



FACULTAD DE
AGRONOMIA
UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA

AGUA EN EL SUELO

Unidad de Hidrología
Depto. de Suelos y Aguas
Facultad de Agronomía

Bibliografía

- ALLEN, R.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. Crop evapotranspiration. FAO. Serie Riego y Drenaje. Tomo 56.
- DURÁN, A. 2000. Propiedades hídricas de los suelos. Cátedra de Edafología. Área de Suelos y Aguas. Facultad de Agronomía. Universidad de la República.
- GARCÍA, F. 1980. Relaciones agua-planta. Boletín N° 5. M.G.A.P. D.U.M.A.
- KRAMER, P. 1974. Relaciones hídricas de suelos y plantas.
- PUPPO, L.; HAYASHI, R.; MORALES, P. 2015. Determinación de parámetros físicos e hídricos del suelo. Curso a distancia: Requerimientos hídricos y manejo del riego.
<https://www.youtube.com/watch?v=j7C44PZwfnY>
- SILVA, A.; PONCE DE LEÓN, J.; GARCÍA, F. y DURÁN, A. 1988. Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. Boletín de Investigación N° 10. Facultad de Agronomía. Universidad de la República.

Conceptos teóricos-básicos en los que se fundamenta el riego

- La plantas necesitan absorber agua con facilidad para crecer y producir a un nivel óptimo.
- Extraen el agua retenida o almacenada en el suelo.
- La capacidad de almacenamiento de agua disponible regula el ciclo hidrológico a nivel del cultivo.

- Si la planta se encuentra en confort hídrico se mantendrá la apertura estomática.
- La apertura estomática permite la entrada de CO_2 que será utilizado en la fotosíntesis.
- Simultáneamente a la entrada de CO_2 se pierde vapor de agua hacia la atmósfera.



- Esta pérdida de agua a nivel foliar debe compensarse por absorción de agua a nivel de raíz.
- Si la tasa de absorción no compensa la tasa de transpiración el cultivo pierde turgencia y se produce ajuste estomático.
- Para que esto no ocurra, la humedad del suelo debe mantenerse por encima de determinado nivel (umbral de riego).

Lámina de riego

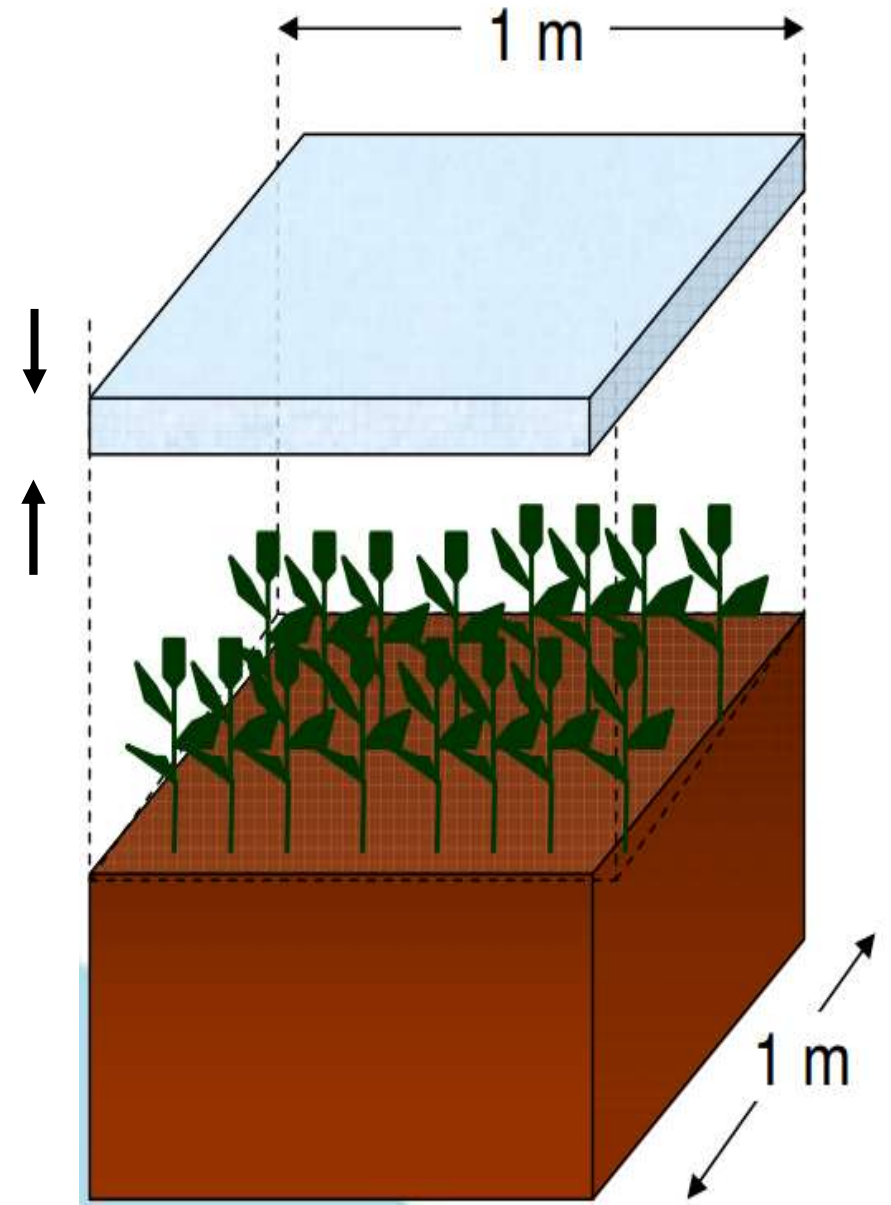
- Volumen de agua a aplicar por unidad de superficie, expresado en mm.
- Devuelve la humedad del suelo desde un valor umbral hasta un contenido óptimo para las plantas (Capacidad de Campo).

Lámina de riego (mm)

Equivalencias:

$1\text{mm} = 1\text{ L/m}^2$

$1\text{mm} = 10\text{ m}^3/\text{ha}$



Contenido de agua en el suelo

Humedad gravimétrica

$$H\%ps = \frac{Masa\ agua}{Masa\ suelo\ seco} \times 100$$

$$H\%vol = H\%ps \times DAp$$

Humedad volumétrica

$$H\%vol = \frac{Volumen\ agua}{Volumen\ total\ suelo} \times 100$$

Humedad en milímetros

$$H\%vol = mm / 10cm$$

mm/horizonte

mm totales en la profundidad radical

Densidad aparente DAp

$$DAp \text{ (g cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{Masa de suelo seco}}{\text{Volumen total suelo}}$$

Depende de:

- La textura
- La estructura
- La compactación

Valores típicos de DAp

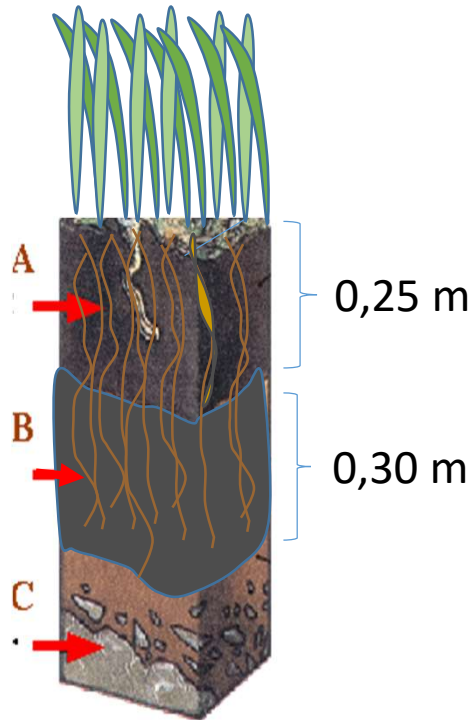
Clase textural	DAp (g cm ⁻³)
Arenosa	1,55
Franco arenosa	1,40
Franco arenosa fina	1,30
Franca	1,20
Franca limosa	1,15
Franca arcillosa	1,10
Arcillosa	1,05
Arcillosa agregada	1,00
Panes compactados	1,70 - 1,80

Valores críticos de densidad aparente, indicadores de compactación, según contenido de arcilla.

Contenido de arcilla (%)	Densidad Aparente (g cm ⁻³)
0-20	1,60
20-30	1,55
30-40	1,50
40-50	1,45
50-60	1,40
60-70	1,35
>70	1,30

Universidad de Santa María, RS, 2005.

Cálculo del contenido de humedad del suelo



Horiz	Volumen muestra cm ³	Peso fresco g	Peso seco g	H% ps	DAp g/cm ³	mm/10 cm	mm/horiz
A	3200	4430	3750	18,1	1,17	21,2	53
B	3100	4100	3200	28,1	1,03	28,9	87

El contenido de humedad del suelo en el momento de extraer las muestras es 140 mm

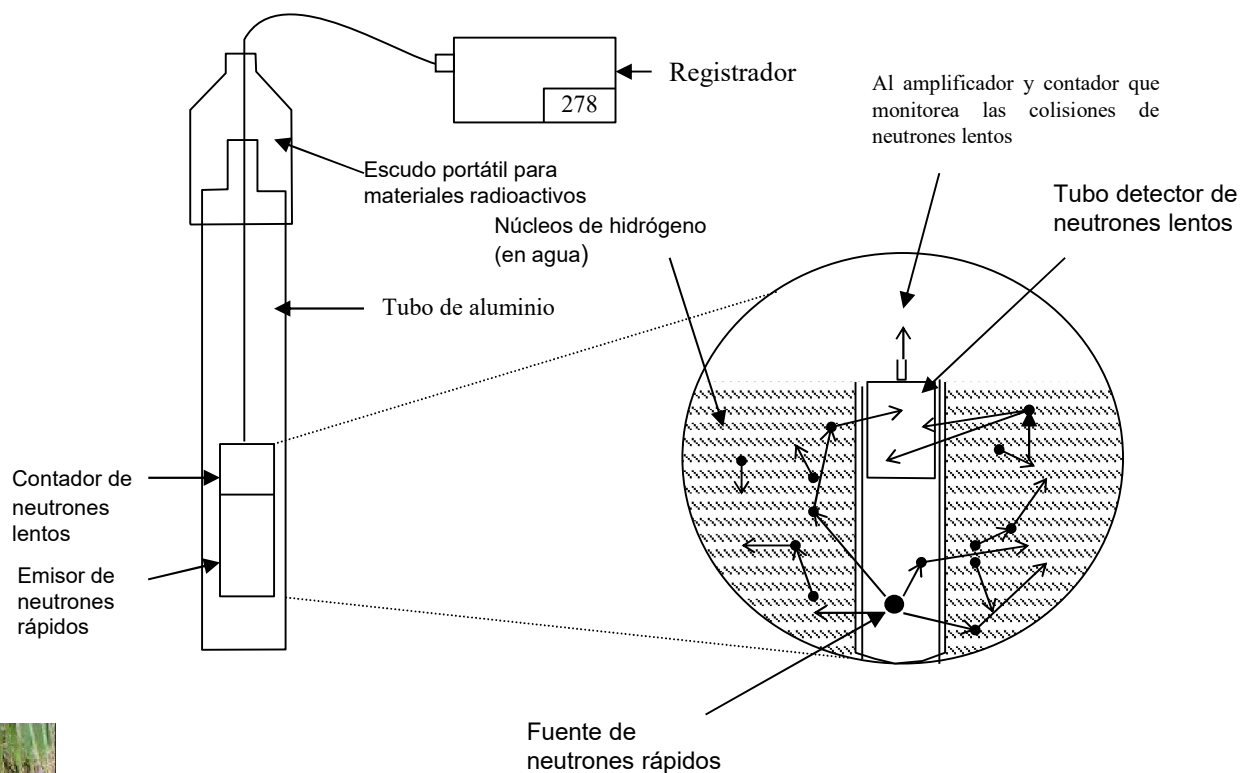
No están totalmente disponibles para el cultivo

Métodos para medir contenido de agua

- Gravimétrico
- Sonda de neutrones
- Reflectometría (TDR y FDR)
- Estimación por tacto y apariencia

https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/ca/farmerrancher/?cid=nrcs144p2_064100

Sonda de neutrones: Modo de operación



Ventajas

- Mediciones rápidas
- Mide el agua de un volumen
- No es destructivo

Desventajas

- Calibración para cada suelo y horizonte
- Alto costo (U\$S 5000 - 7000)
- Radiactiva (se precisa registro de usuario, regulado por MIEM)

Reflectometría (T.D.R. y F.D.R)

Ventajas

Mediciones rápidas y continuas

No es destructivo

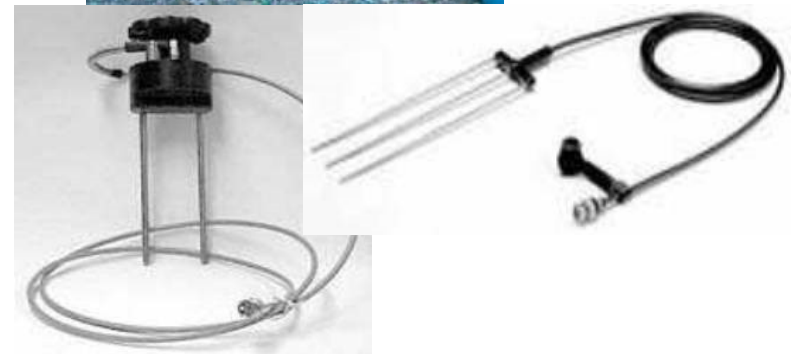
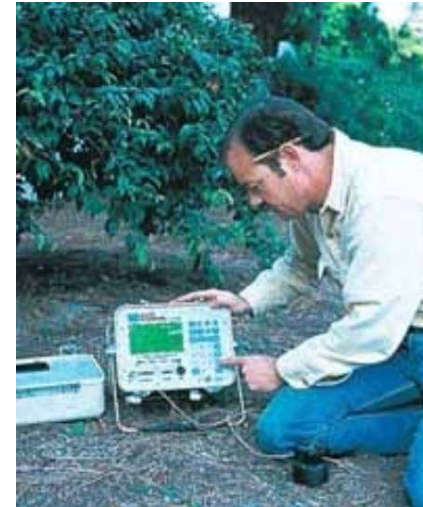
No es riesgosa

Desventajas

Alto costo del aparato

Muy difícil de instalar correctamente

Monitorea un pequeño volumen de suelo



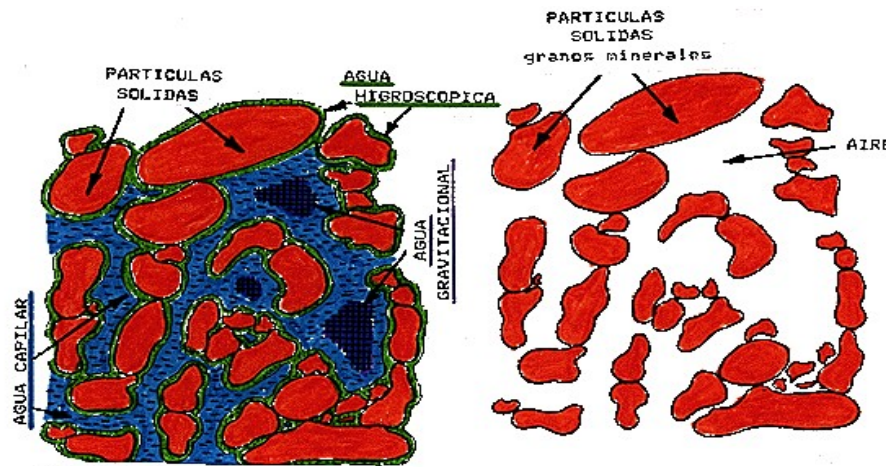
Cálculo de la lámina de riego

1. Es necesario conocer el perfil del suelo y el Agua Disponible/horizonte.
2. Se debe tener en cuenta el crecimiento radicular.
3. Se debe fijar un umbral de riego dependiendo del cultivo y del suelo.

Parámetros hídricos del suelo

Suelo Saturado SS:

Falta de oxígeno.
No hay adecuada absorción

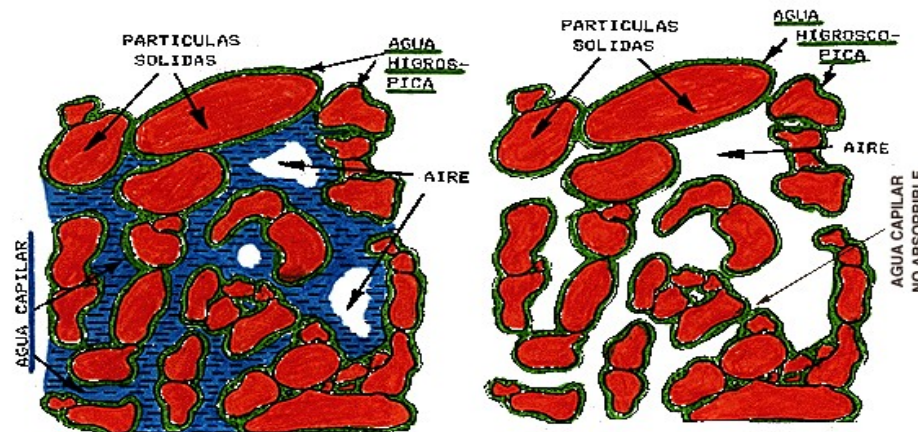


Suelo Seco:

Esta condición se obtiene secando el suelo a estufa

Capacidad de Campo CC:

Situación ideal para la absorción de agua por el cultivo



Punto de marchitez permanente PMP:

Aún queda agua en el suelo pero el cultivo no es capaz de extraerla

$$AD = CC - PMP$$

AD = Agua Disponible

CC = Capacidad de Campo

PMP = Punto de Marchitez Permanente

Capacidad de campo (CC)

Cantidad de agua máxima que el suelo puede retener, medida a las 48-72 horas después de una lluvia o riego que haya saturado el suelo (el contenido de agua continúa descendiendo lentamente con el tiempo).

Contenido de agua retenido a una tensión de 0,1 bar.

Depende del tipo de suelo, especialmente de su textura y estructura.

Podemos estimarla en base a las siguientes fórmulas:

Estimación de CC %ps a partir de la granulometría y la materia orgánica

Horizonte	Ecuación	R ²
A	$CC = 21,977 - 0,186(\%AR) + 2,601(\%MO) + 0,127(\%AC)$	0,815
B	$CC = 9,879 + 3,558(\%MO) + 0,336(\%AC)$	0,318
A arenoso	$CC = 8,659 + 2,571(\%MO) + 0,296(\%L)$	0,943
A+B	$CC = 18,448 - 0,125(\%AR) + 1,923(\%MO) + 0,295(\%AC)$	0,621

Silva et al., 1988

Punto de marchitez permanente (PMP)

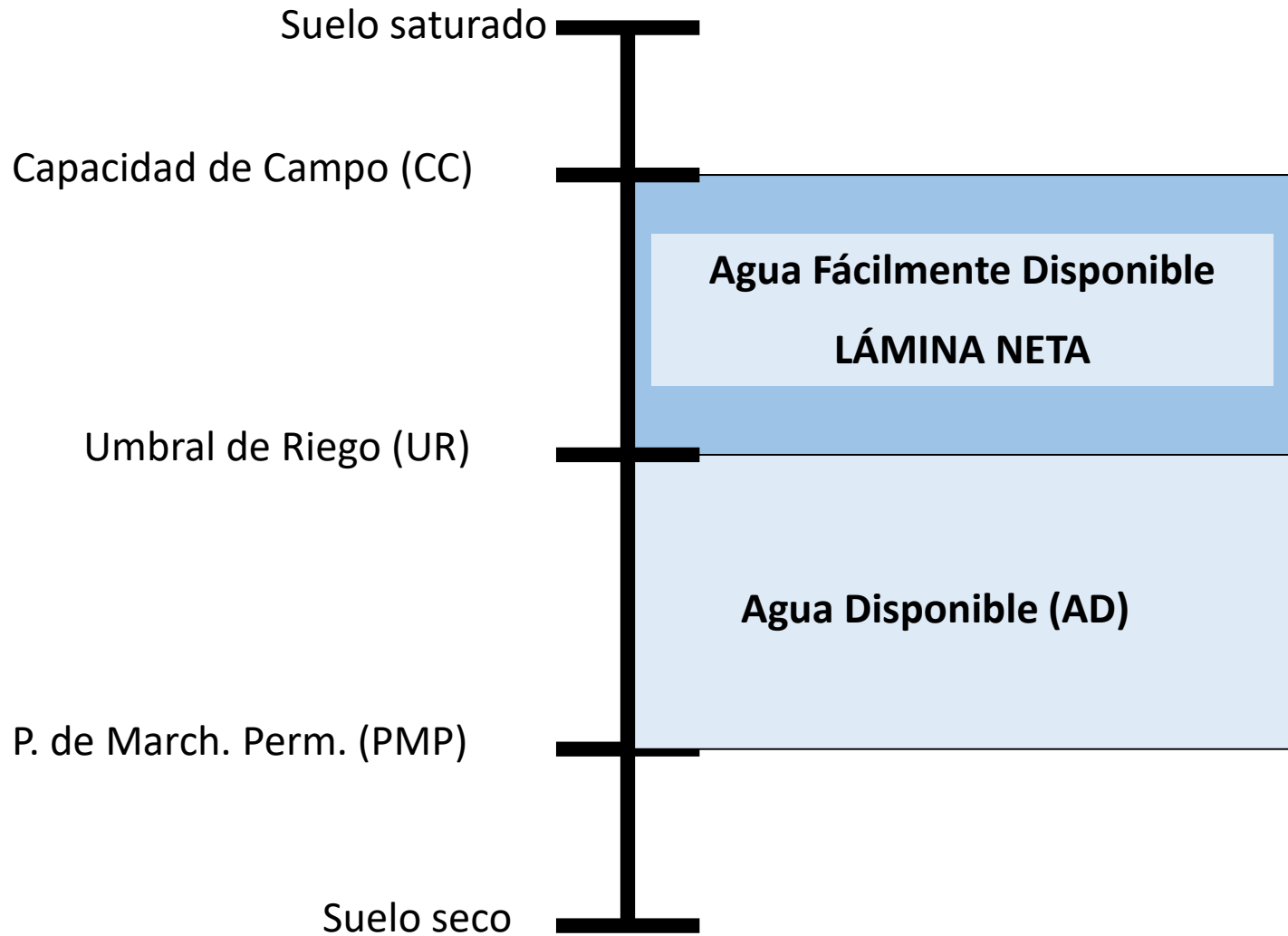
Es el contenido de agua retenida a una tensión de 15 bar. Su valor depende del tipo de suelo. Este es el límite de tensión hasta el cual una planta, adaptada a condiciones medias de humedad, puede extraer agua.

Fórmula recomendada para su estimación:

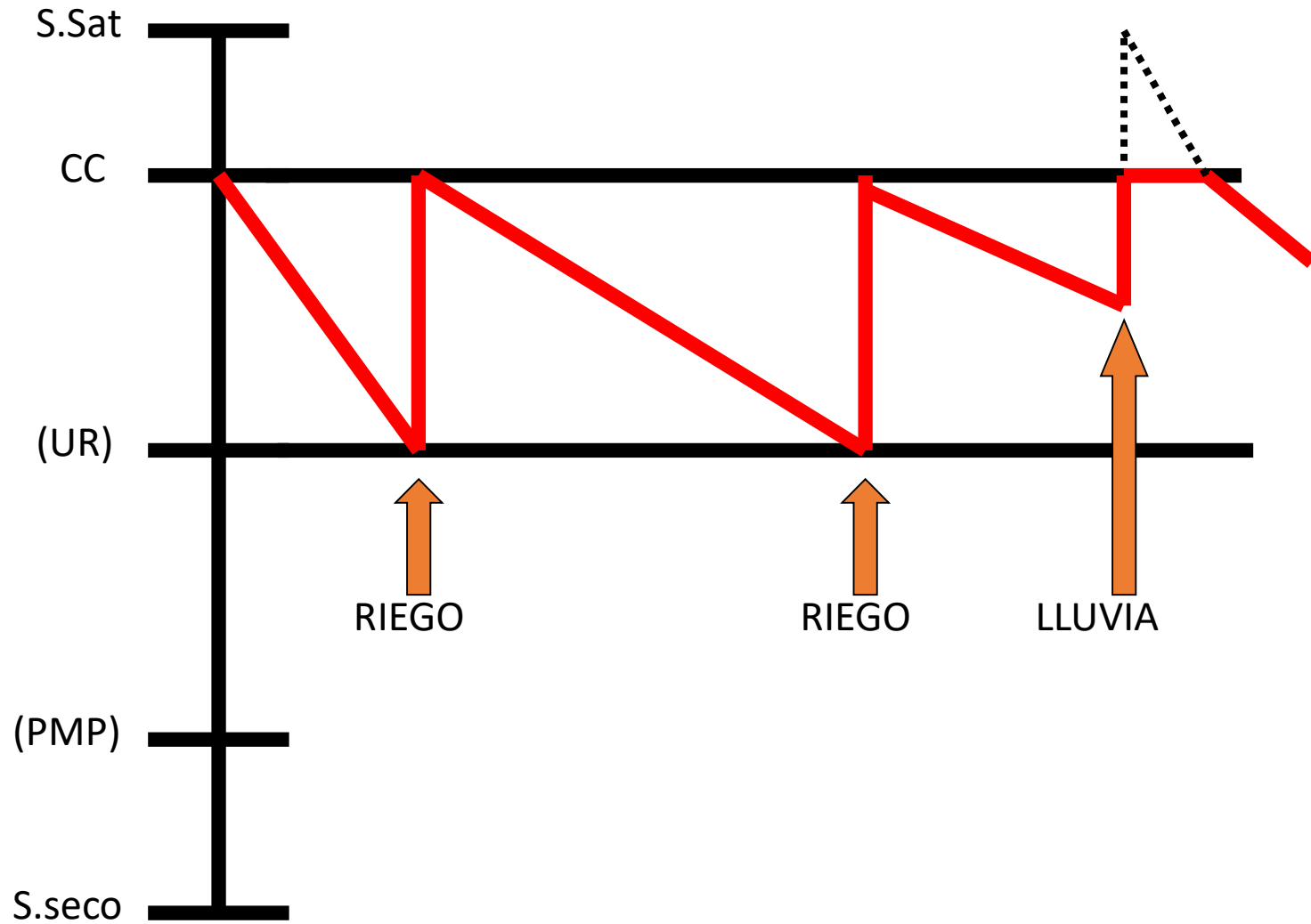
$$\text{PMP \%ps} = -5 + 0,74 \text{ CC \%ps}$$

Silva et al., 1988

Cantidad



Manejo del riego



Agua Disponible en mm/10 cm, retenida por algunos suelos del Uruguay

SUELO	HOR	TRAN	D _{Ap}	TEXT	CC	PMP	AD
Brunosol éutrico/subéutrico háptico	A	cl	1,20	F(p)	35	18	17
Vertisol rúptico lúvico	A	gr	0,98	F Ac	39	21	18
	B	gr-cl	1,31	Ac L	34	21	13
	C		1,23	Ac L	37	26	11
Brunosol subéutrico típico	A	cl	1,25	F Ac L	38	18	20
	B		1,41	Ac L	37	25	12
Brunosol subéutrico ócrico melánico	A	cl	1,39	F Ar	25	10	15
	B		1,51	Ac Ar	33	23	10
Argisol subéutrico melánico	A	ab	1,39	F L	32	11	21
	B		1,41	Ac L	38	26	12
Argisol/Planosol dístrico ócrico	A	ab	1,44	F Ar	18	6	12
	B		1,48	Ac Ar	36	26	10

TRANSICIÓN- cl: clara; gr: gradual; ab: abrupta.

TEXTURA – F: Franco; Ac: Arcilloso; Ar: Arenoso; L: Limoso

Potencial matriz

- El agua en el suelo está en movimiento o retenida.
- Las fuerzas de retención, adhesión y cohesión, constituyen el Potencial matriz.
- Al agua libre le corresponde un valor de potencial matriz de 0.
- Cuanto más seco el suelo menor es el potencial matriz.
- El agua se mueve hacia potenciales cada vez más negativos.
- Para evitar los signos negativos se usan los términos tensión o succión.

- Las unidades en que se mide el potencial matriz son unidades de presión:

$$1 \text{ bar} \cong 1 \text{ atm} \cong 1 \text{ kg cm}^{-2} = 10 \text{ m de columna de agua}$$

$$1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar}$$

$$1 \text{ kPa} = 1 \text{ cbar}$$

$$1 \text{ atm} = 14,7 \text{ PSI}$$

Métodos para medir potencial matriz

- Tensiómetros
- Bloque de yeso (de -50 kPa hasta -1000 kPa)
- Sensores de matriz granular

Tensiómetros

Ventajas

Precio reducido.

Medida directa del potencial matriz. Buena exactitud en el rango 0-80 cb.

Su lectura se puede automatizar con transductores de presión y un equipo registrador.

Fácil instalación.

Desventajas

Mantenimiento frecuente: nivel del agua, control de crecimiento de algas, controlar funcionamiento de los manómetros, etc.

Los vacuómetros no son muy precisos, sí lo son los transductores de presión.

Necesitan calibración para obtener el contenido de agua en volumen (curva tensión-humedad)

Trabaja solo en el rango de 0-80 cb.



Sensores de matriz granular

Ventajas

Miden de 0-200 kPa o cbar

Tienen mayor vida útil, no se disuelven en el suelo.

Compensación interna para niveles de salinidad comúnmente encontrados en los suelos.

Desventajas

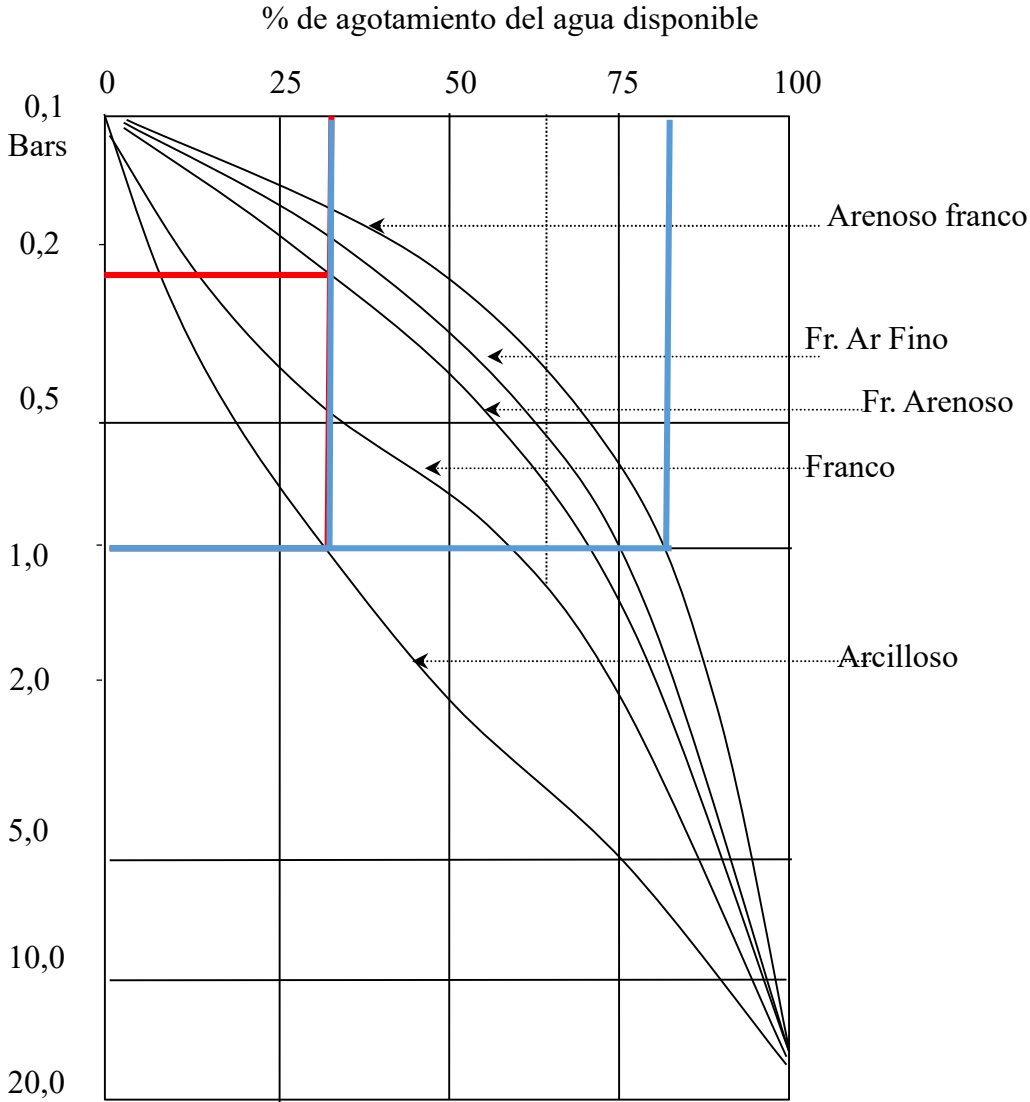
Se deben calibrar para cada suelo

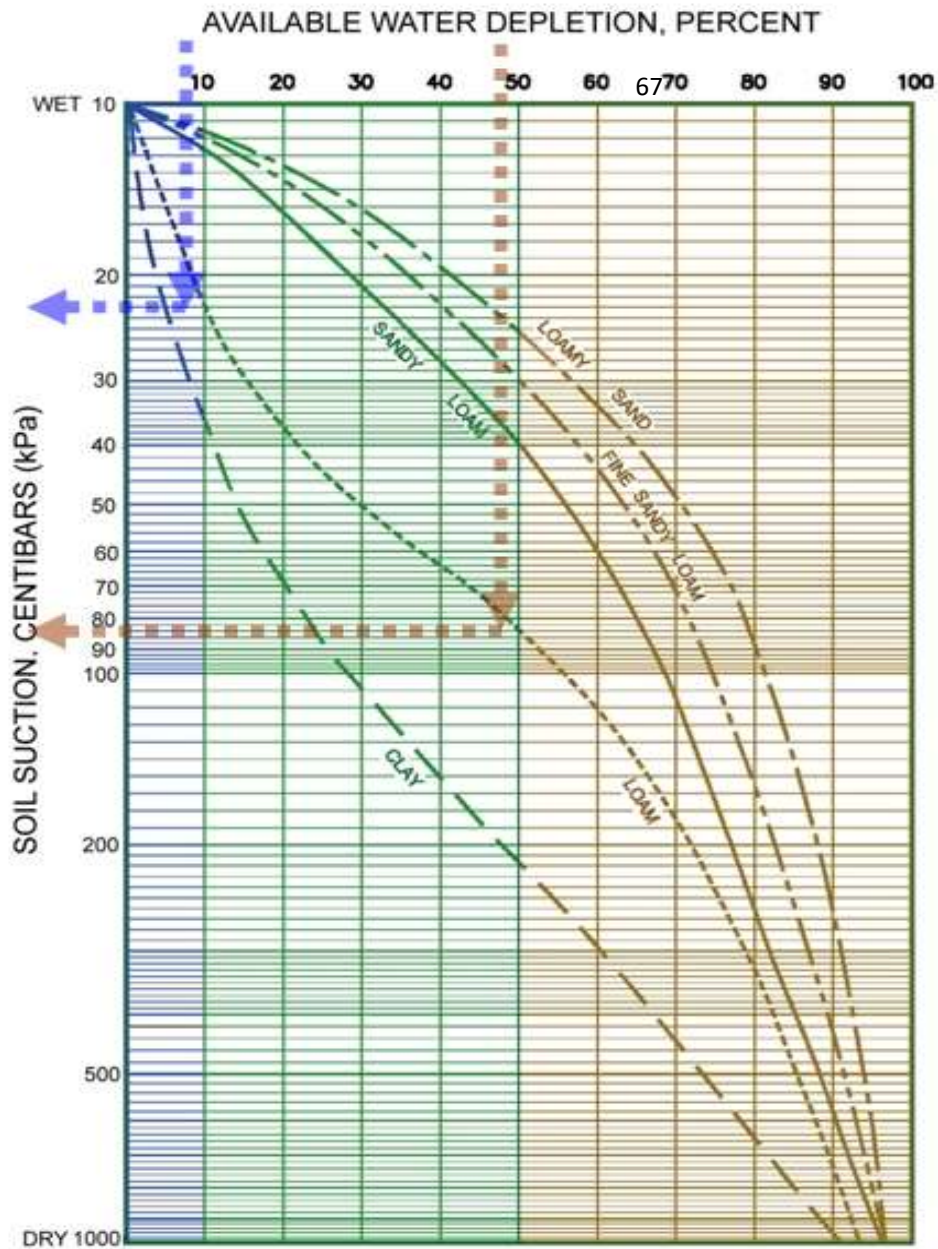


Curva tensión-humedad

- A cada contenido de agua le corresponde un valor de potencial matriz.
- Es una relación particular para cada horizonte.
- En laboratorio se construye con la Olla de Richards.
- Existen curvas teóricas.

Curvas tensión-agotamiento del agua disponible





Graph adapted from:
 Agronomy No.11 figure 30-2
 Irrigation of Agriculture Lands
 American Society of
 Agronomy R.M. Hagen, H.R.
 Haise, T.W. Edminster, editors.

Movimiento del agua en el suelo

$$v = -K \text{ grad } \Psi$$

Ley de Darcy, 1856

V = velocidad del agua

K = conductividad hidráulica

grad Ψ = gradiente de potencial, variación de potencial respecto a distancia

- En un suelo no saturado, el valor de la conductividad hidráulica disminuye a medida que desciende el contenido de humedad.
- A menor humedad se necesita un potencial más negativo a nivel de raíz para mantener la misma velocidad de absorción.

Debemos tener en cuenta que:

- El suelo retiene el agua con más fuerza a medida que se vuelve más seco.
- Al principio, luego de una lluvia o riego, el cultivo extrae el agua del suelo con gran facilidad.
- A medida que el suelo se seca, las fuerzas de retención aumentan y la planta debe realizar un esfuerzo osmótico para abastecerse de agua.
- Llega un momento en que la velocidad de transpiración es mayor que la velocidad de absorción y la planta pierde turgencia.
- Para evitar la deshidratación la planta pone en marcha sus mecanismos de control estomático, reduciendo la transpiración (y simultáneamente la fotosíntesis).

Umbral de riego

La premisa es que la velocidad de absorción pueda satisfacer la velocidad de evapotranspiración:

Velocidad o tasa de Evapotranspiración:

- Depende de la demanda atmosférica y del desarrollo del cultivo.

Velocidad de absorción de agua:

- Características propias del propio cultivo (densidad radicular, tensión osmótica que puede desarrollar, etc.)
- Textura, tensión de retención del agua y transmisibilidad del suelo

Generalmente se define el umbral para la etapa crítica del ciclo del cultivo y se usa el mismo valor durante toda la temporada de riego.

Tabla de p

p = fracción del agua disponible **Máxima** que se puede agotar sin que se produzcan síntomas de estrés hídrico.

Leguminosas	p (*)
Soja	0,50
Oleaginosos	
Canola	0,60
Girasol	0,45
Cereales	
Maíz	0,55
Caña de azúcar	0,65

Corrección por clima y etapa de desarrollo

$$0.1 \leq p = p_{\text{tabla}} + 0.04 * (5 - ETc) \leq 0.8$$

(*) para $ETc = 5 \text{ mm día}^{-1}$ y suelos medios Fuente: Allen et al., 1998

En la publicación FAO, Serie de Riego y Drenaje 56, hay un amplio listado de cultivos detallando los valores de p.

Umbral (fracción de agotamiento de AD) recomendados para distintos tipos de cultivo en función de la evapotranspiración

Tipo de cultivo	ET(mm/día)								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cebolla, morrón, papa	0.5	0.43	0.35	0.3	0.25	0.23	0.2	0.2	0.18
Banana, col, poroto, tomate	0.68	0.58	0.48	0.4	0.35	0.33	0.28	0.25	0.23
Alfalfa, judía, cítricos, maní, girasol, melón, trigo	0.8	0.7	0.6	0.5	0.45	0.43	0.38	0.35	0.3
Algodón, sorgo, olivo, viña, maíz, soja, remolacha, tabaco.	0.88	0.8	0.7	0.6	0.55	0.5	0.45	0.43	0.4

Fuente: Doorenbos y Kassam (1979)

Si el óptimo económico no coincide con el máximo rendimiento:

Nivel de rendimiento de diferentes cultivos cuando se manejan al nivel de riego indicado en términos de potencial de matriz

Cultivo	Potencial(atm)	Nivel de rendimiento (%)				
		90	80	70	60	50
GRANOS						
Maíz	-0.5	-0.9	-1.6	-2.4	-3.4	-4.9
Poroto	-0.5	-0.9	-1.6	-2.4	-3.4	-4.9
HORTALIZAS						
Papa	-0.5	-1.6	-2.1	-2.9	-3.7	-5.0
Cebolla	-0.25	-0.65	-1.1	-1.6	-2.0	-2.5
Tomate	-0.50	-2.0	-3.0	-5.0	-10.0	-
Lechuga	-0.15	-0.3	-0.5	-0.75	-1.1	-1.5
FORRAJERAS						
Alfalfa (silo)	-0.4	-0.9	-1.15	-1.65	-	-
Alfalfa(semilla)	-4 -5	-7.5	-9.1	-10.11	-	-
CULTIVOS INDUSTRIALES						
Algodón	-0.6	-2.5	-7.5	-9.75	-	-

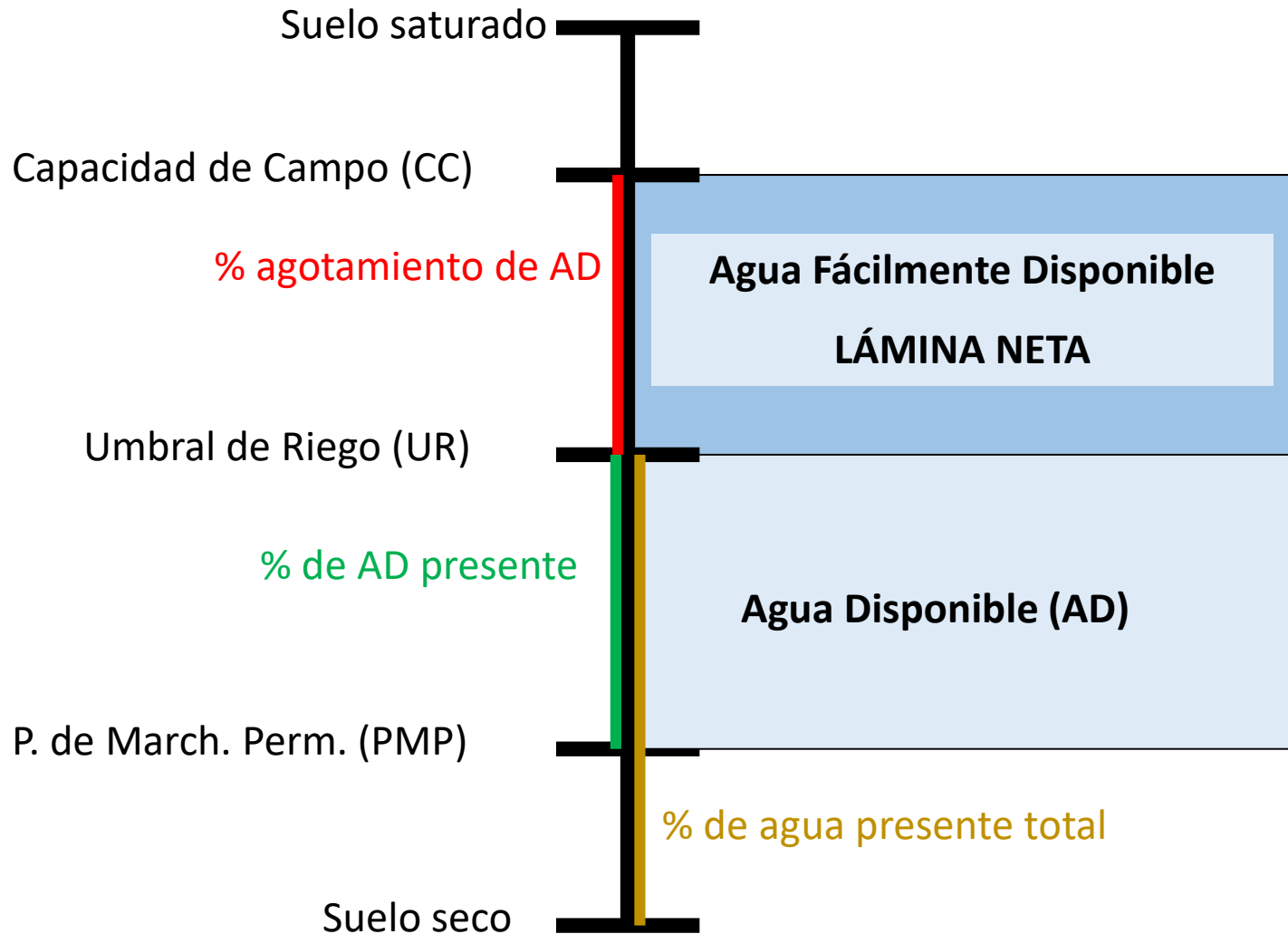
Fuente: Millar, A. 1984

Para definir la lámina de riego además se deberá tener en cuenta el método de riego:

Las tablas proporcionan el valor de **agotamiento de AD máximo** (p) para evitar condiciones de estrés hídrico.

En los métodos de riego de alta frecuencia (pivote , localizado):
Se manejan láminas menores (menores umbrales), con frecuencias mayores (cada dos días, diarias, dos veces por día).
Se parte de un suelo a CC y se repone el consumo del cultivo.

Cantidad



Ejemplo 1

Cuál es la lámina neta de riego para una pradera (trébol blanco y festuca)?

El suelo es franco limoso, homogéneo en primeros 40 cm, contiene 36% de arena, 12% de arcilla y 52% de limo. El contenido de M.O. es 3,5% y su densidad aparente es de $1,35 \text{ g/cm}^{-3}$.

$$\text{CC \%ps} = 21,977 - 0,186(\text{AR}) + 2,601(\text{MO}) + 0,127(\text{AC})$$

$$\text{CC \%ps} = 21,977 - 0,186(36) + 2,601(3,5) + 0,127(12) = 25,9$$

$$\text{PMP \%ps} = -5 + 0,74 \times \text{CC \%ps}$$

$$\text{PMP \%ps} = -5 + 0,74 \times 25,9 = 14,2$$

$$\text{AD} = \text{CC} - \text{PMP} = 11,7 \times 1,35 = 15,8 \text{ mm/10cm (en 40 cm} = 63,2 \text{ mm)}$$

$$\text{Lámina neta de riego} = 63,2 \times 0,50 = 31,6 \text{ mm}$$

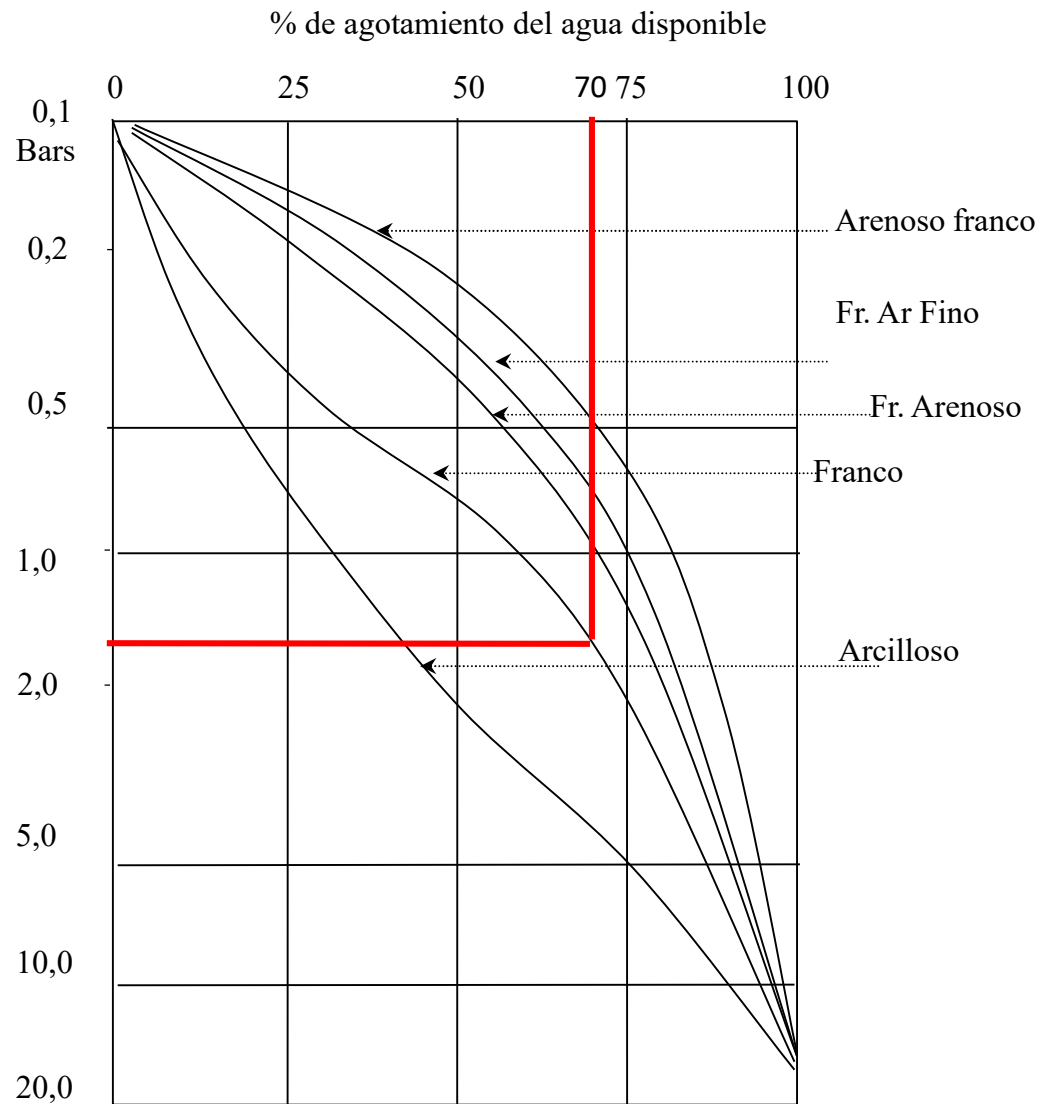
Ejemplo 2

Definir la lámina de riego para un cultivo de maíz; totalmente desarrollado, en un suelo franco, con las siguientes características:

Horiz.	Prof.cm	CC %ps	PMP %ps	DAp g/cm ⁻³
A	35	26	14	1,30
B	20	29	16	1,25

Se apunta a un 80 % del máximo de rendimiento, por lo tanto no deajo descender el potencial por debajo de -1,6 bar.

Curvas tensión-agotamiento del AD



Para una textura predominantemente franca esa tensión corresponde a un agotamiento de 70 % del AD.

Horiz.	AD % ps	mm/10 cm	mm/horiz.	mm Totales
A	12	15,6	54,6	
B	13	16,3	32,5	87

$$LN = 87 \times 0,70 = 61 \text{ mm}$$

Ejemplo 3

Perfil: Brunosol Éútrico Típico, Unidad EP-LB

Espesor cm	Horiz	D _{Ap} g/cm ³	CC % ps	PMP % ps	AD % ps	AD mm/10cm	AD mm/horiz
0-24	Ap	1,36	28,5	13,3	15,2	20,7	49,7
24-56	Bt	1,31	33,5	23	10,5	13,8	44,2
56-82	Bc	1,39	30,6	20,3	10,3	14,3	37,2

Con el suelo anterior, se definen las siguientes láminas por cultivo

Cultivo	Prof raíz cm	AD en prof raíz mm	p	LN mm	LB mm (60%)
Maíz	45	79	0.50	39	65
Sorgo	56	94	0.55	52	87
Alfalfa	56	94	0.50	47	78

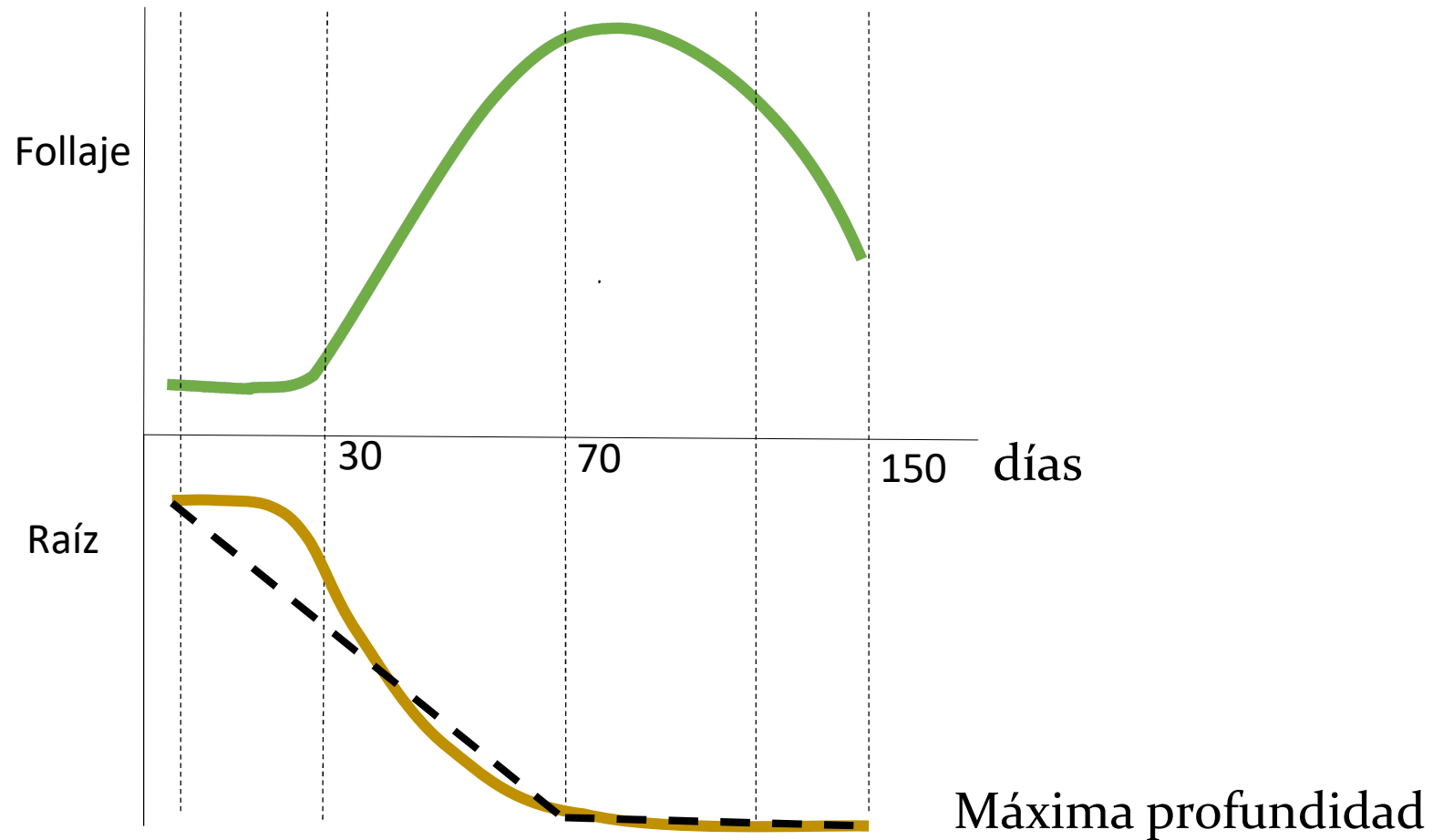
$$LB = LN / \text{efic de aplicación}$$

Se chequea con taladro para comprobar la profundidad que se está mojando

En un cultivo anual la lámina deberá adecuarse al crecimiento radical del cultivo:

- La lámina mínima, en la etapa inicial del cultivo, debe mojar al menos 20 cm.
- La lámina máxima, se alcanza cuando el cultivo completa su máximo desarrollo vegetativo y la profundidad de mojado queda definida por la profundidad radical efectiva.
- Las láminas intermedias se adecuan al desarrollo del cultivo.

El crecimiento de la raíz sigue un patrón similar al desarrollo del follaje



Cálculo de Lámina neta asumiendo crecimiento lineal de la raíz

En referencia al [Ejemplo 3](#) para el cultivo de maíz,

- En el primer mes los riegos deberán mojar 20 cm de profundidad (profundidad mínima a mojar). Lámina = 21 mm
- En el segundo mes la raíz tendrá una profundidad intermedia entre 20 y 39 cm (día 31 y 60 respectivamente).

45 cm	70 d
20 cm	x= 31 d
x= 39 cm	60 d

Profundidad radical media del mes 30 cm. Lámina = 29 mm

- A partir del día 70 y hasta el final se mojan 45 cm de profundidad.

Lámina = 39 mm

Velocidad de infiltración

Kostiakov, 1932

$$I = a * t^b$$

I – Velocidad de infiltración

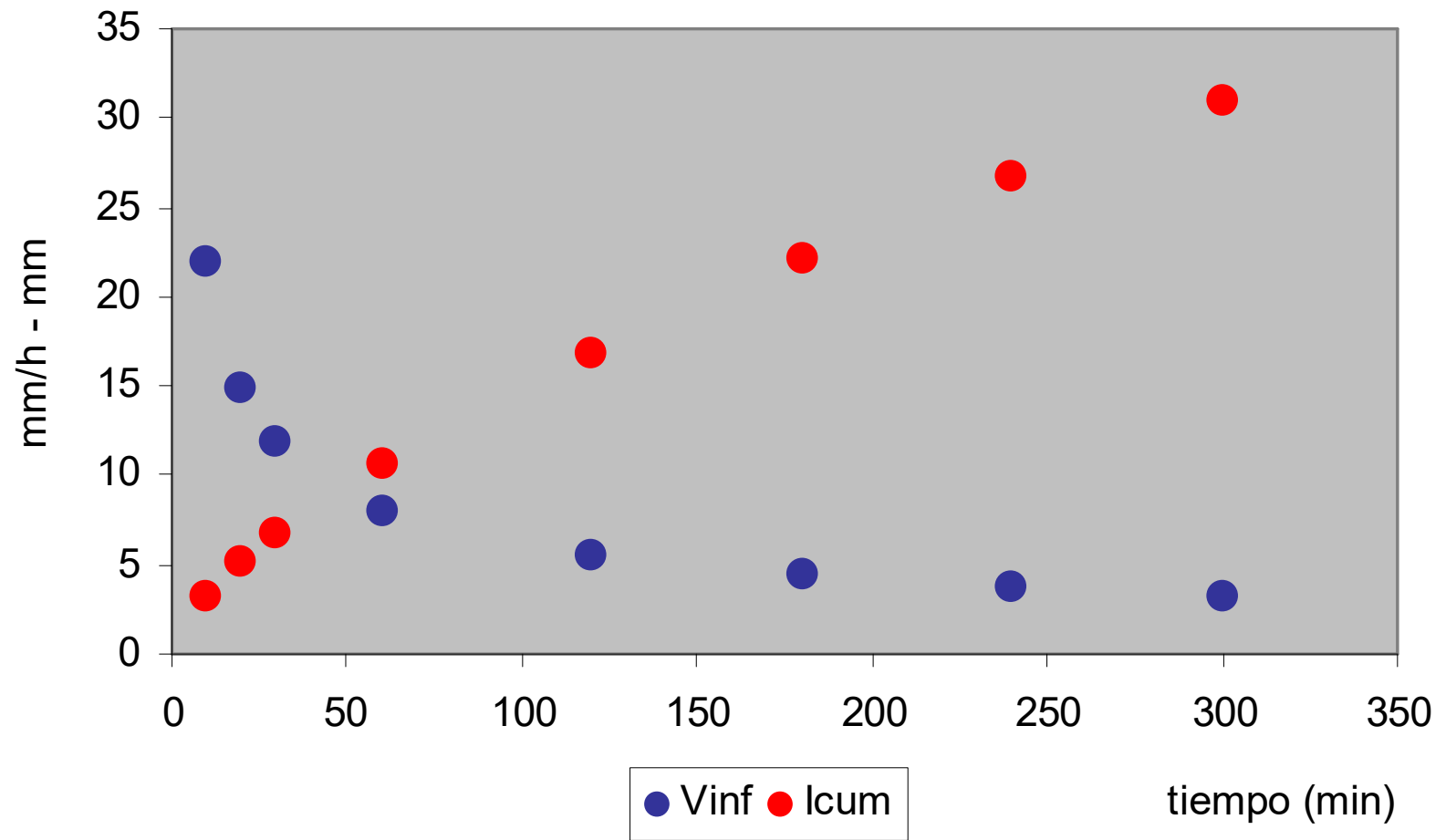
t – Tiempo de infiltración

a – Velocidad de infiltración en unidad de tiempo

b – Exponente adimensional (varía entre 0 y -1)

Si la tasa de aplicación $<$ a la tasa de infiltración; el agua infiltra tan rápido como fue aportada.

Si la tasa de aplicación $>$ a la tasa de infiltración; el agua se acumula en superficie o escurre si hay pendiente.



Infiltración acumulada

$$I_{cum} = \int_0^t a * t^b * dt = \frac{a}{b+1} * t^{b+1}$$

$$I_{cum} = A * t^B$$

$$A = a/(b+1)$$

$$B = b + 1 \text{ (varía entre 0 y 1)}$$

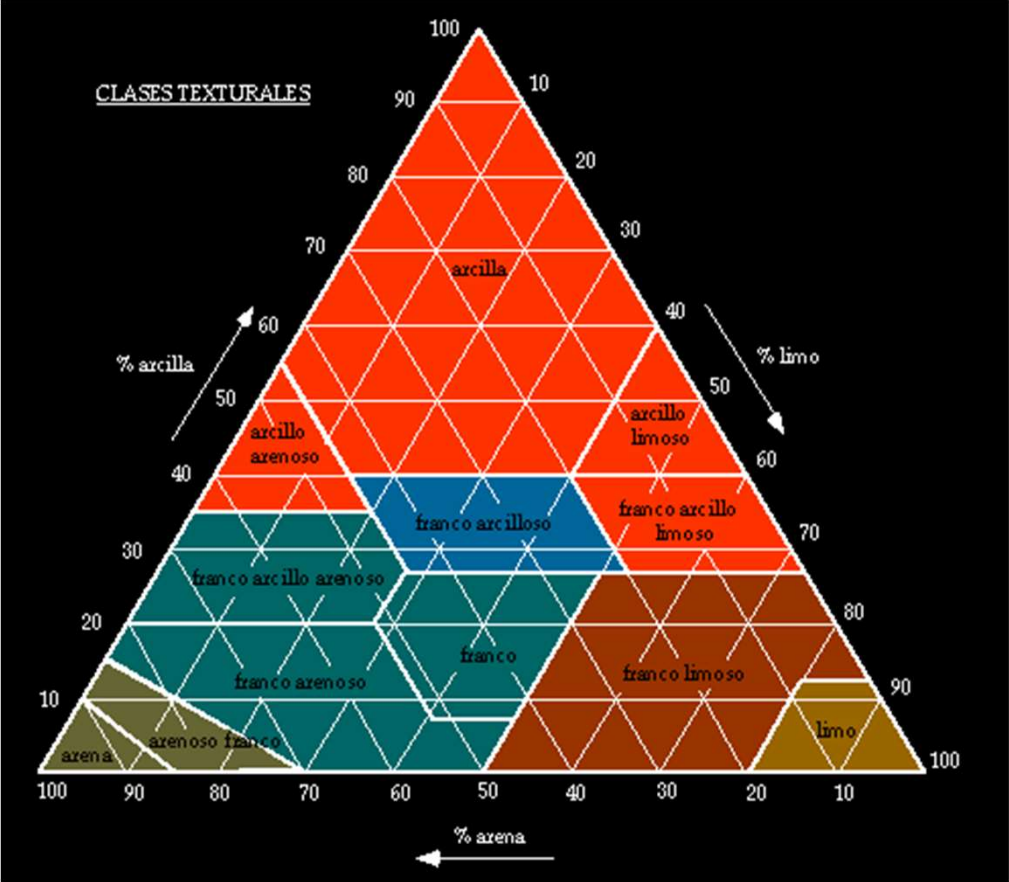
Depende de:

Humedad del suelo al inicio de la prueba

Textura

Estructura

Perfil



Olla de Richards



Fraco Arenoso y Fraco Arenoso fino

25-50%



50-75%



75-100%



Arenosa fina y Fraco Arenosa fina

25-50%



50-75%



75-100%



Fraco Arcillo Arenoso; Francos v Fraco Limosos

25-50%



50-75%



75-100%



Arcilloso, Fraco Arcilloso v Fraco Arcillo Limoso

25-50%



50-75%



75-100%

