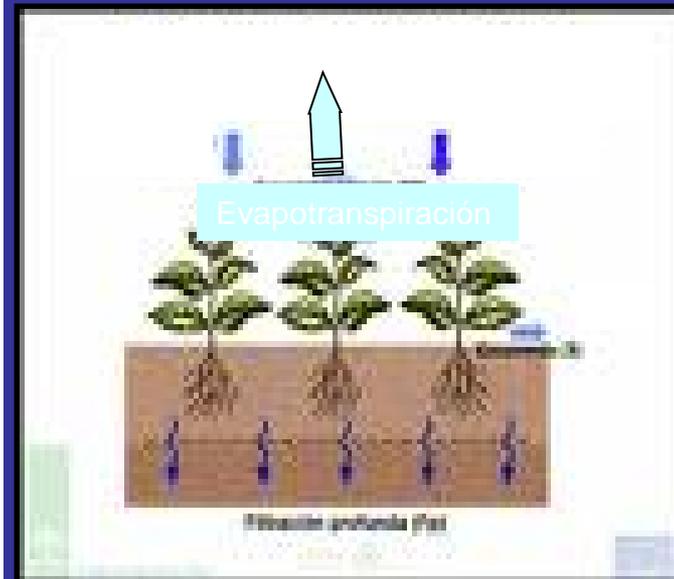


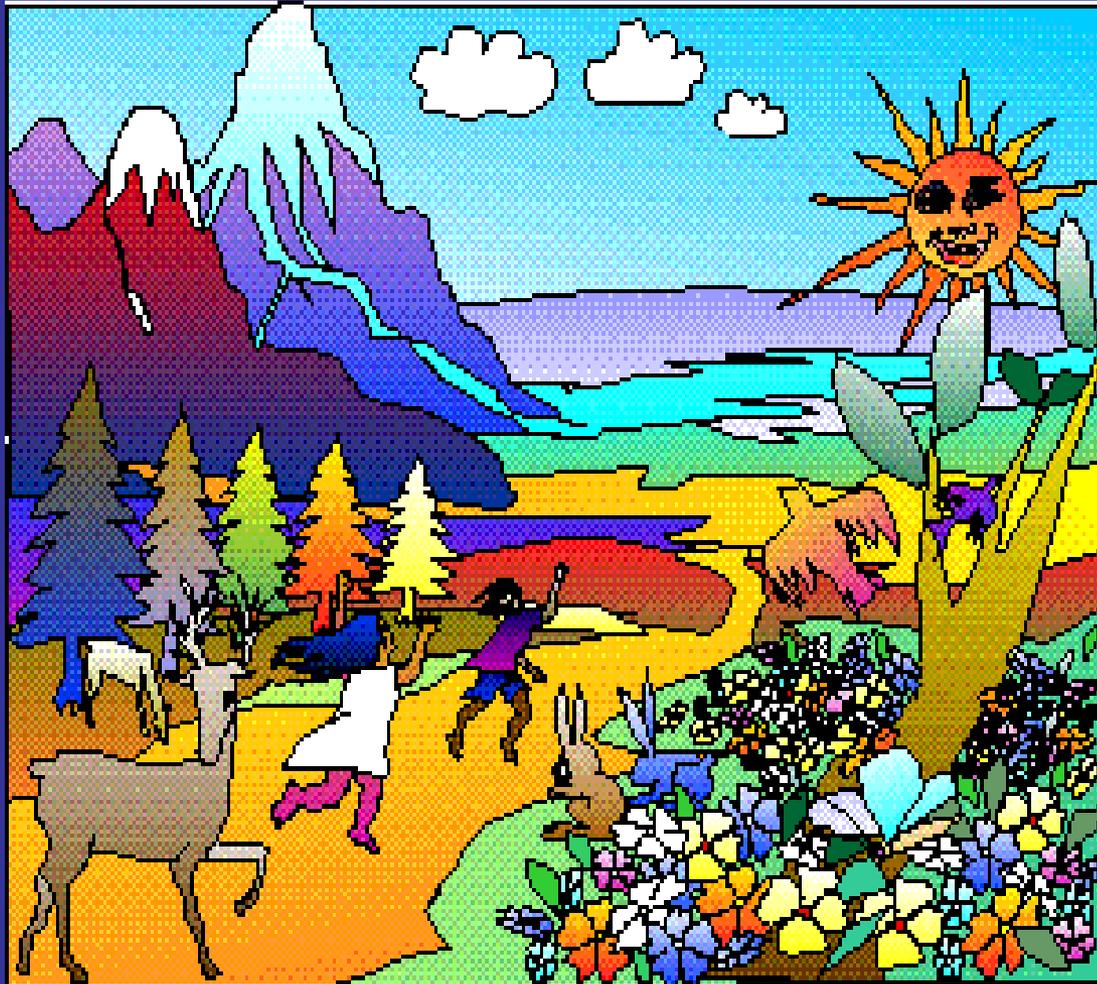
UNIDAD TEMÁTICA

EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN

- **Evaporación y Evapotranspiración.** Conceptos, causas y factores.
- Evapotranspiración real y potencial.
- Estimación de la Evapotranspiración potencial.
- Instrumental para evaporación y evapotranspiración.
- El **almacenaje de agua en el suelo.** Constantes físicas del suelo en relación con el almacenaje.
- Tipo y movilidad del agua edáfica. Medición de la humedad del suelo.
- El **Balance Hidrológico** del Suelo. Elementos, fórmulas, tipos de balance.



Ciclo del Agua.



EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN

- **Componentes del ciclo hidrológico, procesos de cambio de estado.**
 - **Intervienen en las relaciones hídricas: Planta \rightleftharpoons Medio Ambiente**

Importancia del agua en los procesos fisiológicos de los tejidos:

- a- Solvente y medio de reacciones químicas.
- b- Transporte de solutos orgánicos e inorgánicos.
- c- Mantiene la turgencia de las células.
- d- Componente en las reacciones de la fotosíntesis y en otros procesos fisiológicos de la planta.
- e- Elemento indispensable para la transpiración

Función refrescante que impide daños por altas temperaturas.

Funciones relacionadas con el CRECIMIENTO y DESARROLLO de las plantas.

EVAPORACIÓN

Pasaje “Pacífico” del agua del estado líquido (visible) al estado de vapor (invisible), a cualquier temperatura (5, 20, 35, 80°C).

Las moléculas de agua líquida deben aumentar su energía cinética a través de una fuente de calor.

- Energía requerida: 585 cal.g⁻¹, (20°C)

- Intensidad:



FACTORES

I) FACTORES AMBIENTALES QUE REGULAN LA EVAPORACIÓN

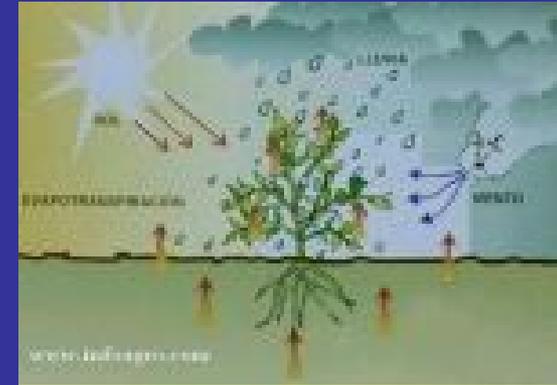
A) SUPERFICIE DE AGUA LIBRE

B) SUELO DESNUDO

C) SUELO CUBIERTO CON VEGETACIÓN

➤ Medición de la Evaporación

➤ Concepto de EVAPOTRANSPIRACIÓN



II) FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN A LA EPT

III) FACTORES DE LA PLANTA QUE AFECTAN LA EPT

IV) CONCEPTOS DE EP Y ER

➤ Medición y ESTIMACIÓN de la EVAPOTRANSPIRACIÓN

I) FACTORES AMBIENTALES QUE REGULAN LA EVAPORACIÓN (i)

A) SUPERFICIE DE AGUA LIBRE:

1. RADIACIÓN SOLAR: La radiación incidente aumenta la temperatura y la energía molecular

A > TEMPERATURA DEL AIRE

> demanda atmosférica
> energía molecular
> **EVAPORACIÓN**

2. VIENTO: El viento “recambia” el aire saturado de vapor por aire más seco.

A > Velocidad del viento > EVAPORACIÓN

3. ESTABILIDAD VERTICAL: Los movimientos ascendentes y descendentes del aire producen mezcla turbulenta aportando aire seco a la superficie evaporante.

4. HIDROLAPSO: Es el gradiente de humedad del aire entre dos alturas.

A > gradiente > EVAPORACIÓN

5. RUGOSIDAD SUPERFICIAL: A > Rugosidad > superficie evaporante por unidad de área
∴ > EVAPORACIÓN

6. SALINIDAD: Las sales aumentan la tensión entre las moléculas de agua.

A > SALINIDAD < EVAPORACIÓN

I) FACTORES AMBIENTALES QUE REGULAN LA EVAPORACIÓN (ii)

B) SUELO DESNUDO:

La intensidad dependerá, además de los factores vistos, de la cantidad de agua disponible en el suelo.

Relación CANTIDAD DE AGUA \longrightarrow TENSIÓN o FUERZA con que el agua está retenida en el suelo.

C) SUELO CUBIERTO CON VEGETACIÓN:

La intensidad del proceso evaporativo dependerá también de las características propias de cada cobertura vegetal:

DENSIDAD DE PLANTAS.

TIPO DE PLANTAS (C_3 ; C_4 ; CAM).

PROFUNDIDAD DE EXPLORACIÓN Y LONGITUD DE RAICES.

ALBEDO DE LA CAPA FOLIAR.

CAPACIDAD RESPIRATORIA.

CANTIDAD Y DISTRIBUCIÓN DE ESTOMAS.

MEDICIÓN DE LA EVAPORACIÓN:

EVAPOROMETROS

{ TANQUE DE EVAPORACIÓN TIPO A
EVAPOROMETRO DE PICHE



VARIACIÓN DIARIA Y ANUAL DE LA EVAPORACIÓN:

Ambas curvas muestran gran paralelismo con las temperaturas.

EVAPOTRANSPIRACIÓN:

Desde el punto de vista agrícola interesa conocer en forma simultánea:

ET { EVAPORACIÓN (Ev) del suelo
TRANSPIRACIÓN (Tr) de las plantas.

$$\underline{ET = Ev + Tr}$$

→ Cantidad total de agua perdida por EVAPORACIÓN y TRANSPIRACIÓN

II) FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN A LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Además de los vistos para evaporación mencionaremos aquellos relacionados con la demanda atmosférica y propios de la transpiración.

1. **HUMEDAD RELATIVA** (HR): Si la HR es elevada la demanda de transpiración disminuye.
2. **VIENTO**: Remueve el aire próximo al suelo y a las hojas, creando un ambiente más seco o más húmedo que regula la intensidad del proceso.
3. **TEMPERATURA DEL SUELO**: Influye en el proceso de absorción del agua por la planta.

A < Temperatura del suelo

- > Viscosidad del agua del protoplasma y de las paredes celulares
- < Permeabilidad de membranas celulares.
- < Actividad metabólica de raíces.
- < Velocidad de alargamiento de raíces.

4. CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO:

AGUA DISPONIBLE PARA LAS PLANTAS =

CAPACIDAD DE CAMPO (< tensión de retención)	↑ MAYOR ABSORCIÓN POR RAÍCES ↓ MENOR
AGUA <u>CAPILAR</u> ó " <u>UTIL</u> "	
P.M.P. (> tensión de retención)	

III) FACTORES DE LA PLANTA QUE AFECTAN LA ET

TRANSPIRACIÓN

- ESTOMÁTICA (importante)
- CUTICULAR (reducida)

1. APERTURA Y CIERRE DE ESTOMAS

Regulada por la turgencia de las células oclusivas

2. NÚMERO Y POSICIÓN DE LOS ESTOMAS

Variable en las distintas especies vegetales.

3. CANTIDAD, MORFOLOGÍA Y POSICIÓN DE LAS HOJAS

A > área foliar > transpiración

(relación con el eje principal: sombreado – radiación recibida)

4. MOVIMIENTO FOLIAR

Acartuchamiento de hojas (maíz, sorgo, etc)

5. DESARROLLO Y PROFUNDIDAD DE RAÍCES

A > profundidad > posibilidad de absorción

A > superficie radicular > absorción

(Micorrizas)



IV) CONCEPTOS DE EP Y ER

EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

Cantidad de agua que evaporaría un suelo y transpirarían las plantas si el suelo tuviera un contenido óptimo de humedad y la cobertura vegetal fuera completa.

EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL

Cantidad de agua que realmente evapora un suelo y transpiran las plantas de acuerdo al contenido de humedad del suelo y cobertura vegetal circunstanciales.
(Cultivos: Rendimiento Real – Producción Potencial)

$$\text{E.T. REAL} \leq \text{E.T.POTENCIAL}$$

MEDICIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

ETR: Lisímetros (ESTATICOS y DE PESADA)

ETP: Evapotranspirómetros

COMPLEJOS
COSTOSOS
ESCASA DIFUSIÓN

Utilizados en Francia, EEUU, Canadá

Carencia de registros. Complejidad de medición.

ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN (i)

1.- METODO DEL BALANCE HIDRICO

Considera los ingresos (POSITIVOS) y las salidas (NEGATIVOS) de agua de la superficie.

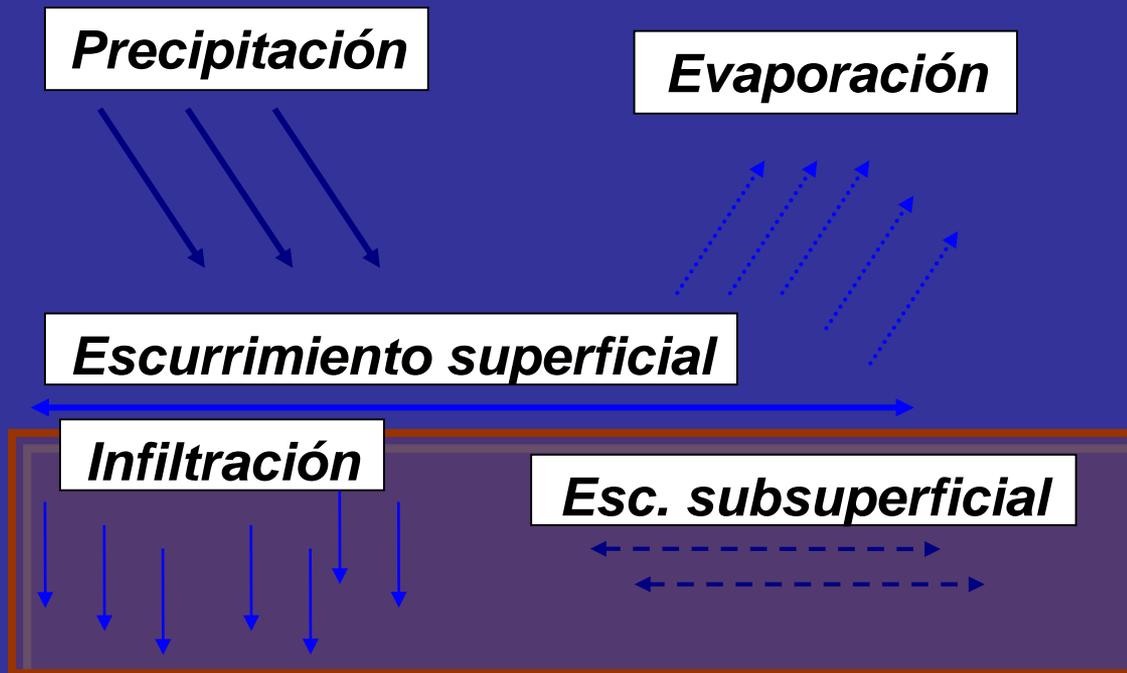
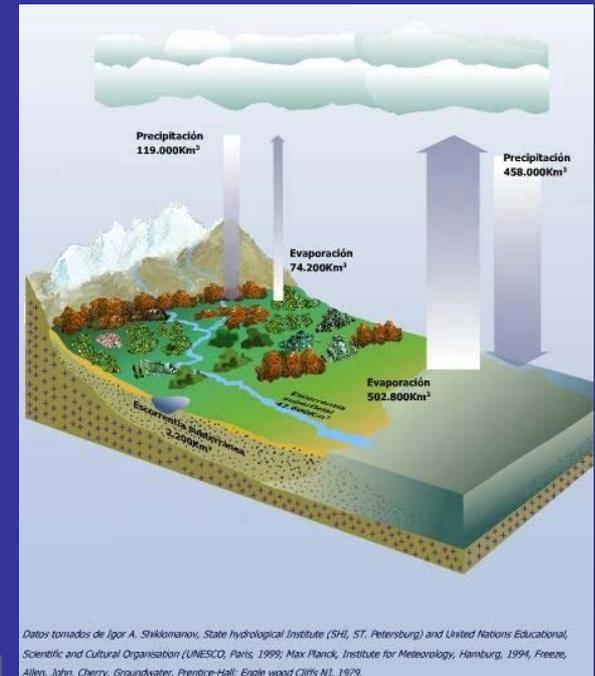
$$P + \Delta Sw + ES - D - ET = 0 \quad (\text{Rosemberg et al., 1983})$$

P = Precipitación

Sw = Variación de agua almacenada en el suelo

ES = Esgurrimento

D = Percolación profunda



2.- METODOS CLIMATICOS

Modelos basados en datos meteorológicos de fácil obtención y medición generalizada.

2.1. BASADOS EN LA TEMPERATURA DEL AIRE

2.1.1 Método de Thornthwaite (1948): $ETP \text{ (mm/mes)} = 16 \left(\frac{10 t}{I} \right)^a$

t = temperatura del aire, media mensual

I = índice calórico anual

a = función cúbica de I

- ✓ Buenos resultados en la pradera pampeana.
- ✓ En algunos casos la ET calculada resulta subestimada.

2.1.2 Método de Blaney – Criddle (1960):

2.1.3 Método de Hargreaves (1974)

2.1.4 Hargreaves (1977)

2.1.5 Método de Linacre.

ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN (ii)

3.- FORMULAS BASADAS EN LA RADIACIÓN SOLAR (Rs)

La evidencia experimental sugiere que la ETP depende en forma lineal de la R_s . Algunos de estos métodos de estimación emplean también la temperatura del aire (T_a).

3.1. Métodos obtenidos por regresión:

3.2. Método de Makkink (1957)

3.3. Método de Jensen – Haise (1963)

3.4. Ecuación de Sola – Pereyra (1985)

4.- MÉTODOS COMBINADOS

Consideran el suministro de ENERGÍA y el transporte turbulento del VAPOR desde la superficie evaporante.

4.1. Método de PENMAN (1948)

4.2. Método de Penman modificado por Monteith (1963-64)

4.3. Método de Van Bavel (1966)

4.4. Slatyer – McLiroy (1961)

4.5. Priestley – Taylor (1972)

ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN (vii)

4.1 Método de PENMAN (1948): (Radiación – Viento – Humedad del aire)

Estima la EVAPORACIÓN (E_o) desde una superficie de agua libre.

$$E_o = \frac{R_{no} + E_a}{(\Delta + Cte.)}$$

R_{no} = radiación neta sobre el agua libre

E_a = coeficiente aerodinámico

$$E_a = f(u)(e_s - e_a)$$

u = velocidad del viento a 2m de h (km/día)

e_s = presión de vapor a saturación del aire

e_a = presión de vapor actual del aire

Δ = gradiente de la curva de saturación a la temperatura media del período considerado

Cte. = constante psicrométrica

La R_n puede estimarse por los procedimientos de

{	PENMAN (1948)
	LINACRE (1968/69)
	FAO

Para determinar el uso del agua por la vegetación PENMAN relaciona la EVAPOTRANSPIRACIÓN con la EVAPORACIÓN:

$$ETP = f \cdot E_o \quad f = \text{factor empírico} = 0.8 \text{ (verano) y } 0.6 \text{ (invierno)}$$

Autores que trabajaron sobre estos coeficientes (f):

MONTEITH (1973); THOM y OLWER (1977); ROSEMBERG (1969);

DOOREMBOS y PRUITT (1975); BURT et al (1981)

ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN (viii)

5.- MÉTODOS MICROMETEOROLOGICOS

5.1 Métodos de transporte de masas

5.2 Métodos aerodinámicos

5.3 Método del balance de energía

5.4 Método de resistencia del aire al transporte de calor

6.- MODELOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

6.1 Ritchie (1972)

6.2 Tanner – Jury (1976)...

6.3 Eduardo Rivas, Raúl (2005)

CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

La siguiente planilla de cálculo estima la Evapotranspiración potencial (ET) por distintos métodos. Los cuales necesitan de cierta información (datos) para poder realizarla, a continuación se detallan los datos necesarios de acuerdo al autor elegido:

Información necesaria para los cálculos				
Datos	Thornthwaite	Turc	Hargreaves	Penman
Latitud (en grados y minutos)	✓ <input type="checkbox"/>	✓ <input type="checkbox"/>	✓ <input type="checkbox"/>	✓ <input type="checkbox"/>
Temperatura media mensual (°C)	✓ <input type="checkbox"/>	✓ <input type="checkbox"/>	✓ <input type="checkbox"/>	✓ <input type="checkbox"/>
Temp. media de máximas (°C)		✓ <input type="checkbox"/>	✓ <input type="checkbox"/>	✓ <input type="checkbox"/>
Temp. media de mínimas (°C)		✓ <input type="checkbox"/>	✓ <input type="checkbox"/>	✓ <input type="checkbox"/>
Heliofania efectiva (hs/día)			✓ <input type="checkbox"/>	✓ <input type="checkbox"/>
Humedad relativa (%)			✓ <input type="checkbox"/>	✓ <input type="checkbox"/>
Presión atmosférica (hPa)				✓ <input type="checkbox"/>
Velocidad viento (Km/h)				✓ <input type="checkbox"/>
Altura de la estación (metros)				✓ <input type="checkbox"/>
Altura del anemómetro (metros)				✓ <input type="checkbox"/>
Albedo (%)				✓ <input type="checkbox"/>

Metodologías	Fórmulas
Thornthwaite	$ETP = 16 \times (10 \times tm / I)^a$
Turc	$ETP = f_i \times [tm/(tm+15)] \times [R_{gi}+50] \times c_i$
Hargreaves	$ETP = 0,0023 \times Ra \times (tmax-tmin)^{0,5} \times (tm+17,8)$
Penman	$ETP = \Delta / (\Delta + \gamma^*) \cdot (1/\lambda_v \cdot \{Rn-G\}) + \gamma / (\Delta + \gamma^*) \cdot (900 \cdot U_2 / \{tm+273\}) \cdot (e_s - e_a)$

Referencias de las fórmulas de estimación de ETP

Donde:

tm :	Temperatura media mensual (°C)
tmax :	Temperatura máxima media (°C)
tmin :	Temperatura mínima media (°C)
I :	Índice calorico anual
a :	Coefficiente que depende de "I"
f_i :	Factor de corrección mensual
R_{gi} :	Radiación Global estimada (cal × cm ⁻² × día ⁻¹)
c_i :	Factor de corrección para zonas áridas
R_a :	Radiación Astronómica (mm/día)
Δ :	Pendiente de la curva de tensión de vapor kPa/°C
γ* :	Constante Psicrométrica modificada en kPa/°C
λ_v :	Calor de vaporización MJ/kg
R_n :	Radiación neta en MJ/m ² × día ⁻¹
G :	Flujo de calor en el suelo MJ/m ² × día ⁻¹
U₂ :	Velocidad del viento a 2 mts en m/s
e_s - e_a :	Deficit de presión de vapor en kPa

Datos: Buscar en “Estadísticas Meteorológicas” (Publicaciones del SMN)

Ingrese la Información necesaria para los cálculos

Nombre de la Estación	General Pico			
------------------------------	---------------------	--	--	--

	Grados:	Minutos:	Hemisferio	(Ingresar N para Hemisferio Norte) (Ingresar S para Hemisferio Sur)
Latitud:	35	42	S	

Datos	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Temperatura media (°C)	23.7	22	19.8	15.7	11.8	8.5	8.5	10	13.3	16.2	19.4	22.9	16.0
Temp. media de máximas (°C)	31.1	29.5	27.1	23.1	18.6	15.2	15.3	17.6	20.7	23.2	26.6	30.2	23.2
Temp. media de mínimas (°C)	16.3	14.8	13.4	9.5	6.5	3.1	2.9	3.4	6	9.4	11.9	15.4	9.4
Heliofania efectiva (hs/día)	7.6	8.5	6.5	6.3	4	3.7	4	5.5	5.2	6.3	6.5	6.1	5.9
Humedad relativa (%)	63	68	73	75	79	78	78	69	63	68	62	58	69.5
Presión atmosférica (hPa)	993	995	997	999	999	1000	999	1001	1000	998	996	994	997.5
Velocidad viento (Km/h)	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	10.0	10.0	12.0	13.0	13.0	14.0	13.0	11.3
Altura de la estación (metros sobre el nivel del mar)	145												
Altura del anemómetro (metros)	10												
Albedo (%)	25												

RESULTADOS

EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm/mes)

General Pico

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
<i>ET (Thornthwaite)</i>	137	102	88	52	31	17	17	25	42	66	93	131	801
<i>ET (Turc)</i>	143	129	101	74	42	29	32	48	67	96	117	126	1003
<i>ET (Hargreaves)</i>	202	156	131	85	55	39	44	64	95	130	167	202	1370
<i>ET (Penman-Monteith)</i>	161	127	102	67	41	31	32	54	79	98	128	159	1079

Fuente:

Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas

Facultad de Agronomía - UBA

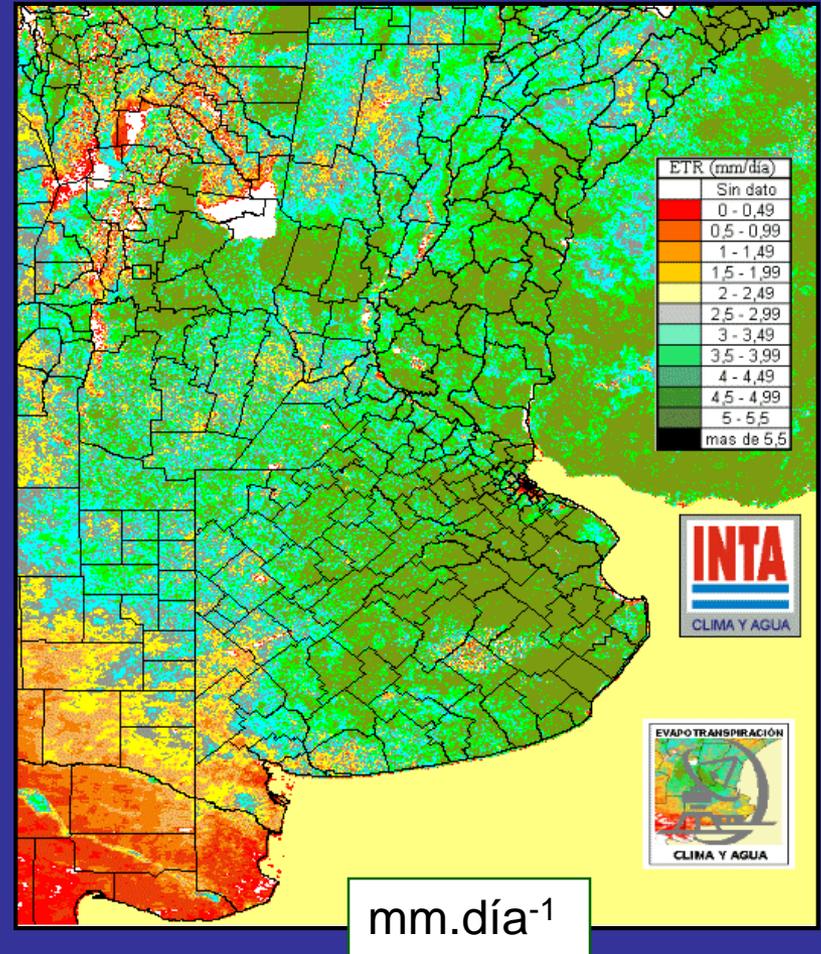
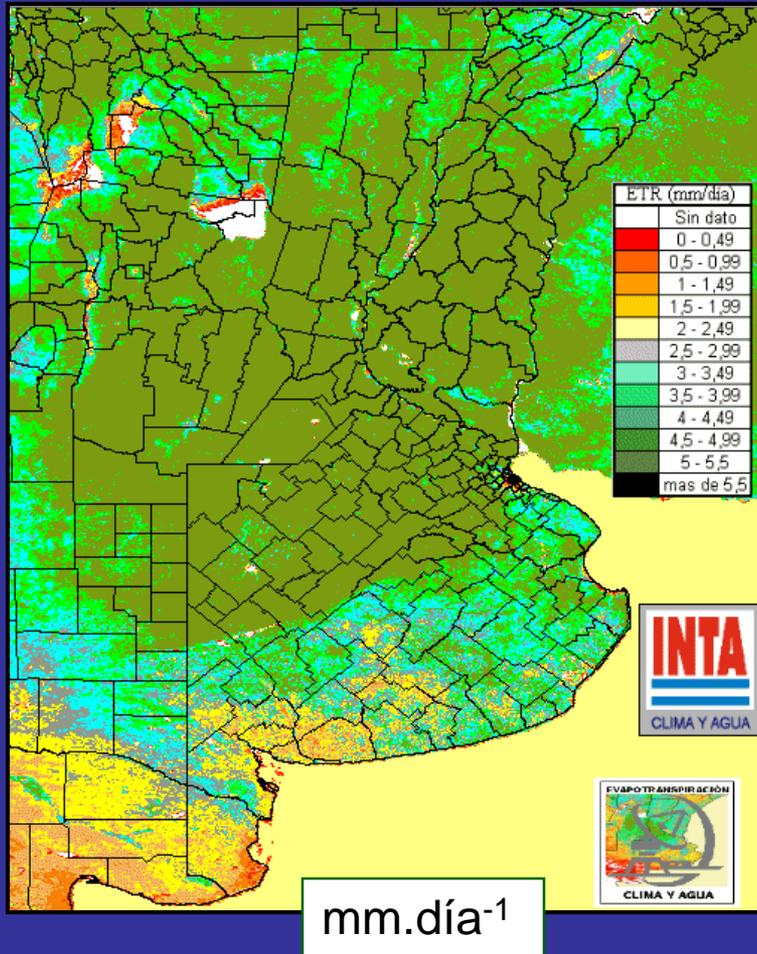
Hurtado R. y Fernández Long, María E. (2003)

www.agro.uba.ar/catedras/clima/eto.xls

01 al 07 de febrero 2008

ETR

21 al 27 de Marzo 2008

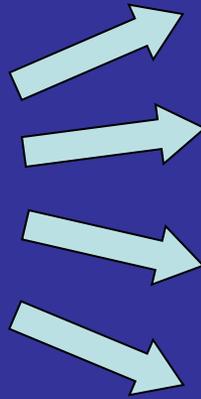


Fuente: INTA Castelar – Análisis de imágenes satelitales. 2008

Constantes Hidrológicas del Suelo

Retención (Atmósferas)	Estado Hídrico	Simbolos	Tipo de Agua	Efectos
0	Plena Capacidad Saturación.	W_{tc}	Gravitación poros $> 5 \mu$	Exceso Asfixia
0.3	Capacidad de Campo o Humedad Equivalente	W_{fc}	Capilar Movil ($W_{fc} - W_{pwc}$) Poros entre 0,2 y 5 μ	Agua útil. Humedad óptima.
15	Punto de Marchitez Permanente	W_{pwc}	Capilar de Baja movilidad	Stress Hídrico creciente
	Coe ficiente Higroscópico	W_h	Agua Higroscópica	Cesa el crecimiento Muerte por sequia
1000	Suelo Absolutamente seco		Poros $< 0,2 \mu$	

COMO SE MUEVE EL AGUA EN EL SUELO ?



- Temperatura del Suelo
- Tensión de Retención
- Cantidad de Agua Almacenada
- Velocidad de EVT

Movilidad del agua en el suelo. (Argiudol Típico)

Cantidad de Agua Almacenada (CC 300 mm)	Demanda Atmosférica (mm)	Agua entregada por el suelo (mm)	Agua que queda en el suelo (mm)
277	3	3	274
185	3	2	183
67	3	1	66

Tabla de Retenciones o Almacenaje (300 mm, 200 mm, 150 mm, etc.)

AGUA DEL SUELO

1.- MEDICIÓN = MÉTODOS – APARATOS

2.- ESTIMACIÓN = CALCULOS DE B.H.

1. MEDICIÓN:

MÉTODO GRAVIMÉTRICO

- ✓ Muestreo con barremos
- ✓ Peso de suelo húmedo
- ✓ Estufa a 105°C
- ✓ Peso de suelo seco
- ✓ Porcentaje de agua sobre suelo seco

- PRECISIÓN EN MEDICIONES
- PATRON -

- LABORIOSO
- DESTRUCTIVO

TENSIÓMETROS

- ✓ Cápsulas porosas
- ✓ Columna de agua
- ✓ Succión del suelo
- ✓ Vacuómetro

- ADECUADO PARA ZONAS
DE RIEGO (ALTA HUMEDAD)

- SUELOS SECOS: interfase
gaseosa (FALLAS)

✓ **BLOQUES POROSOS**

- POCO PRACTICO

✓ **BLOQUES CON RESISTENCIA ELÉCTRICA**

- SALES INTERFIEREN

✓ **SONDA DE NEUTRONES**

- BUENA PRECISIÓN
- NO DESTRUCTIVO

Fuente de emisión de neutrones

Principio: desaceleración de neutrones por los hidrógenos del agua del suelo.

Detectos:

→ DE PROFUNDIDAD

→ DE SUPERFICIE

- NECESIDAD DE CALIBRACIÓN EN CADA TIPO de SUELO (M. Gravimetrico)