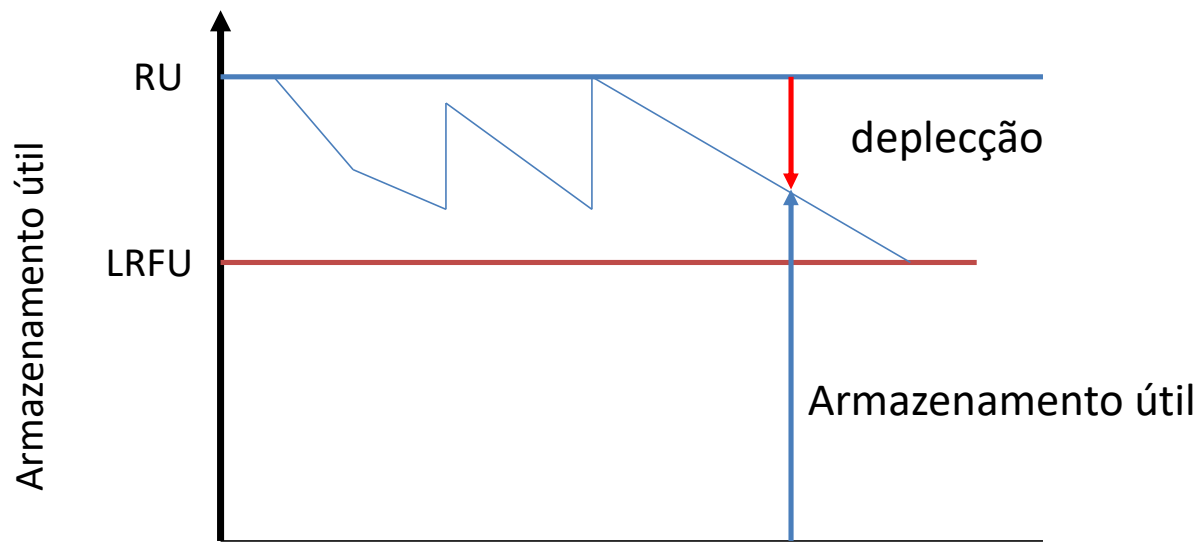
CC e CE em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e z em m

➤ **Reserva facilmente utilizável (RFU, mm)**

parte da RU utilizada em situação de conforto hídrico das culturas

$$\text{RFU} = \text{RU} \times p$$

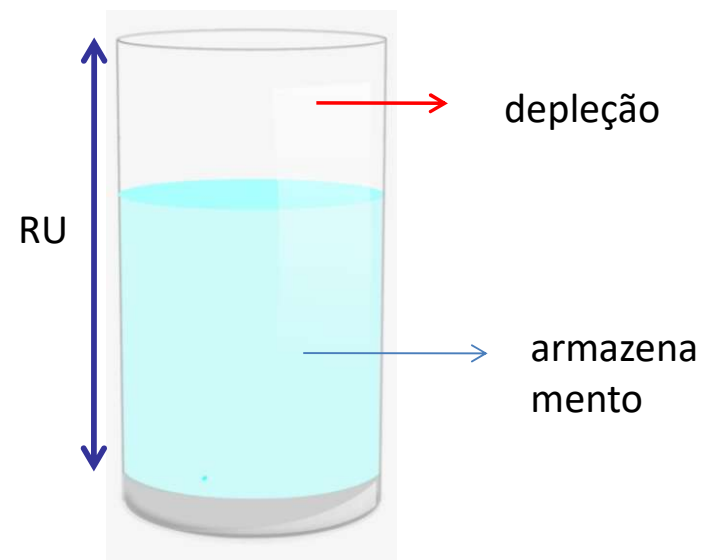
p é a fracção facilmente utilizável (adim)

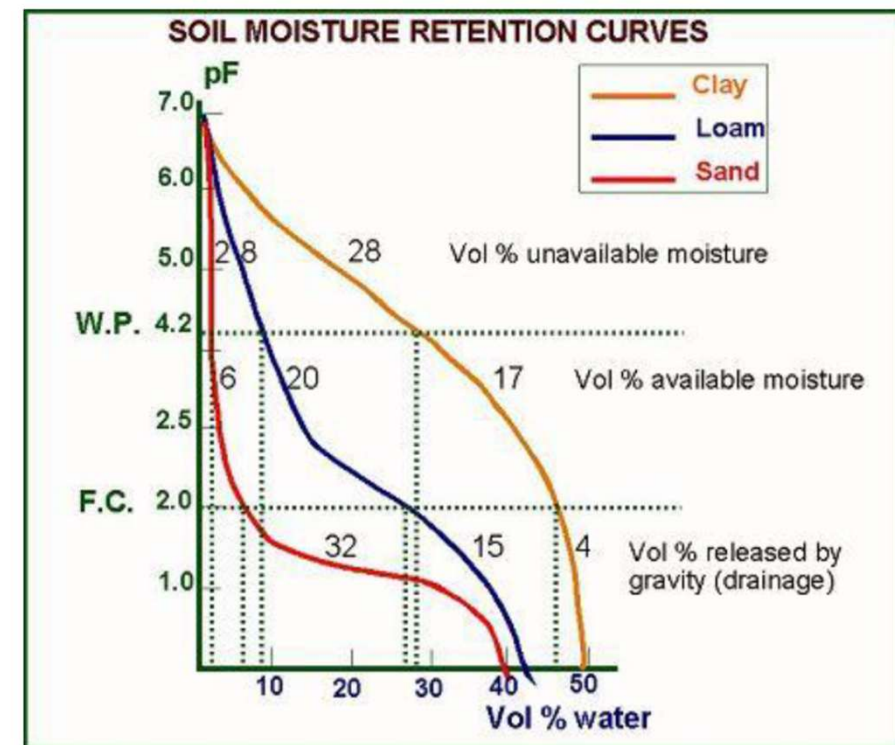


Armazenamento útil = armazenamento acima do CE

RU = TAW (*total available water*)
RFU = RAW (*readily available water*)

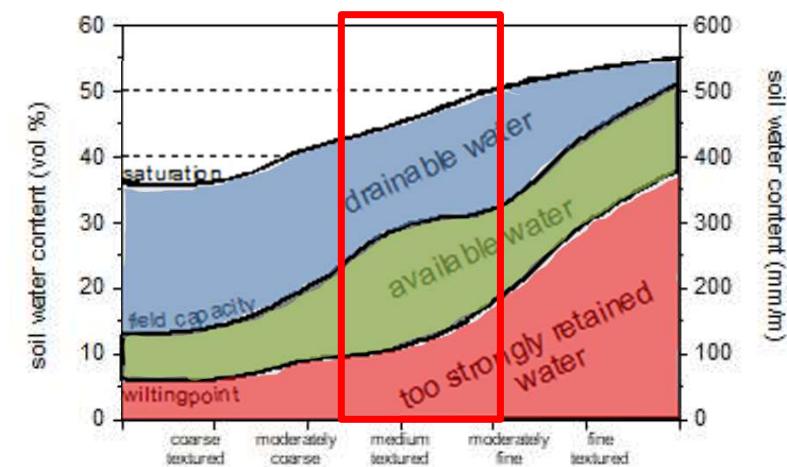
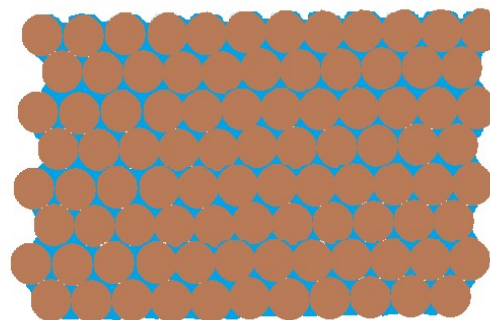
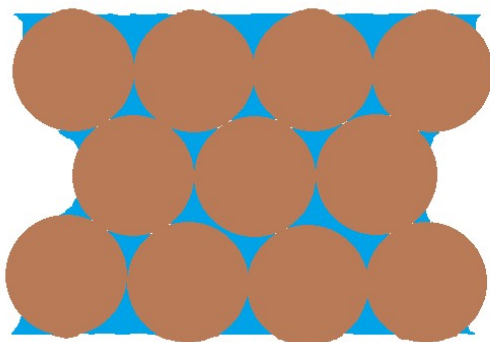
**Armazenamento útil + depleção
= reserva utilizável**





Allen *et al.* (1998)

	θ_{cc}	θ_{ce}	$(\theta_{cc} - \theta_{ce})$
	m^3/m^3	m^3/m^3	m^3/m^3
Sand	0.07 - 0.17	0.02 - 0.07	0.05 - 0.11
Loamy sand	0.11 - 0.19	0.03 - 0.10	0.06 - 0.12
Sandy loam	0.18 - 0.28	0.06 - 0.16	0.11 - 0.15
Loam	0.20 - 0.30	0.07 - 0.17	0.13 - 0.18
Silt loam	0.22 - 0.36	0.09 - 0.21	0.13 - 0.19
Silt	0.28 - 0.36	0.12 - 0.22	0.16 - 0.20
Silt clay loam	0.30 - 0.37	0.17 - 0.24	0.13 - 0.18
Silty clay	0.30 - 0.42	0.17 - 0.29	0.13 - 0.19
Clay	0.32 - 0.40	0.20 - 0.24	0.12 - 0.20



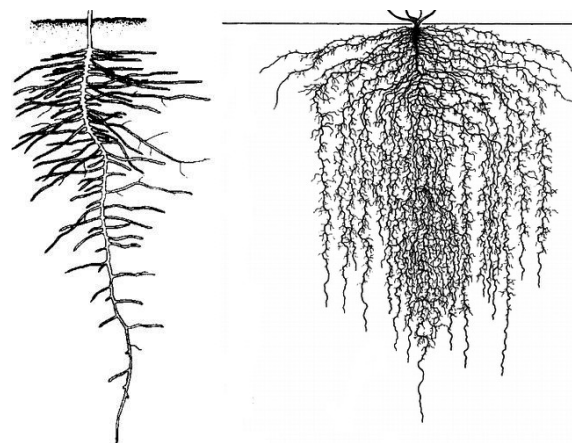
A fracção facilmente utilizável (p) varia com:

- Tipo de cultura
- Tipo de solo

p pode ser diminuído 5-10% em solos argilosos e
aumentado em solos arenosos

- Desenvolvimento radicular

- ET_c $p = p_{\text{tabela}} + 0.04 (5 - ET_c)$



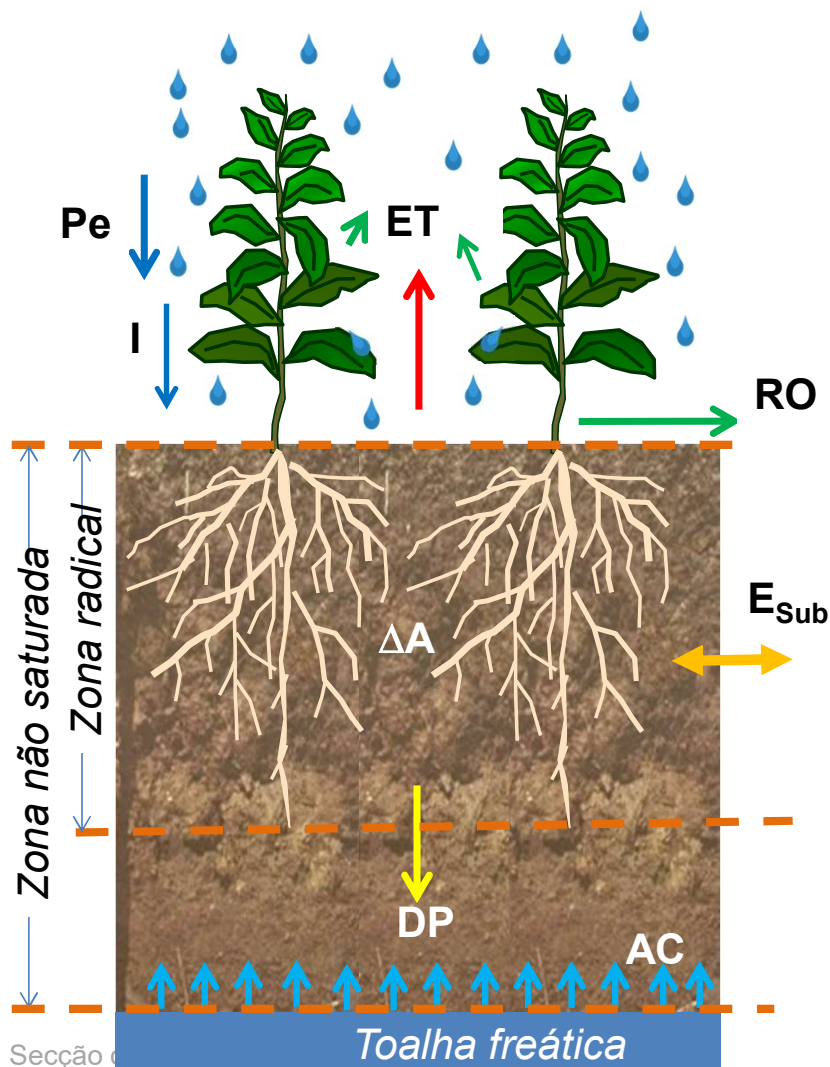
Crop	p
Carrots	0.30
Garlic	0.30
Radish	0.30
Cabbage	0.40
Lettuce	0.30
Spinach	0.20
Bell pepper	0.30
Strawberries	0.25
Tomato	0.40
Watermelon	0.40

Sunflower	0.45
Barley	0.55
Oats	0.55
Wheat	0.55
Maize	0.50

Alfalfa Hay	0.55
Grazing Pasture	0.60

Balanço hídrico na zona explorada pelas raízes

Componentes do balanço hídrico na zona explorada pelas raízes



Variação do armazenamento = entradas – saídas

Entradas:

Pe – precipitação efectiva

I – rega

AC – ascensão capilar

Saídas:

RO – Escoamento superficial

DP – Percolação ou drenagem profunda

ET – Evapotranspiração

$ET = (K_s)K_c ETo$

ΔA – variação do armazenamento

$\Delta A = A(t_2) - A(t_1)$

$A = \theta \times z$

Todos os termos em mm

$$\Delta A = [(Pe + I + AC) - (RO + DP + ET)]_{1 \rightarrow 2}$$

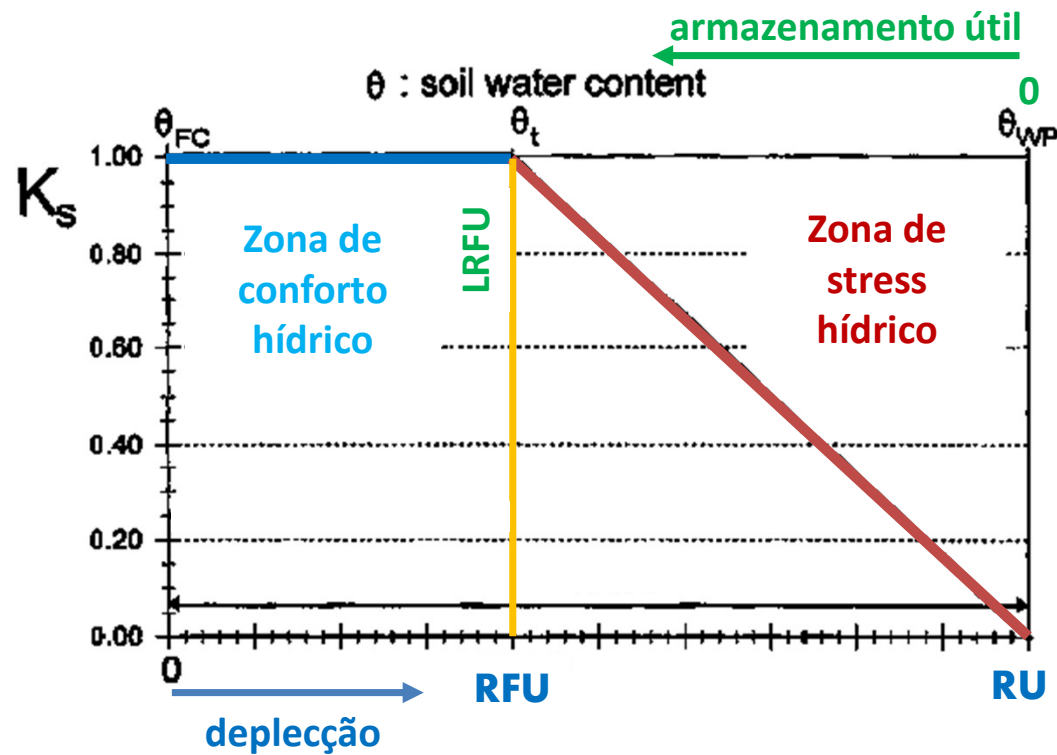
$$\text{Se } A_2 > A_{cc} \Rightarrow DP = A_2 - A_{cc}$$

➤ Quando **Dep < RFU**
A > LRFU

$$K_s = 1$$

➤ Quando **Dep > RFU**
A < LRFU

$$K_s = \frac{RU - D_p}{RU - RFU} = \frac{A}{LRFU}$$



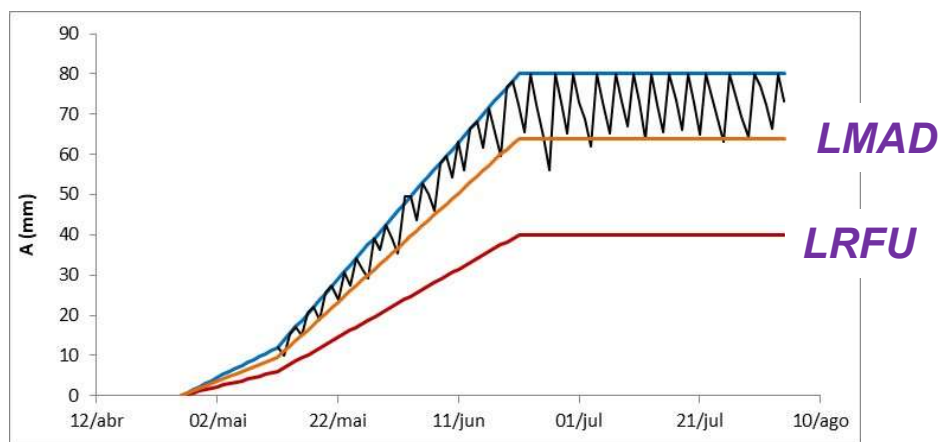
$$ET_{adj} = K_s K_c ET_o = K_s ET_c$$

$$ET_{adj} = (K_s K_{cb} + K_e) ET_o$$

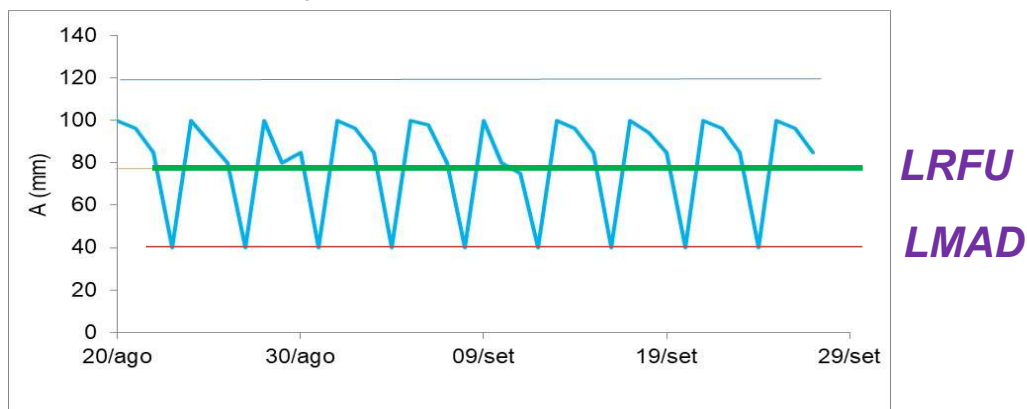
MAD (maximum allowed depletion) – deplecção de gestão admitida (mm/ fracção da RU)

MAD < RFU - a cultura é mantida em conforto hídrico

Ex: condução da rega gota-a-gota com alta frequência e pequenas dotações; culturas muito sensíveis ao stress



MAD > RFU - a cultura é sujeita intencionalmente a stress hídrico



MAD a adoptar para conduzir ao K_s médio indicado, considerando que as regas preenchem a RU

K_s médio	$p = 0.3$	$p = 0.4$	$p = 0.5$	$p = 0.6$	$p = 0.7$
1.00	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70
0.95	0.47	0.57	0.66	0.75	0.86
0.90	0.55	0.65	0.73	0.81	0.88
0.85	0.62	0.71	0.79	0.86	—
0.80	0.68	0.76	0.83	0.89	—
0.75	0.74	0.80	0.87	—	—
0.70	0.78	0.84	0.89	—	—
0.65	0.82	0.88	—	—	—
0.55	0.90	—	—	—	—
0.50	—	—	—	—	—

Exercício

Estime para cada dia do período de 10 dias apresentado o armazenamento e a depleção de água no solo, considerando que no início, devido às precipitações, o solo estava à CC e que no fim do 8º dia é efectuada uma rega de 27 mm. Considere os seguintes dados adicionais:

$\theta_{CC} = 0.21 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $\theta_{CE} = 0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $z_r = 0.4 \text{ m}$ $p = 0.3$

Nota: ajuste o *p* de acordo com a *ETc* do dia

Dia	ET _c mm	P-RO mm	I mm	DP mm	p -	RFU mm	A mm	Dep mm	K _s -	ET _{c,adj} mm
0	-	-	-	-	-	-				
1	5.3	0	0							
2	5.0	15	0							
3	5.3	0	0							
4	5.5	0	0							
5	5.4	0	0							
6	5.6	0	0							
7	5.8	0	0							
8	6.3	0	27							
9	5.7	0	0							
10	5.5	0	0							

Resolução

$\theta_{CC} = 0.21 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $\theta_{CE} = 0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $z_r = 0.4 \text{ m}$ $p = 0.3$

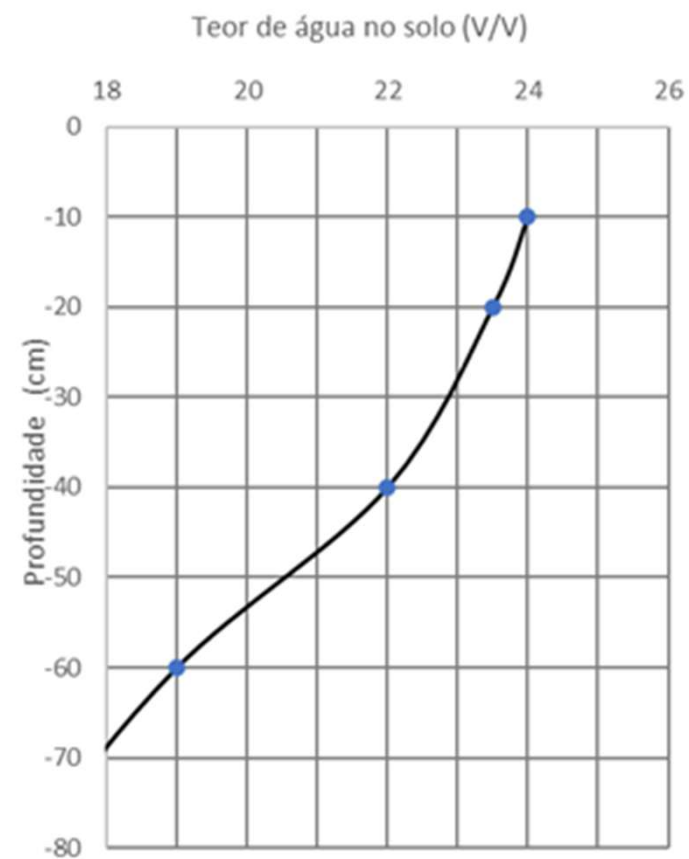
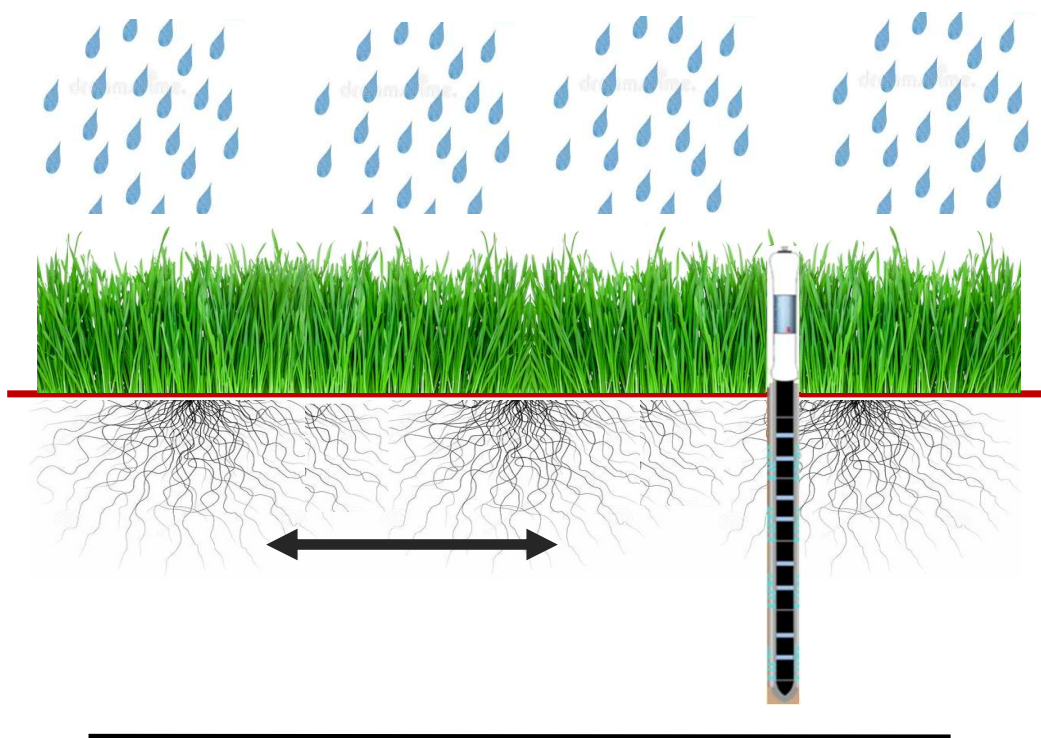
$RU = (0.21 - 0.08) \times 400 = 52 \text{ mm}$

Dia	ET _c mm	P-RO mm	I mm	DP mm	p -	RFU mm	A(*) mm	Dep mm	K _s -	ET _{c,adj} mm
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	5.3	0	0	4.7	0.29	15.1	52.0	0.0	1.00	5.3
2	5.0	15	0		0.30	15.5	46.7	5.3	1.00	5.0
3	5.3	0	0		0.29	15.1	52.0	0.0	1.00	5.3
4	5.5	0	0		0.28	14.6	46.7	5.3	1.00	5.5
5	5.4	0	0		0.29	14.9	41.2	10.8	1.00	5.4
6	5.6	0	0		0.28	14.4	35.8	16.2	0.95	5.3
7	5.8	0	0		0.27	14.0	30.5	21.5	0.80	4.7
8	6.3	0	27		0.25	12.9	25.8	26.2	0.66	4.2
9	5.7	0	0		0.27	14.2	48.6	3.4	1.00	5.7
10	5.5	0	0		0.28	14.6	42.9	9.1	1.00	5.5

(*) A no início do dia = A no final do dia anterior

Balanço hídrico na zona explorada pelas raízes

- Precipitação
- Rega por aspersão

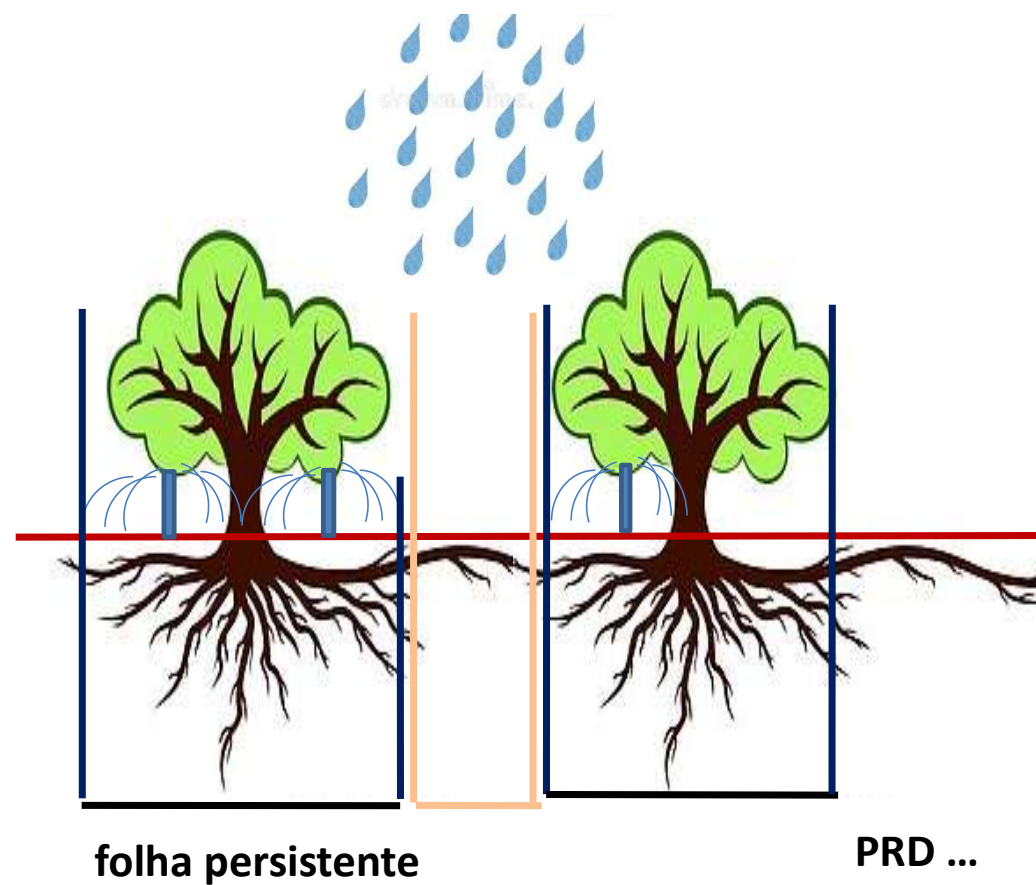
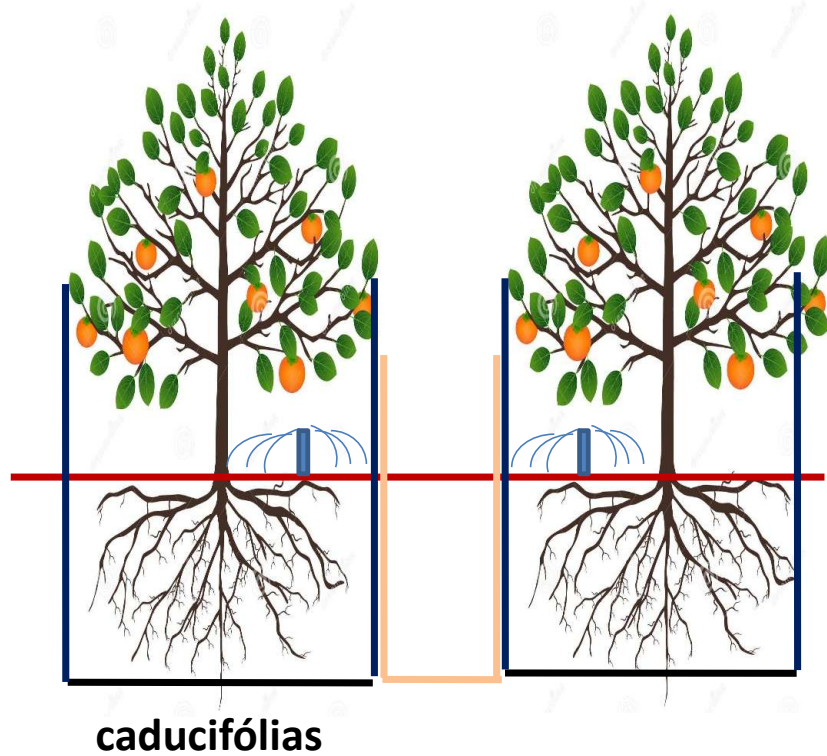


Sistema radicular
Humidade do solo

Balanço hídrico na zona explorada pelas raízes

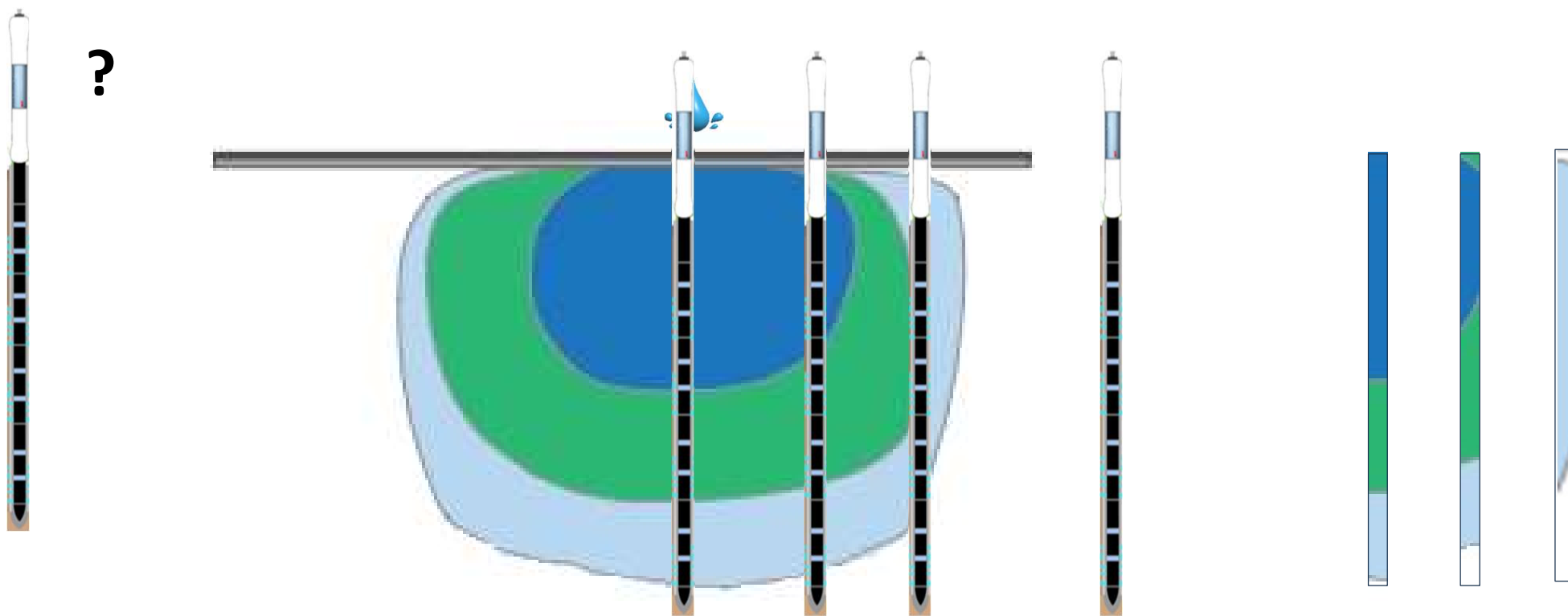
- Rega localizada

Sistema radicular



- Rega localizada

Humidade do solo



Balanço hídrico do solo para todo o ciclo da cultura

O conhecimento das necessidades hídricas totais é importante, por exemplo:

- Dimensionamento de reservatórios
- Determinação da área possível de regar
- Programação da rega

Profundidade radicular numa cultura anual não é constante ao longo do ciclo

Na fase de desenvolvimento vegetativo, o sistema radicular também vai desenvolver-se em profundidade e a equação do balanço hídrico deve ser ajustada de forma a considerar o aumento do armazenamento devido ao aumento do volume de solo explorado

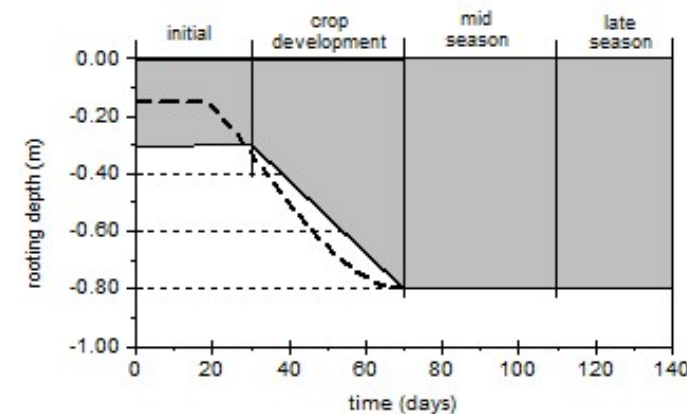
$$\Delta A = Pe + I + AC - (RO + DP + ET) + A_{\Delta z}$$

$$A_{\Delta z} = A_{SNE} * \Delta z_r$$

$A_{\Delta z}$ – aumento do armazenamento de água no solo devido à expansão das raízes (mm)

A_{SNE} – armazenamento de água no solo ainda não explorado pelas raízes (mm/m) ($= \theta - \theta_{CE}$) $\times 1000$

Δz_r – aumento da profundidade radicular durante o Δt considerado (m)



Balanço hídrico do solo para todo o ciclo da cultura

Normalmente assume-se que a expansão do sistema radicular ocorre linearmente durante a fase de desenvolvimento

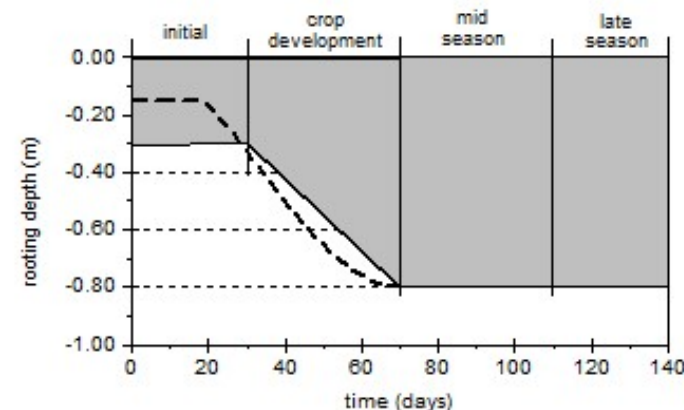
$$\Delta z_r = \frac{z_{r \text{ máx}} - z_{r \text{ ini}}}{L_{dev}} \Delta t$$

$z_{r \text{ máx}}$ – profundidade radicular máxima (no fim do período de desenvolvimento (m))

$z_{r \text{ ini}}$ – profundidade radicular no início do período de desenvolvimento (m)

L_{dev} – duração do período de desenvolvimento (dias)

Δt – passo de cálculo (dias)



O teor de água no solo ainda não explorado pelas raízes pode ser obtido fazendo um balanço hídrico independente.

Fase inicial (1)

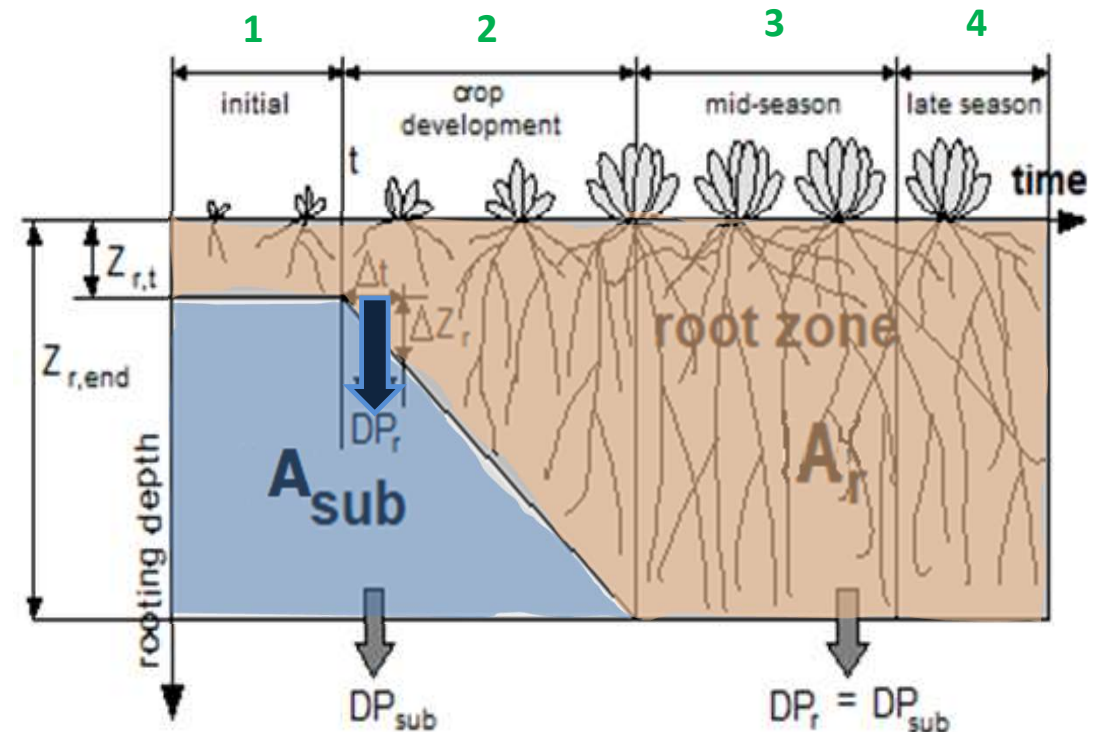
$$\Delta A_{\text{sub}} = DP_r - DP_{\text{sub}}$$

$$\Delta A = Pe + I + AC - (RO + DP_r + ET) + A_{\Delta z}$$

$$\Delta A_{\text{sub}} = DP_r - DP_{\text{sub}} - A_{\Delta z}$$

$$\Delta A = Pe + I + AC - (RO + DP_r + ET)$$

$$DP_{sub} = DP_r ; A_{sub} = 0$$



Necessidades líquidas de rega (necessidades úteis de rega) para o ciclo completo

$$\text{NRL} = \text{ET} - \text{Pe} - \text{AC} + \text{RO} + \text{DP} - \Delta\text{A}$$

ET – evapotranspiração da cultura na totalidade do ciclo

Pe – precipitação efectiva

RO – escoamento superficial

DP – drenagem profunda

AC – ascensão capilar

ΔA – variação do armazenamento do solo entre o início e o final do ciclo

Exercício

Com base nos dados fornecidos (Dados_BH_ciclo.xls):

1. Calcular as necessidades úteis de rega anuais , com:

- $\theta_{CC} = 28\% \text{ (V/V)}$; $\theta_{CE} = 15\% \text{ (V/V)}$; $z_{r\ ini} = 20 \text{ cm}$ $z_{r\ máx} = 1 \text{ m}$
- à sementeira o armazenamento está a 90% da Reserva Utilizável do solo
- $p_{ini} = 0.6$ resto do ciclo $p = 0.4$
- não se rega no mês de Setembro