



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DO SOLO  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM MANEJO DO SOLO



Campo Verde – (MT)

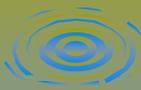
**Água no Solo e Manejo da Irrigação**

**Relação Água Solo Planta  
Infiltração**

*Prof. Marcos Vinicius Folegatti*

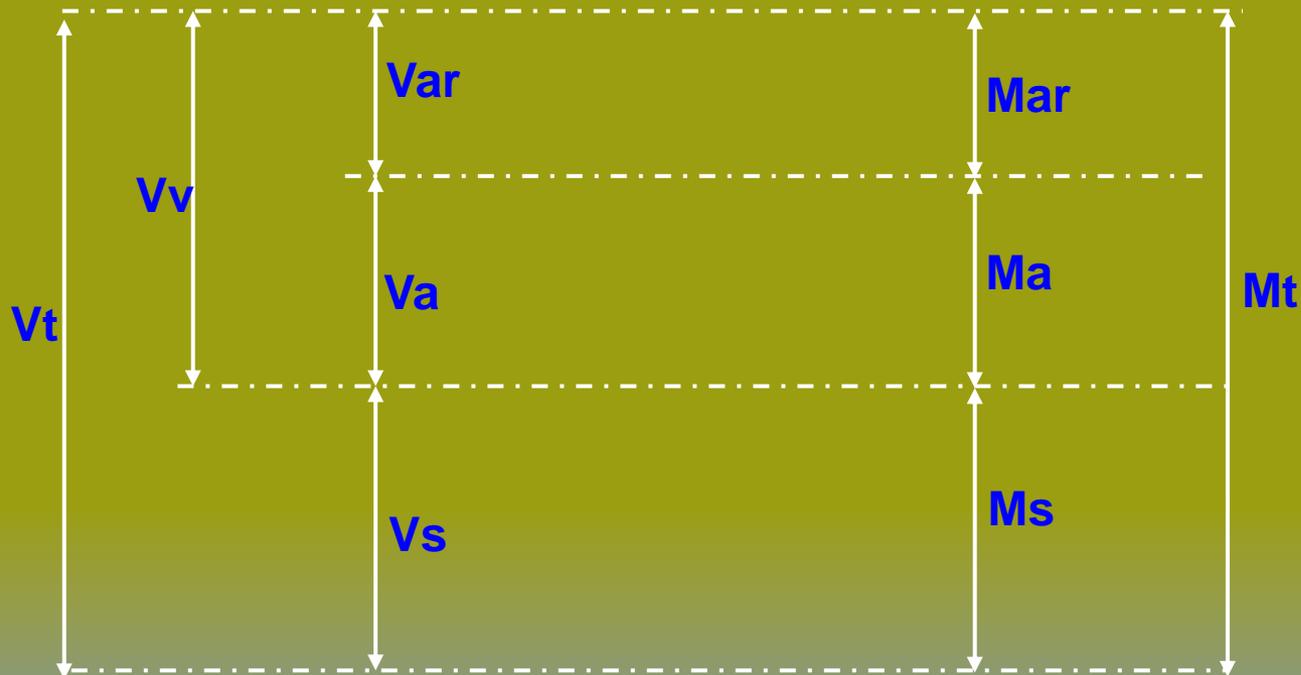
[mvfolega@usp.br](mailto:mvfolega@usp.br)

Departamento de Engenharia de Biossistemas  
ESALQ/USP



# RELAÇÕES ÁGUA-SOLO-PLANTA

## 1. Relação massa volume dos constituintes do solo.



$M_{ar}$  = massa de ar  
 $M_a$  = massa de água  
 $M_s$  = massa de sólidos  
 $M_t$  = massa total

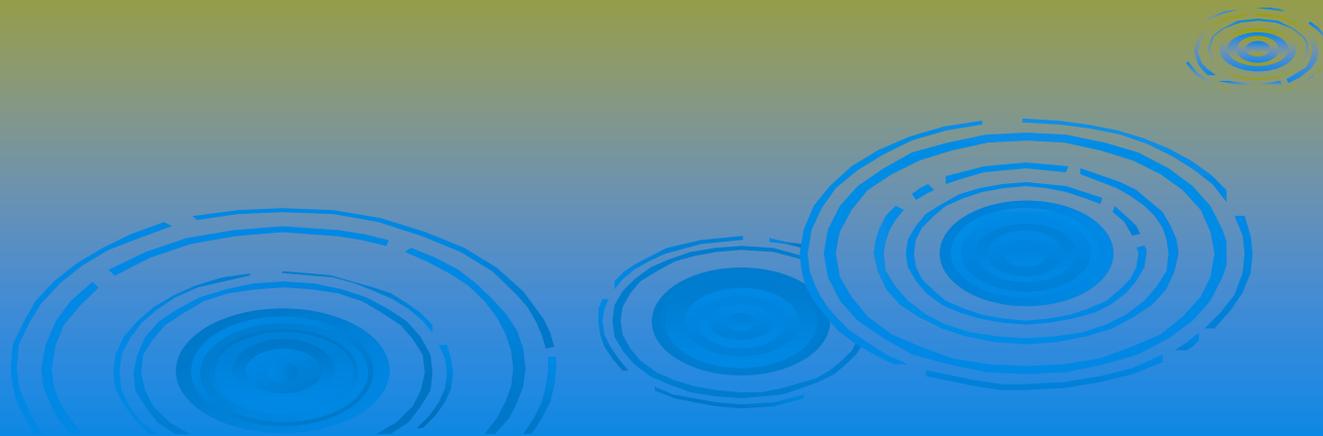
$V_{ar}$  = volume de ar  
 $V_a$  = volume de água  
 $V_v$  = volume de poros (vazios) =  $V_{ar} + V_a$   
 $V_s$  = Volume de sólidos  
 $V_t$  = Volume total

## 1.1 Densidade das partículas ( $d_p$ )

$$d_p = \frac{M_s}{V_s} \quad (\text{g/cm}^3) \sim 2,65$$

f (nat. Mineralógica: feldspatos, quartzo)

M.O (1,3 – 1,5)



## 1.2 Densidade do solo ( $d_s$ )

$$d_s = \frac{M_s}{V_t} \quad (\text{g/cm}^3)$$

f (textura, estrutura, grau compactação)

SOLOS TEXTURA:	$d_s$
GROSSA	1,3 – 1,8 g/cm <sup>3</sup>
FINA	1,0 – 1,4 g/cm <sup>3</sup>
ORGÂNICO	0,2 – 0,6 g/cm <sup>3</sup>

## 2. Umidade do solo com base em massa (U)

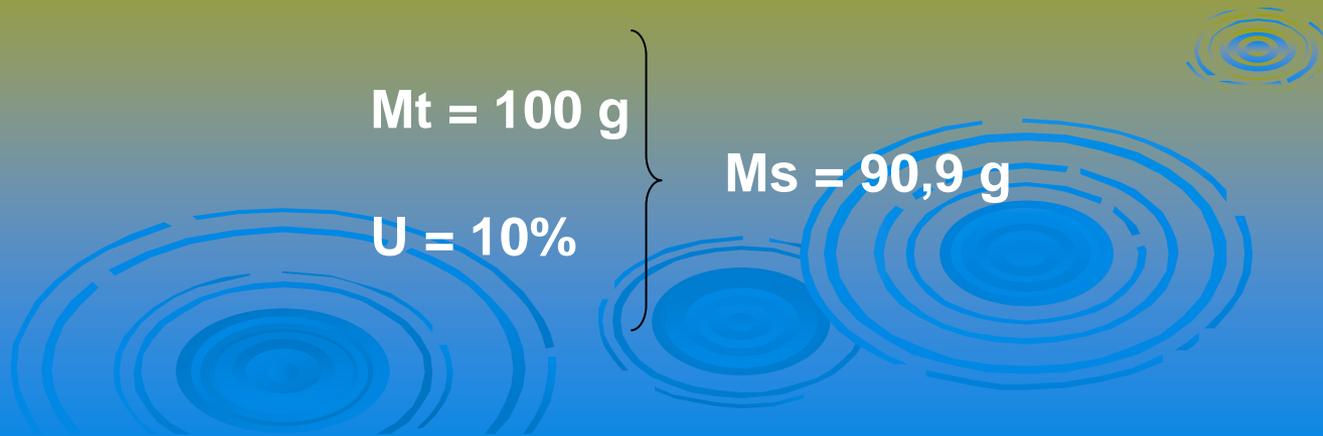
$$U = \frac{Ma}{Ms} = \frac{Mt - Ms}{Ms} = \frac{gH2O}{gsolo\ sec\ o}$$

$$Ms = \frac{Mt}{1 + U}$$

Mt = 100 g

U = 10%

Ms = 90,9 g

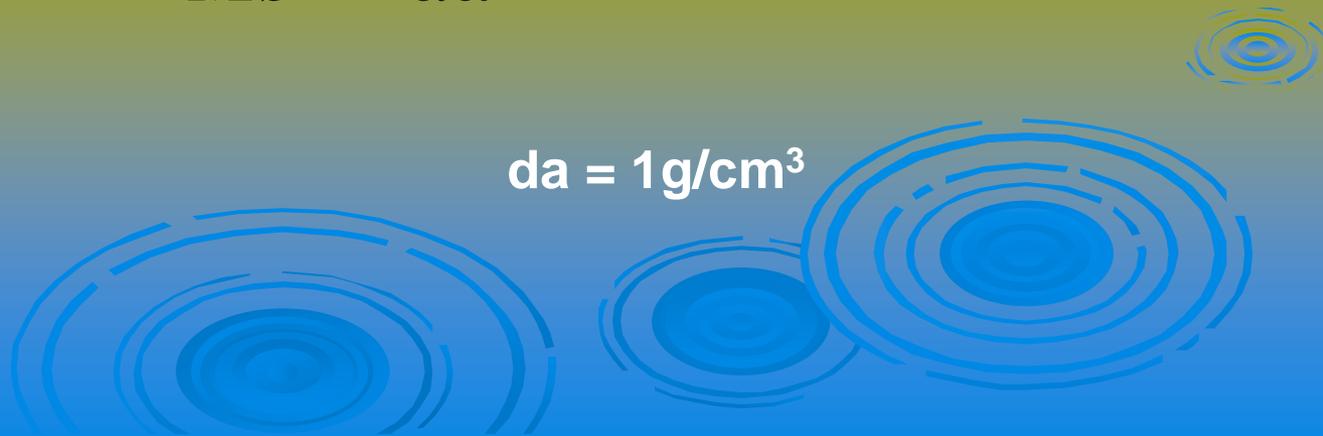


### 3. Umidade do solo com base em volume ( $\Theta$ )

$$\Theta = \frac{V_a}{V_t} = \frac{cm^3 H_2O}{cm^3 solo}$$

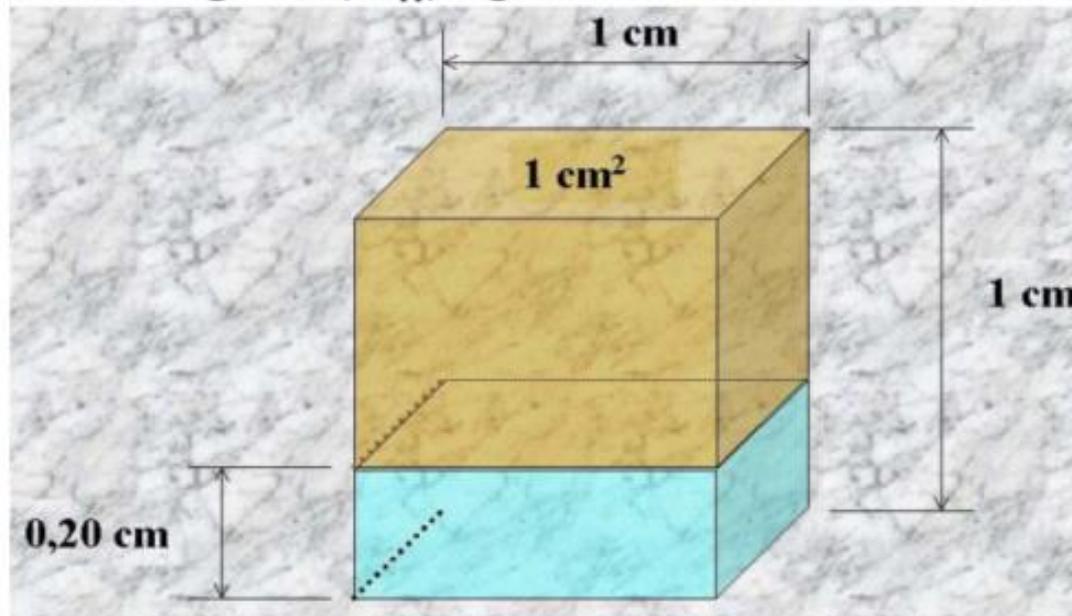
$$\left. \begin{array}{l} da = \frac{M_a}{V_a} \\ ds = \frac{M_s}{V_t} \end{array} \right\} \Theta = \frac{M_a}{M_s} \times \frac{ds}{da}$$

$$da = 1g/cm^3$$



# Armazenamento de Água no Solo

- Um volume de  $1 \text{ cm}^3$  de solo com umidade ( $\theta$ ) de  $0,20 \text{ cm}^3$  de água por  $\text{cm}^3$  de solo, armazena um volume de água ( $V_w$ ) igual a  $0,20 \text{ cm}^3$  de água



- Ou seja, naquele  $\text{cm}^3$  de solo cuja base é  $1 \text{ cm}^2$  tem  $0,20 \text{ cm}^3$  de água ou a altura de água de  $0,20 \text{ cm}$  ou  $2 \text{ mm}$ .

## 4. Porosidade do solo ( $\eta$ )

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_{ar} + V_a}{V_t} \quad (\text{cm}^3/\text{cm}^3)$$

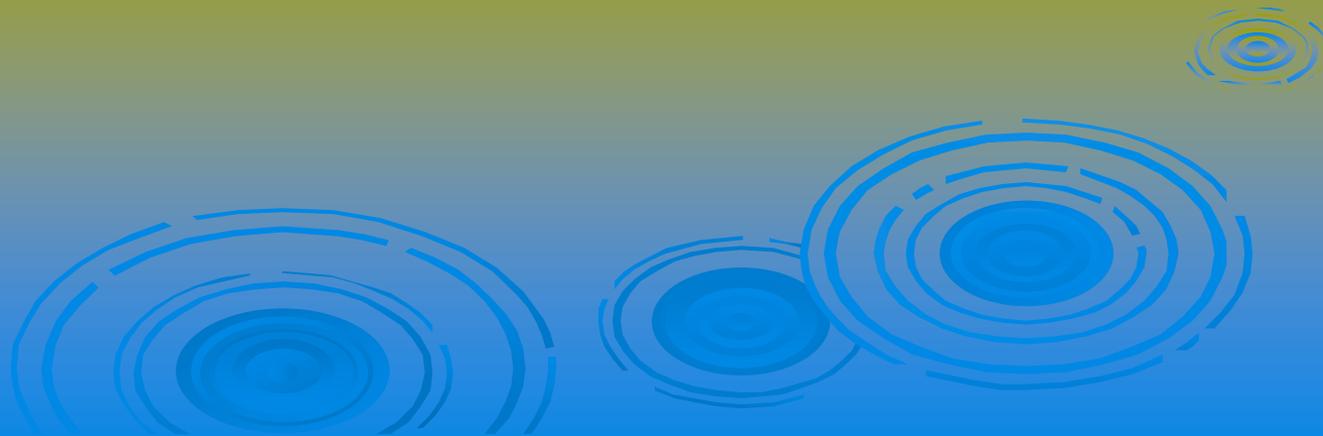
$$\eta = \frac{V_t - V_s}{V_t} = 1 - \frac{V_s}{V_t}$$

$$\left. \begin{aligned} ds &= \frac{Ms}{V_t} \\ dp &= \frac{Ms}{V_s} \end{aligned} \right\} \eta = 1 - \frac{ds}{dp}$$

## 5. Porosidade livre de água (E)

$$E = \frac{V_{ar}}{V_t}$$

$$E = \frac{V_v - V_a}{V_t} = \eta - \Theta$$

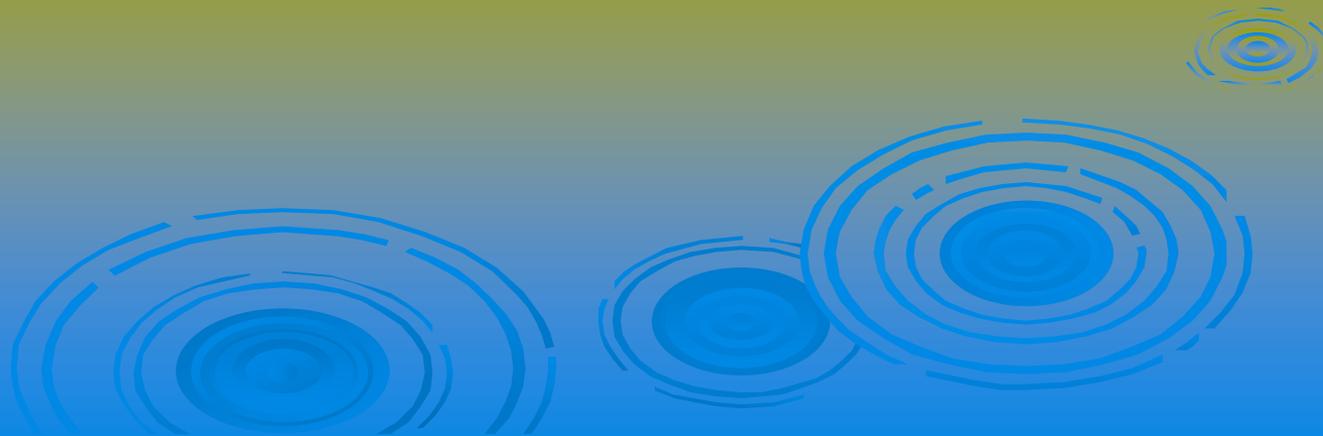


## 6. Grau de saturação ( $\Theta_{gs}$ )

$$\Theta_{gs} = \frac{V_a}{V_v} = \Theta / \eta$$

SOLO SECO  $\Theta_{gs} = 0$

SOLO SATURADO  $\Theta_{gs} = 1$



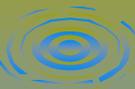
## Exercício

1000 cm<sup>3</sup> de solo tem massa úmida igual a 1460g e massa seca de 1200g. Sabendo-se que a  $d_p = 2,65 \text{ g/cm}^3$ , calcular:

- a) umidade com base em massa seca;
- b) umidade volumétrica;
- c) densidade do solo;
- d) porosidade do solo;
- e) porosidade livre de água;
- f) grau de saturação.

# Métodos de determinação da umidade do solo.

- Gravimétrico;
- Das pesagens;
- Dos volumes;
- Tensiômetro;
- Blocos de gesso;
- Sonda de nêutrons;
- Speed (Carbureto);
- Frigideira.

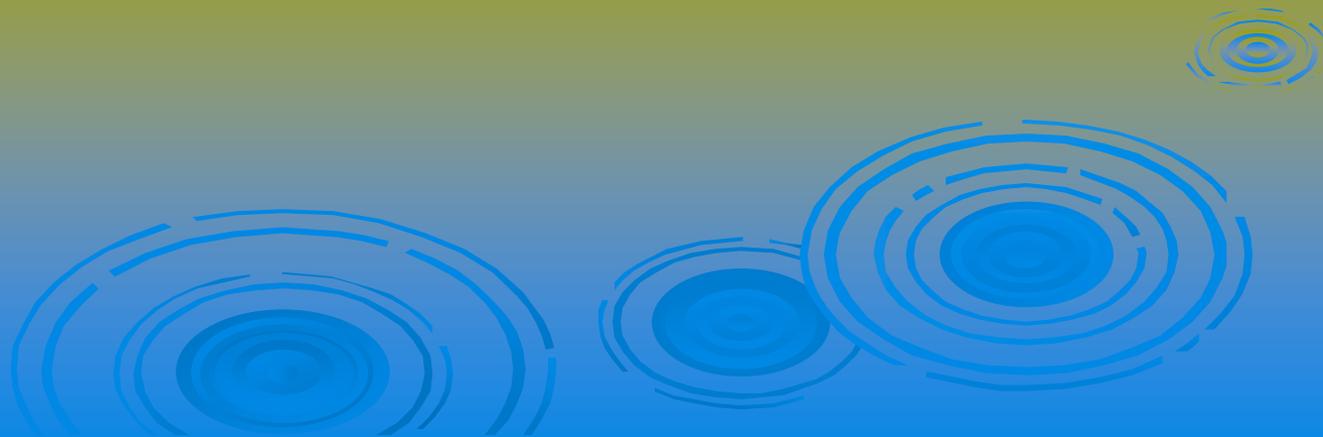


# Métodos de determinação da umidade do solo

## 1. Gravimétrico (Padrão)

$$U = \frac{M_t - M_s}{M_s} \times 100$$

Estufa – (105 – 110°C – 24 a 48 horas)



# Métodos de determinação da umidade do solo

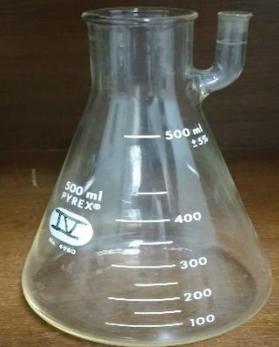
## 2. Método das pesagens (Frasco Papadakis)

$$U' = (M - M')X \frac{dp}{dp - 1} \quad (\text{umidade com base em massa úmida})$$

$$U = \frac{100XU'}{100 - U'} \quad (\text{umidade com base em massa seca})$$

**M = massa do frasco + solo seco + água (Padrão)**

**M' = massa do frasco + solo úmido + água**



# Métodos de determinação da umidade do solo

## 3. Método dos volumes

Balão volumétrico – 100ml

Tubo adicional

$$Ma = \frac{VX (dp - Mt)}{dp - 1}$$

V = volume em excesso no balão ( $\Delta$  ml)

$$Ms = Mt - Ma$$

$$U = \frac{Ma}{Mt - Ma}$$



# Métodos de determinação da umidade do solo.

## Exemplo

$$M_t = 20\text{g}$$

$$V = 10,1\text{ml}$$

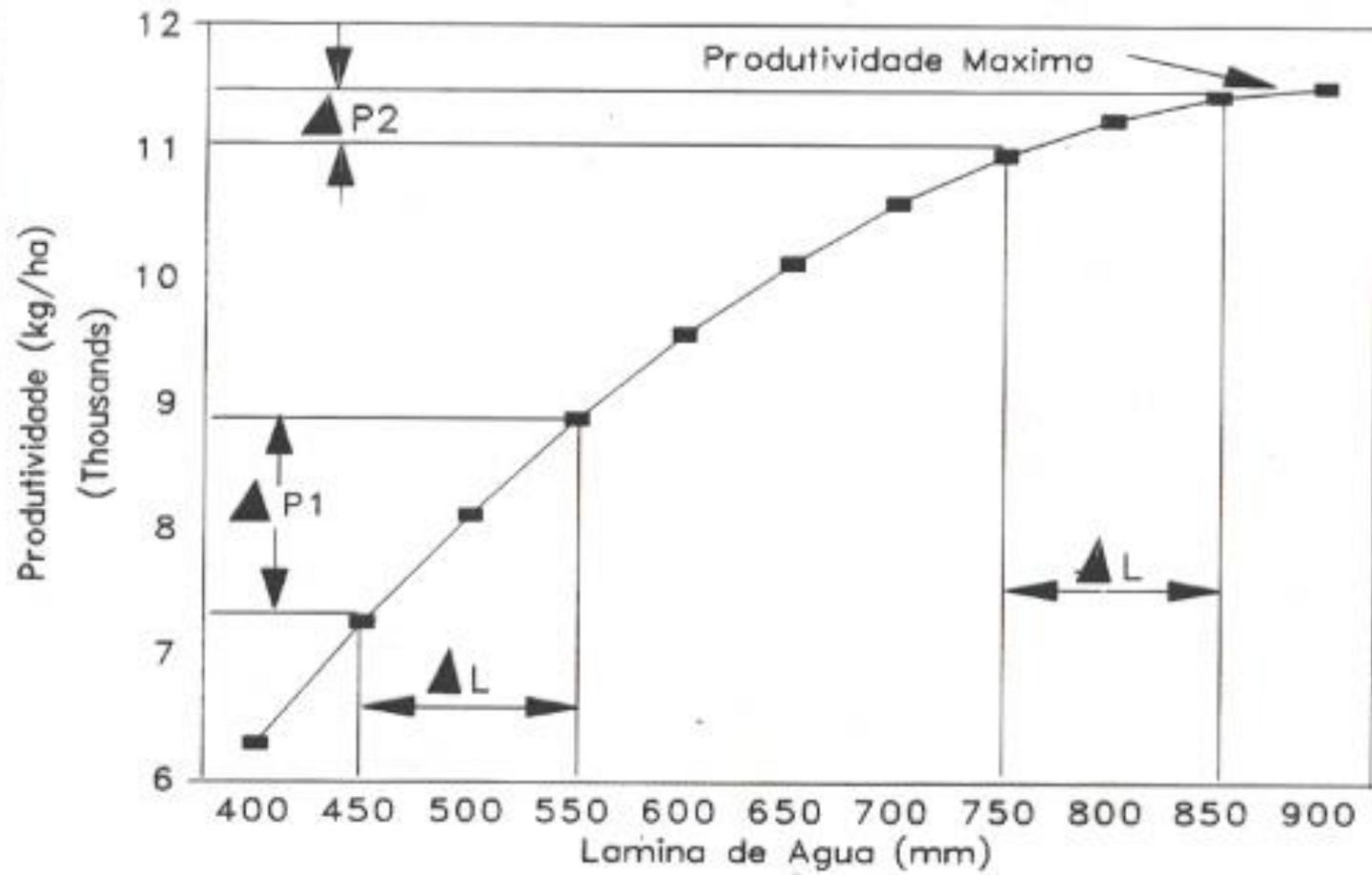
$$D_p = 2,65 \text{ g/cm}^3$$

$$M_a = \frac{10,1 \times 2,65 - 20}{2,65 - 1} = 4,1$$

$$M_s = 20 - 4,1 = 15,9$$

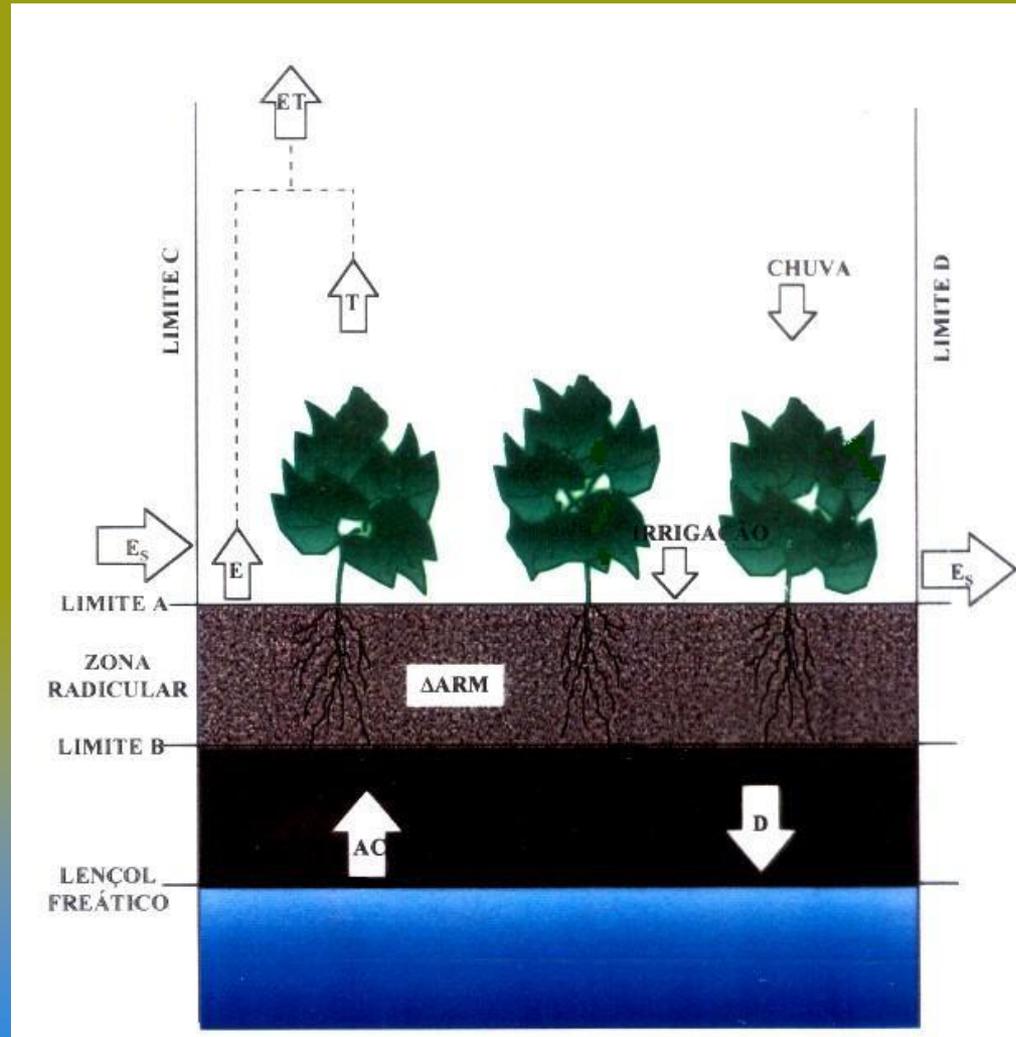
$$U = \frac{4,1}{20 - 4,1} = 0,257$$

# FUNÇÃO DE RESPOSTA DE UMA CULTURA À IRRIGAÇÃO



# RELAÇÕES ÁGUA-SOLO-PLANTA

## RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

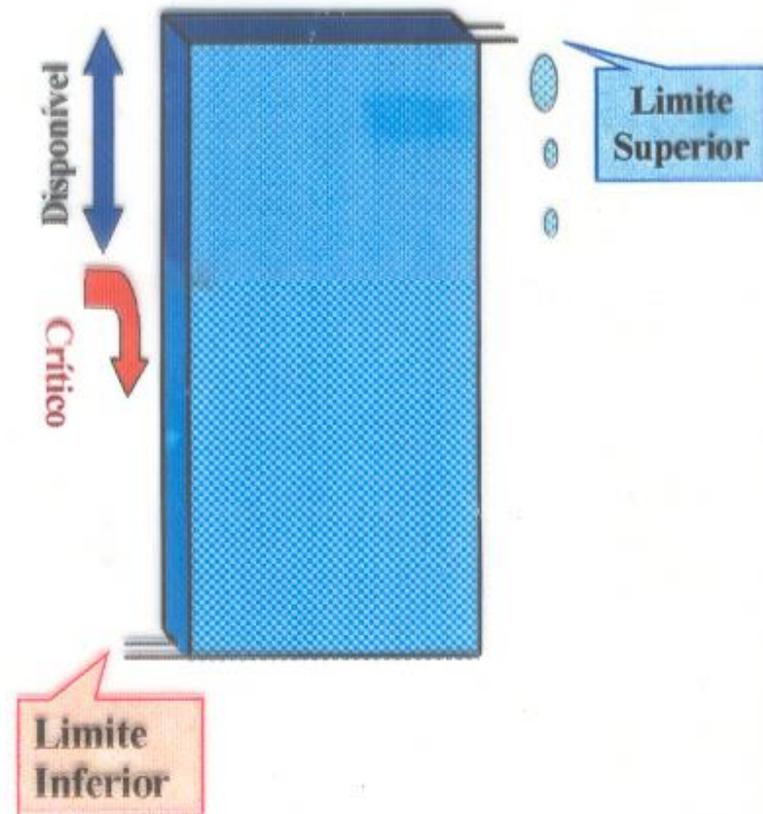


# RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

O SOLO AGRÍCOLA



O SOLO COMO UM  
RESERVATÓRIO  
DE ÁGUA

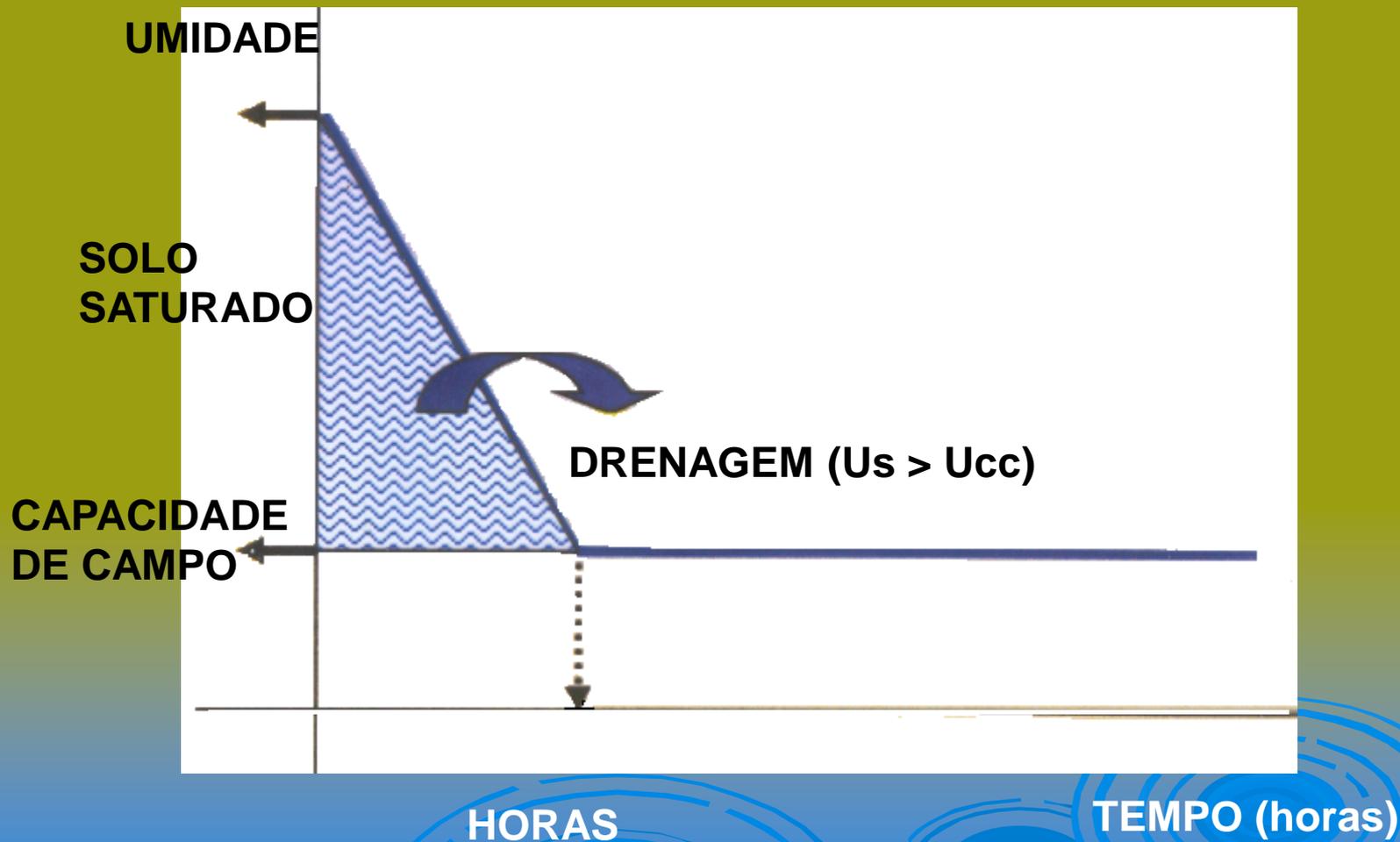


# RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO



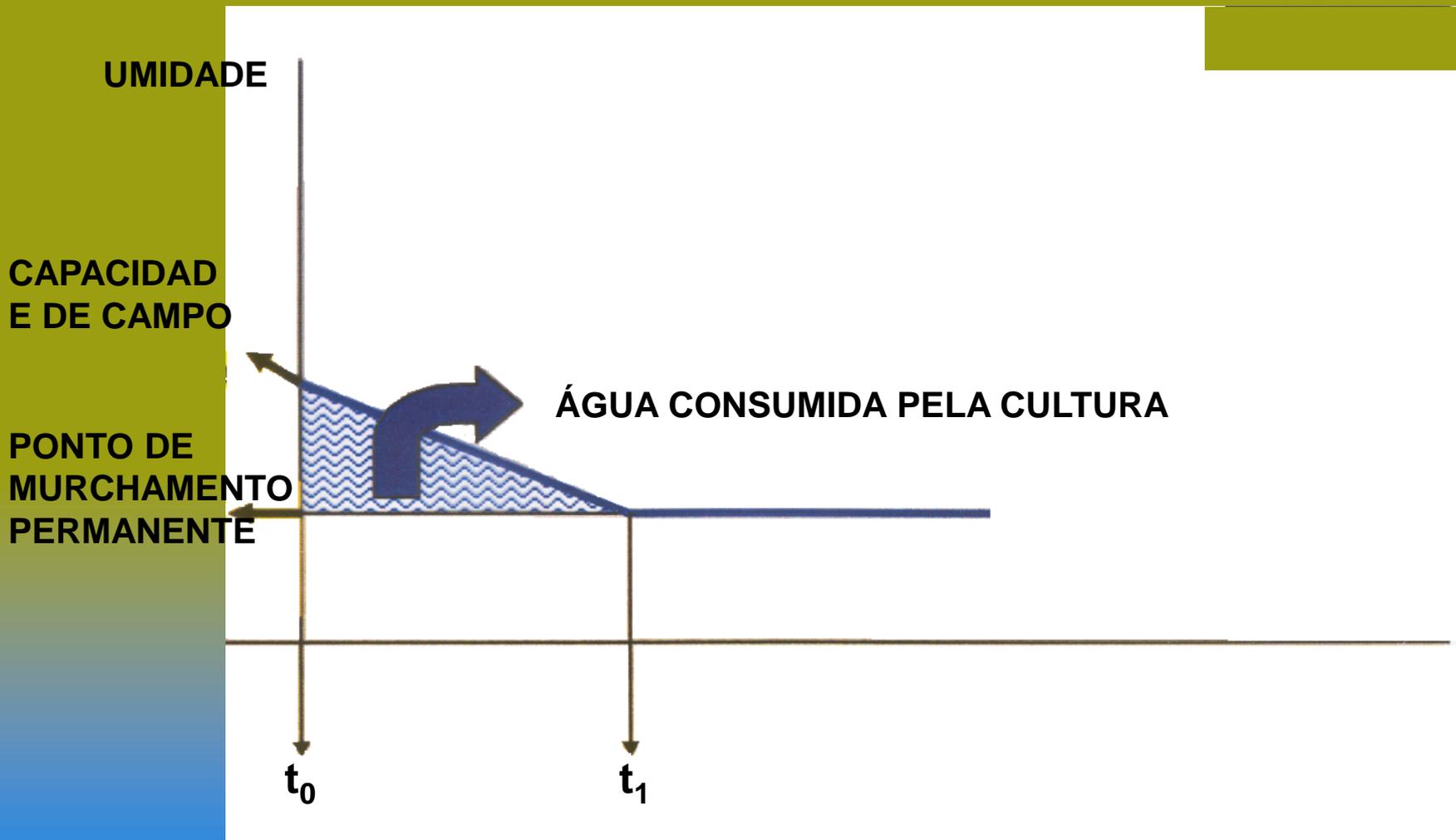
# RELAÇÕES ÁGUA-SOLO-PLANTA

## 1. CAPACIDADE DE CAMPO



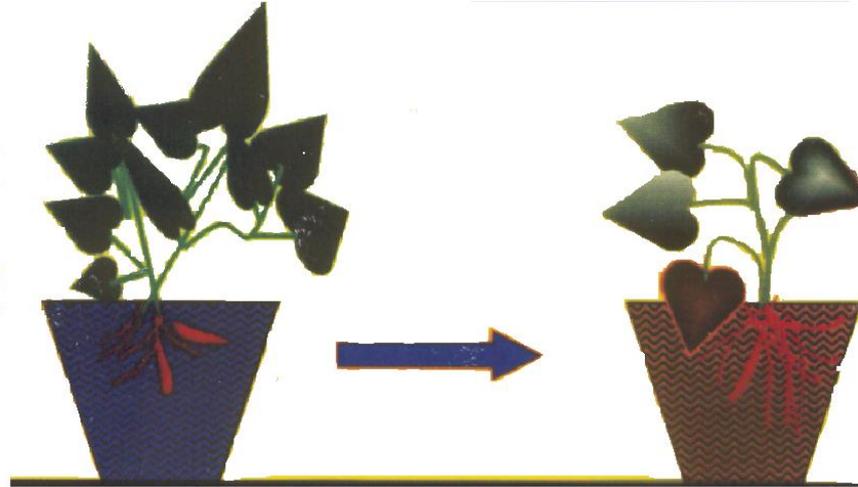
# RELAÇÕES ÁGUA-SOLO-PLANTA

## 2. PONTO DE MURCHAMENTO PERMANENTE



**SOLO COM UMIDADE A  
CAPACIDADE DE CAMPO –  
(CC)**

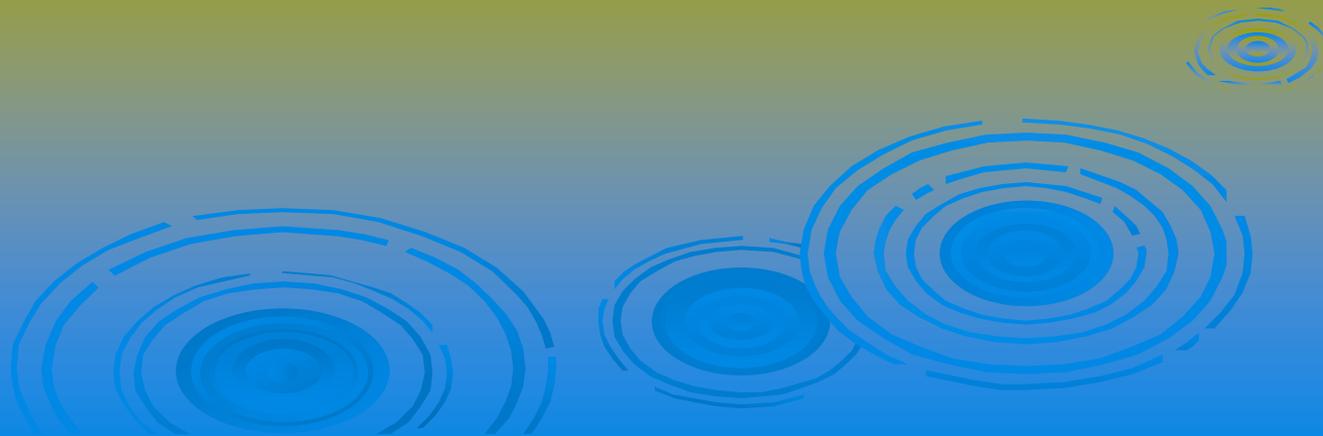
**SOLO COM UMIDADE NO  
PONTO DE MURCHA  
PERMANENTE (PMP)**

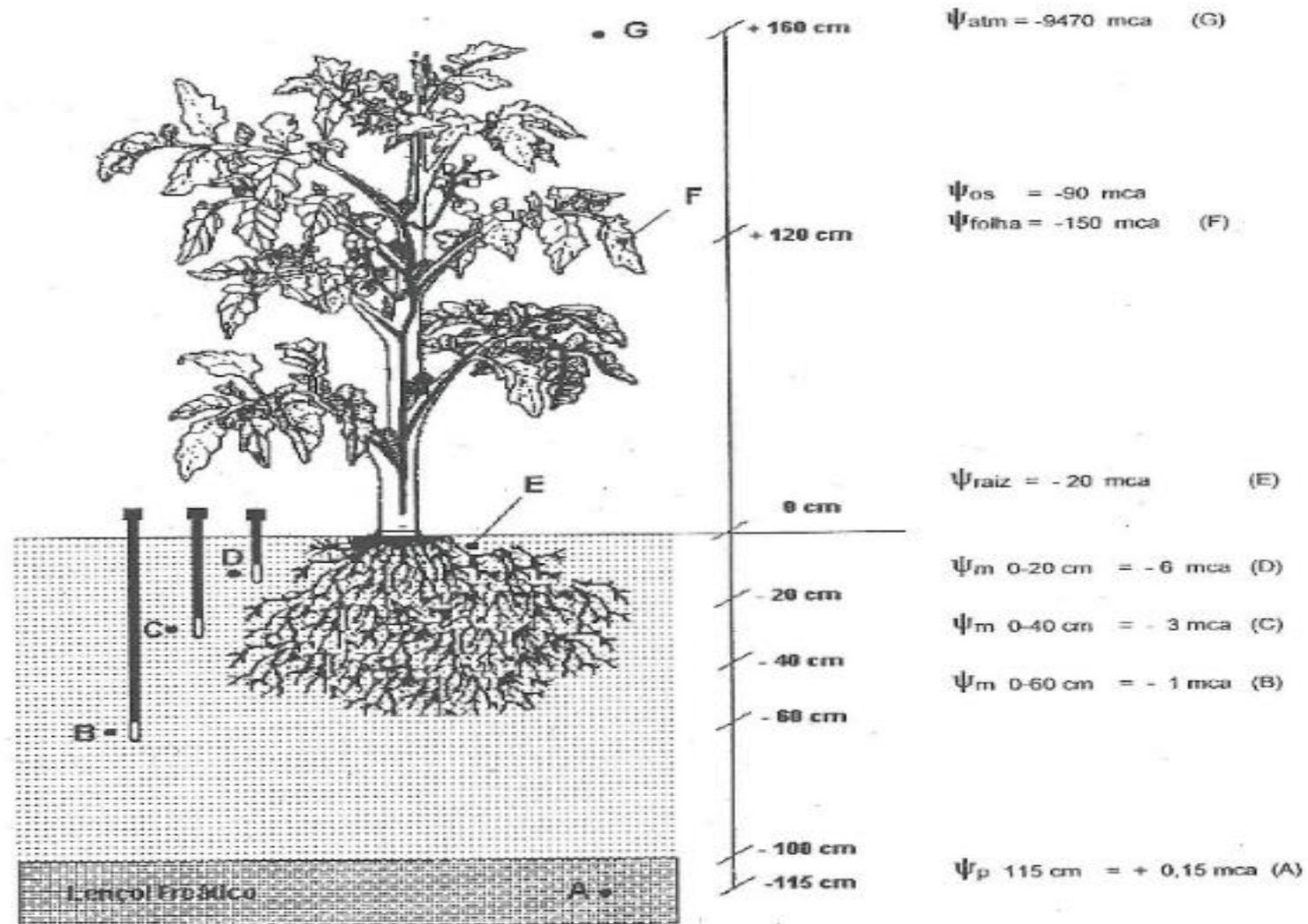


**Capacidade máxima de  
Retenção pelos microporos**

**Solo seco**

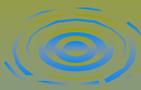
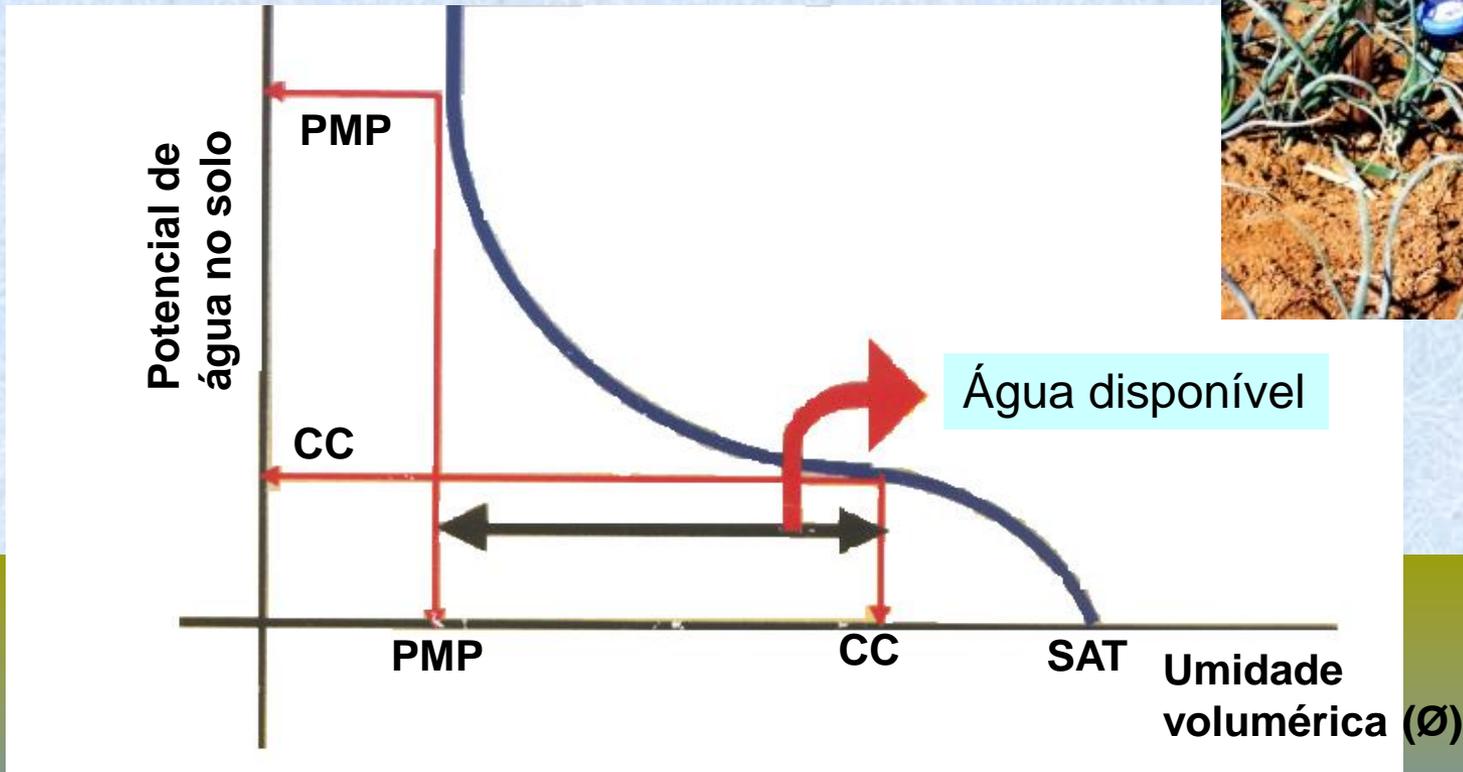
**Planta não mais entugerce**





Potencial da água em diferentes posições do sistema  
solo – planta - atmosfera

# CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

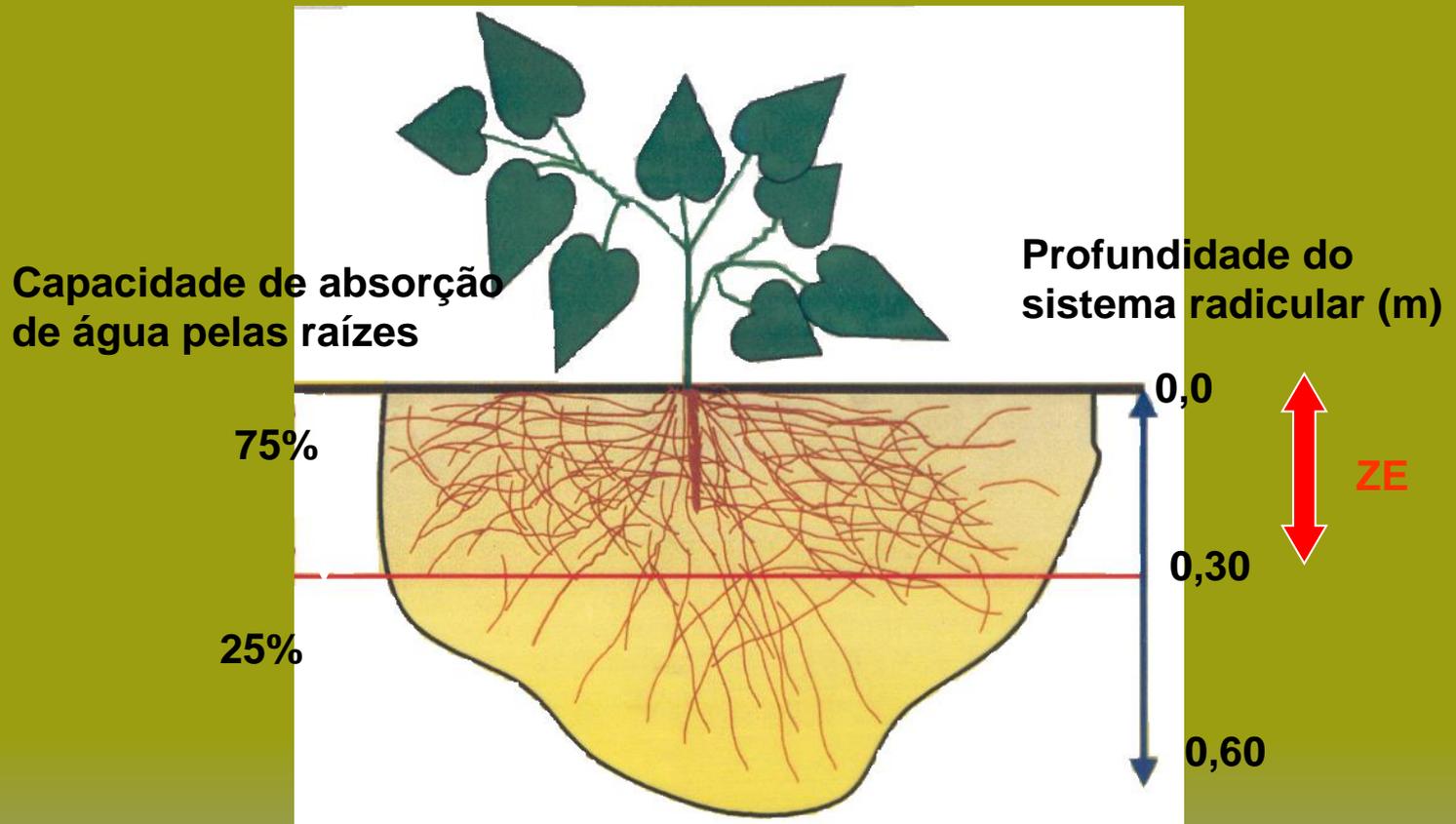


# ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO

Modelo para explicar as frações de água disponível no solo para as plantas



# PROFUNDIDADE DA IRRIGAÇÃO

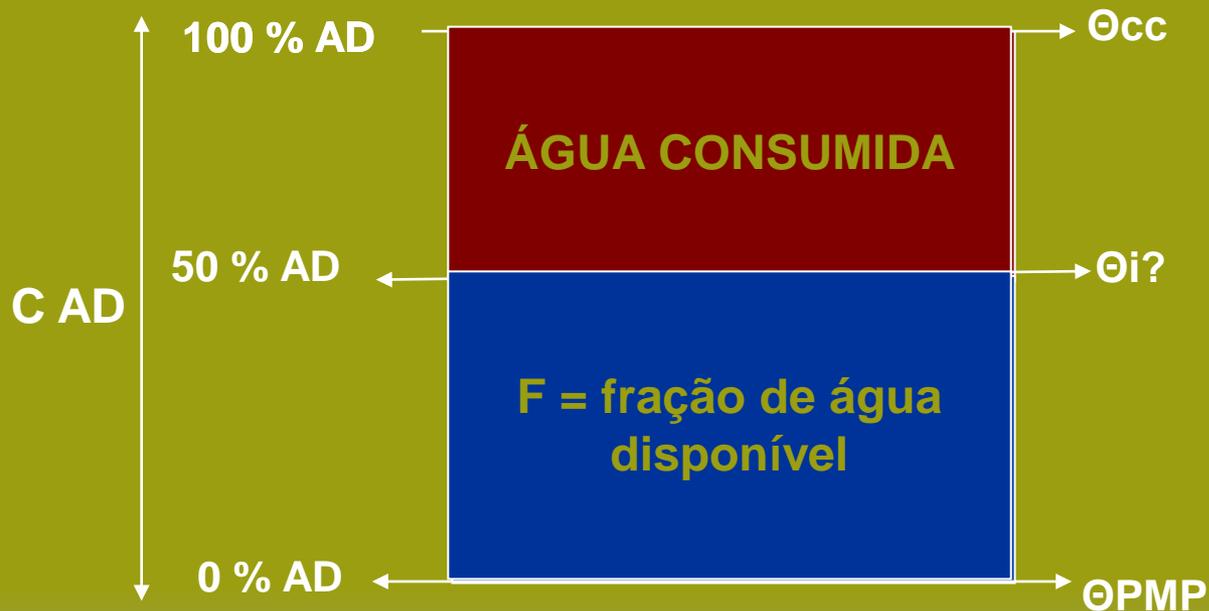


Capacidade de água disponível (CAD) ou Reservatório de água para as plantas – (Modelo)

$$\text{CAD} = (\Theta_{cc} - \Theta_{PMP}) \times \text{ZE} \longrightarrow \text{mm}$$

# QUANTO IRRIGAR?

Qual o valor da umidade do solo quando a cultura consome 50% da água disponível?



$$F = \frac{\theta_i - \theta_{PMP}}{\theta_{CC} - \theta_{PMP}}$$

F é a fração de água disponível no solo para as plantas e varia de 0 a 1

# DISPONIBILIDADE DE ÁGUA DO SOLO PARA AS PLANTAS

Grupos de culturas para definir a fração f

Grupo	Culturas
1	Cebola, pimentão, batata, pepino, cenoura
2	Banana, repolho, tomate, ervilha, vagem, melão, melancia, videira
3	Feijão, alfafa, amendoim, abacaxi, trigo, cítricas, girassol
4	Algodão, milho, sorgo, soja, beterraba, cana-de-açúcar, fumo

Valores da fração f

Grupo	ET <sub>o</sub> (mm/dia)					
	2	3	4	5	6	7
1	0,50	0,42	0,35	0,30	0,25	0,22
2	0,68	0,58	0,48	0,40	0,35	0,32
3	0,80	0,70	0,60	0,50	0,45	0,42
4	0,88	0,80	0,70	0,60	0,55	0,50

O valor da umidade do solo quando devo iniciar a irrigação é igual a:

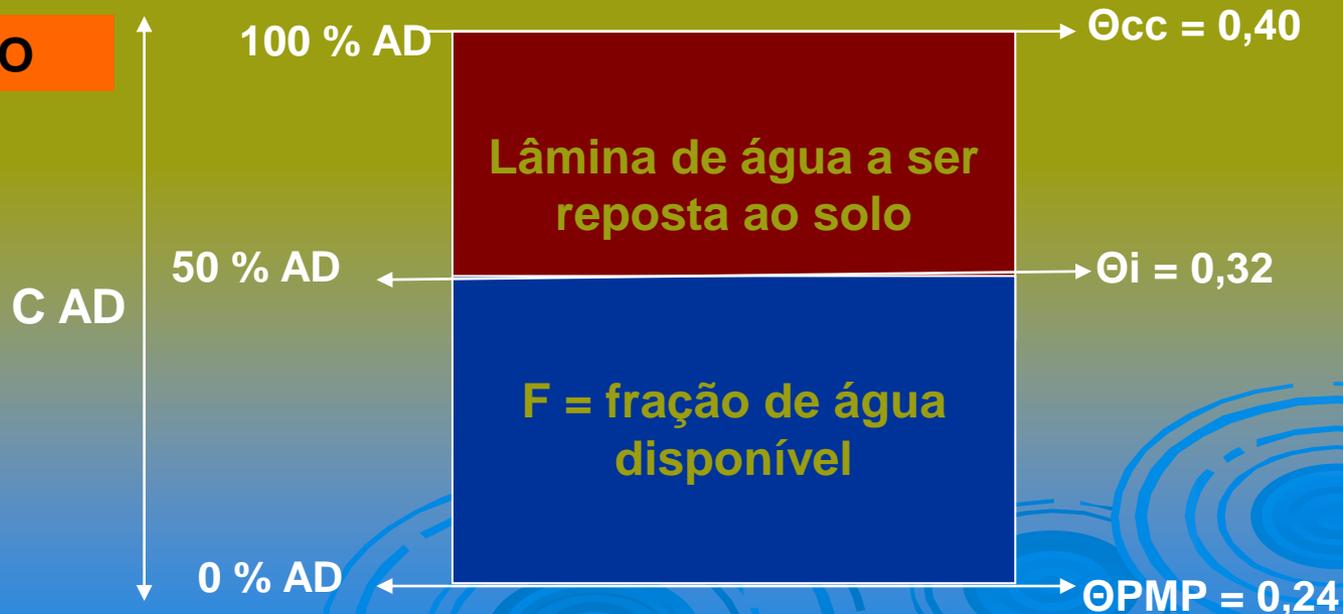
$$\Theta_i = \Theta_{PMP} + F \times (\Theta_{cc} - \Theta_{PMP})$$



$$\Theta_i = \Theta_{PMP} + 0,5 \times (\Theta_{cc} - \Theta_{PMP})$$

Lâmina líquida de água a ser repostada ao solo

**EXEMPLO**

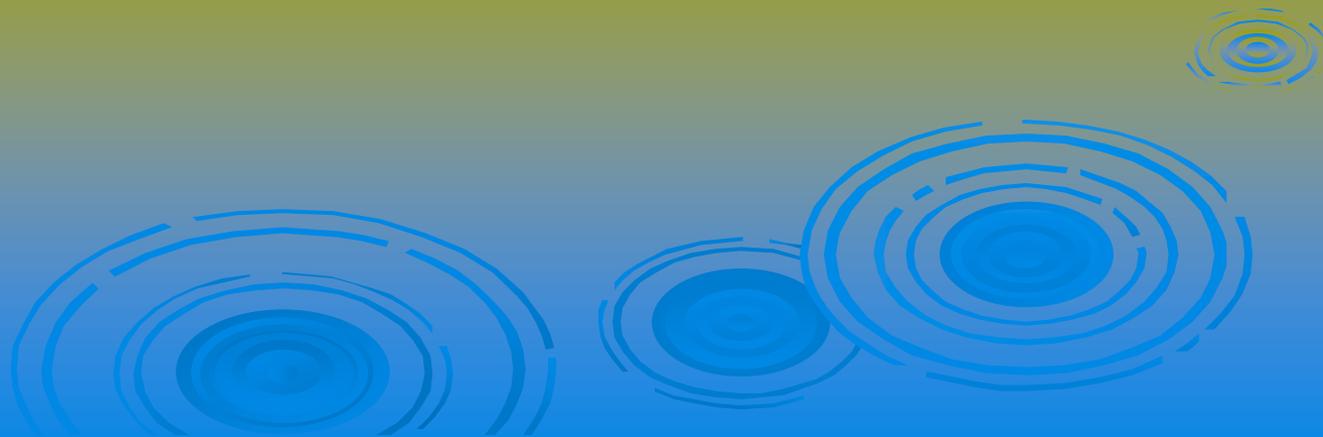


O valor da lâmina líquida de água a ser reposta ao solo é igual a:

$$L_r = (\Theta_{cc} - \Theta_i) \times Z_E \quad (\text{mm})$$

$$L_r = (0,40 - 0,32) \times 300 \quad (\text{mm})$$

$$L_r = 24 \text{ mm}$$



## Quando irrigar?

1. Fatores a serem observados para definição do nível de água disponível no solo antes de se iniciar a irrigação:

- Capacidade de aplicação de água do pivô central;
- Cultura e fase fenológica;
- Sub-divisões de culturas e/ou épocas de plantio sob pivô central;
- Datas de aplicações de agroquímicos via pivô central.

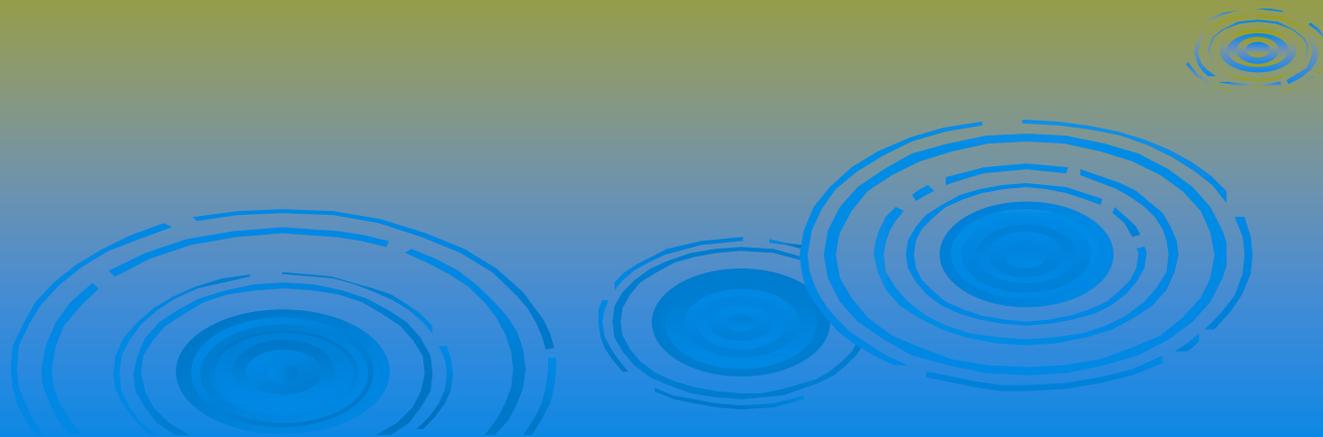


# PROPRIEDADES DE MOVIMENTAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

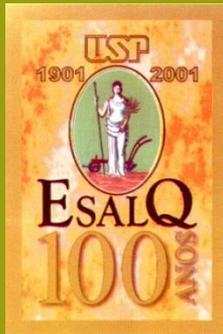
INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

MOVIMENTO DA ÁGUA NO SOLO



# INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

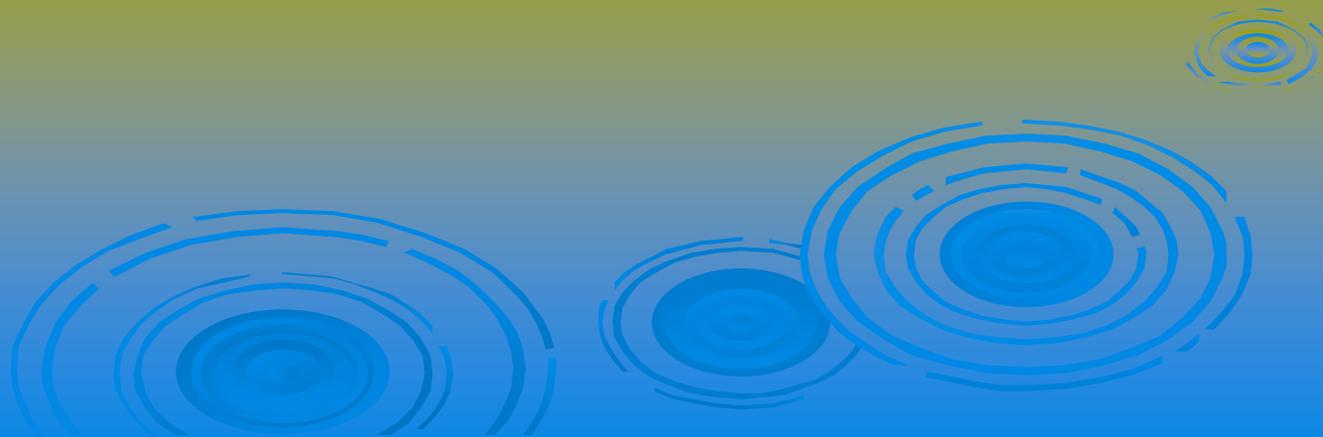


*Prof. Dr. Marcos Vinícius Folegatti*

**LER - 1571 Irrigação**

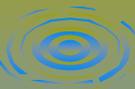
# DEFINIÇÃO

A Infiltração é definida como sendo o processo de penetração da água no solo, através de sua superfície, no sentido vertical descendente, indo molhar camadas mais profundas.



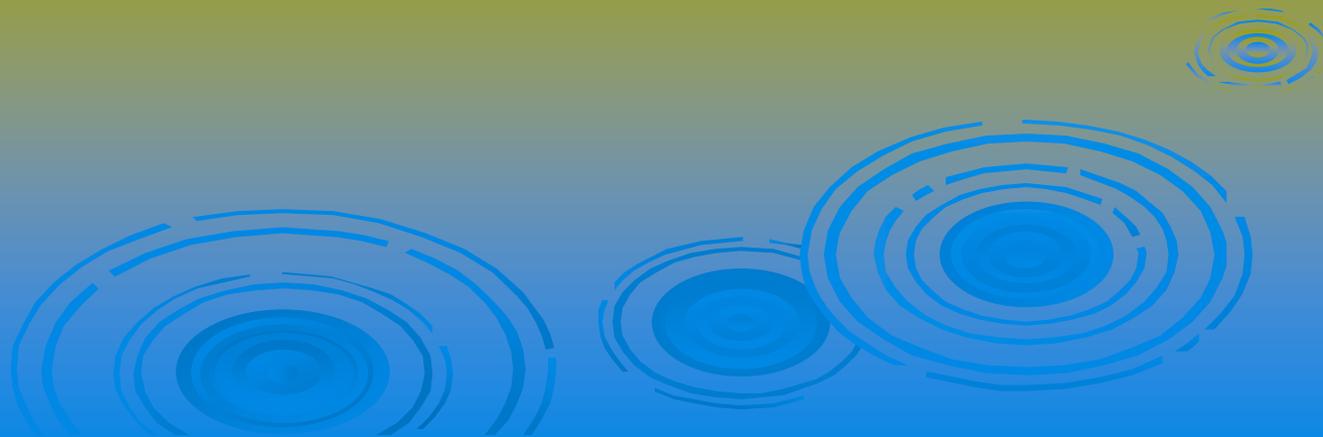
# Fatores que interferem na velocidade de infiltração

- Umidade inicial do solo
- Textura e estrutura do solo
- Matéria orgânica
- Camada de impedimento
- Variabilidade espacial
- Ar comprimido



# Métodos de determinação

-MÉTODO DO INFILTRÔMETRO DE ANÉIS



# Infiltrômetro de anéis

Material:

2 cilindros, interno e externo;

Prancha de madeira;

Marreta e Regua;

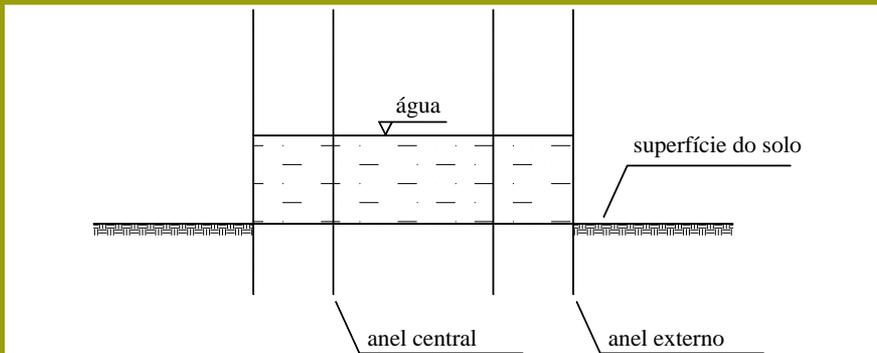
Plástico



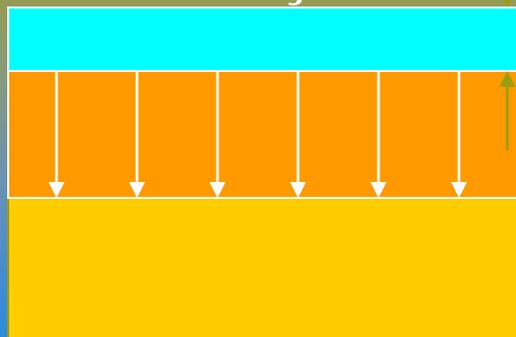
Carga variável



Carga constante



inundação



Lâmina de água

Frente de molhamento

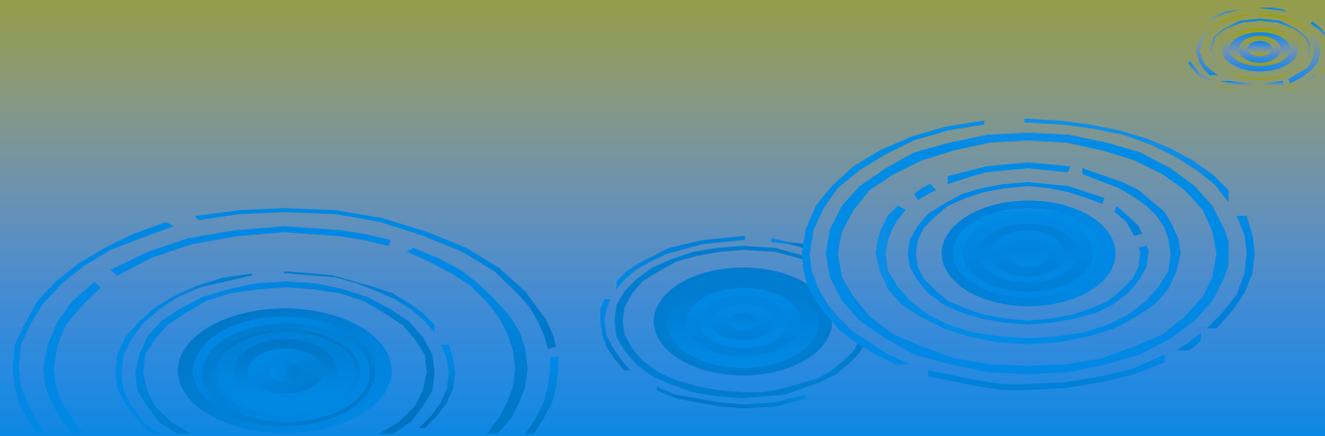
# Métodos de determinação

- MÉTODO DO INFILTRÔMETRO DE ANÉIS
- ENTRADA E SAÍDA DE ÁGUA NO SULCO (sulco e gotejamento)
- SIMULADOR DE CHUVA (aspersão)



# GRANDEZAS CARACTERÍSTICAS

- Lâmina de água infiltrada ( $I$ )
- Velocidade instantânea de infiltração ( $i$ )
- Velocidade de infiltração básica(VIB)



# MODELO DE KOSTIAKOV

$$I = K.T^m$$

Modelo potencial

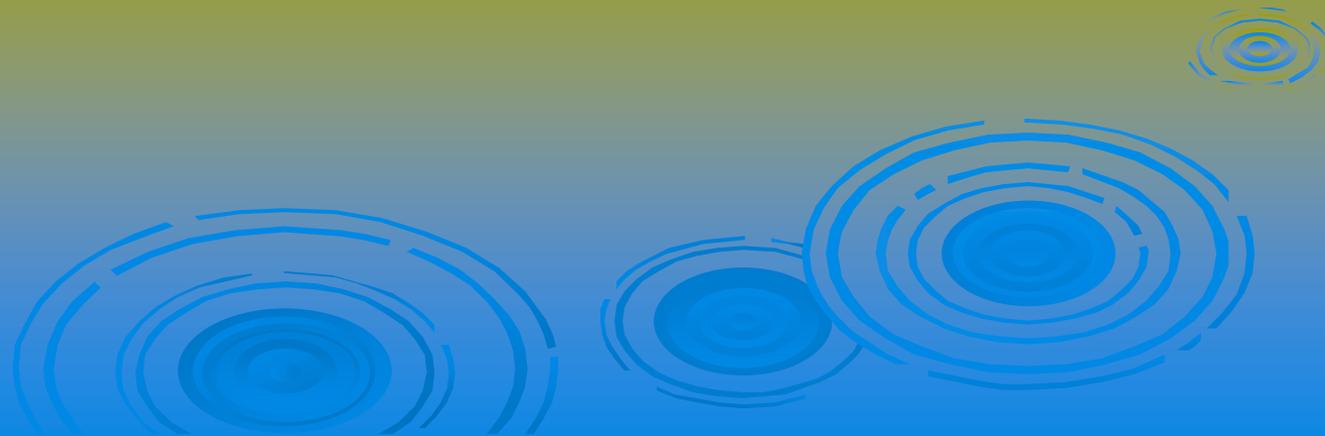
I = infiltração acumulada (cm);

T = tempo de infiltração acumulado (min);

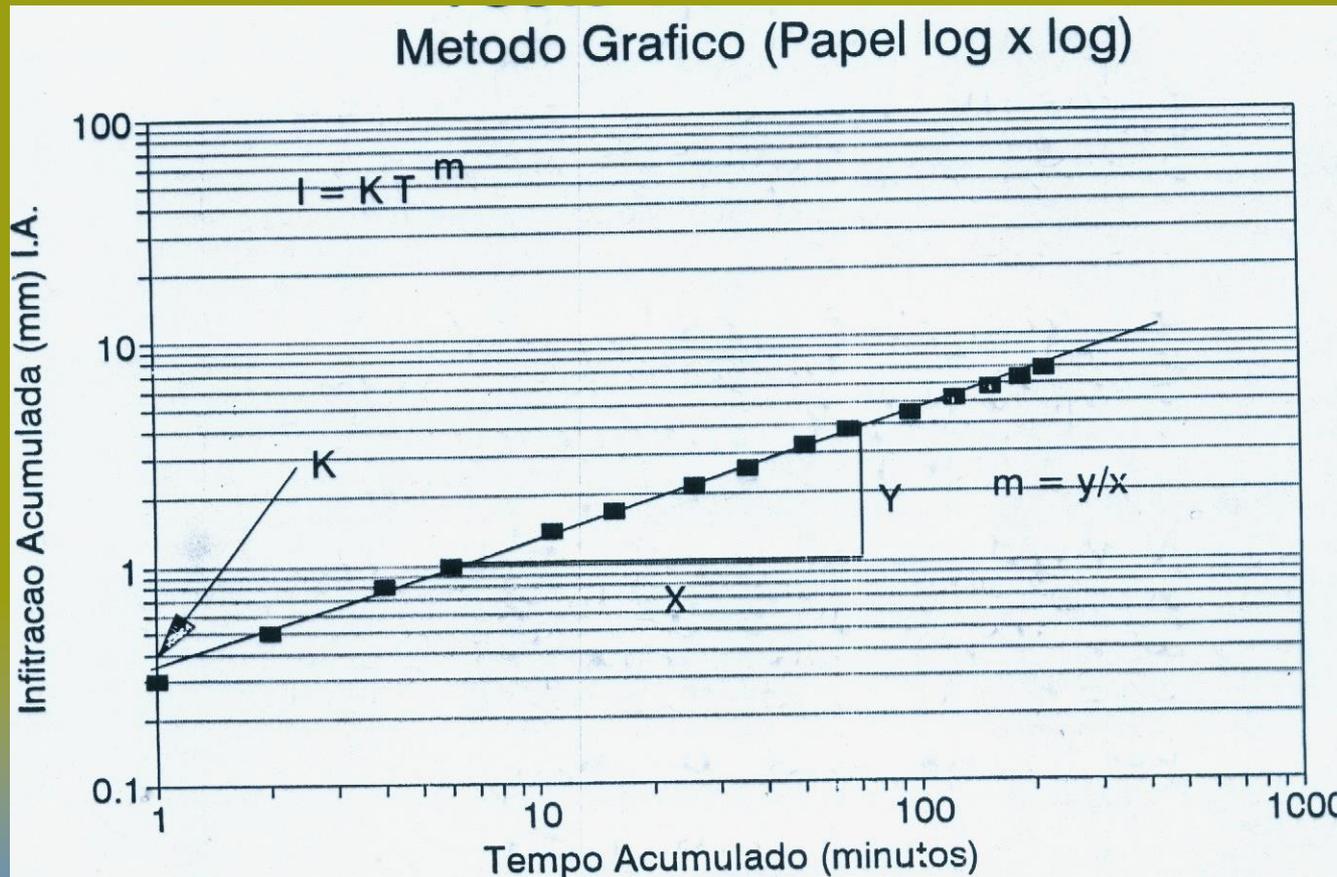
K e m = coeficiente que depende do solo (0-1)

Formas para definir K e m

- gráfica
- analítica



# Resolução gráfica



# SOLUÇÃO ANALÍTICA

$$I = K.T^m$$

Modelo potencial

$$\log I = \log K + m \cdot \log T$$

Modelo linear

$$\bar{Y} = A + B \bar{X}$$

O coeficiente angular (B) e a interseção (A) da reta são dados por:

$$B = m = \frac{\sum X \cdot Y - \frac{\sum X \cdot \sum Y}{N}}{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}}$$

$$A = \bar{Y} - B \bar{X}$$

$$\text{Log } K = A \quad K = \text{ant log } A$$

# Dados obtidos em um ensaio para determinação da infiltração de água no solo pelo método do infiltrômetro de anel.

Hora	Tempo (min)	Tempo acumulado (min)	Leitura da régua (cm)	Reposição (cm)	Infiltração (cm)	Infiltração Acumulada (cm)	Tempo acumulado (min)	X	Y	XY	X <sup>2</sup>
08:00	0	0	10,5		0	0	1	0	0,415	0	0
08:01	1	1	7,9		2,6	2,6	2	0,301	0,613	0,184	0,091
08:02	1	2	6,4		1,5	4,1	4	0,602	0,716	0,431	0,362
08:04	2	4	5,3	10,7	1,1	5,2	6	0,778	0,778	0,606	0,606
08:06	2	6	9,9		0,8	6,0	11	1,041	0,934	0,973	1,084
08:11	5	11	7,3	10,5	2,6	8,6	16	1,204	1,045	1,259	1,450
08:16	5	16	8		2,5	11,1	26	1,415	1,140	1,613	2,002
08:26	10	26	5,3	10,6	2,7	13,8	36	1,556	1,196	1,861	2,422
08:36	10	36	8,7		1,9	15,7	51	1,708	1,260	2,152	2,916
08:51	15	51	6,2	10,4	2,5	18,2	66	1,820	1,326	2,413	3,311
09:06	15	66	7,4	10,5	3,0	21,2	96	1,982	1,408	2,792	3,929
09:36	30	96	6,1	10,4	4,4	25,6	126	2,100	1,476	3,099	4,412
10:06	30	126	6,1	10,6	4,3	29,9	156	2,193	1,513	3,319	4,810
10:36	30	156	7,9		2,7	32,6	186	2,270	1,547	3,510	5,151
11:06	30	186	5,3	10,7	2,6	35,2	216	2,334	1,584	3,699	5,450
11:36	30	216	7,5		3,2	38,4	<b>Soma</b>	21,305	16,952	27,910	37,995
							<b>Média</b>	1,420	1,130	1,861	2,533

Lembre-se :  $Y = \log I$     $X = \log T$



# SOLUÇÃO ANALÍTICA

$$I = K.T^m$$

Modelo potencial

$$\log I = \log K + m \cdot \log T$$

Modelo linear

$$\bar{Y} = A + B \bar{X}$$

O coeficiente angular (B) e a interseção (A) da reta são dados por:

$$B = m = \frac{\sum X \cdot Y - \frac{\sum X \cdot \sum Y}{N}}{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}}$$

N o número de leituras realizadas na régua durante o teste de infiltração

$$A = \bar{Y} - B \bar{X}$$

$$\text{Log } K = A \quad K = \text{ant log } A$$

# VELOCIDADE INSTANTÂNEA (I)

$$I = K \cdot T^m$$

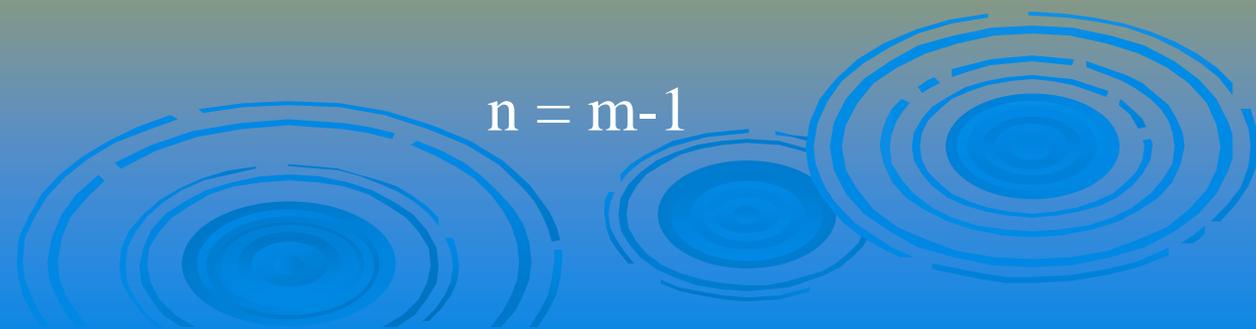
$$\frac{dI}{dT} = VI$$

Derivando a lâmina de  
infiltração em relação ao  
tempo

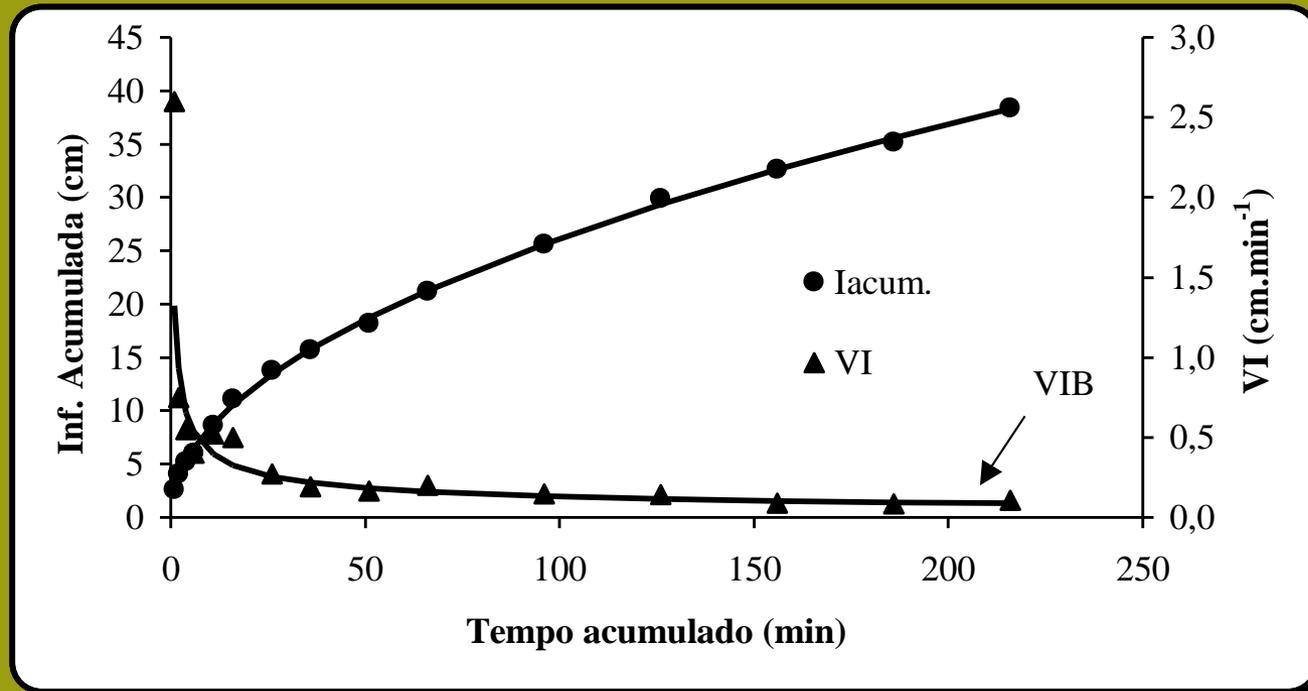
Desenvolvendo-se a equação de VI, tem-se:

$$VI = m \cdot K \cdot T^{m-1} \quad \therefore \quad VI = m \cdot K \cdot T^n, \text{ em cm.min}^{-1}$$

$$\text{ou } VI = 60 \cdot m \cdot K \cdot T^n, \text{ em cm.h}^{-1}$$

$$n = m - 1$$


# VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO BÁSICA (VIB)



- Solo de VIB muito alta ..... > 3,0 cm.h<sup>-1</sup>
- Solo de VIB alta ..... 1,5 – 3,0 cm.h<sup>-1</sup>
- Solo de VIB média ..... 0,5 – 1,5 cm.h<sup>-1</sup>
- Solo de VIB baixa ..... < 0,5 cm.h<sup>-1</sup>