



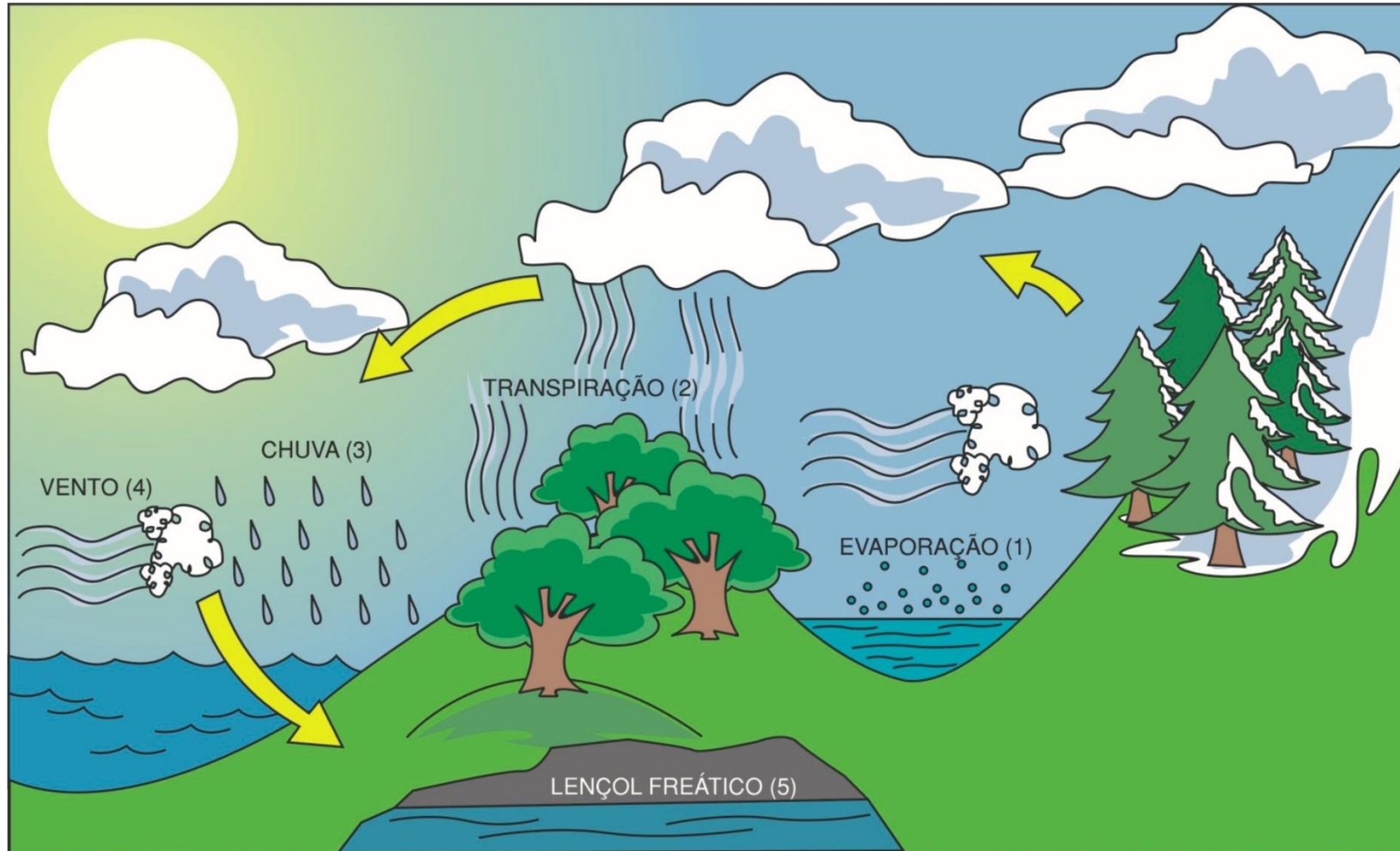
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA 'LUIZ DE QUEIROZ'
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIODIVERSIDADE
LEB0495 - Análise Física do Ambiente



Balanço Hídrico

Prof. Felipe Gustavo Pilau

Balanço Hídrico - Conceito



Balanço Hídrico - Introdução



Caatinga

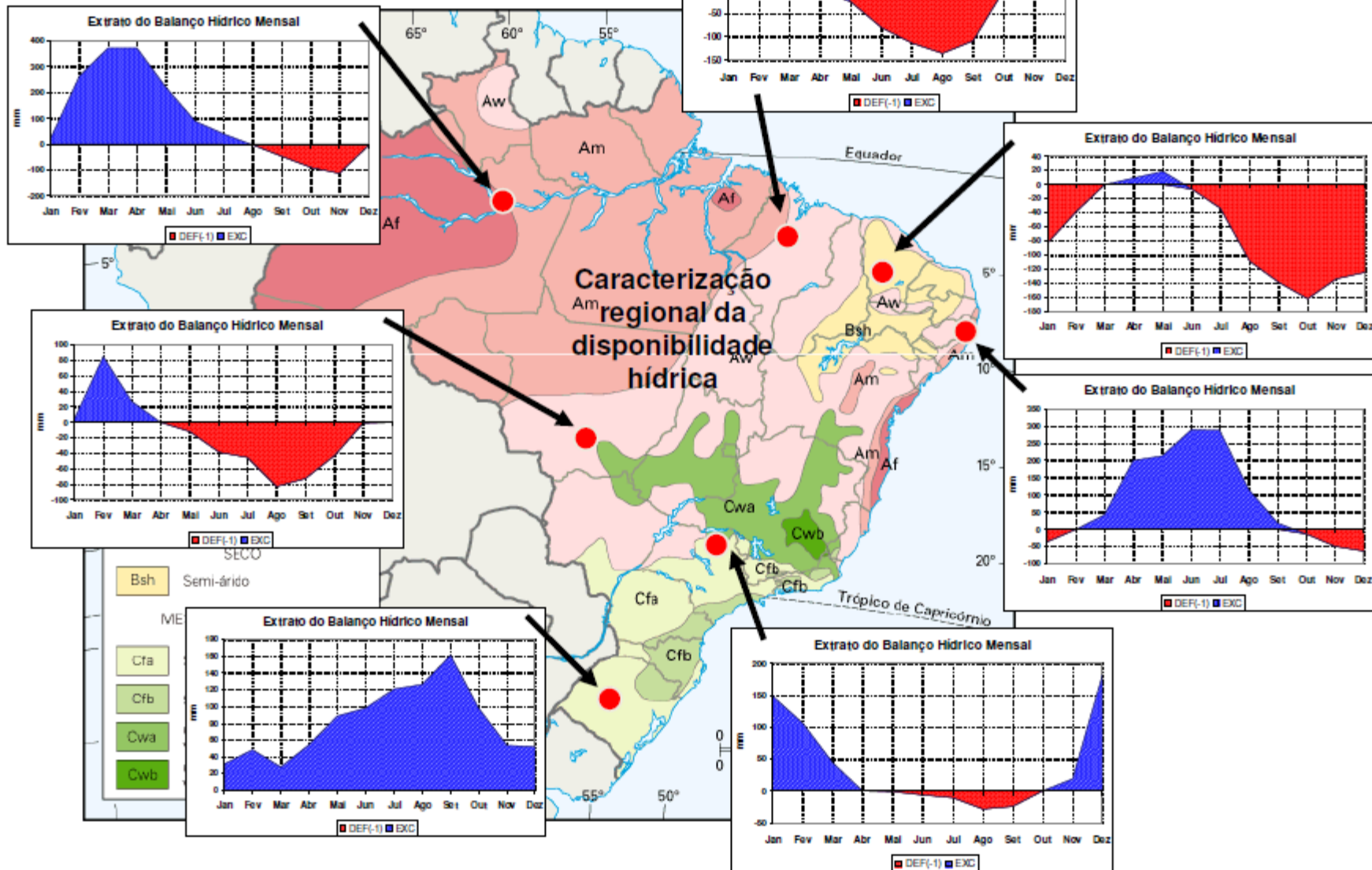


Floresta Tropical

Como quantificar as diferenças climáticas entre regiões?

Balço Hídrico - Introdução

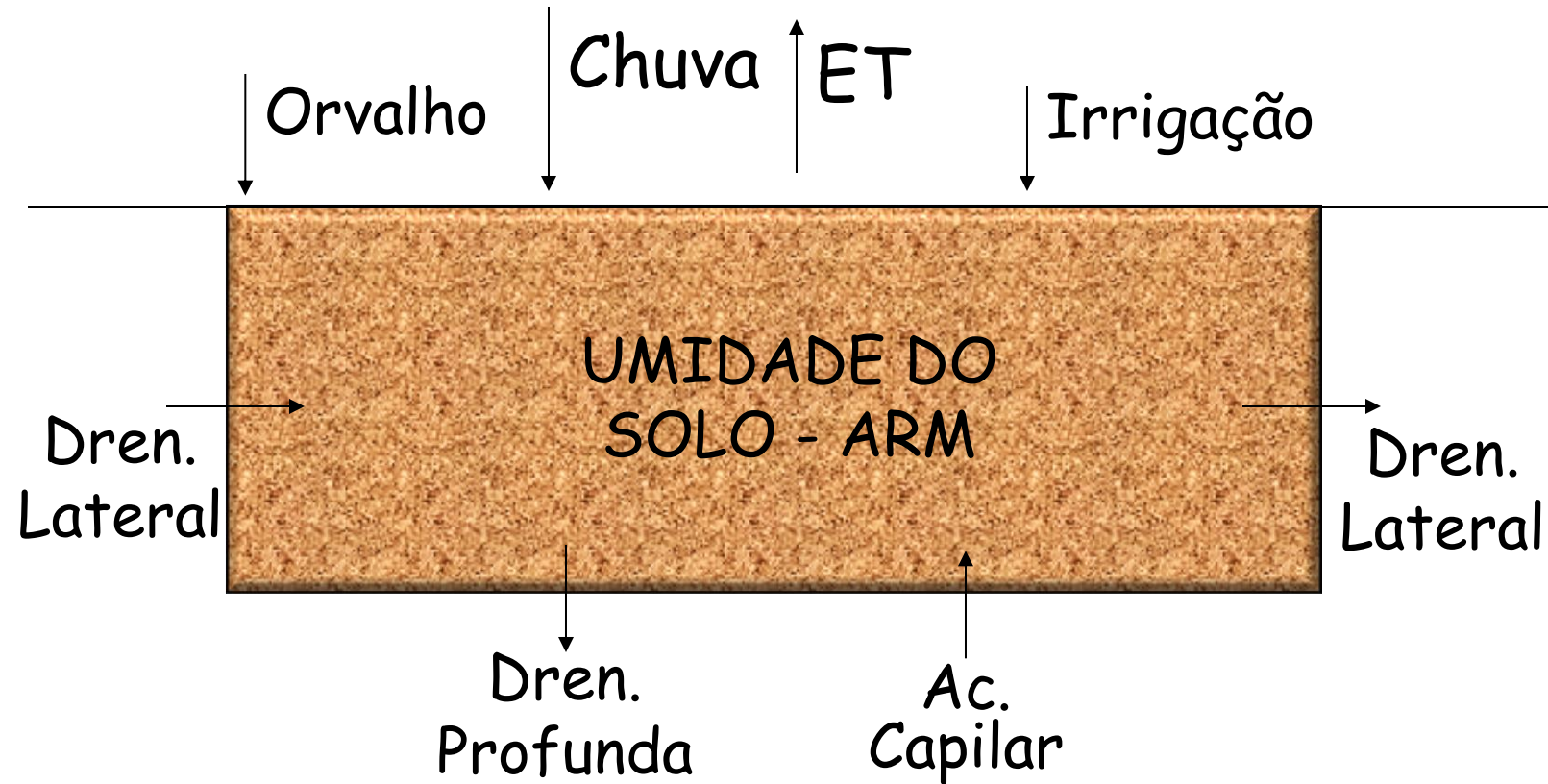
Aplicações do Balço Hídrico Climatológico Normal



Precipitação Anual

Porto Alegre	1347
Cuiabá	1314
Petrolina	608
Londres	611

Balanço Hídrico - Introdução



ENTRADA

Chuva (P)
Orvalho (O)
Irrigação (I)
Escorrimento superficial (Ri)
Escorrimento sub-superficial (DLi)
Ascensão capilar (AC)

SAÍDA

Evapotranspiração (ET)
Escorrimento superficial (Ro)
Escorrimento sub-superficial (DLo)
Drenagem profunda (DP)

O armazenamento de água do solo será determinado a partir das entradas (+) e as saídas (-)

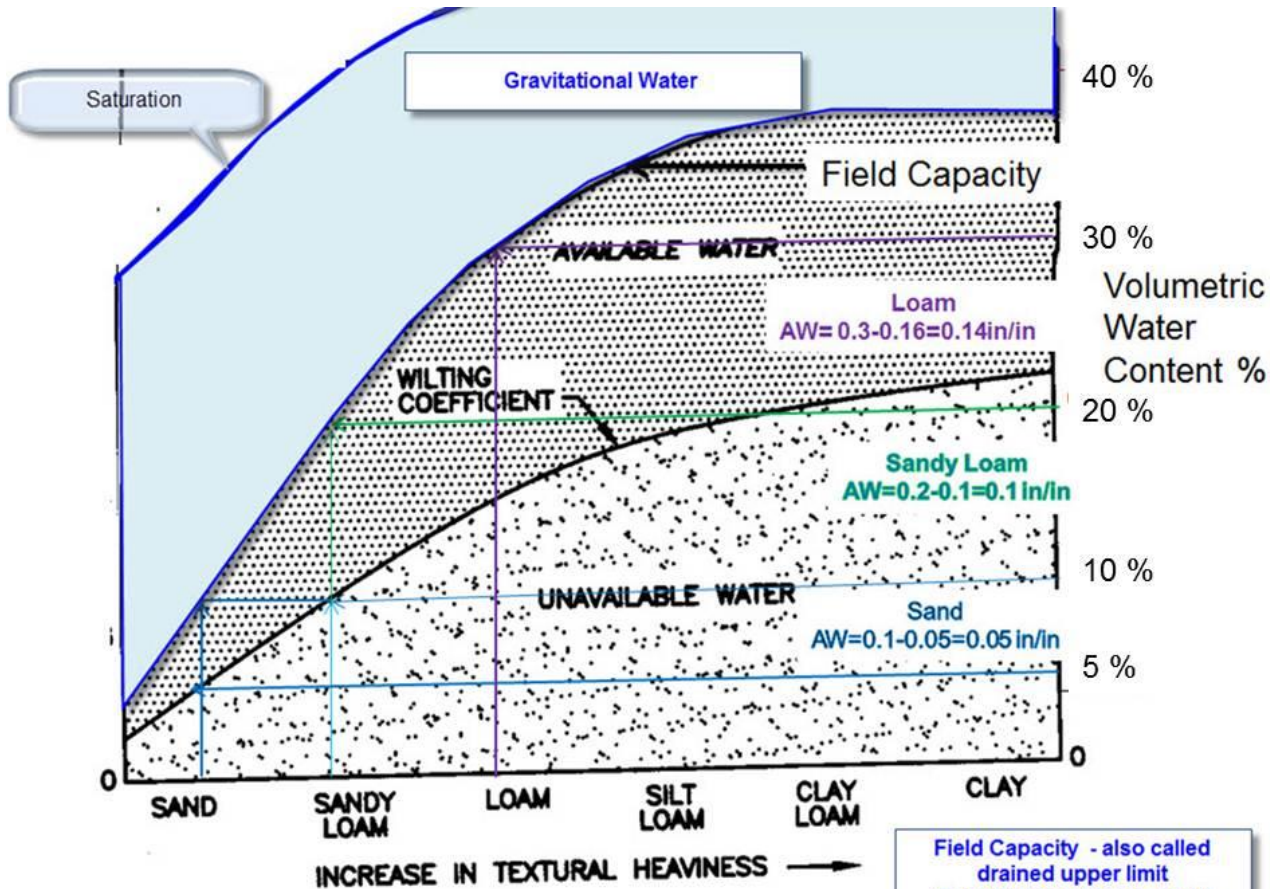
$$\Delta \text{ ARM} = P + O + R_i + D_{Li} + AC - ET - R_o - D_{Lo} - DP$$

A **chuva** representa a principal entrada de água em um sistema, ao passo que a contribuição do **orvalho** só assume papel importante em regiões muito áridas, sendo assim desprezível. A **irrigação**, facilmente determinada tal como a chuva, também deverá ser contabilizada. As entradas de água pela **ascensão capilar** também são muito pequenas e somente ocorrem em locais com lençol freático superficial e em períodos muito secos. Mesmo assim, a contribuição dessa variável é pequena, sendo também desprezível. Já os fluxos horizontais de água (**Ri, Ro, DLi e DLo**), para áreas homogêneas, se compensam, portanto, anulando-se. A **ET** é a principal saída de água do sistema, especialmente nos períodos secos, ao passo que **DP** constitui-se em outra via de saída de água do volume controle de solo nos períodos excessivamente chuvosos.

Portanto: $\Delta ARM = P - ET - DP$

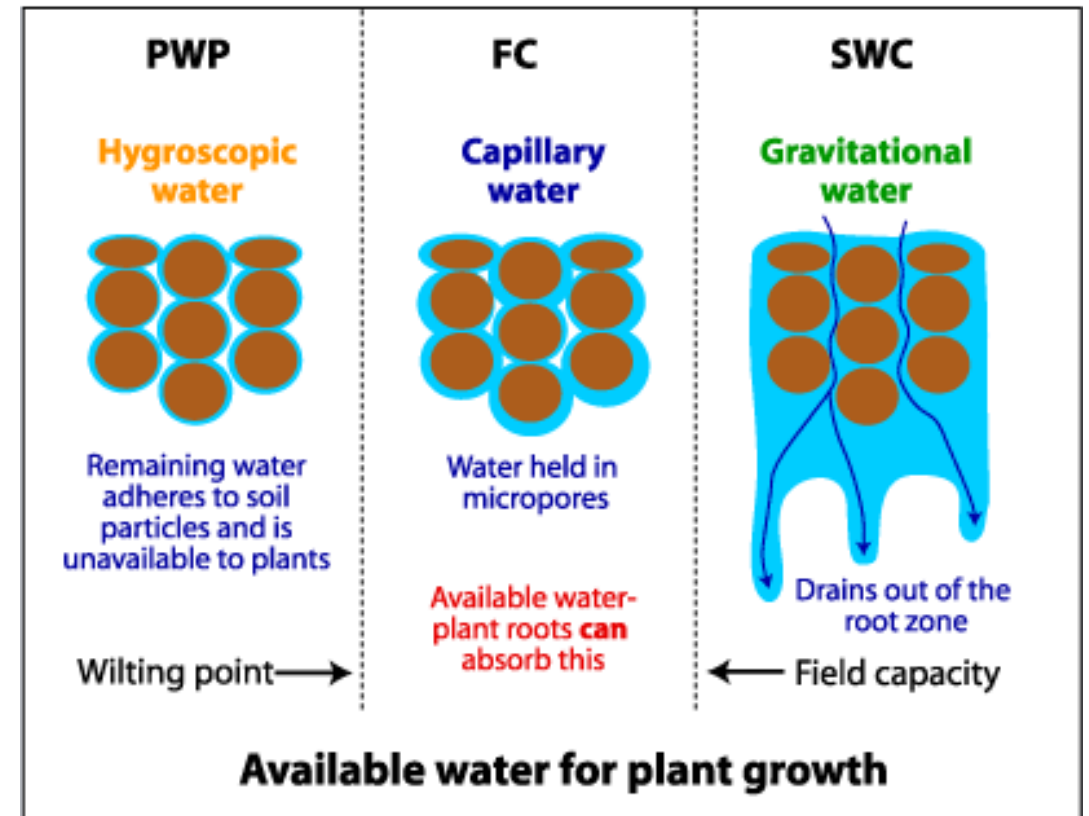
Por meio dessa equação, pode-se determinar a variação da disponibilidade de água no solo. Caso se conheça a capacidade de água disponível (CAD) desse solo, pode-se determinar também a quantidade de água armazenada por ele.

CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL: CONCEITO



Ref: USDA, NRCS, *Engineering Field Manual*
 Additional graphics add by Steve A Miller, Michigan State University

Field Capacity - also called drained upper limit
 Gravitational Water - rapid drainage



Como o solo é um reservatório que dificulta a saída da água à medida que vai secando, nos períodos em que o total de chuvas (P) é menor que a evapotranspiração potencial (ET), a água retida torna se uma função dessa demanda potencial (P - ETP < 0) e da CAD adotada.

Havendo uma sequência de períodos nessa condição, a água retida no solo será uma função sequencial dos valores negativos acumulados de P - ETP, ou seja, da perda potencial acumulada (THORNTHWAITE e MATHER, 1955). Tal somatório é denominado "negativo acumulado".

Impondo as condições de contorno do BHC, MENDONÇA (1958) propôs a primeira simplificação no método de Thornthwaite-Mather, na qual todas as tabelas de água retida (ARM) podiam ser substituídas pela equação adimensional:

$$ARM/CAD = \exp [Neg\ Acum/CAD]$$

$$ARM = CAD \cdot \exp [Neg\ Acum/CAD]$$

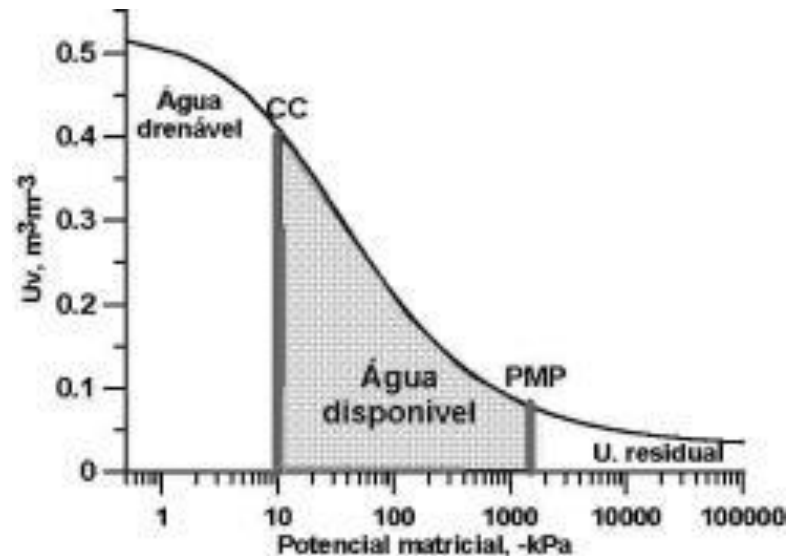
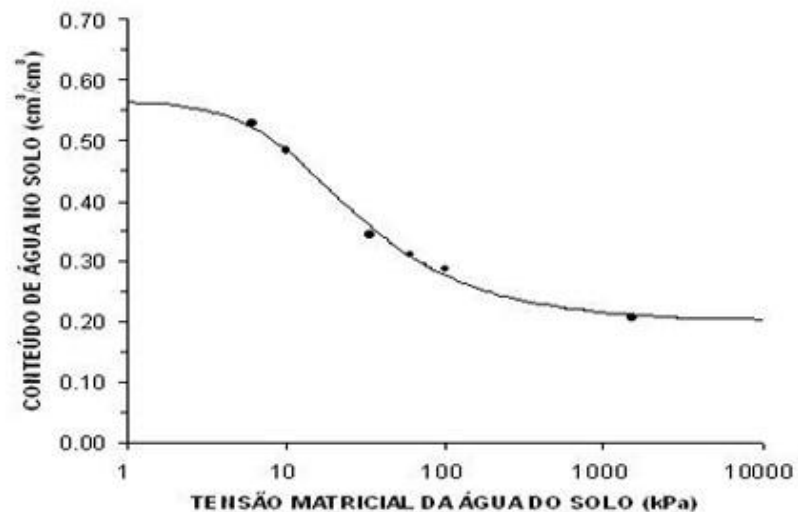
$$Neg\ Acum = CAD \cdot \ln [ARM/CAD]$$



Curva de retenção de água no solo

Curva de retenção: relaciona o teor ou o conteúdo de água no solo com a força (tensão) com que ela está retida pelo mesmo. Permite uma estimativa da disponibilidade de água no solo para as plantas, na profundidade de solo considerada.

- ✓ O limite superior, que é chamado de capacidade de campo (CC), é o máximo que um solo armazena de água sem que haja perdas por percolação. Isto ocorre por que neste momento a força da gravidade exercida para baixo através do peso, entra em equilíbrio com as forças de capilaridade dos poros, cessando assim a percolação de água.
- ✓ No limite inferior da CAD, que é chamado de ponto de murcha permanente (PMP), o armazenamento é tão pequeno que a planta mesmo gastando muita energia, não consegue retirar a água dos poros, por que neste momento a tensão de água no solo é muito alta (1500KPa).



Calculando a Capacidade de Água Disponível (CAD)

$$CAD = 0,01.(CC\% - PMP\%).\rho.Z$$

ρ é a densidade do solo (kg/m^3);

Z é a profundidade efetiva do sistema radicular (m).

Solos argilosos: 200 mm/m

Solos com textura média: 140 mm/m

Solos arenosos: 60 mm/m

Exemplo:

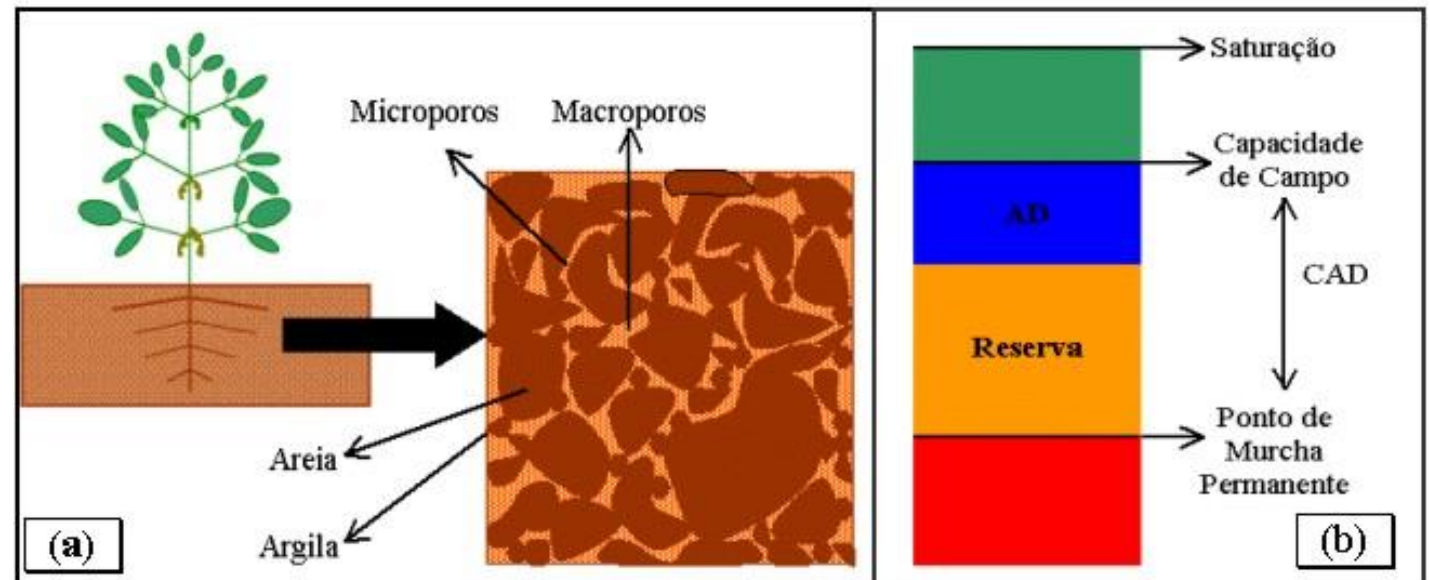
CC = 32%

PMP = 21%

$\rho = 1200 \text{ kg}/\text{m}^3$

Z = 50cm

CAD = _____ mm



Água Facilmente Disponível (AFD)

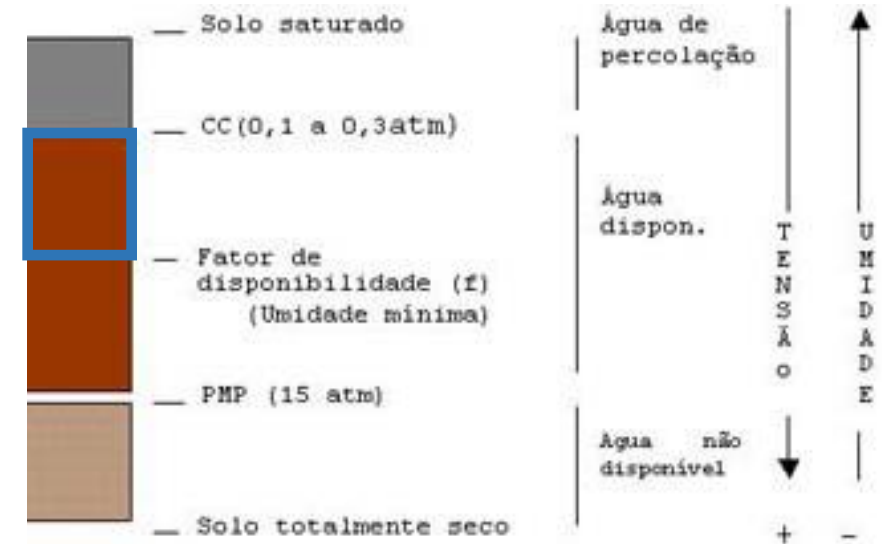
A AFD é uma fração (percentual p) da capacidade de água disponível (CAD). Pode ser extraída do solo a partir do armazenamento máximo, sem que ocorra déficit hídrico na cultura.

$$AFD = p \cdot CAD$$

AFD é determinada em laboratório, dependente do tipo de cultura e do consumo máximo de água nos diferentes estádios fenológicos. Para fins práticos, normalmente, adota-se $p = 0,35$ para culturas dos grupos 1 e 2, e $p = 0,5$ para culturas do grupo 3 e 4.

TABELA 14.3 Fração p para grupos de cultura e ETC. Fonte: Doorenbos & Kassam (1994).

Culturas	Grupo	ETc (mm d ⁻¹)									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Cebola, Pimentão, Batata	1	0,50	0,43	0,35	0,30	0,25	0,23	0,20	0,20	0,18	
Banana, Repolho, Uva, Ervilha, Tomate	2	0,68	0,58	0,48	0,40	0,35	0,33	0,28	0,25	0,23	
Alfafa, Feijão, Citros, Amendoim, Girassol, Trigo	3	0,80	0,70	0,60	0,50	0,45	0,43	0,38	0,35	0,30	
Algodão, Milho, Sorgo, Soja, Cana-de-açúcar	4	0,88	0,80	0,70	0,60	0,55	0,50	0,45	0,43	0,40	



Tipos de Balanço Hídrico

- ❑ BH Normal (mensal) - análise climatológica
- ❑ BH sequencial (diário, semanal, decendial, mensal) - acompanhamento das condições
- ❑ BH de culturas - monitoramento da irrigação, zoneamentos, estimativa de produtividade

Elaboração do BHC: Roteiro

- 1) Estimativa da E_{To} com o método mais adequado para a região, dependendo dos dados meteorológicos disponíveis.
- 2) Obtenção de dados de chuva (P)
- 3) Calcular $(P - E_{To})$, preservando os sinais positivos (+) e negativos (-)
- 4) A partir deste ponto deve-se completar as colunas (N_{Ac} e ARM) simultaneamente.
- 5) Inicia-se no primeiro mês com valor de $(P - E_{To}) < 0$ (negativo).

Elaboração do BHC: Roteiro

6) Determinação do NAc e do ARM

- Se $(P-ET_o) < 0 \rightarrow$ Calcula-se o NAc, ou seja, os valores de $(P-ET_o)$ negativos, e posteriormente se calcula o valor do ARM

$$ARM = CAD * \exp(NAc/CAD)$$

- Se $(P-ET_o) \geq 0$ Calcula-se primeiro o ARM e, posteriormente, calcula-se o Nac,

$$NAc = CAD * \ln (ARM/CAD);$$

$$ARM = ARM \text{ anterior} + (P-ET_o);$$

- Nesse caso o NAC deve ser determinado no caso de haver um próximo período com $(P-ET_o) < 0$.

7) Cálculo da Alteração ($ALT = \Delta ARM$)

$ALT = ARM - ARM \text{ anterior}$ ($ALT > 0 \rightarrow$ reposição; $ALT < 0 \rightarrow$ retirada de água do solo)

Elaboração do BHC: Roteiro

8) Determinação da ETR (Evapotranspiração Real)

- Se $(P-ET_o) < 0 \rightarrow ETR = P + |ALT|$
- Se $(P-ET_o) \geq 0 \rightarrow ETR = ET_o$

9) Determinação da DEF (Deficiência hídrica = o quanto o sistema solo-planta deixou de evapotranspirar)

- $DEF = ET_o - ETR$


10) Determinação do EXC (Excedente hídrico, que corresponde a água que não pode ser retida e drena em profundidade = água gravitacional)

- Se $ARM < CAD \rightarrow EXC = 0$
- Se $ARM = CAD \rightarrow EXC = (P-ET_o) - ALT$

Exemplo de Cálculo do BH Climatológico

Formosa - GO

Calcula-se o TOTAL e a MÉDIA



MÊS	ETo	P	P-ETo	NAC	ARM	ALT	ETR	DEF	EXC
Jan	116	271	155	0	100	0	116	0	155
Fev	97	215	118	0	100	0	97	0	118
Mar	104	230	126	0	100	0	104	0	126
Abr	88	119	31	0	100	0	88	0	31
Mai	78	20	-58	-58	56	-44	64	-14	0
Jun	63	9	-54	-112	33	-23	32	-31	0
Jul	62	5	-57	-169	18	-15	20	-42	0
Ago	90	12	-78	-247	8	-10	22	-68	0
Set	94	30	-64	-311	4	-4	34	-60	0
Out	109	123	14	-171	18	14	109	0	0
Nov	106	223	117	0	100	82	106	0	35
Dez	106	280	174	0	100	0	106	0	174
Total	1113	1537	424	-1068	737	0	898	-215	639
Média	93	128	35	-89	61	0	75	-18	53

Aferição do Balanço Hídrico

$$\Sigma P = \Sigma ETP + \Sigma(P-ETP)$$

$$\Sigma P = \Sigma ETR + \Sigma EXC$$

$$\Sigma ETP = \Sigma ETR + \Sigma DEF$$

$$\Sigma ALT = 0$$

Aferição BHC Normal

$$\Sigma P = \Sigma ETo + \Sigma(P-ETo) \rightarrow 1537 = 1113 + 424$$

$$\Sigma P = \Sigma ETR + \Sigma EXC \rightarrow 1537 = 898 + 639$$

$$\Sigma ETo = \Sigma ETR + \Sigma DEF \rightarrow 1113 = 898 + 215$$

$$\Sigma ALT = 0 \rightarrow 0 = 0$$

Balanço Hídrico Sequencial

- ✓ Mesma metodologia de cálculo do BH normal.
- ✓ Entretanto, quando iniciar, já que ele não é cíclico.

CAD = 75mm

Tempo (dec.)	Nº dias	T°C	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP	Nac	ARM	ALT	ETR	DEF	EXC
J1	10	24,1	102,9	40,68	62,2						
J2	10	24,1	58,9	40,56	18,3						
J3	11	22,7	72,5	38,56	33,9						
F1	10	22,9	27,5	34,41	-6,9						
F2	10	24,3	7,3	39,44	-32,1						
F3	8	25,0	31,5	33,76	-2,3						
M1	10	23,7	0,0	35,29	-35,3						
M2	10	24,2	68,8	37,33	31,5						
M3	11	22,9	43,2	36,07	7,1						
A1	10	25,1	22,3	38,53	-16,2						
A2	10	24,0	0,0	34,77	-34,8						
A3	10	20,0	8,4	22,44	-14,0						
M1	10	20,8	0,1	23,60	-23,5						
M2	10	22,1	0,1	27,13	-27,0						
M3	11	19,0	159,2	20,86	138,3						
J1	10	19,5	0,2	19,59	-19,4						
J2	10	19,1	18,3	18,58	-0,3						
J3	10	17,8	23,7	15,76	7,9						
J1	10	17,6	0,0	15,40	-15,4						
J2	10	16,9	0,0	14,03	-14,0						
J3	11	18,1	8,1	18,30	-10,2						
A1	10	18,5	0,0	18,04	-18,0						
A2	10	19,7	0,1	21,17	-21,1						
A3	11	21,7	23,5	29,17	-5,7						
S1	10	20,5	14,1	24,48	-10,4						
S2	10	20,5	10,3	24,64	-14,3						
S3	10	19,2	10,8	21,12	-10,3						
O1	10	23,4	33,1	35,33	-2,2						
O2	10	23,5	29,7	36,04	-6,3						
O3	11	22,6	56,1	36,11	20,0						
N1	10	21,6	24,6	30,56	-6,0						
N2	10	22,9	47,5	35,35	12,2						
N3	10	22,8	44,7	34,78	9,9						
D1	10	22,3	49,7	33,86	15,8						
D2	10	22,5	32,0	34,50	-2,5						
D3	11	23,6	40,7	42,66	-2,0						

Balanço Hídrico de Cultura

- ✓ Mesma metodologia de cálculo do BH normal.
- ✓ Porém, a evapotranspiração da cultura, $ET_c = k_c \cdot ET$, passa a ser o referencial: $P - ET_c$.
- ✓ Mais uma vez: quando iniciar?

CAD = 75mm

Tempo (dec.)	Nº dias	T°C	P (mm)	ETP (mm)	kc	ETc (mm)	P-ETc	Nac	ARM	ALT	Etr	DEF	EXC
M1	10	23,7	0,0	35,29			-35,3						
M2	10	24,2	68,8	37,33			31,5						
M3	11	22,9	43,2	36,07			7,1						
A1	10	25,1	22,3	38,53			-16,2						
A3	10	20,0	8,4	22,44			-14,0						
M1	10	20,8	0,1	23,60			-23,5						
M2	10	22,1	0,1	27,13			-27,0						
M3	11	19,0	159,2	20,86			138,3						
J1	10	19,5	0,2	19,59			-19,4						
J2	10	19,1	18,3	18,58			-0,3						
J3	10	17,8	23,7	15,76			7,9						
J1	10	17,6	0,0	15,40			-15,4						
J2	10	16,9	0,0	14,03			-14,0						
J3	11	18,1	8,1	18,30			-10,2						
A1	10	18,5	0,0	18,04			-18,0						
A2	10	19,7	0,1	21,17			-21,1						
A3	11	21,7	23,5	29,17			-5,7						
S1	10	20,5	14,1	24,48			-10,4						
S2	10	20,5	10,3	24,64			-14,3						
S3	10	19,2	10,8	21,12			-10,3						
O1	10	23,4	33,1	35,33			-2,2						
O2	10	23,5	29,7	36,04			-6,3						
O3	11	22,6	56,1	36,11			20,0						
N1	10	21,6	24,6	30,56	0,20		-6,0						
N2	10	22,9	47,5	35,35	0,30		12,2						
N3	10	22,8	44,7	34,78	0,50		9,9						
D1	10	22,3	49,7	33,86	0,80		15,8						
D2	10	22,5	32,0	34,50	0,90		-2,5						
D3	11	23,6	40,7	42,66	1,00		-2,0						
J1	10	24,1	102,9	40,68	1,00		62,2						
J2	10	24,1	58,9	40,56	1,10		18,3						
J3	11	22,7	72,5	38,56	0,90		33,9						
F1	10	22,9	27,5	34,41	0,80		-6,9						
F2	10	24,3	7,3	39,44	0,50		-32,1						
F3	8	25,0	31,5	33,76	0,40		-2,3						

Balanço Hídrico para Controle da Irrigação

- **Irrigação:** sempre que a AFD_f do período anterior tenha chegado próximo ao limite crítico, ou seja, $AFD \cong 0$. A quantidade de água a ser irrigada depende do critério adotado:
 - ✓ **DR fixa** (lâmina de irrigação igual a um valor mínimo ($0,25AFD$) ou máximo ($0,50AFD$))
 - ✓ **DR variável** (igual a AFD adotada e a AFD do final do período anterior)

A fim de evitar perdas por deficiência hídrica na cultura do milho, semeada em 01/11/2013, proceda, a partir do balanço hídrico, o cálculo da irrigação necessária. Assuma uma CAD = 60mm, o fator $p = 0,60$ e a AFD = 36mm.

Período	ET _o (mm)	K _c	ET _c (mm)	P (mm)	(P+I)-ET _c (mm)	AFDi (mm)	AFDf (mm)	I (mm)
1-10/11/2013	33	0,2		56		36		
11-20/11/2013	34	0,3		0				
21-30/11/2013	34	0,4		0				
1-10/12/2013	38	0,7		2				
11-20/12/2013	42	0,9		9				
21-31/12/2013	41	0,9		16				
1-10/1/2014	40	1,0		18				
11-20/1/2014	39	1,2		23				
21-31/1/2014	39	1,2		29				
1-10/2/2014	36	1,0		13				
11-20/2/2014	37	0,9		25				
21-28/2/2014	36	0,8		19				
1-10/3/2014	35	0,7		12				
11-20/3/2014	34	0,5		39				
21-31/3/2014	34	0,4		8				
1-10/4/2014	35			91				