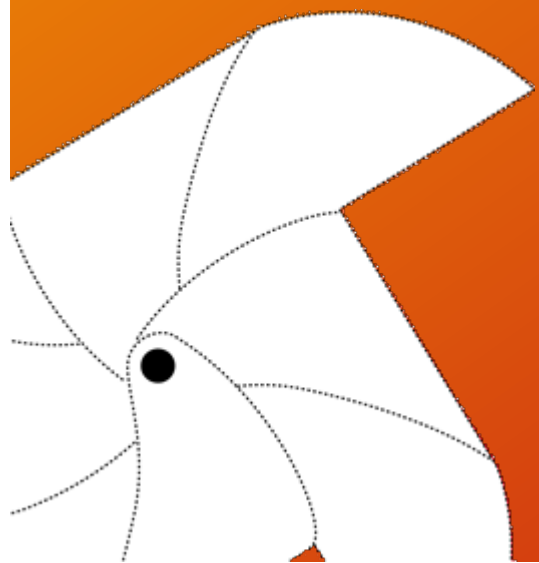


Isótopos estables y la ecología del cambio global: una cuestión de escala

Juan Pedro Ferrio

ARAID - Unidad de Recursos Forestales, CITA



08/11/2018

Seminario *Plantas y cambio global*

Máster en Agrobiología Ambiental

Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona

araid



Conceptos generales

- Isótopos, fraccionamiento
- Pares de isótopos, notación diferencial

Isótopos de agua (hidrógeno, oxígeno)

- Ciclo hidrológico
- Fuente de agua en plantas
- Caso 1: interacciones en bosque mixto

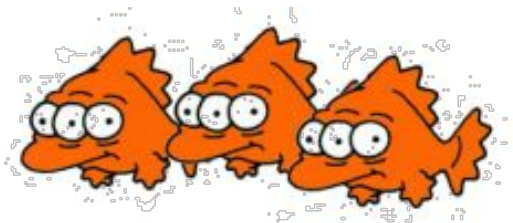
Isótopos de carbono

- Fuentes de variación
- Discriminación y eficiencia hídrica
- Caso 2: respuesta espacial al clima
- Caso 3: estudio retrospectivo del decaimiento
- Caso 4: sostenibilidad en inicio agricultura

Los isótopos: ¿qué son?



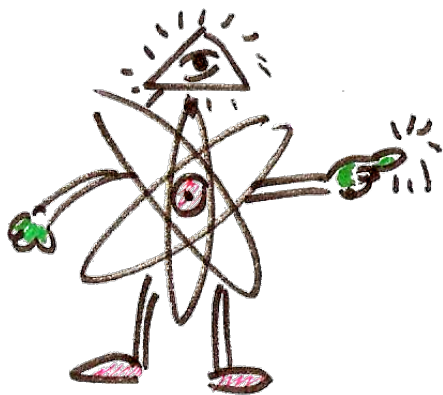
¿Un equipo de baseball?



¿Algo malo y radiactivo?



Los isótopos: ¿qué son?

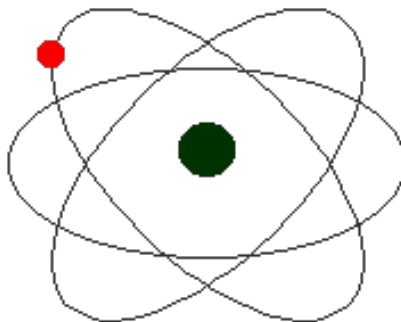


Isótopos: formas de un mismo elemento químico que difieren en el número de neutrones

- **Inestables** (radioactivos) se desintegran espontáneamente en el tiempo \rightarrow ^{14}C
- **Estables** (no radioactivos) no decaen en una escala de tiempo geológica

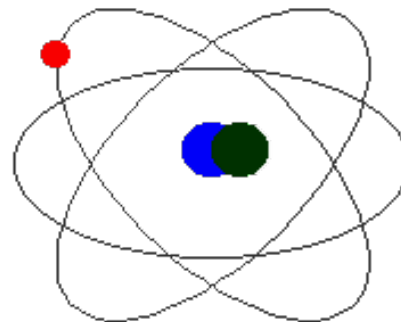
Hydrogen

1 Proton (green)
1 Electron (red)



Deuterium

1 Proton
1 Electron
1 Neutron (blue)



Isótopos estables en la biosfera



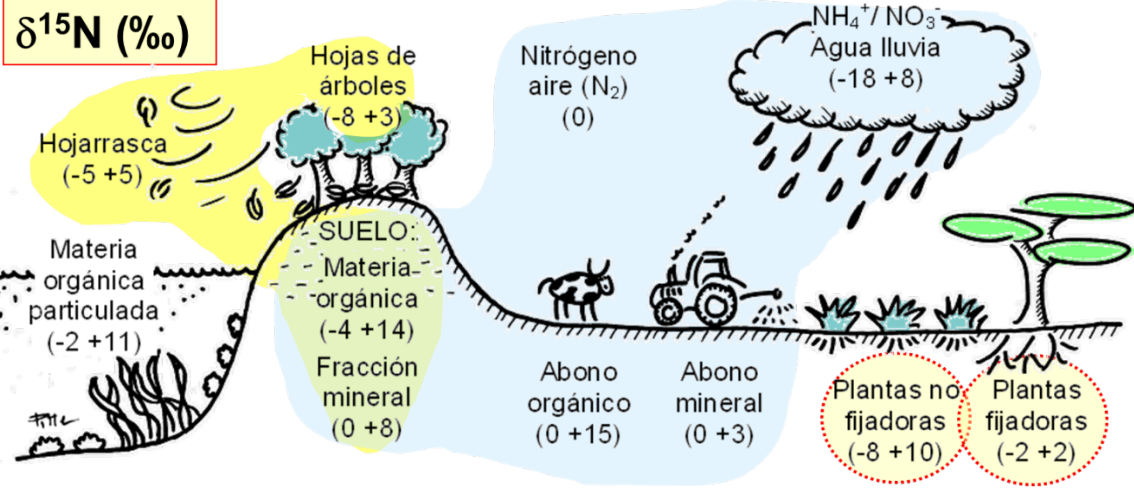
	Par de isótopos			
	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	$^2\text{H}(\text{D})/^1\text{H}$
Estándar	PDB ^b	N ₂ aire	SMOW ^c	SMOW ^c
Notación	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H} / \delta\text{D}$ (‰)
Abundancia (%) ^a	1,1	0,37	0,20	0,015

^a Abundancia del isótopo pesado respecto al total del elemento

^b PDB, Pee-Dee Belemnite (calcita)

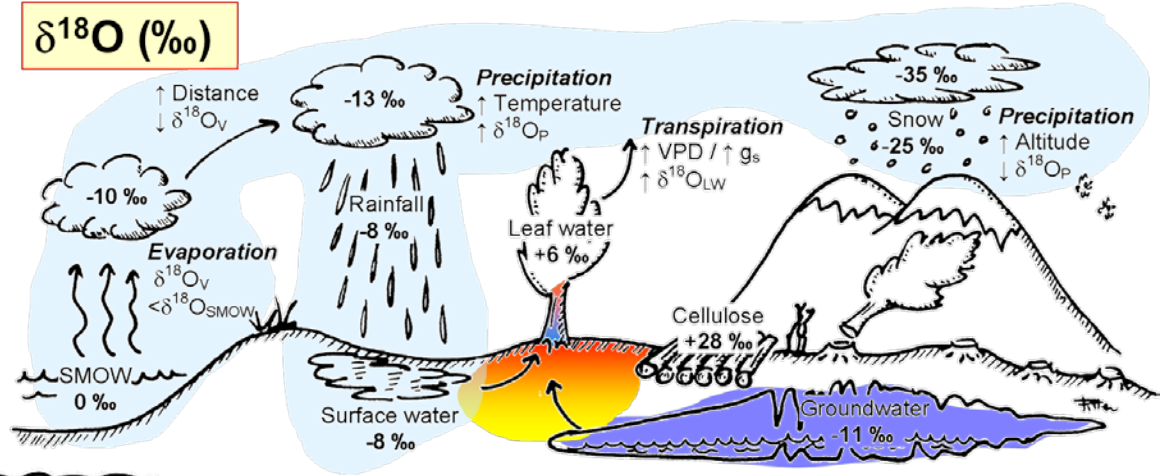
^c SMOW, Standard Mean Ocean Water

$\delta^{15}\text{N}$ (‰)

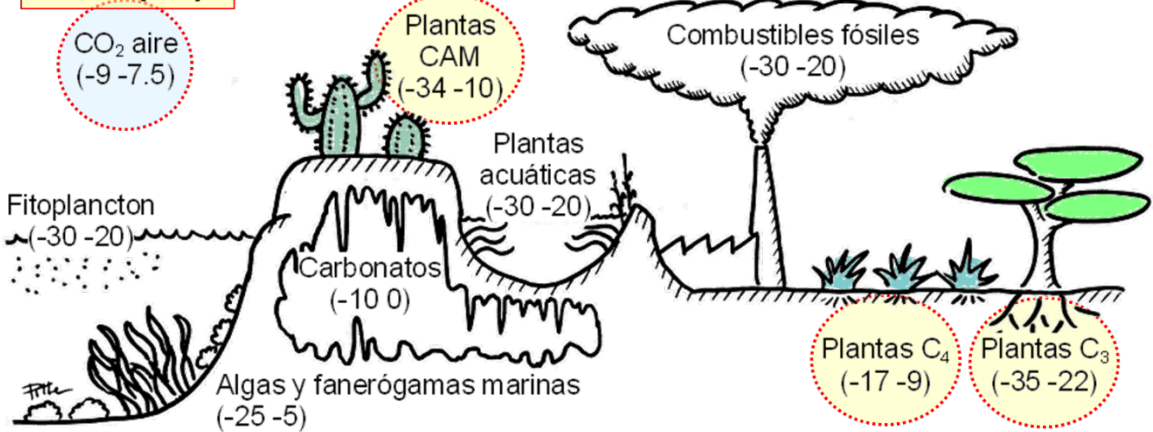


Estables, pero no constantes

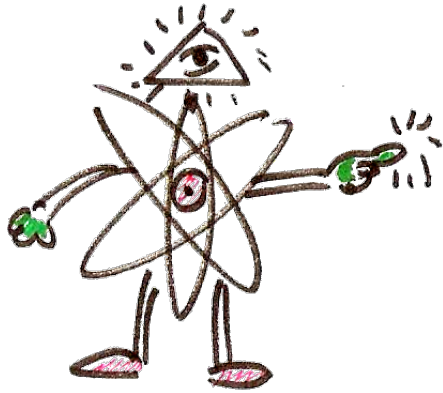
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)



$\delta^{13}\text{C}$ (‰)



Estables, pero no constantes



Fraccionamiento: todos los **procesos** químicos y físicos alteran las proporciones entre isótopos

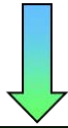
Enriquecimiento vs. empobrecimiento: Incremento o disminución de la proporción del isótopo menos abundante (pesado)

¿Para qué sirven?: Integración procesos

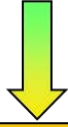


Tiempo

Asimilados



Azúcares hoja



Floema

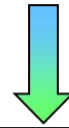


Tejidos sumidero
(madera, granos)



Espacio

Hoja



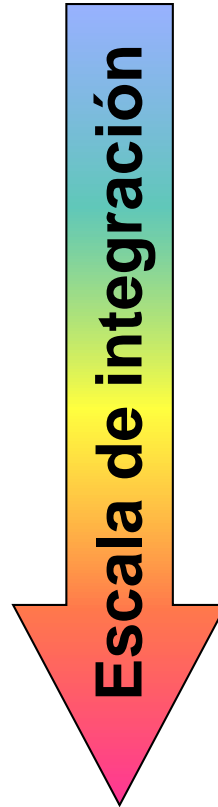
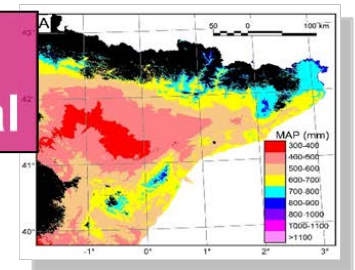
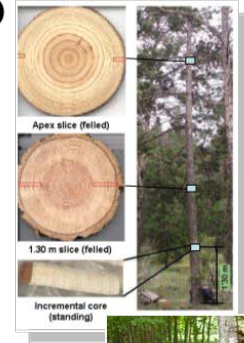
Planta



Ecosistema



Paisaje Regional



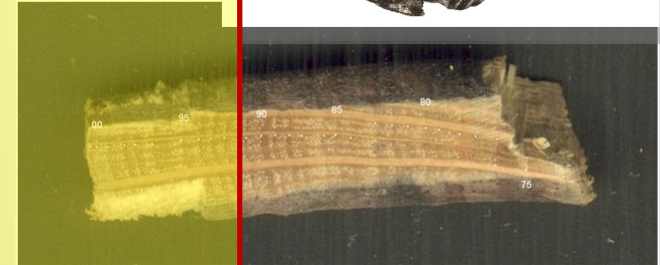
¿Para qué sirven?: Integración procesos



Reconstrucción paleoambiental



Respuesta de las plantas al cambio climático



Mejora de cultivos

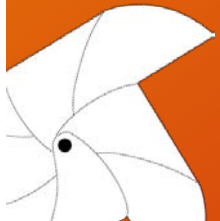


**Dieta de animales
Migraciones**

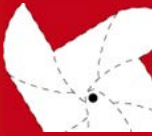


Fraude alimentario

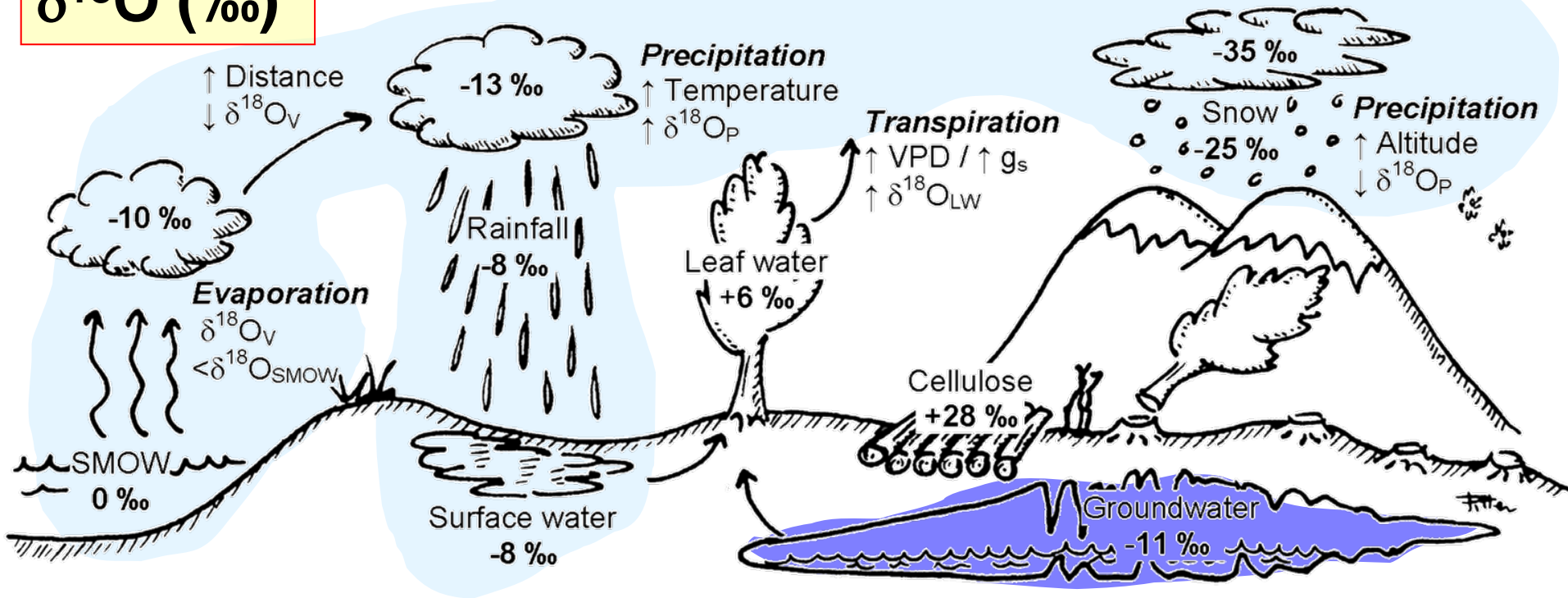
Isótopos de agua (oxígeno / hidrógeno)



Variación en el ciclo hidrológico



$\delta^{18}\text{O}$ (‰)

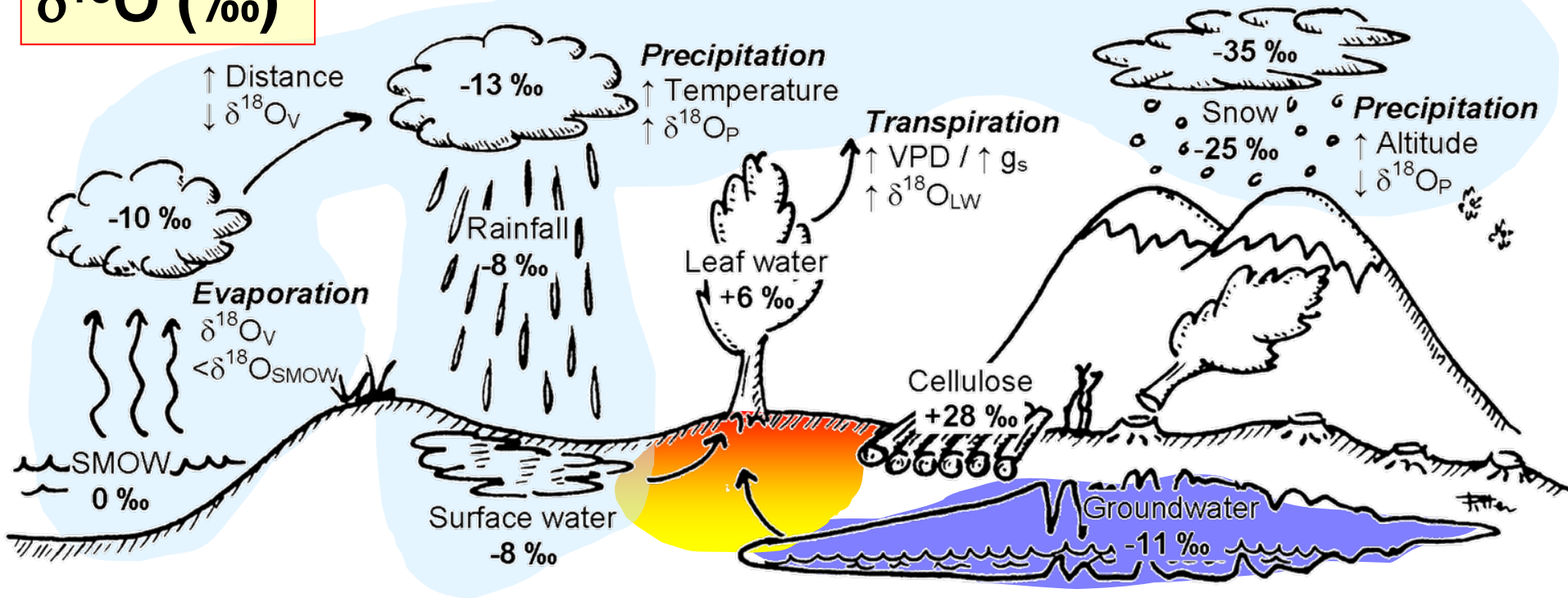


- $\delta^{18}\text{O}$ (‰) varía durante el ciclo hidrológico

Variación en el ciclo hidrológico



$\delta^{18}\text{O}$ (‰)

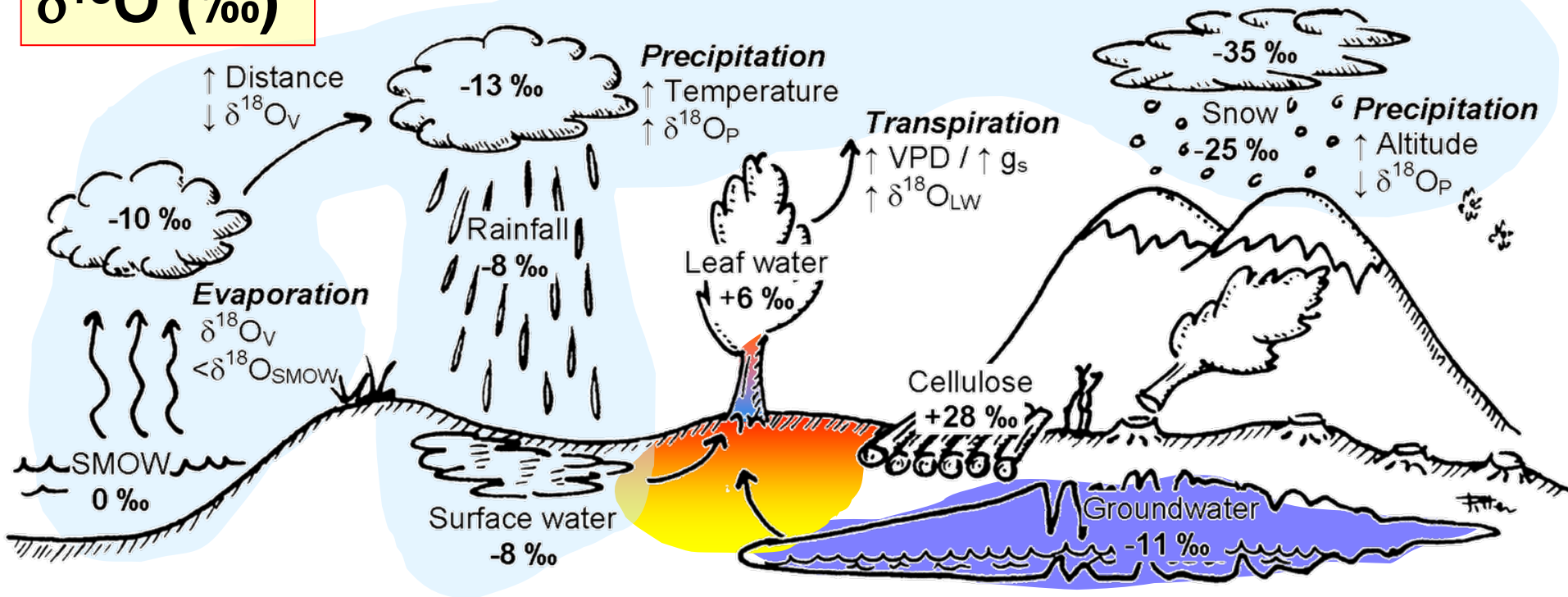


- $\delta^{18}\text{O}$ (‰) varía durante el ciclo hidrológico
- + gradiente por evaporación en el suelo

Variación en el ciclo hidrológico

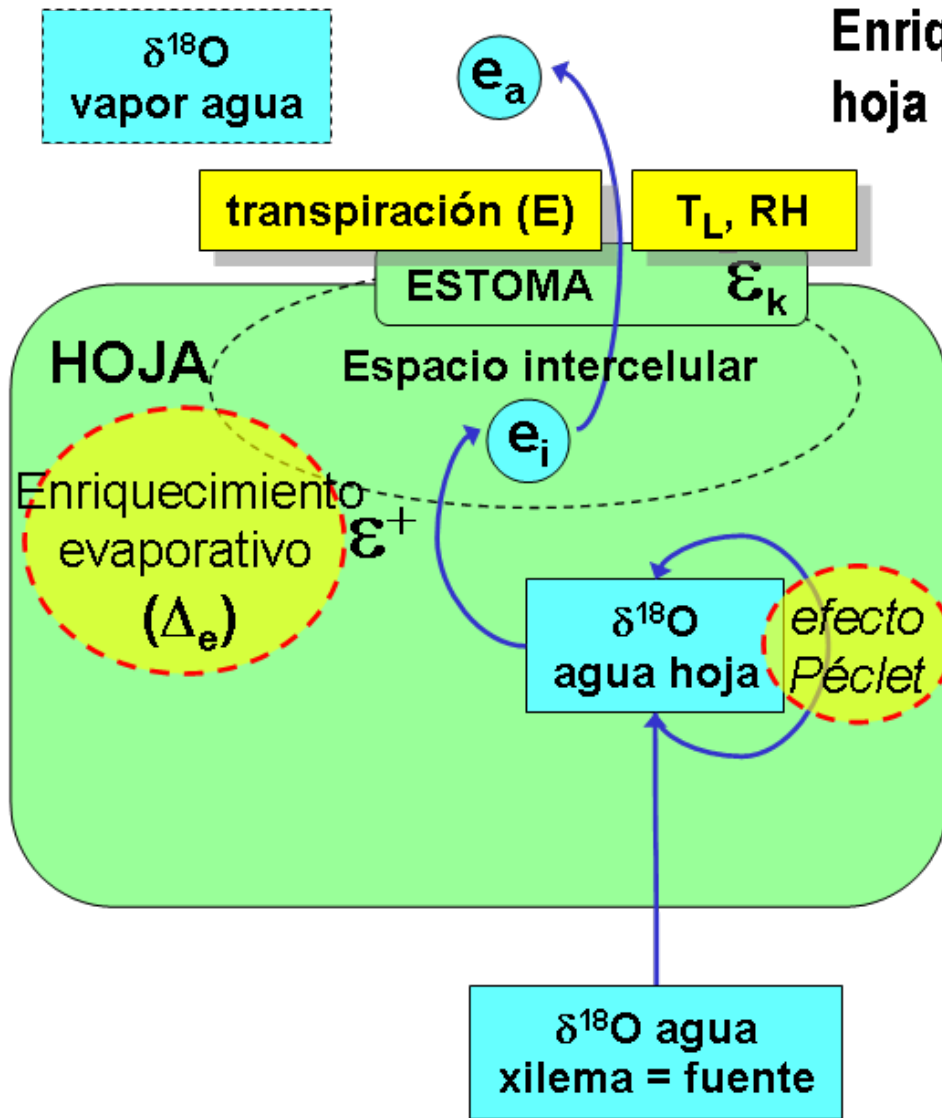


$\delta^{18}\text{O}$ (‰)

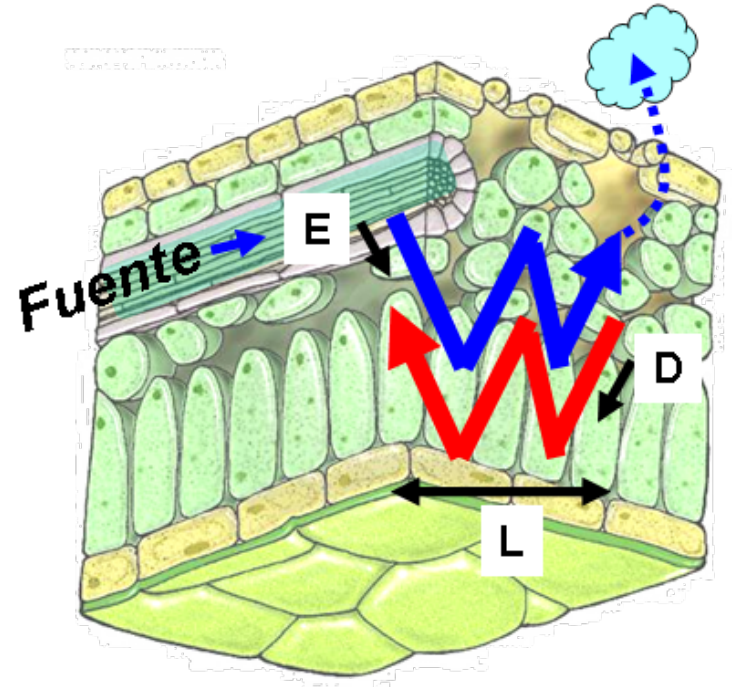


- $\delta^{18}\text{O}$ (‰) varía durante el ciclo hidrológico
- + gradiente por evaporación en el suelo
- $\delta^{18}\text{O}$ (‰) del xilema refleja la del agua fuente

Enriquecimiento isotópico en la hoja



Enriquecimiento isotópico del agua de hoja respecto a la fuente (Δ_L)*





- **Fuente de agua**

- Gradiente del suelo, precipitación, freático

→ agua meteórica =
 $f(T_{\text{aire}}, \text{altitud, continentalidad})$

- **Enriquecimiento en la hoja**

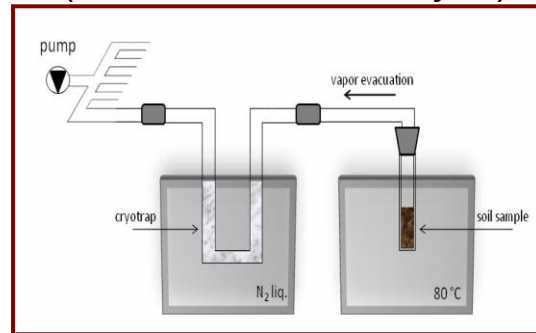
- Depende de HR, temperatura foliar ($\approx T_{\text{aire}} + g_s$)
y transpiración (E)

Origen del agua de las plantas



Extracción criogénica
(suelo, xilema, hojas)

Pirólisis
Equilibrado con CO_2 / H_2



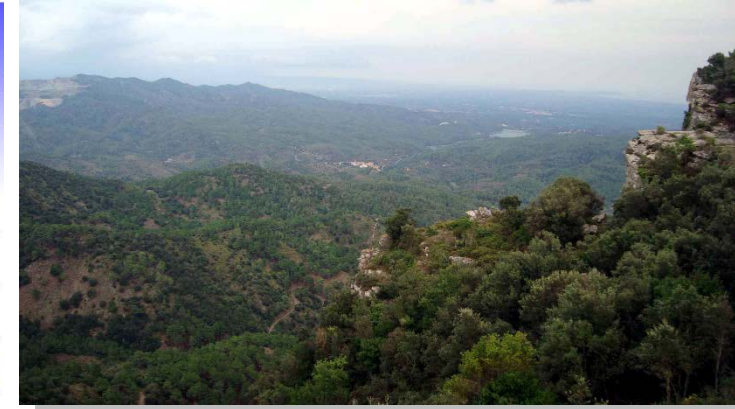
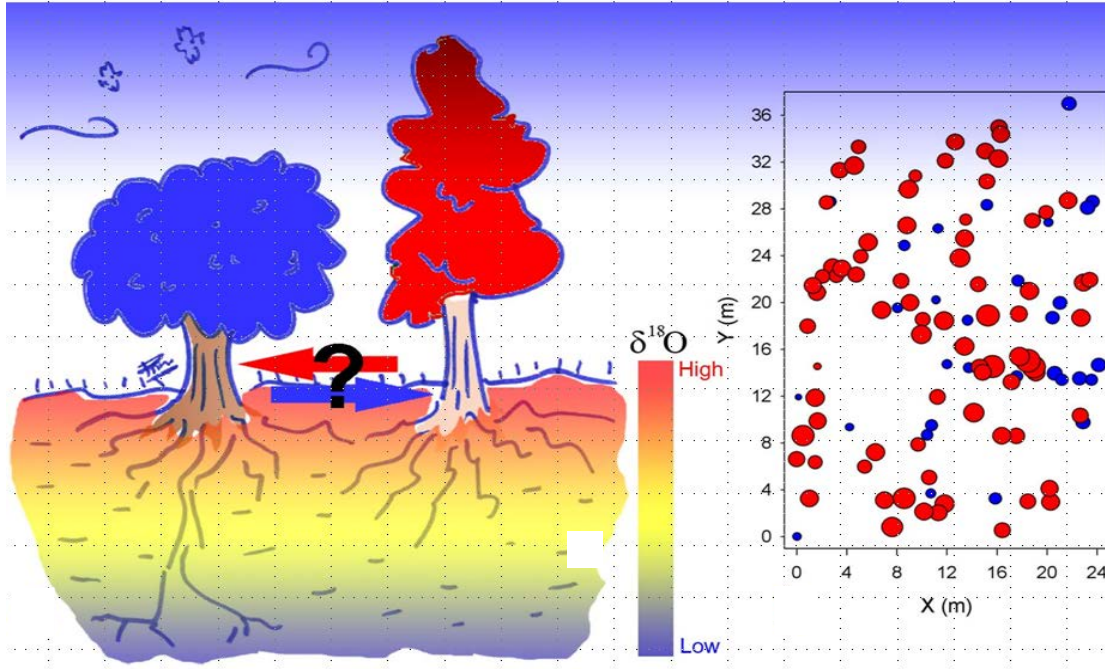
Muestras líquidas (lluvia, pozos)
Agua libre suelo: equilibrado con H_2O
Micro-inducción (suelo, xilema, hojas)



Caso 1: relaciones inter-específicas



Quercus ilex L. *Pinus halepensis* Mill.



Ulldemolins, Serra de Montsant

Bosque mixto sobre suelos calcáreos someros



Pino y encina: nicho hidrológico

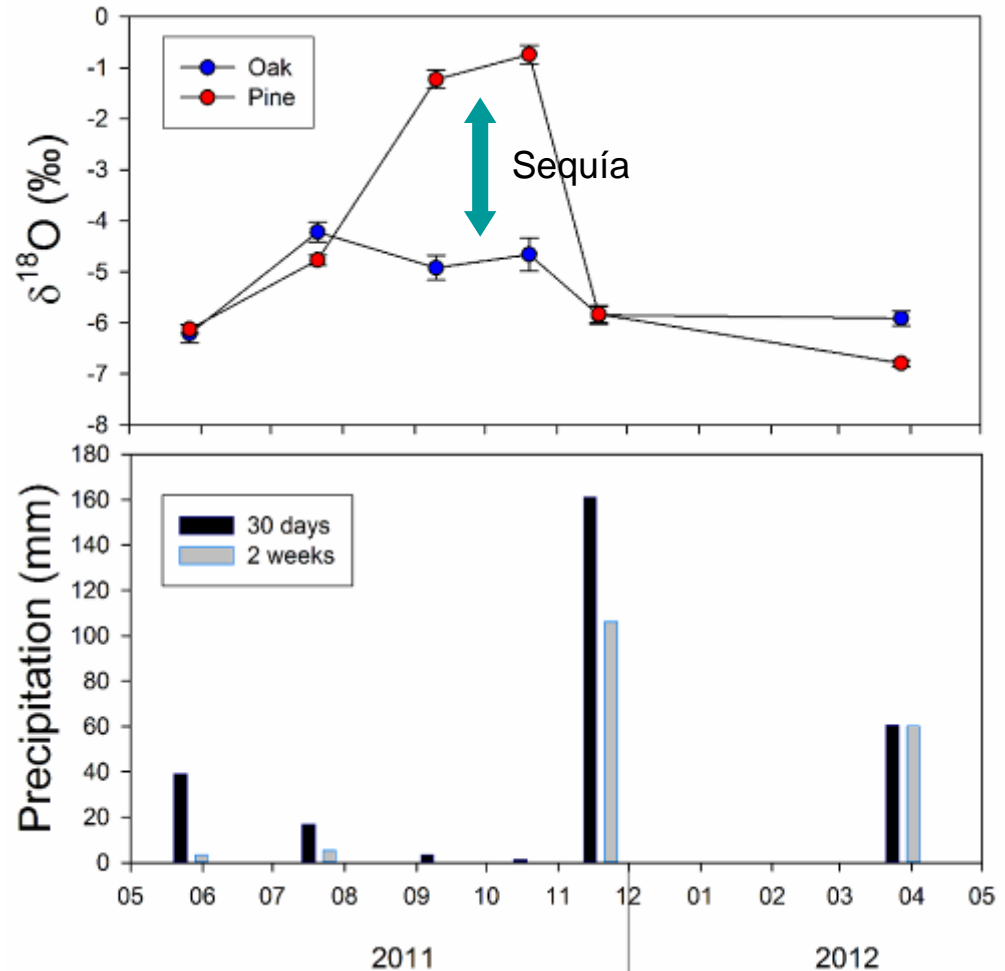
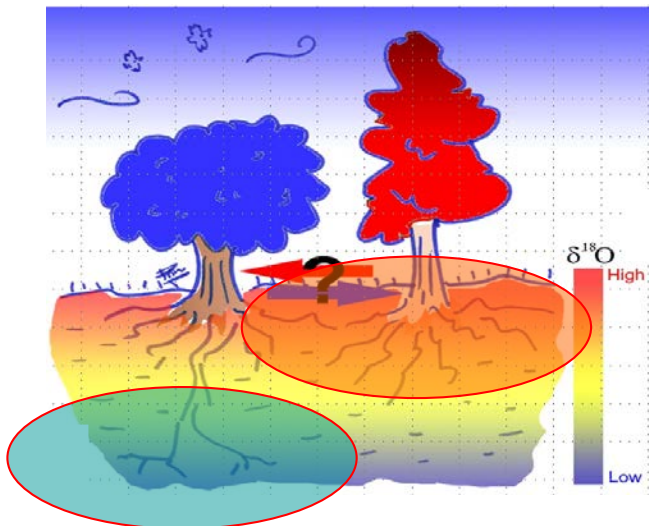


¿Diferente uso del agua?

Sí!!

Especialmente
en sequía

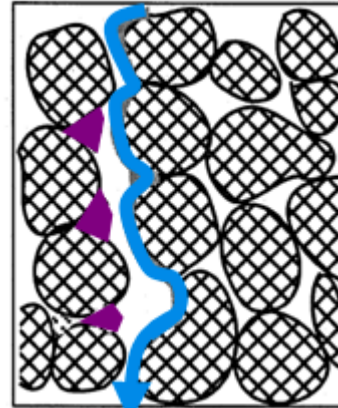
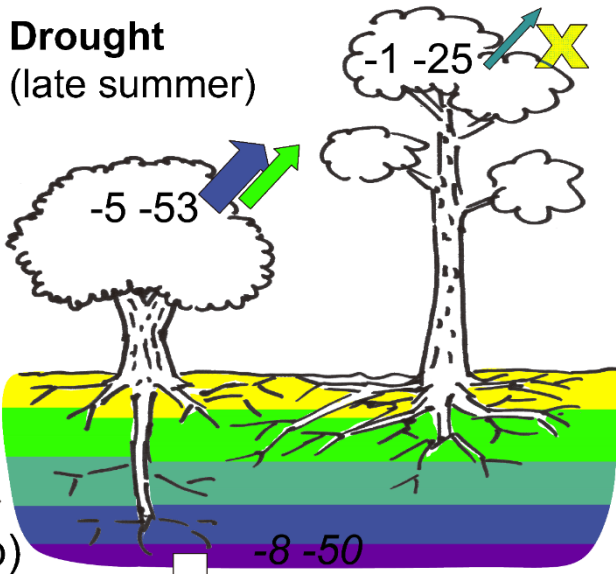
Las encinas captan agua
a mayor profundidad



Pino y encina: respuesta a sequía

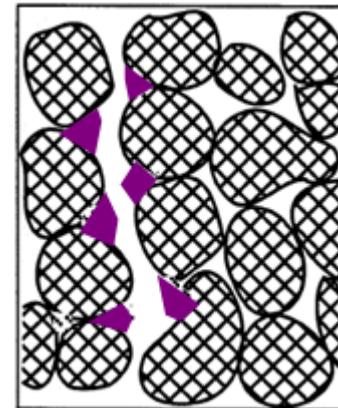
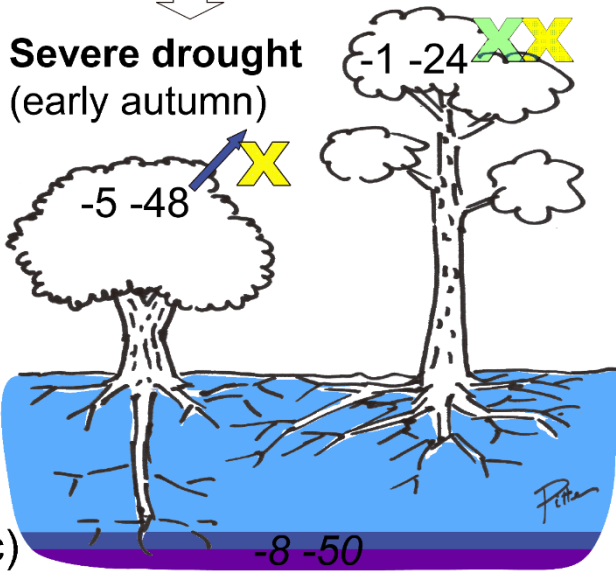


Drought
(late summer)



Suficiente agua libre
Disponible para encinas
y (algunos) pinos

Severe drought
(early autumn)



Únicamente queda agua retenida
→ **Disponible sólo para**
(algunas) encinas

Soil particle

Water film around soil particles (immobile)

Mobile water

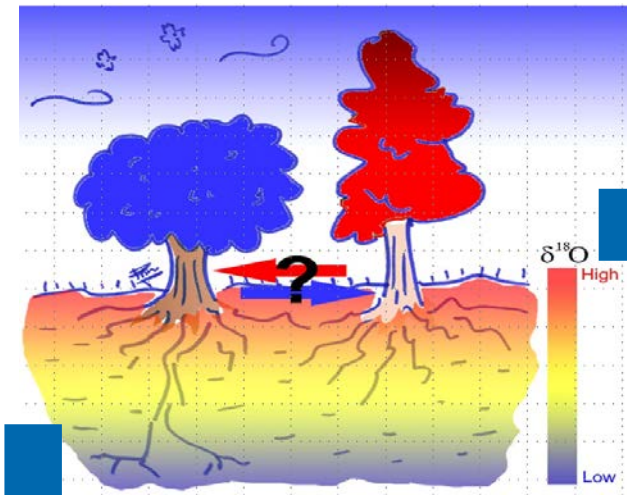
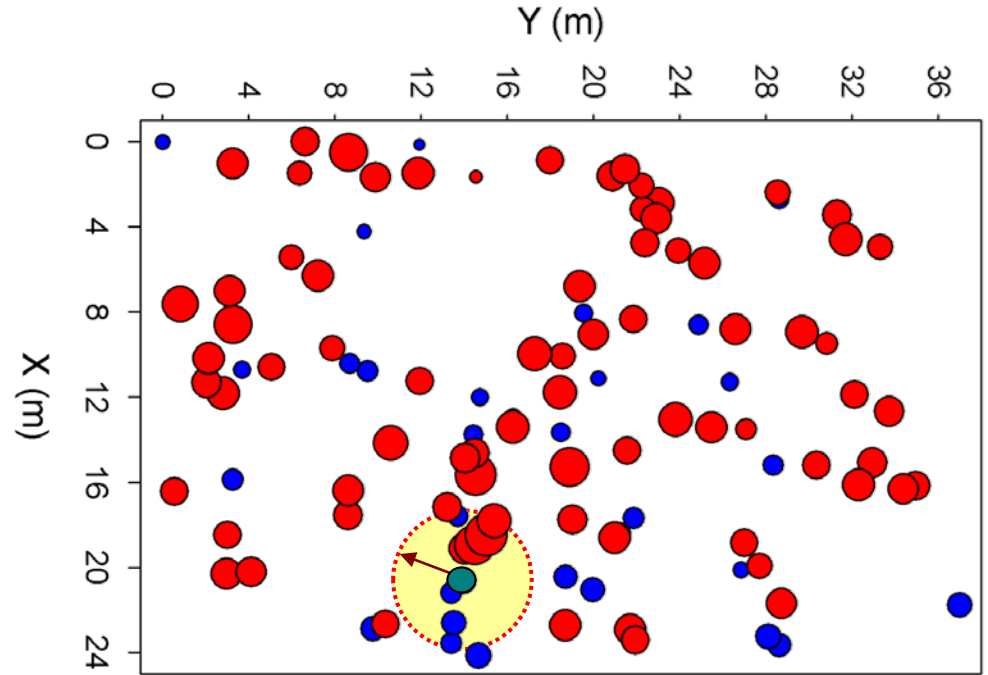
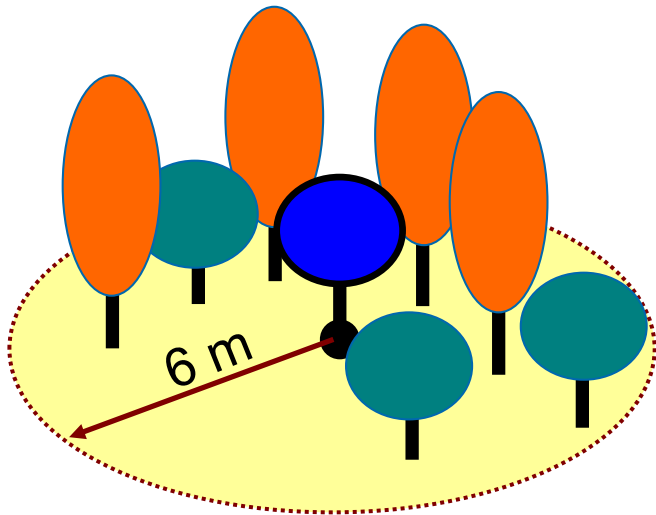
Soil pore water (immobile)

Pino y encina: ¿interacción?



¿Respuesta diferente a la competencia?

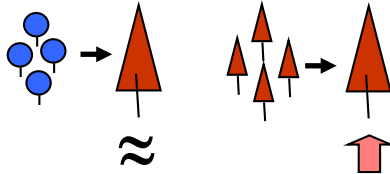
Compara $\delta^{18}\text{O}$ xilema con el área basal (BA) de árboles vecinos



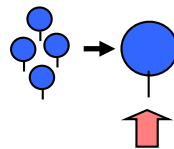
Pino y encina: ¿interacción?



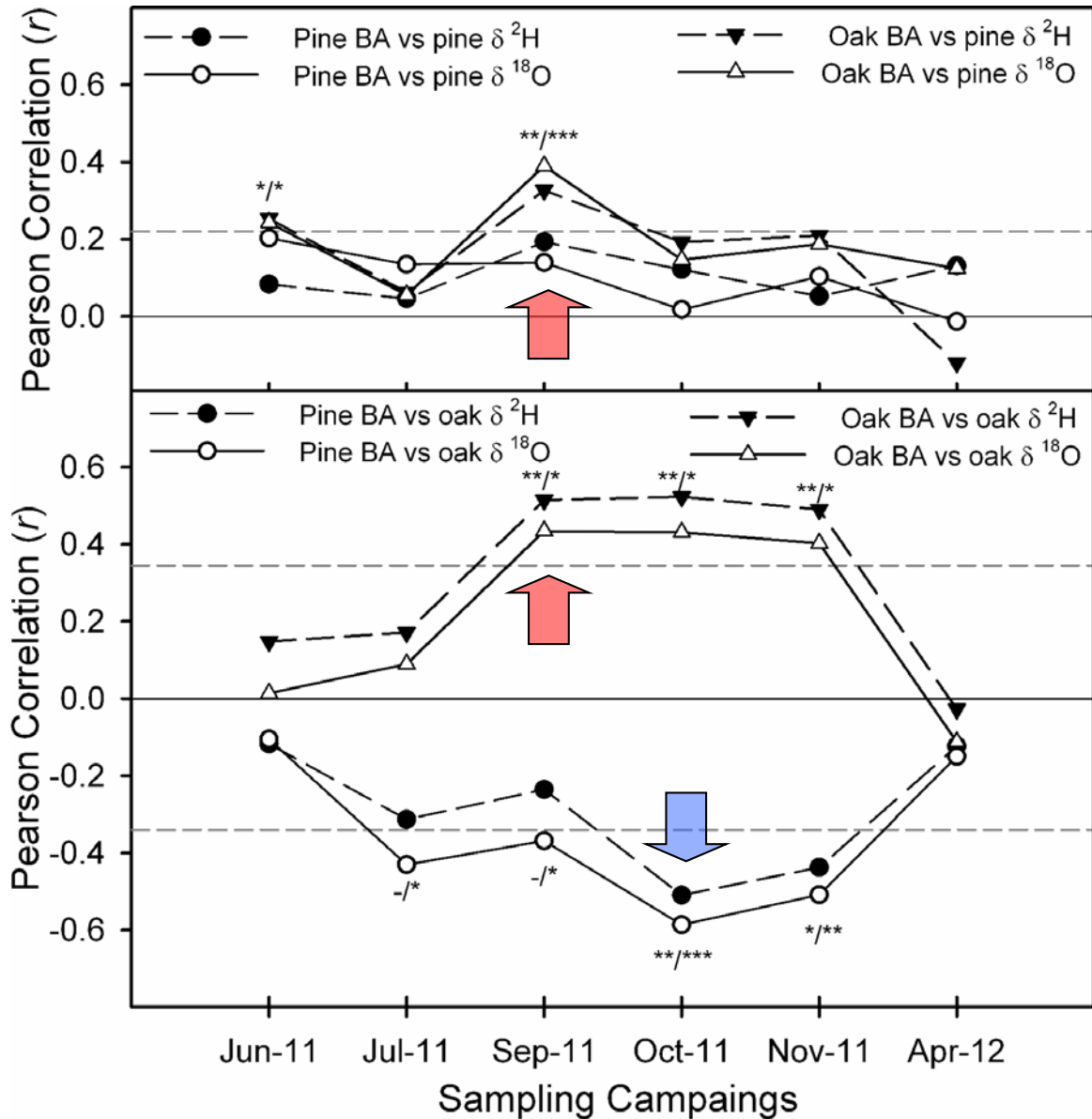
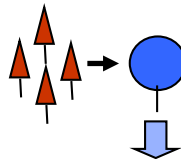
¿Respuesta diferente a la competencia?



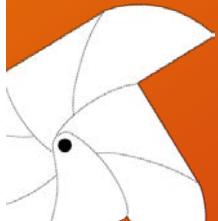
Pino y encina:
más evaporación con alta densidad de la propia especie (estancamiento)



Encina:
“baja más” en presencia de pinos



Isótopos de carbono

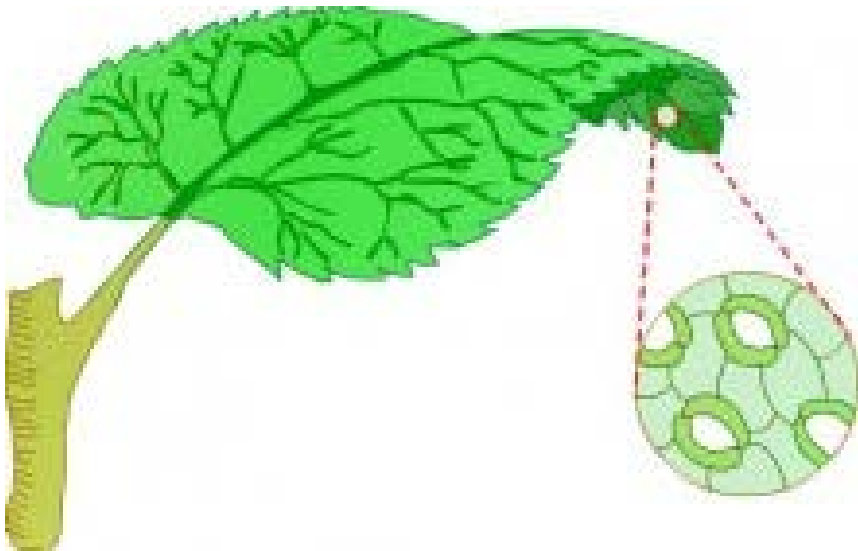
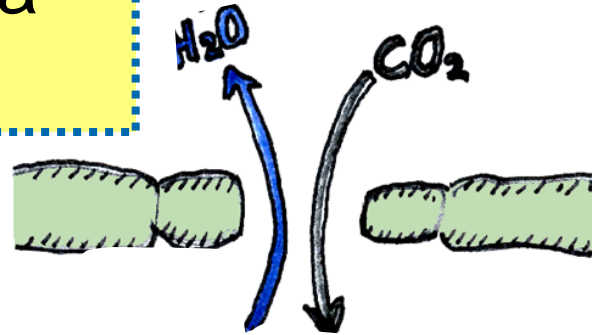


13C: EUA y respuesta ambiental



Estomas:

Regulan la salida de agua y entrada de CO_2



EUA

Eficiencia Uso del Agua

Relaciona fotosíntesis y pérdida de agua

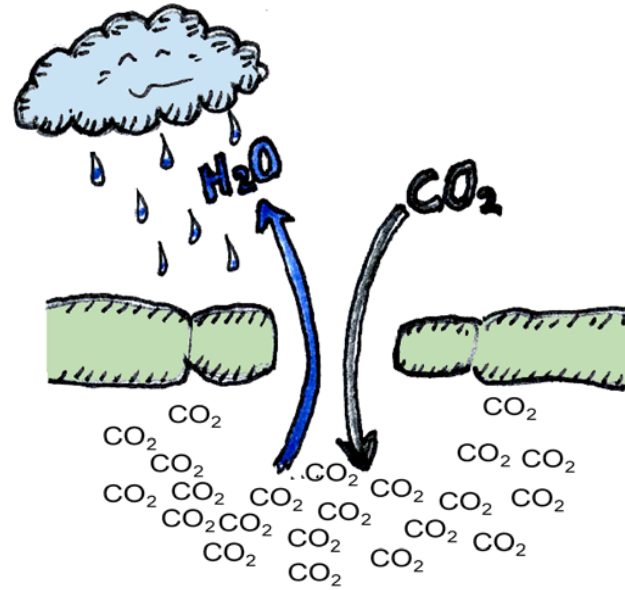
13C: EUA y respuesta ambiental



Sin estrés:

estomas abiertos

CO₂ interno no limitado



13C: EUA y respuesta ambiental

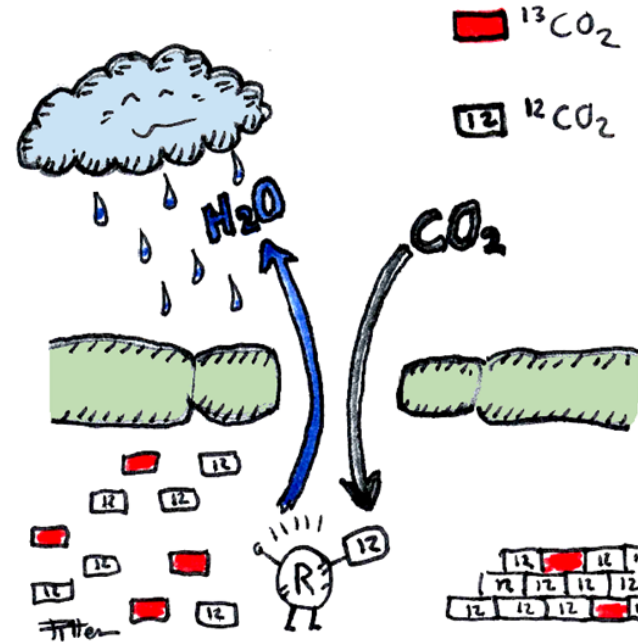


Sin estrés:

estomas abiertos

CO₂ interno no limitado

Planta 'prefiere' ¹²CO₂

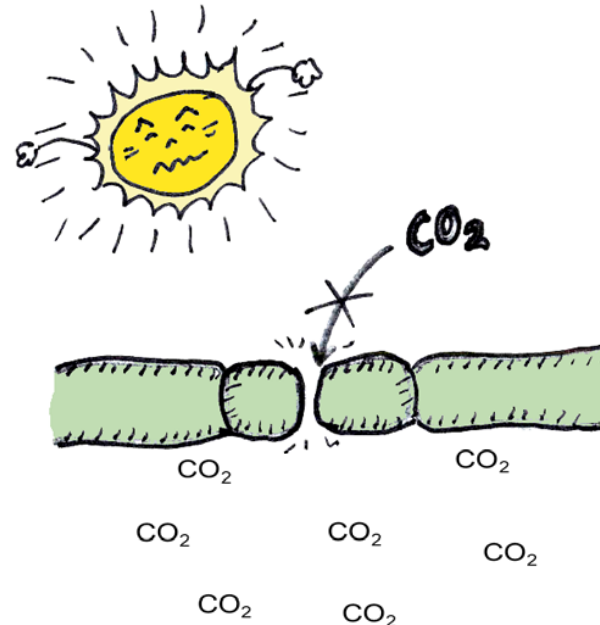


→ Poco ¹³C
Baja EUA

Sequía:

Cierre estomas

CO₂ interno limitado



13C: EUA y respuesta ambiental

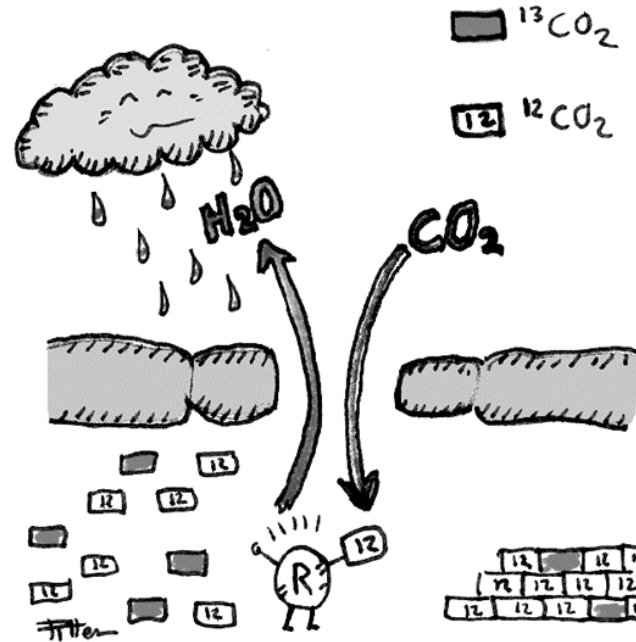


Sin estrés:

estomas abiertos

CO₂ interno no limitado

Planta 'prefiere' ¹²CO₂



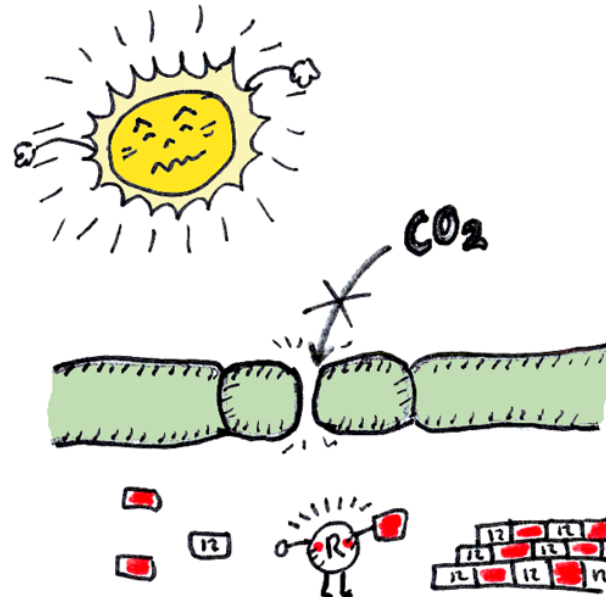
→ Poco ¹³C
Baja EUA

Sequía:

Cierre estomas

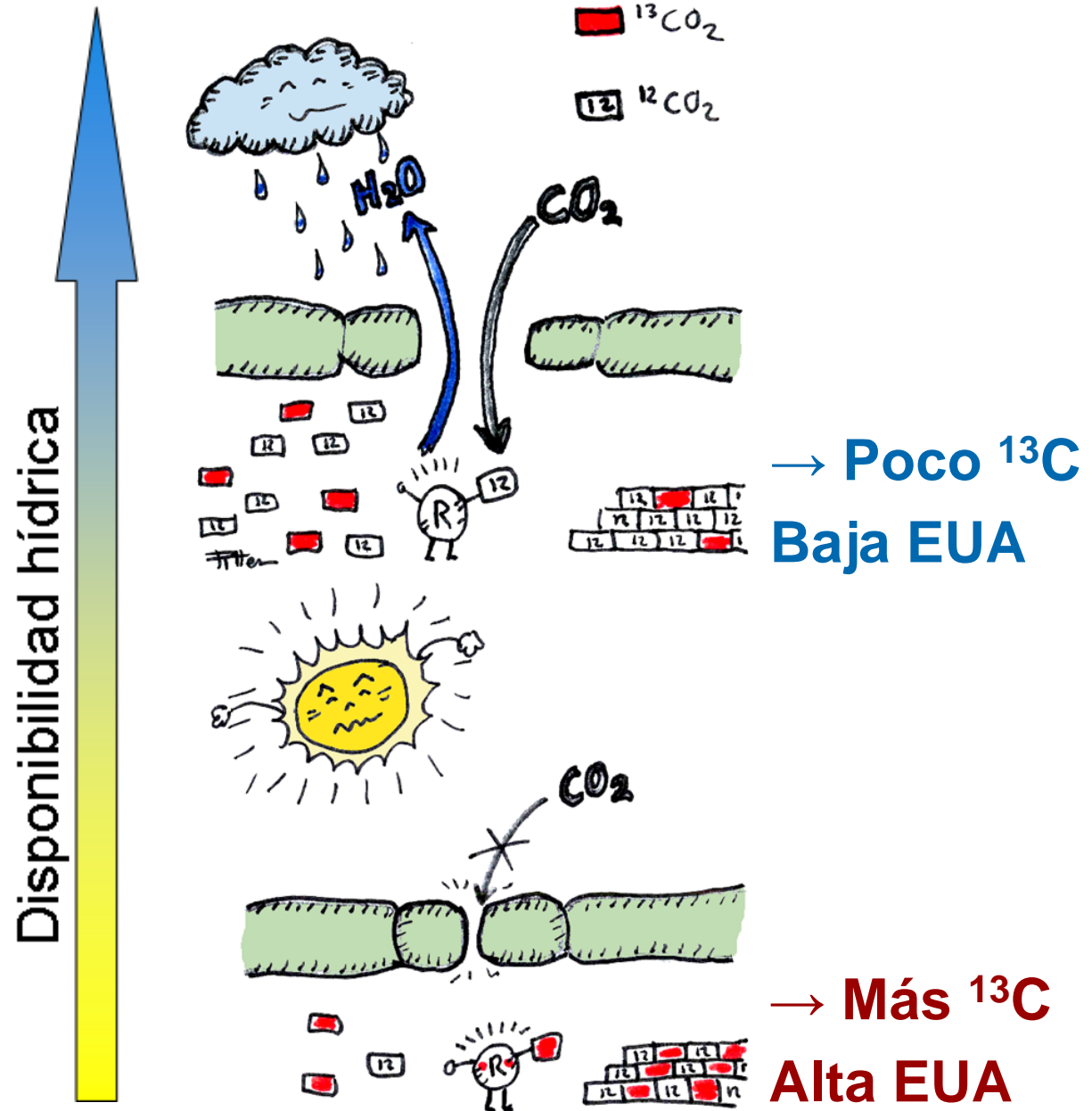
CO₂ interno limitado

'No hay dónde elegir'



→ Más ¹³C
Alta EUA

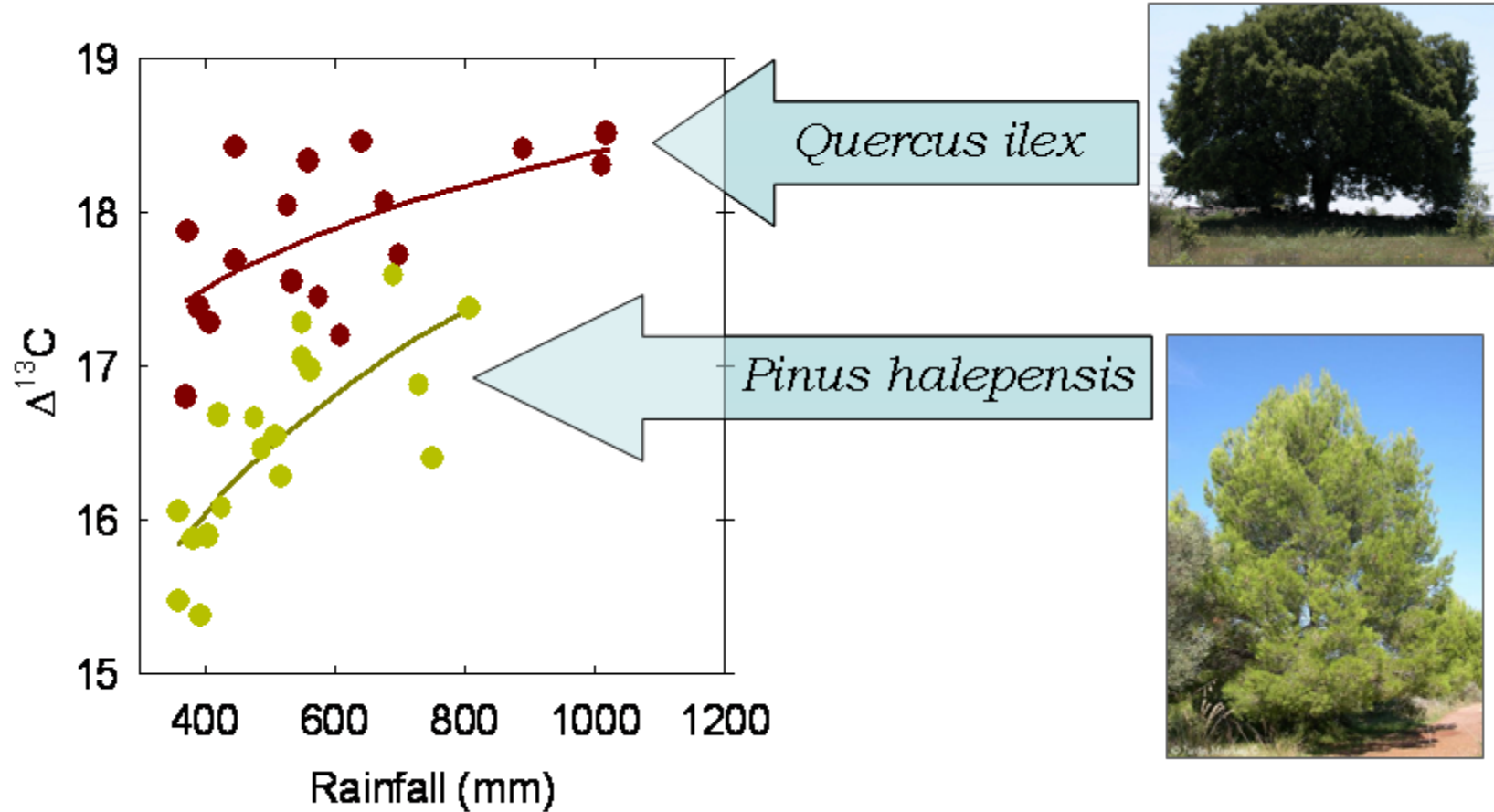
13C: EUA y respuesta ambiental



13C: EUA y respuesta ambiental



$\Delta^{13}\text{C}$ en madera determinada por la cantidad de precipitación



¿Cómo se mide?



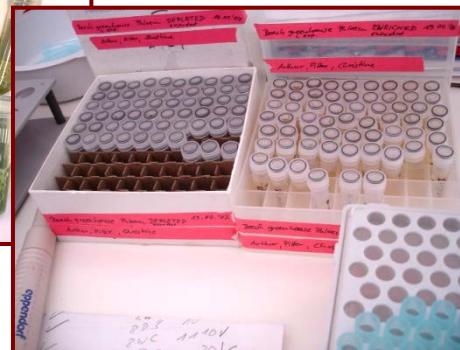
Materia Orgánica



Biocarbonatos



Homogenizado /
Extracción compuestos



Hidrólisis ácida
carbonato

Encapsulado
combustión/pirólisis



CO₂ respirado

Inyección

IRMS



Laser (IRIS)



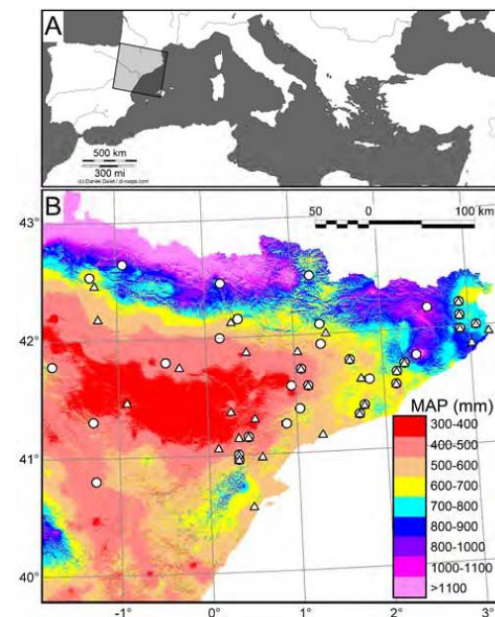


ISOSCAPES: Isotope landscapes

modelos espaciales ecoclimáticos a partir de series de isótopos de anillos de crecimiento

Isoscapes of tree-ring carbon-13 perform like meteorological networks in predicting regional precipitation patterns

Jorge del Castillo,¹ Mònica Aguilera,¹ Jordi Voltas,¹ and Juan Pedro Ferrio¹
JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: BIOGEOSCIENCES
VOL. 118, 1–9, doi:10.1002/jgrg.20036, 2013



Red de muestreos $\Delta^{13}\text{C}$ en anillos de crecimiento



Encina (N=44)
Quercus ilex L.



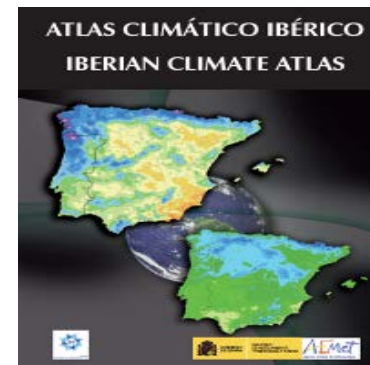
Pino carrasco (N=38)
Pinus halepensis Mill.

Modelos de regresión-interpolación

- basados en variables geográficas
- utilizados para interpolar datos climáticos



<http://opengis.uab.es/wms/iberia/>

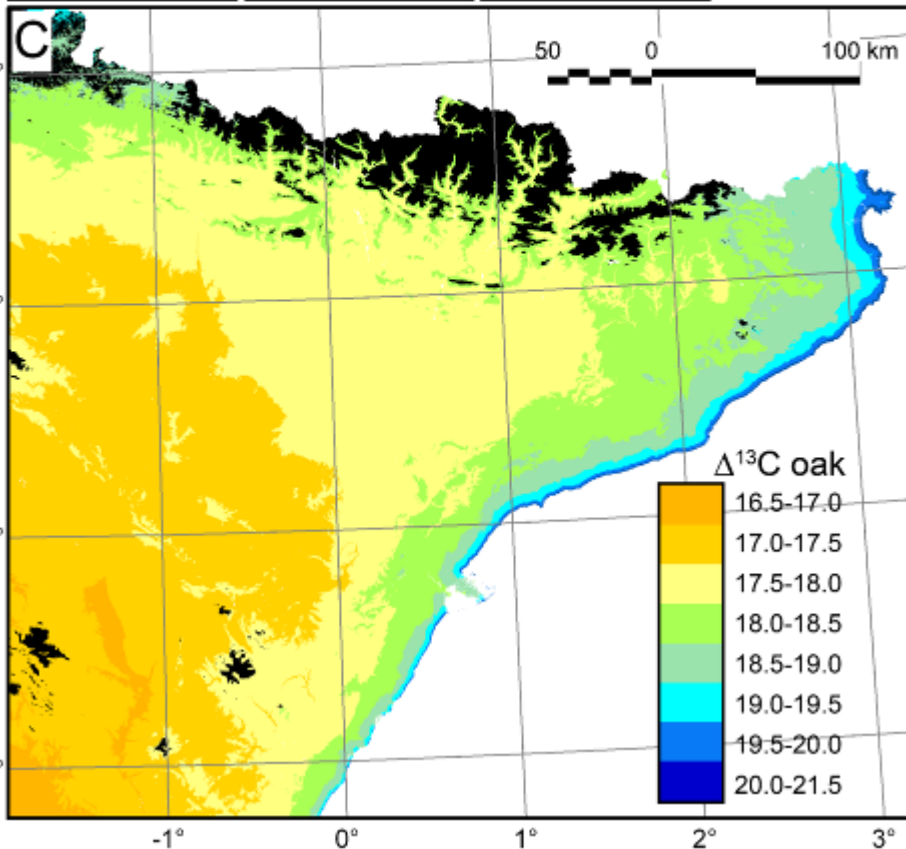
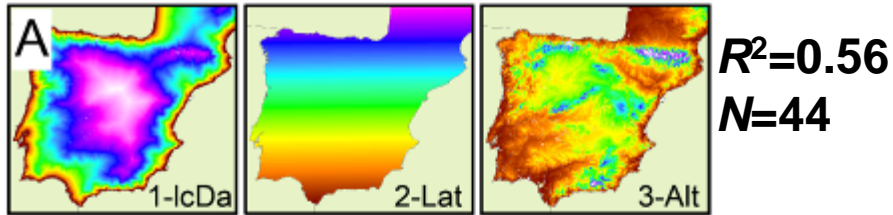


<http://www.aemet.es/>

Isoscapes: pino vs. encina

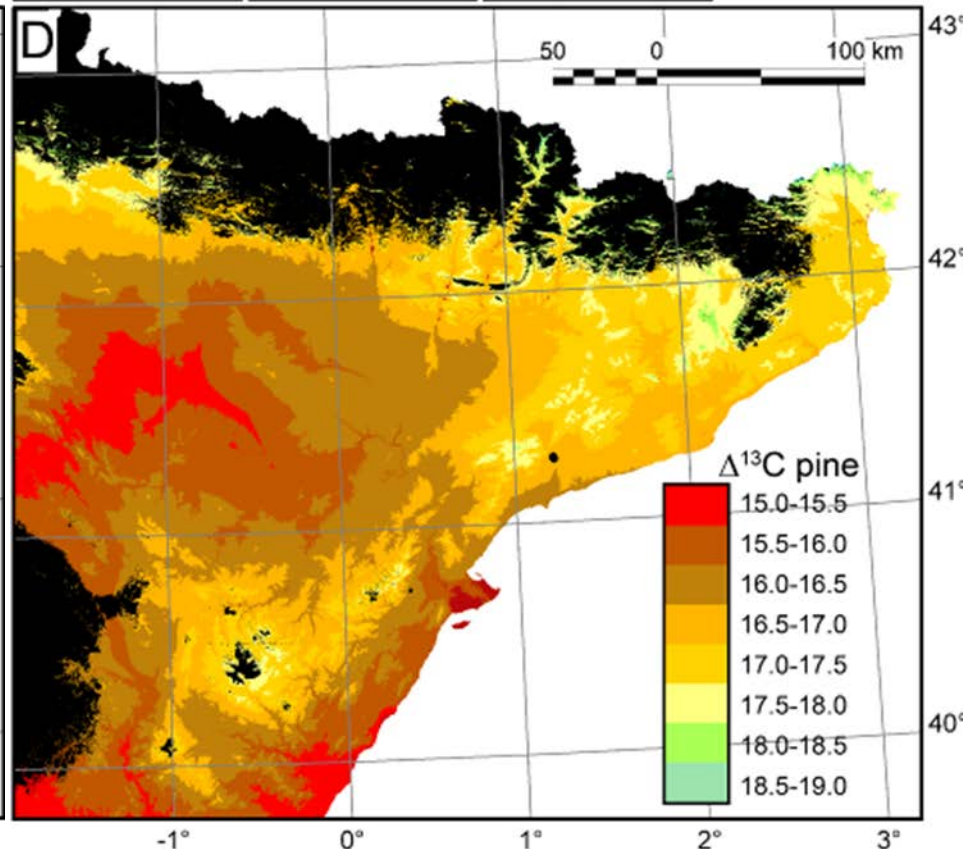
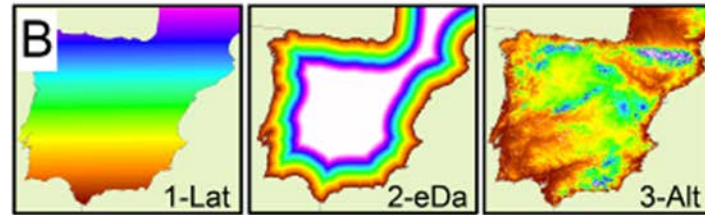
Q. ilex

Cont >>> Lat > Alt



P. Halepensis

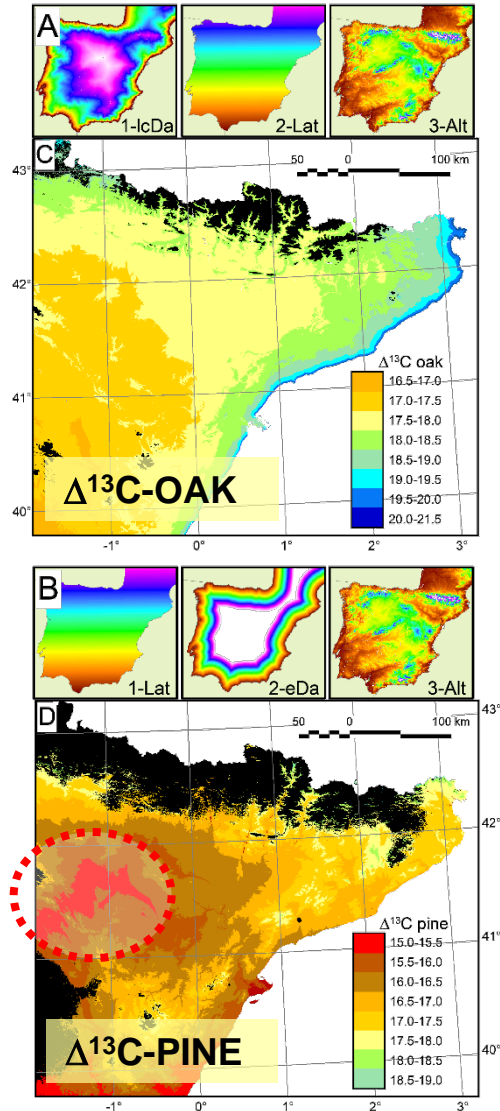
Lat > Cont > Alt



Isoscapes: pino vs. encina

Patrones espaciales de $\Delta^{13}\text{C}$ muestran limitación geográfica de cada especie
→ define ‘zonas de riesgo’ potencial

Complementa los tradicionales ‘índices de idoneidad’, basados en la distribución de especies,
→ ‘vulnerabilidad fisiológica’



Caso 3: estudio del decaimiento



Sierra de Gúdar (Teruel)
sequía + frío



Decaimiento selectivo
Mortalidad selectiva

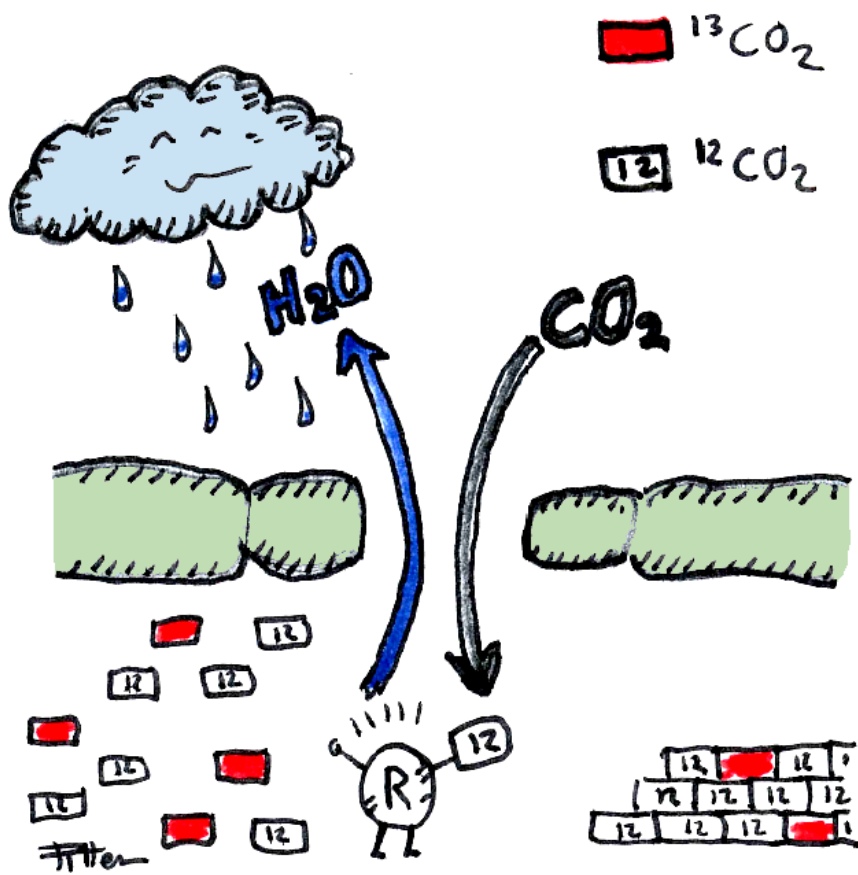
2002 → present

Ishinomaki (Japón)
Tsunami 2011



Decaimiento general
Descenso brusco crecimiento

2011 → present



Dos escenarios posibles:

¿cómo aumenta EUA (A/g_s)?

ESCENARIO 1

Baja g_s (ahorro de agua)

→ **asociación negativa entre EUA y crecimiento**

ESCENARIO 2

Alta A (fijación eficiente de C)

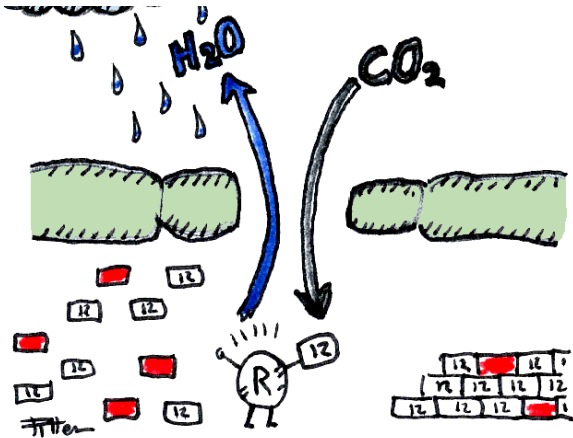
→ **asociación positiva entre EUA y crecimiento**

Análisis isotópico dual: ^{13}C y ^{18}O

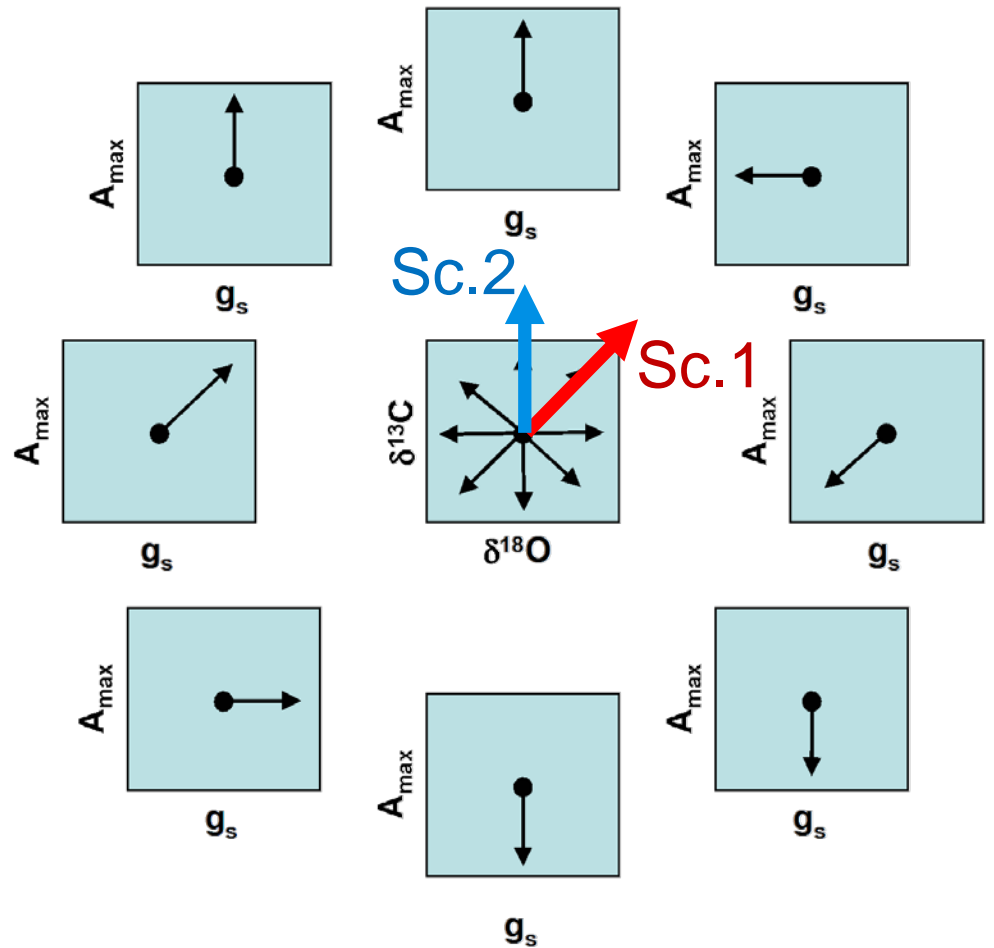
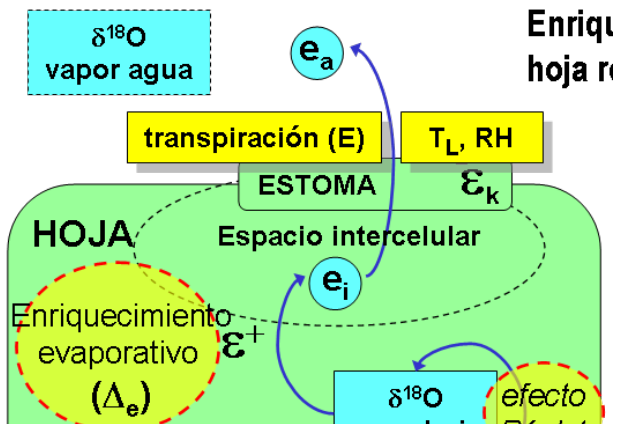


$\delta^{18}\text{O}$ separa efecto g_s y A sobre EUA_i (^{13}C)

$^{13}\text{C} \approx A/g_s$



$^{18}\text{O} \approx g_s$



Pino albar en Gúdar



Pinus sylvestris



2002 → present



Material vegetal y estrategia de muestreo

Edad a 1.30m (y)

<i>Healthy</i>	93.8% (± 7.52)
<i>Declining</i>	79.8% (± 7.51)
	$P=0.380$

Edad en ápice (y)

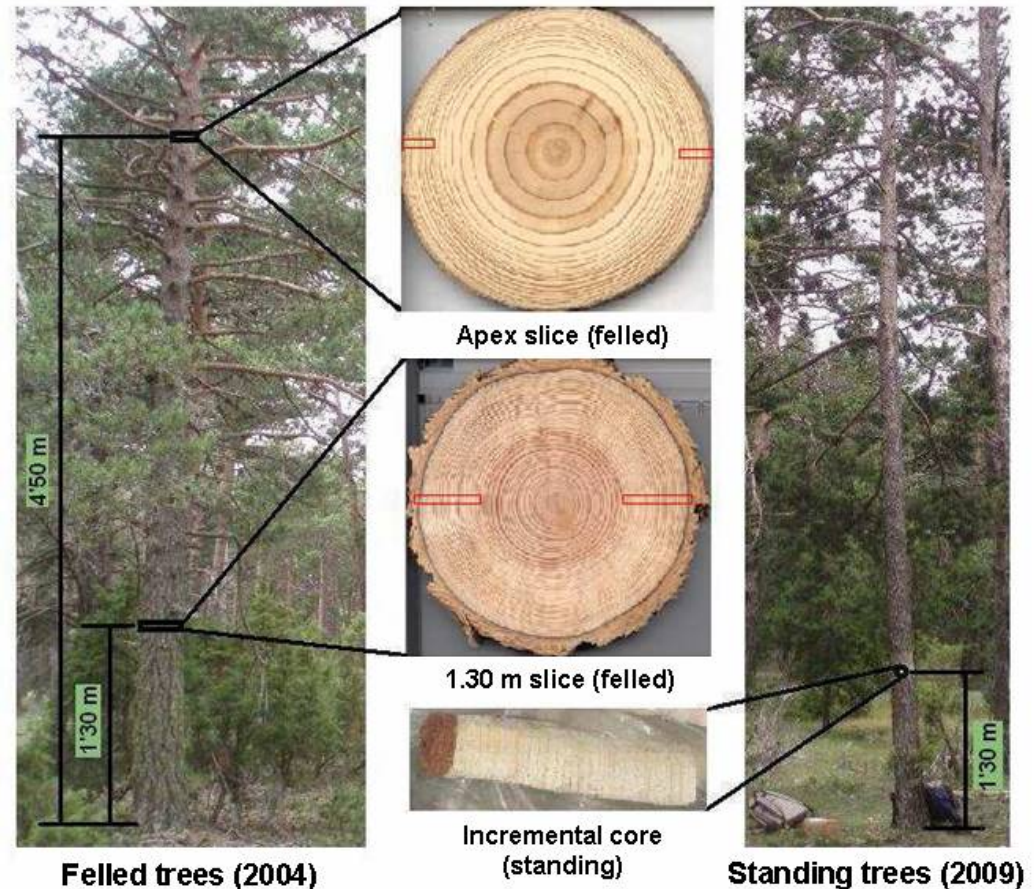
<i>Healthy</i>	27.0% (± 2.76)
<i>Declining</i>	33.0% (± 4.18)
	$P=0.394$

DBH (cm)

<i>Healthy</i>	14.4% (± 0.41)
<i>Declining</i>	15.8% (± 1.92)
	$P=0.535$

Defoliación (%)

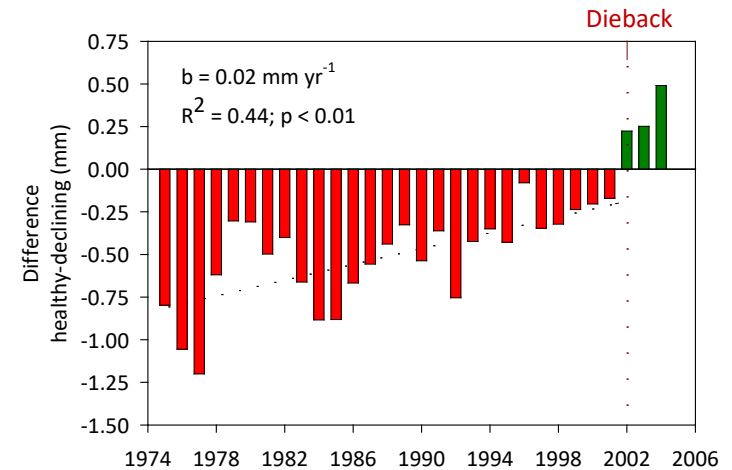
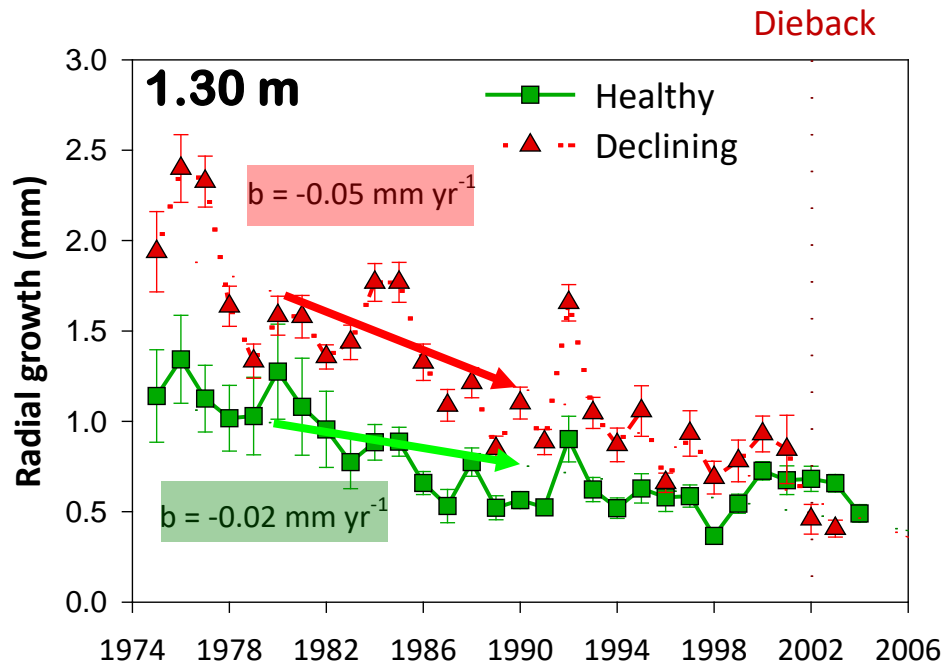
<i>Healthy</i>	11.7% (± 8.66)
<i>Declining</i>	65.0% (± 4.41)
	$P=0.003$



Análisis del crecimiento + ^{13}C y ^{18}O



Diferencias pre-decaimiento: crecimiento

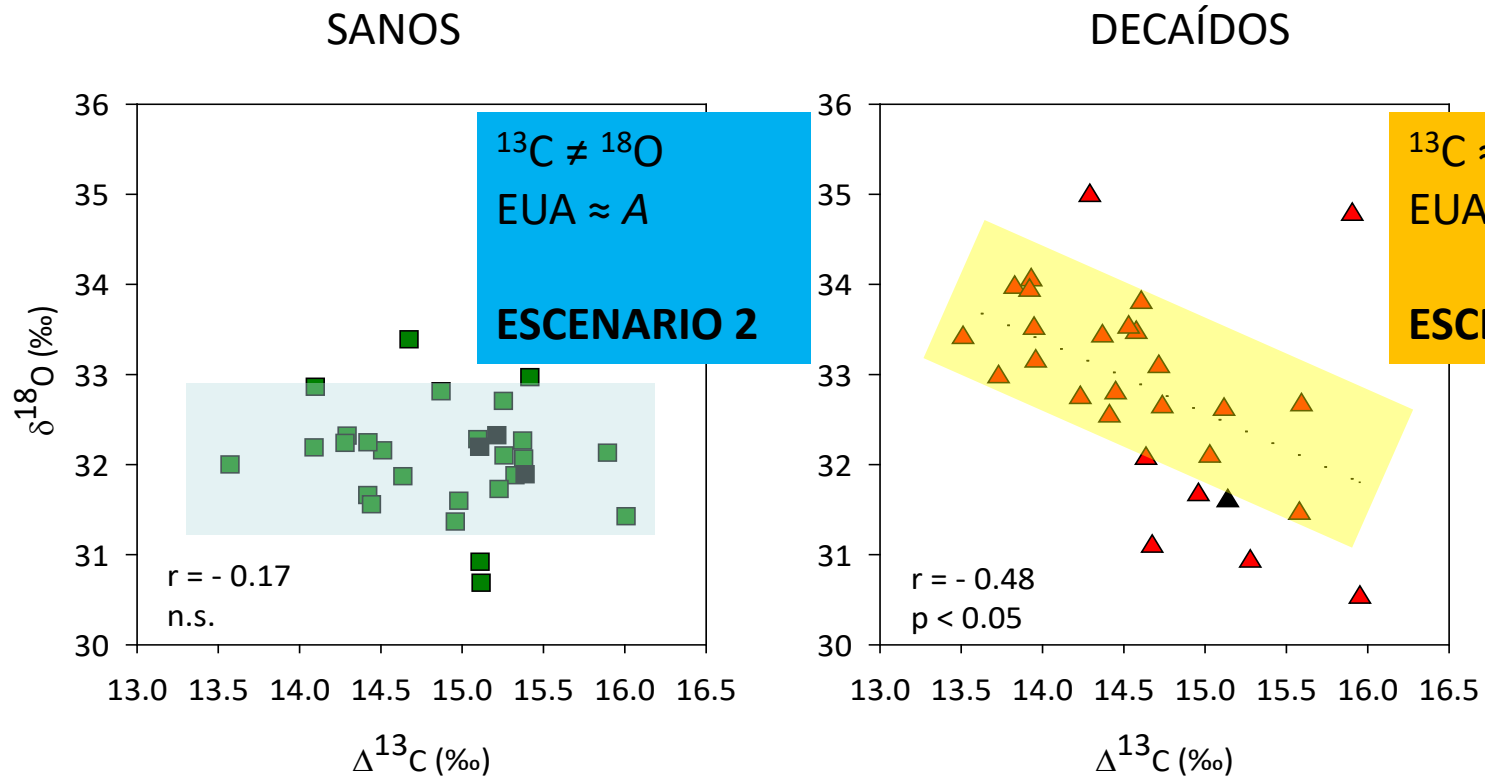


Until mid 90s,
declining trees grew faster
...but more erratic

Reducción en crecimiento, pero a distinto ritmo

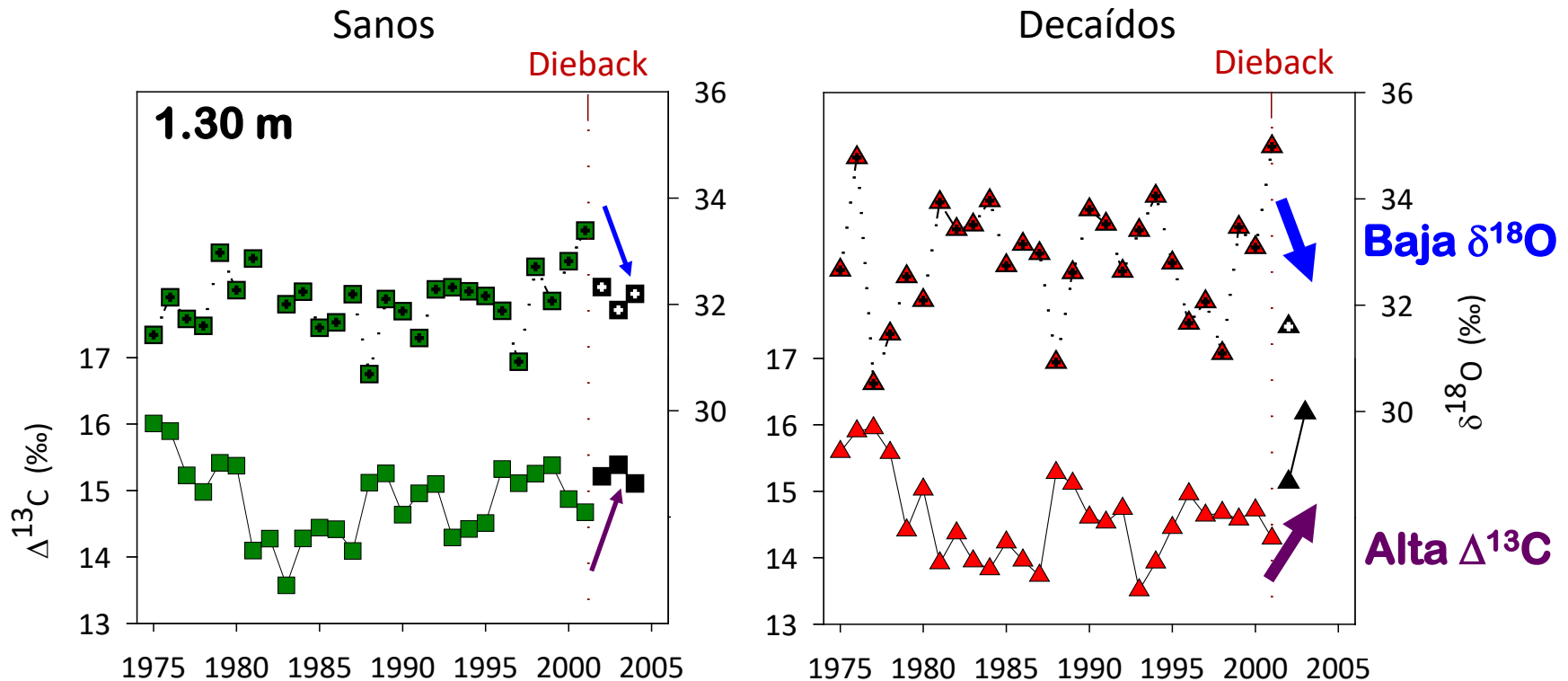


ISÓTOPOS ESTABLES (1,30m)





Respuesta post-decaimiento: $\Delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$



ESCENARIO 'X': Reducción en EUA y temperatura foliar

Bosque costero tras Tsunami



Ishinomaki
Prefectura de Miyagi
(Japón)



Pinus thunbergii



Cambios isotópicos tras tsunami en Japón



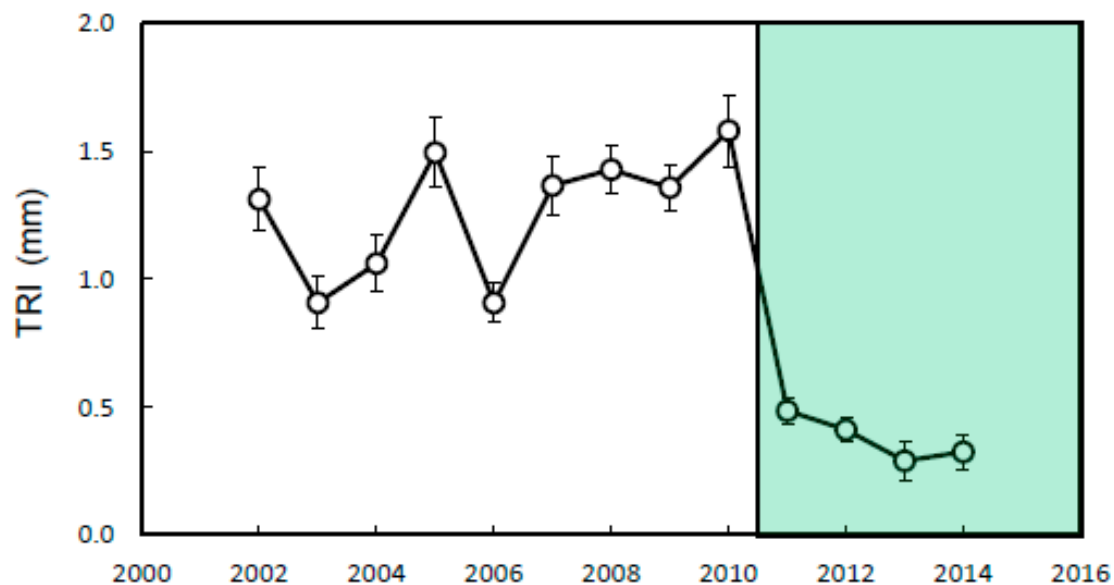
Parcela de bosque costero en Ishinomaki
Sin daños físicos debido al tsunami



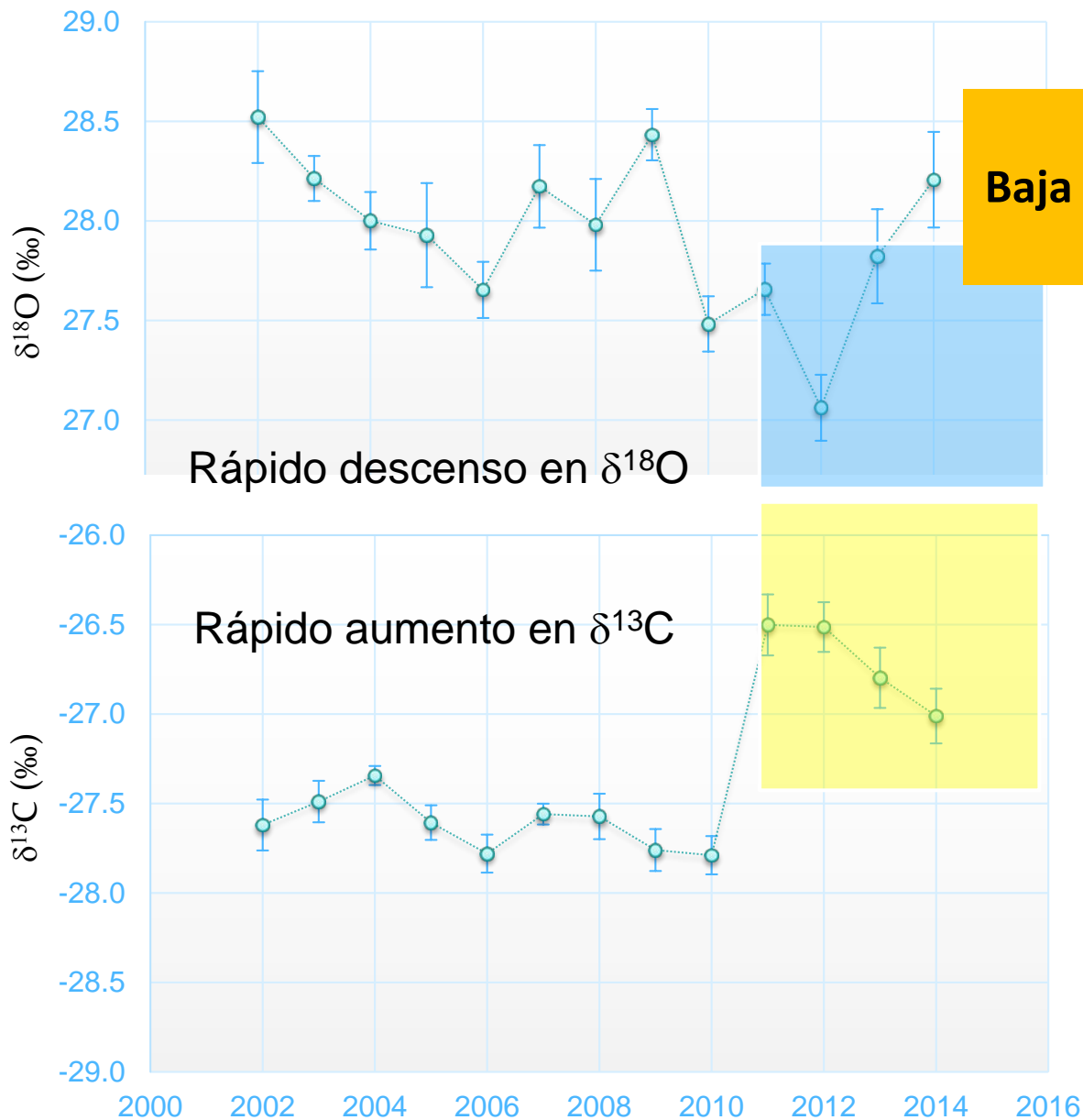
**... pero rápido descenso
en crecimiento**

¿Daño por intrusión marina?

- Estrés salino
- Pérdida de nutrientes
- Debilitación y ataque patógenos

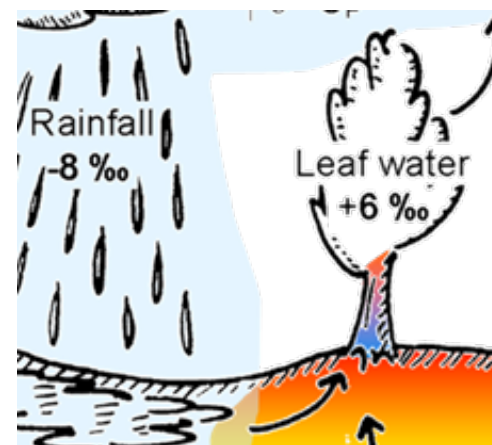


Cambios isotópicos tras tsunami en Japón



ESCENARIO 1:
Baja crecimiento y alta EUA
(... pero 18O baja)

**¡Ojo! Señal agua Fuente
en xilema (tifón 2011)**



Caso 4: sostenibilidad de la agricultura



Tell Halula, Neolítico, Eúfrates medio (10.000-8.000 BP)

Halula, poblado actual
(región de Aleppo, NO Siria)



Tell Halula, Yacimiento neolítico



ELSEVIER

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Journal of Arid Environments

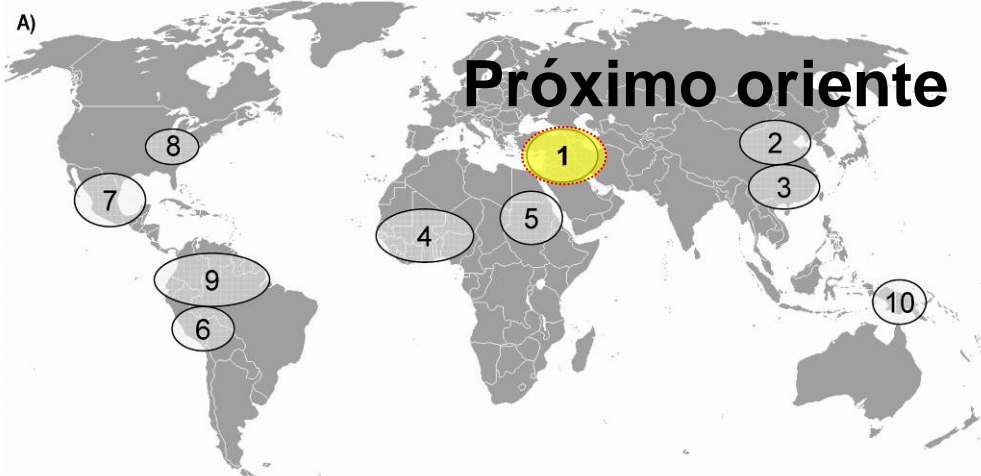
journal homepage: www.elsevier.com/locate/jaridenv



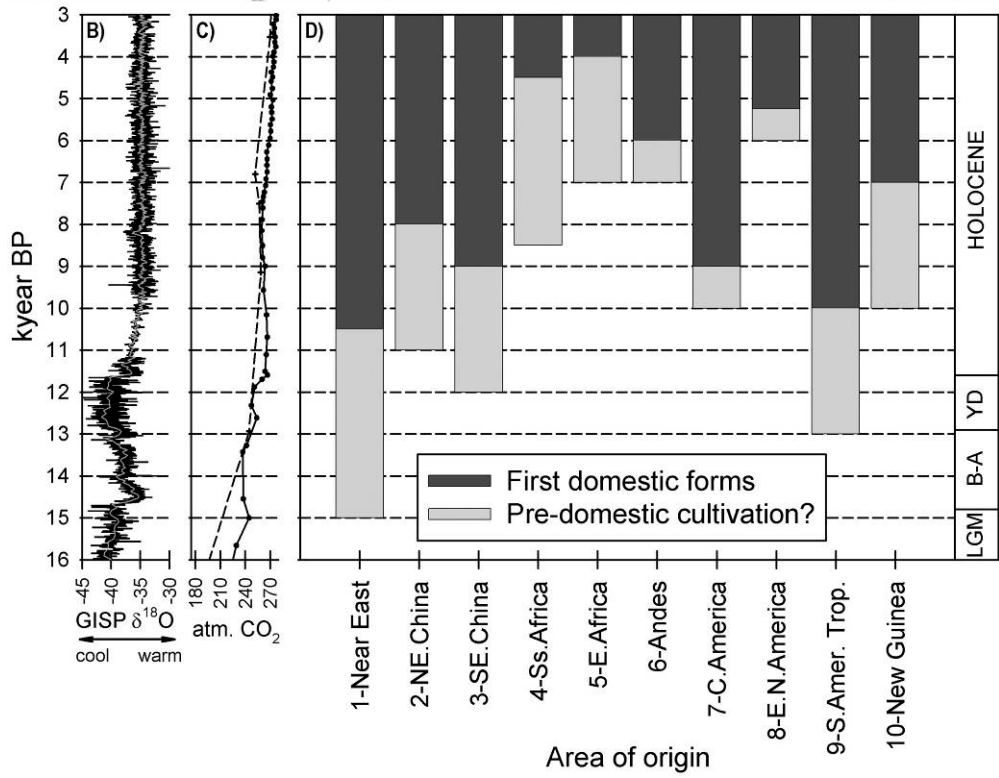
Agricultural expansion and settlement economy in Tell Halula
(Mid-Euphrates valley): A diachronic study from early Neolithic to present

J.P. Ferrio ^{a,*}, G. Arab ^b, R. Buxó ^c, E. Guerrero ^d, M. Molist ^d, J. Voltas ^a, J.L. Araus ^e

Sostenibilidad en inicios agricultura



¿Hasta qué punto era sostenible la agricultura del pasado?



Restos arqueobotánicos



Carbones en el sedimento, *Tell Halula*, Siria (J.L.Araus, Univ. Barcelona)

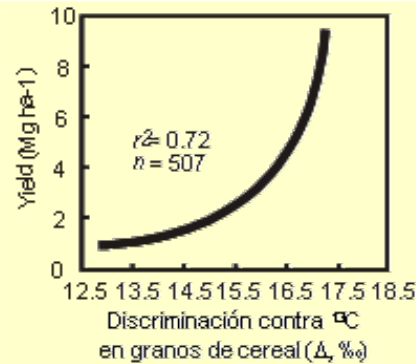
Rendimiento a partir de $\Delta^{13}\text{C}$ y tamaño del grano

Granos actuales



$\delta^{13}\text{C}$

Δ



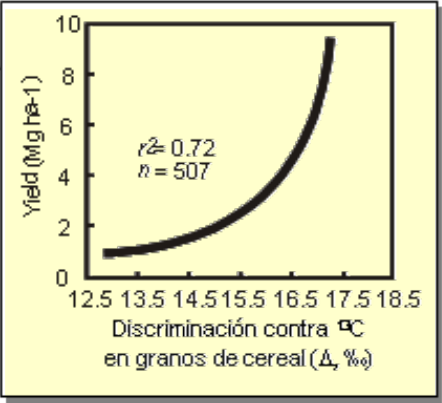
$\Delta^{13}\text{C}$ y rendimiento

$$\text{Yield} = 0.0054 e^{0.40 \cdot \Delta}$$

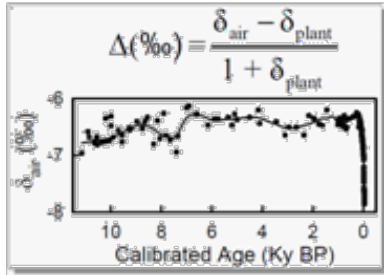
Rendimiento a partir de $\Delta^{13}\text{C}$ y tamaño del grano



$\delta^{13}\text{C}$ Δ



Cambios $\delta^{13}\text{C}$ aire



$\Delta^{13}\text{C}$ y rendimiento

$$\text{Yield} = 0.0054 e^{0.40 \cdot \Delta}$$



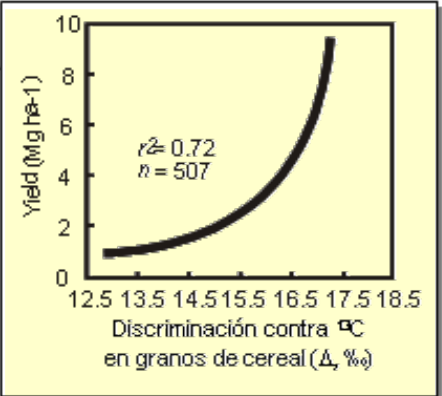
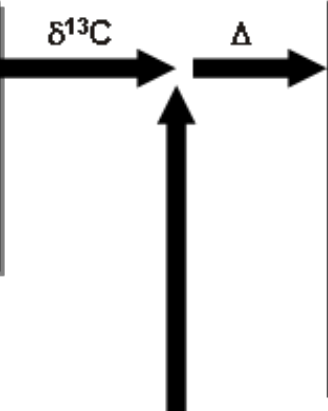
$\delta^{13}\text{C}$
-23.35 ‰
-23.62 ‰

Δ
17.17 ‰
17.46 ‰

Rendimiento cond. actuales:

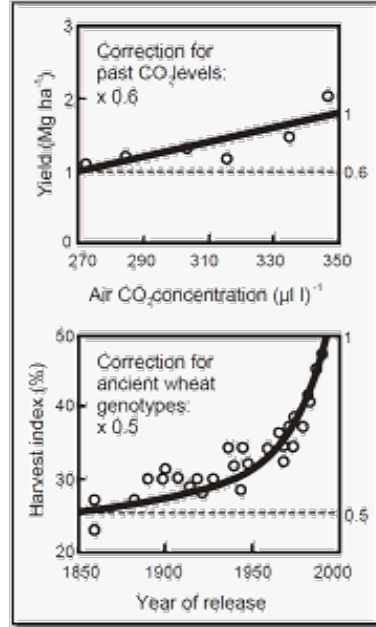
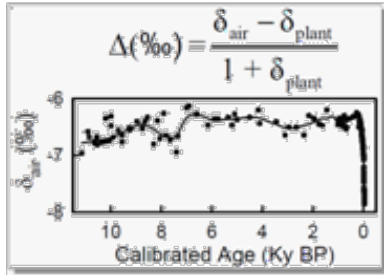
5.36 Mg ha⁻¹
6.02 Mg ha⁻¹

Rendimiento a partir de $\Delta^{13}\text{C}$ y tamaño del grano



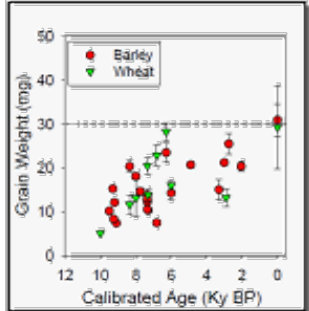
$\Delta^{13}\text{C}$ y rendimiento

Yield = 0.0054 e^{0.40 * Δ}



Cambios conc. CO₂
Índice de cosecha

Cambios peso potencial



$\delta^{13}\text{C}$	Δ
-23.35 ‰	17.17 ‰
-23.62 ‰	17.46 ‰

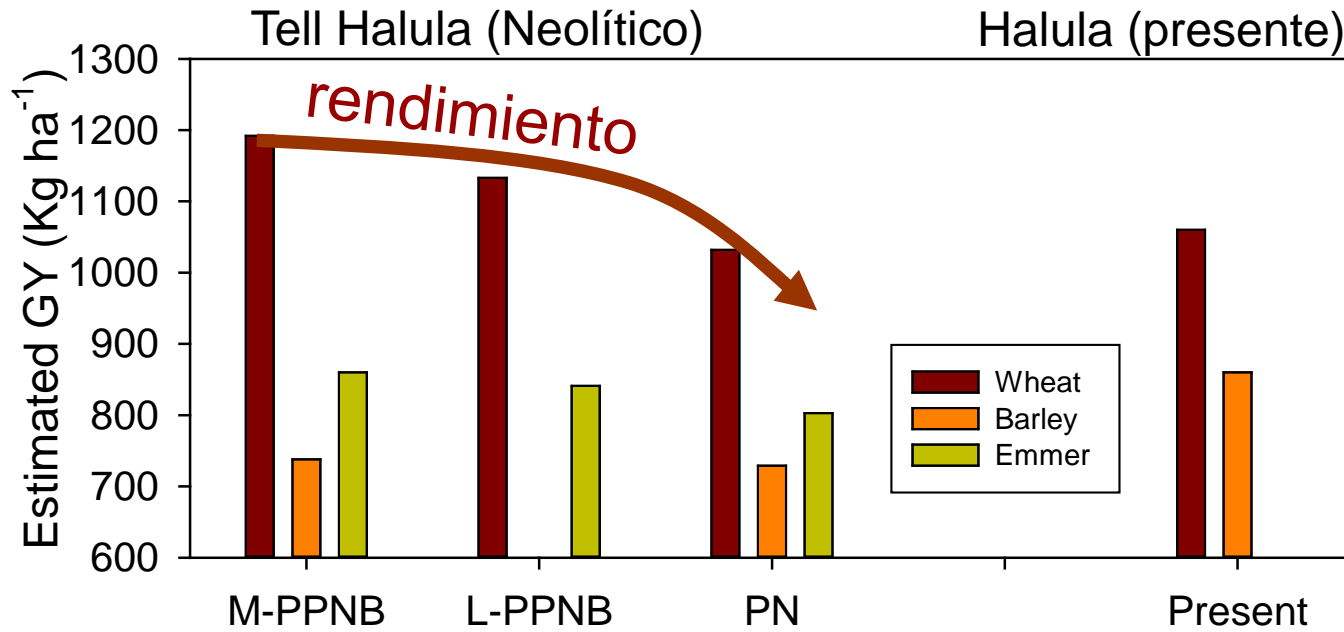
Rendimiento cond. actuales:
5.36 Mg ha⁻¹
6.02 Mg ha⁻¹

Corrección:
0.6 x 0.5 = 0.3

Corrección por tamaño potencial pasado / presente

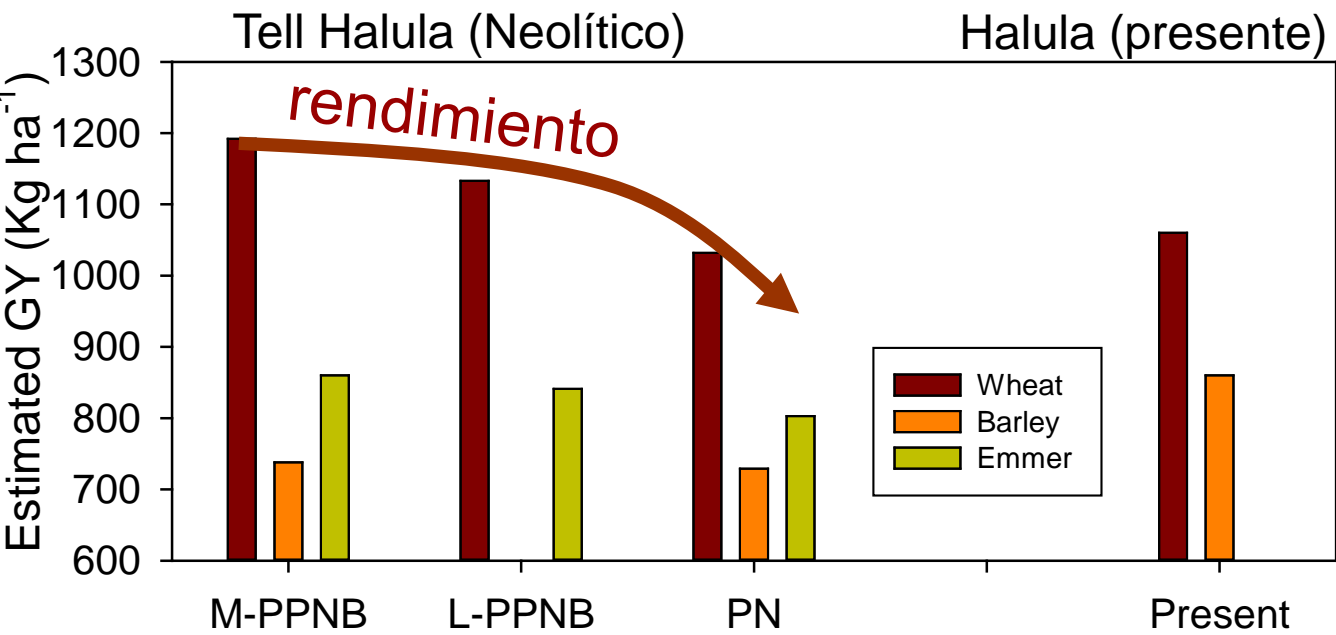
Rendimiento en antigüedad:
1.61 Mg ha⁻¹
1.81 Mg ha⁻¹

Descenso en producción de grano

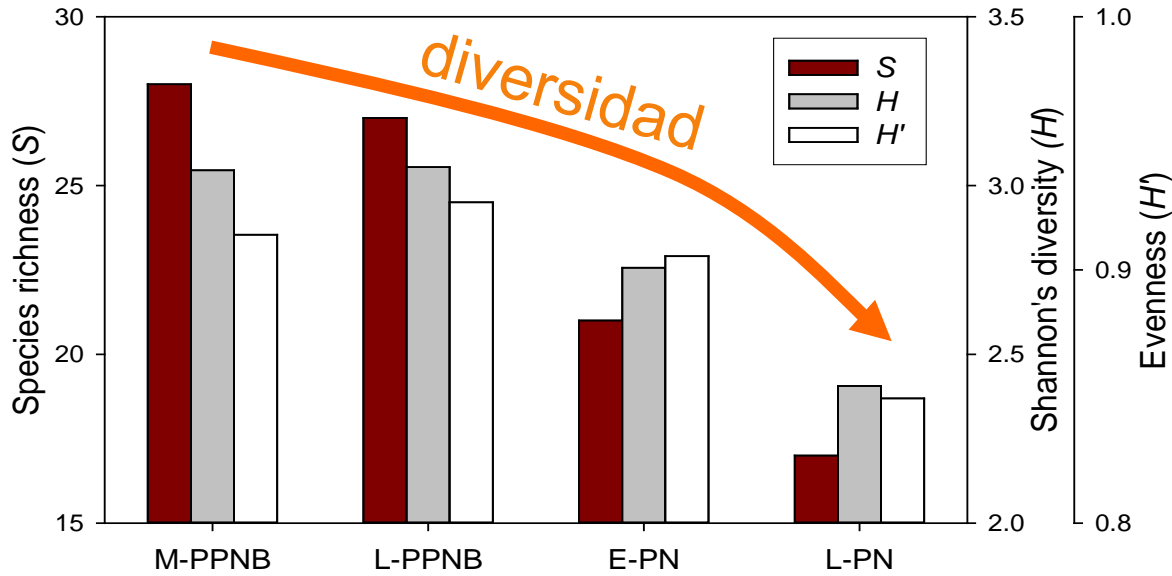


Descenso en Rendimiento de trigo (según 13C)

Descenso en la diversidad

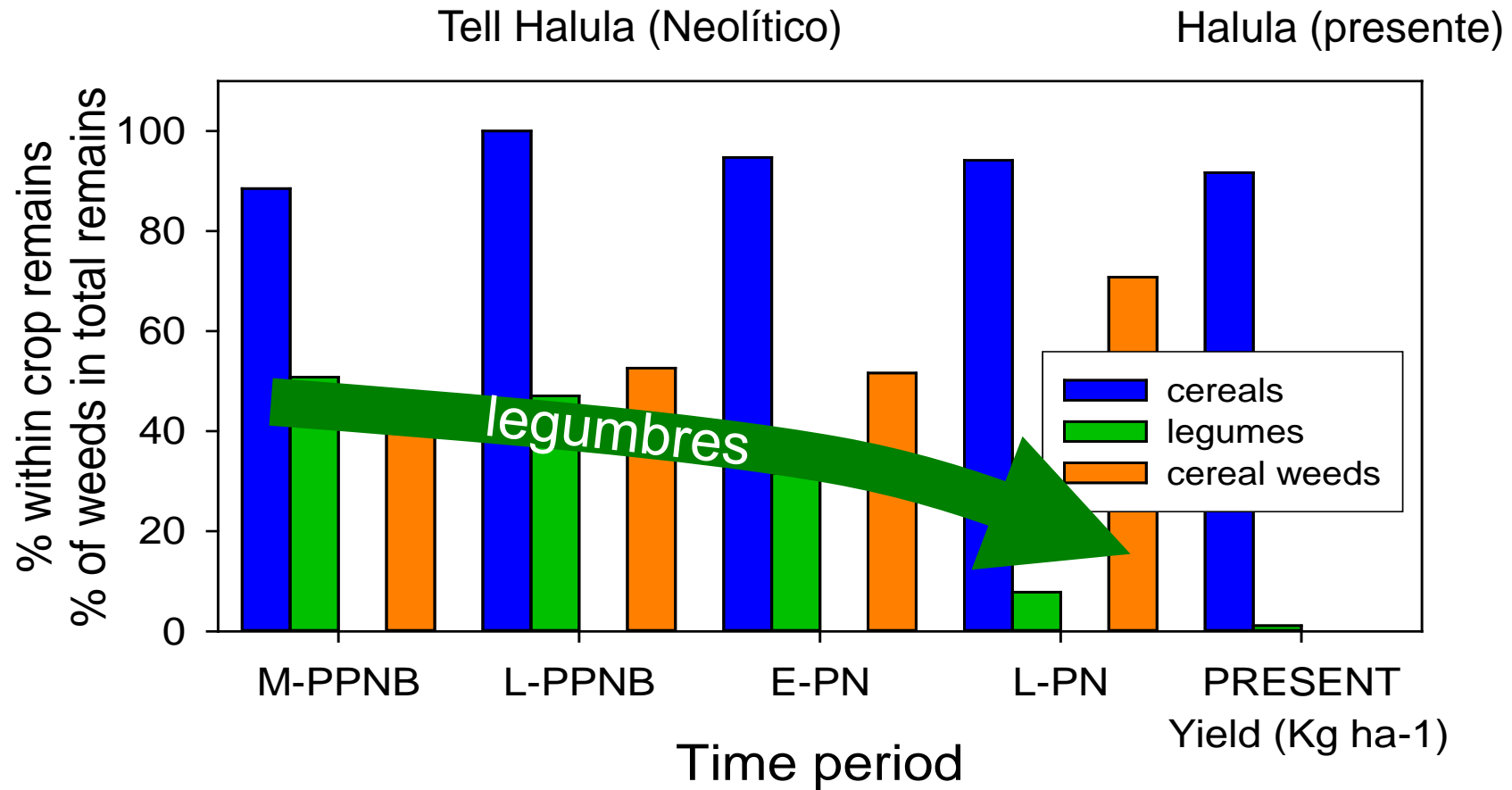


Descenso en Rendimiento de trigo (según 13C)



Descenso en Diversidad

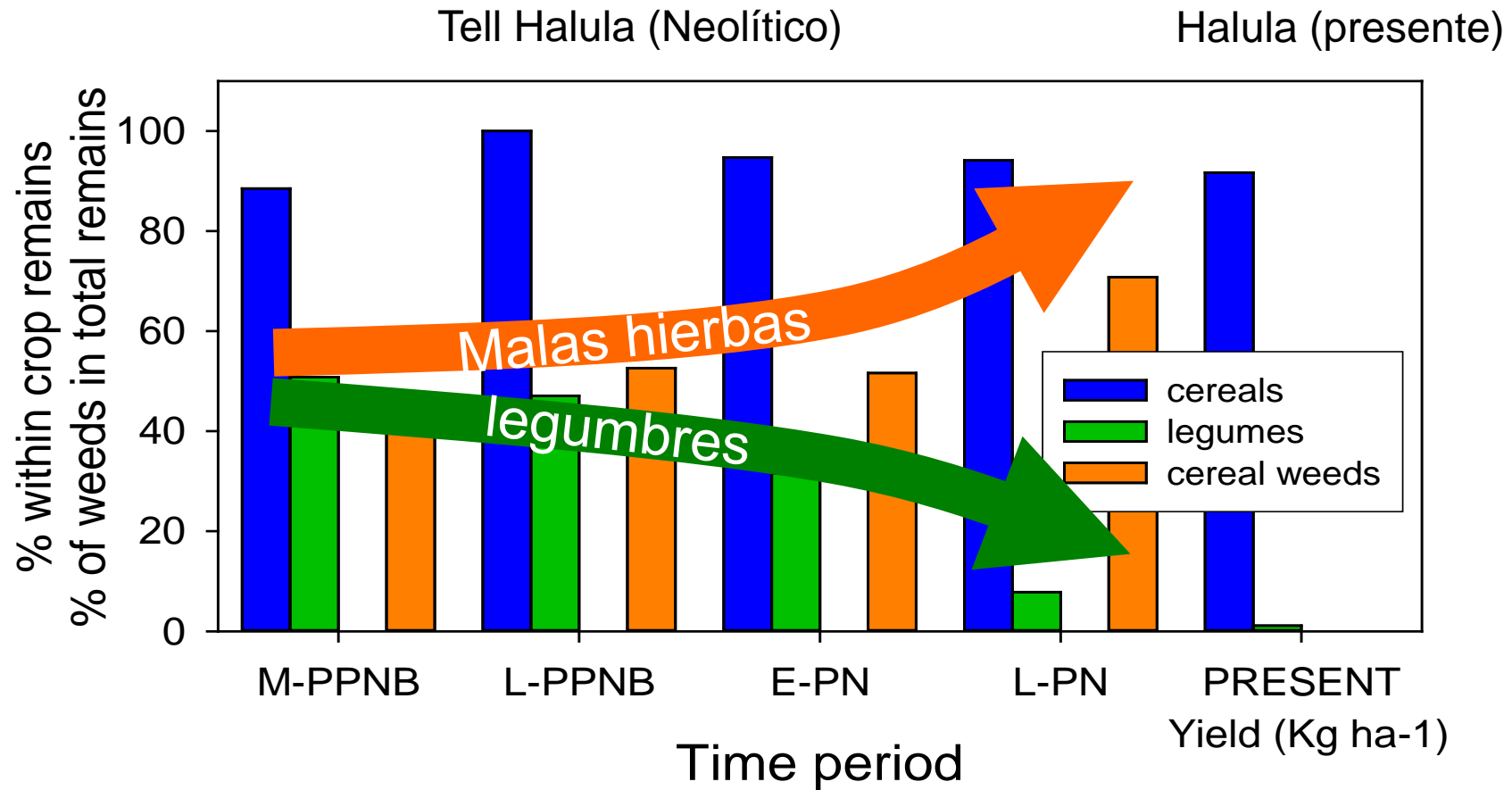
Posible causa: Transición hacia el monocultivo



Descenso en leguminosas

≈ Presente (monocultivo cebada)

Monocultivo = ¿ baja fertilidad y malas hierbas ?

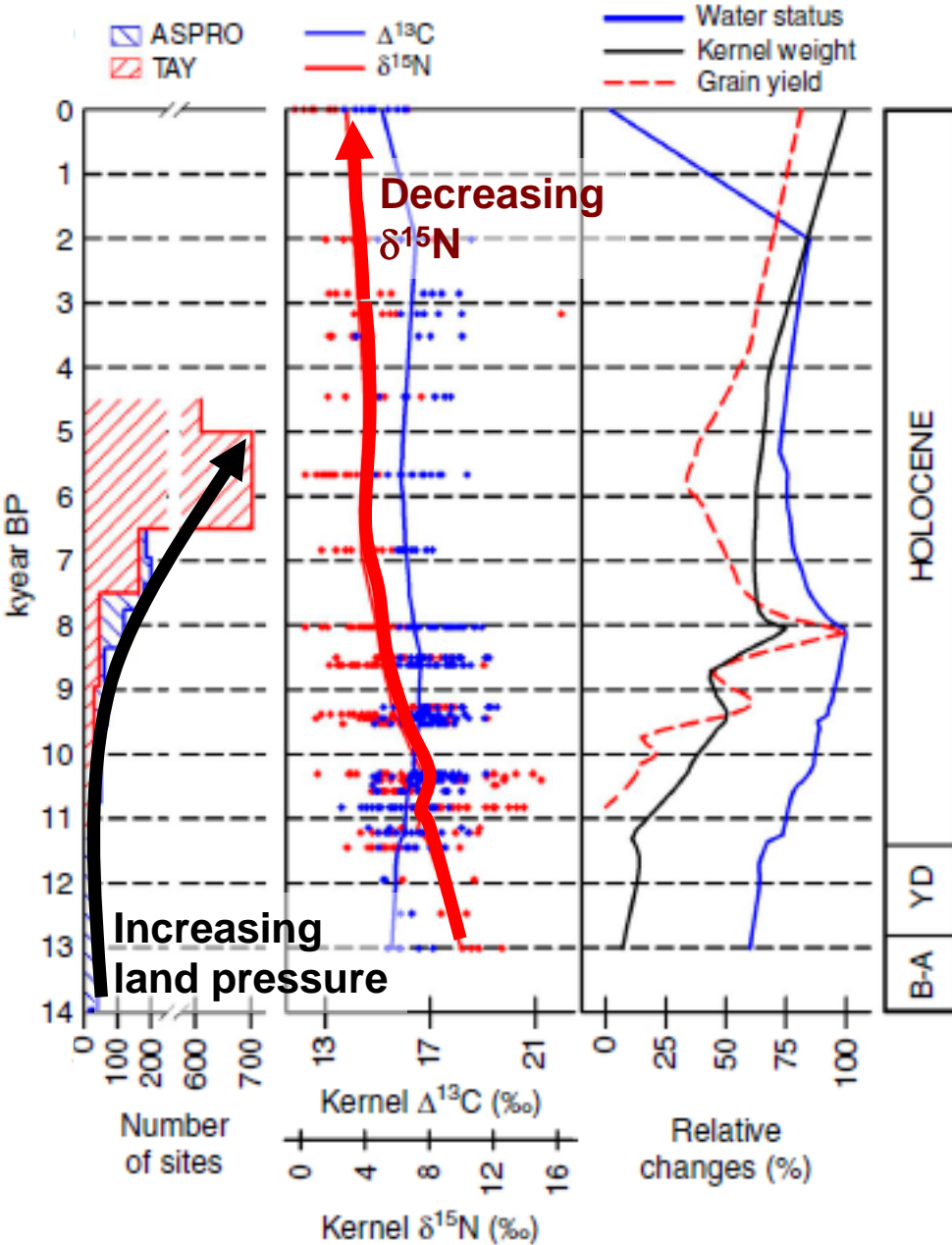


Descenso en leguminosas

≈ Presente (monocultivo cebada)

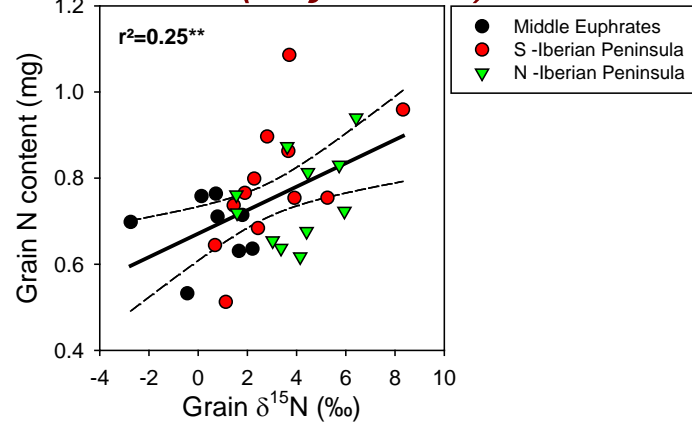
Aumento de malas hierbas asociadas a cereal

Indicios de un descenso en fertilidad a largo plazo



Gran expansión agrícola
(número de yacimientos)
(aumento presión demográfica)

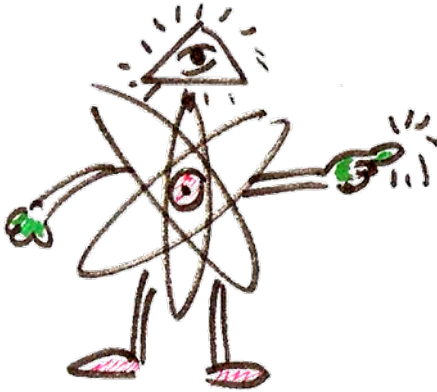
Descenso en la fertilidad
del suelo (*baja δ¹⁵N*)



ARTICLE
Received 24 Dec 2013 | Accepted 24 Apr 2014 | Published 23 May 2014
DOI: 10.1038/ncomms4953

Agronomic conditions and crop evolution in ancient Near East agriculture

José L. Araus^{1,*}, Juan P. Ferrio^{2,*}, Jordi Voltas^{2,*}, Mònica Aguilera² & Ramón Buxó³



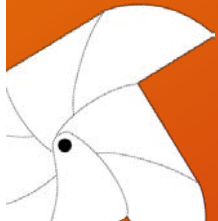
BELIEVE IN ISOTOPES

Integración a nivel temporal y espacial de distintos procesos físicos, químicos y biológicos

Material de estudio: cada fracción orgánica (azúcares, almidón, madera) o inorgánica (CO_2 , H_2O) muestra una escala temporal distinta

¡Ojo! procesos que alteran la señal isotópica

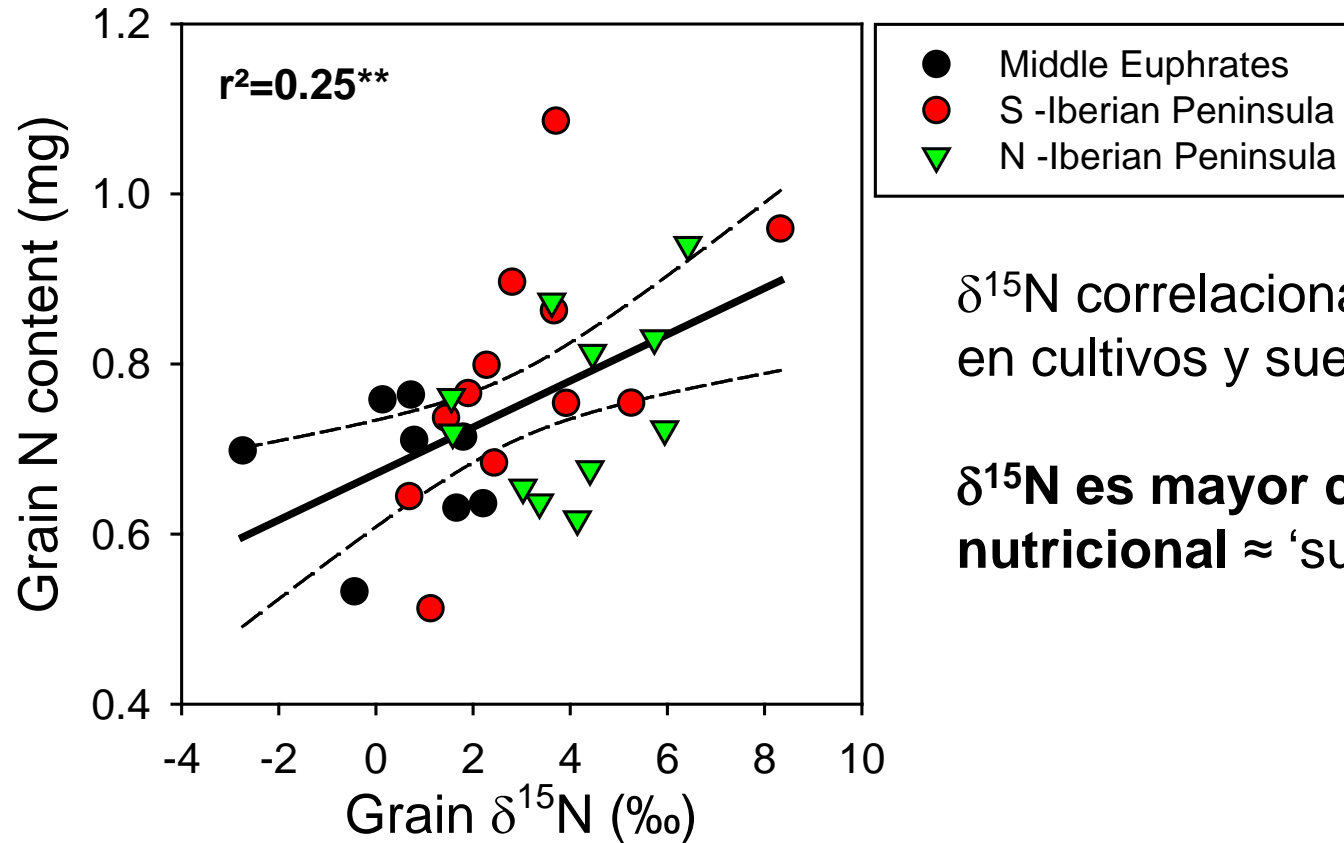
¡Gracias!



^{15}N y estado nutricional



$\delta^{15}\text{N}$ y contenido de Nitrógeno por grano en cebada y trigo



$\delta^{15}\text{N}$ correlaciona positivamente con N en cultivos y suelo (sin fertil. Mineral*):

$\delta^{15}\text{N}$ es mayor con mejor estado nutricional \approx 'suelos ricos'

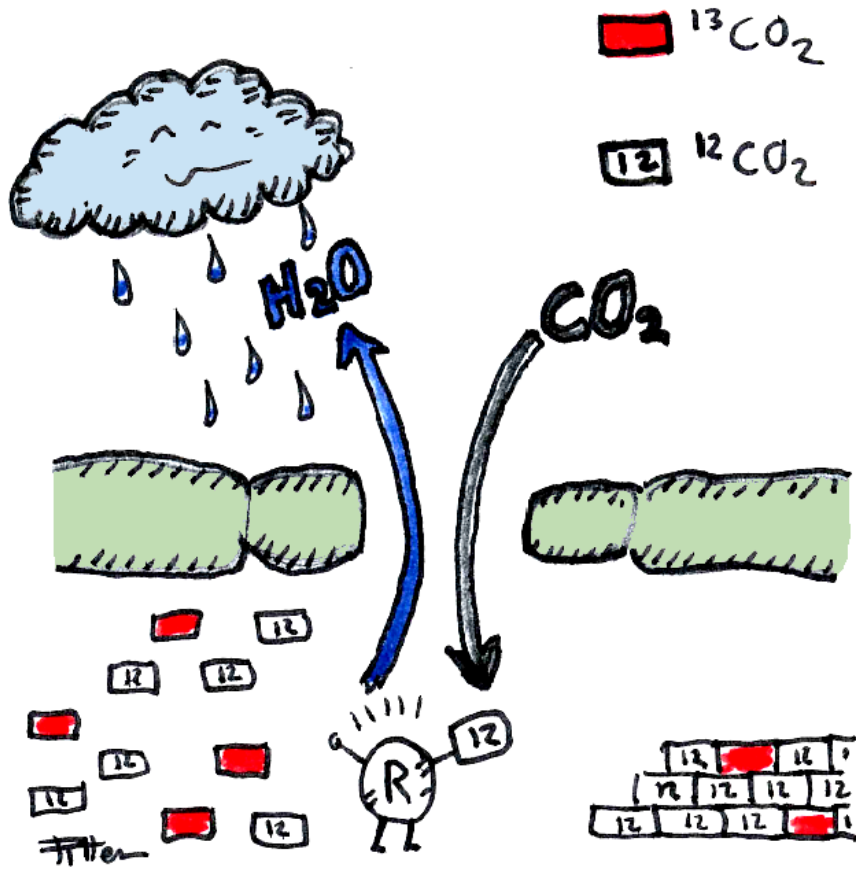
*Bol et al. 2004. *Isotopes Environ. Health Stud.*; Bol et al. 2005. *Rapid Comm. Mass Spectrom.*

*Choi et al. 2003. *Soil Biology & Biochemistry*

*Bogaard et al. 2006. *Journal of Archaeological Science*

*Aguilera et al. 2008. *Rapid Comm Mass Spec*

Ejemplo: adaptación y EUA



Dos escenarios posibles:
forma de aumentar A/g_s

ESCENARIO 1

Baja g_s (ahorro de agua)

→ **asociación negativa entre
EUA y crecimiento**

VS.

ESCENARIO 2

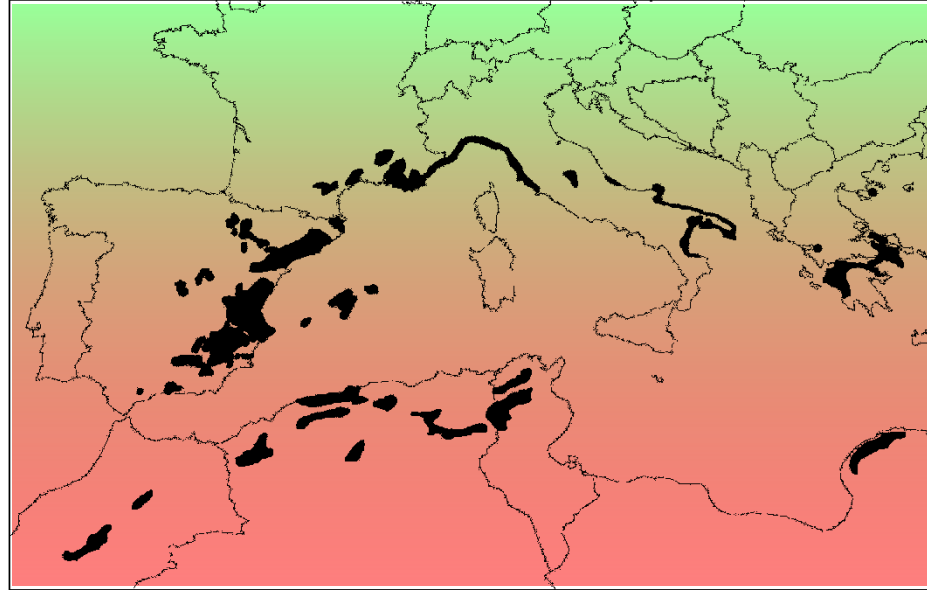
Alta A (fijación eficiente de C)

→ **asociación positiva entre
EUA y crecimiento**

Ejemplo: adaptación y EUA



Pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.)



Diferente exposición al estrés hídrico actúa como fuerza de selección

Ensayo de procedencias

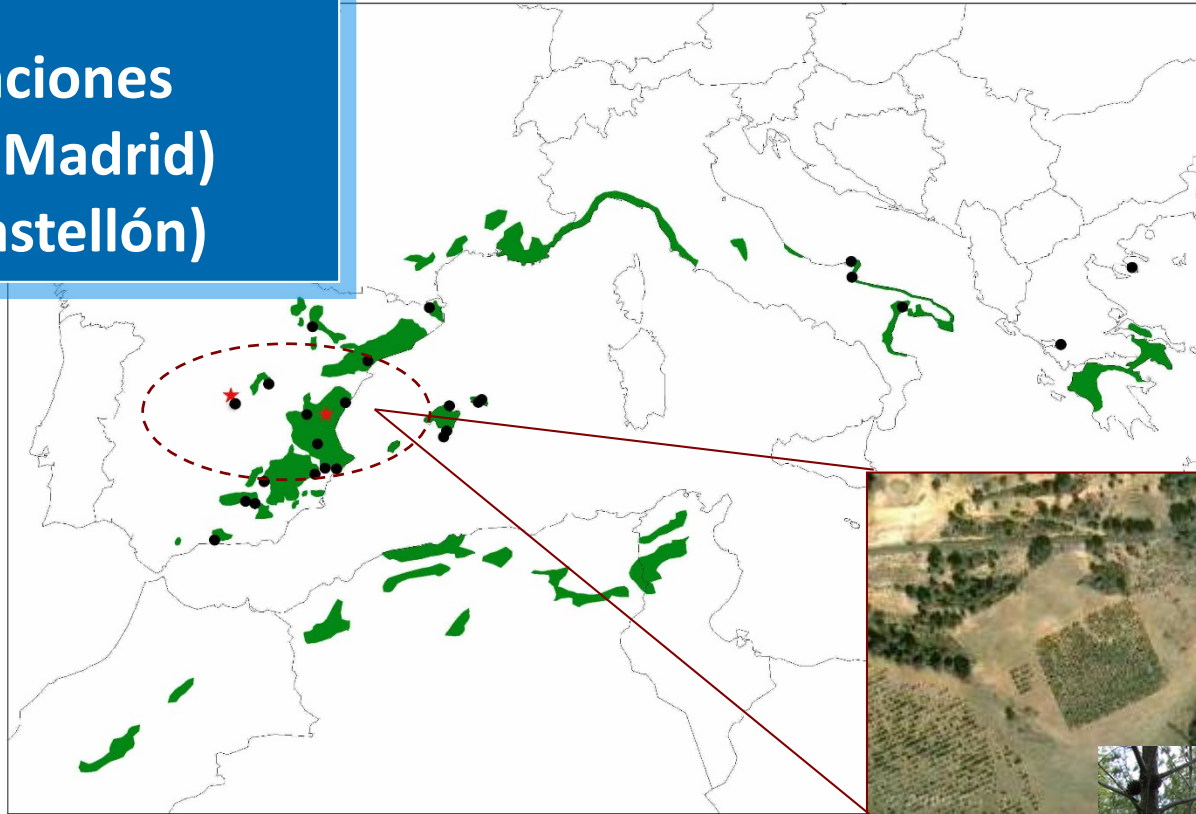


25 poblaciones

x 2 plantaciones

Arganda (Madrid)

Altura (Castellón)

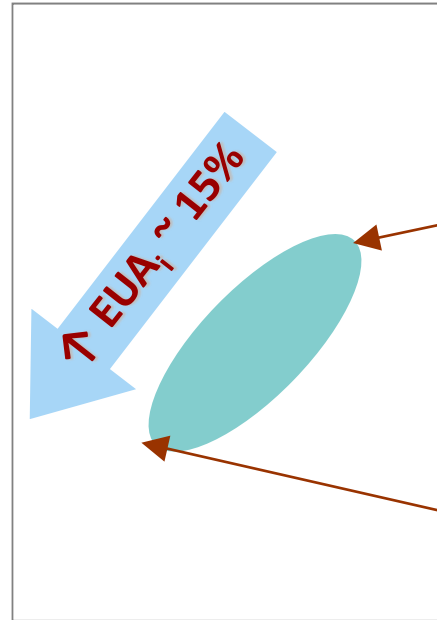
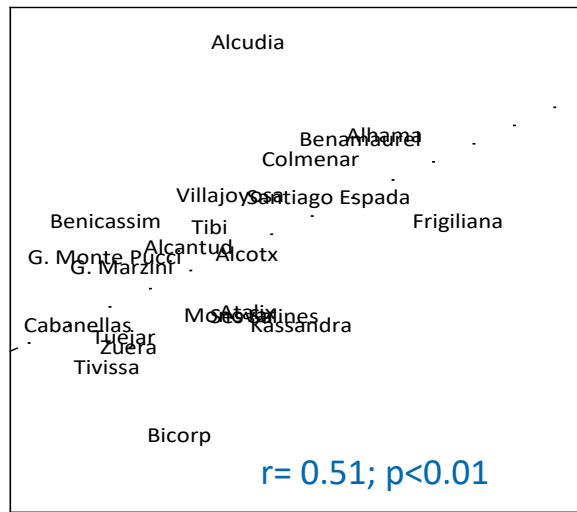


Variación genética en ^{13}C

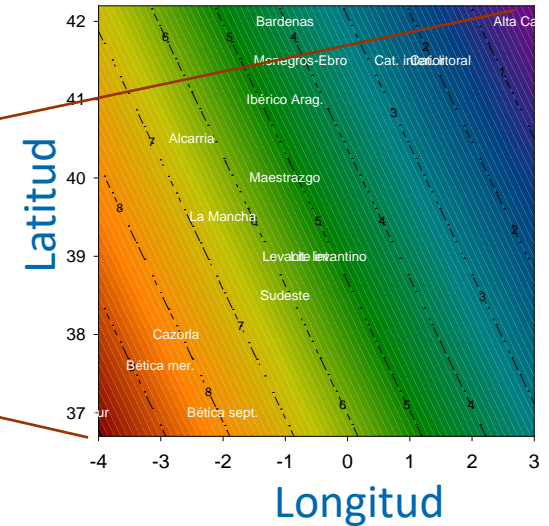


Respuesta adaptativa: asociación con el clima en origen

+
 $\delta^{13}C$ (EUA)



Paisaje genotípico (EUA_i , %)



-
Estacionalidad
precipitación
(aridez estival)

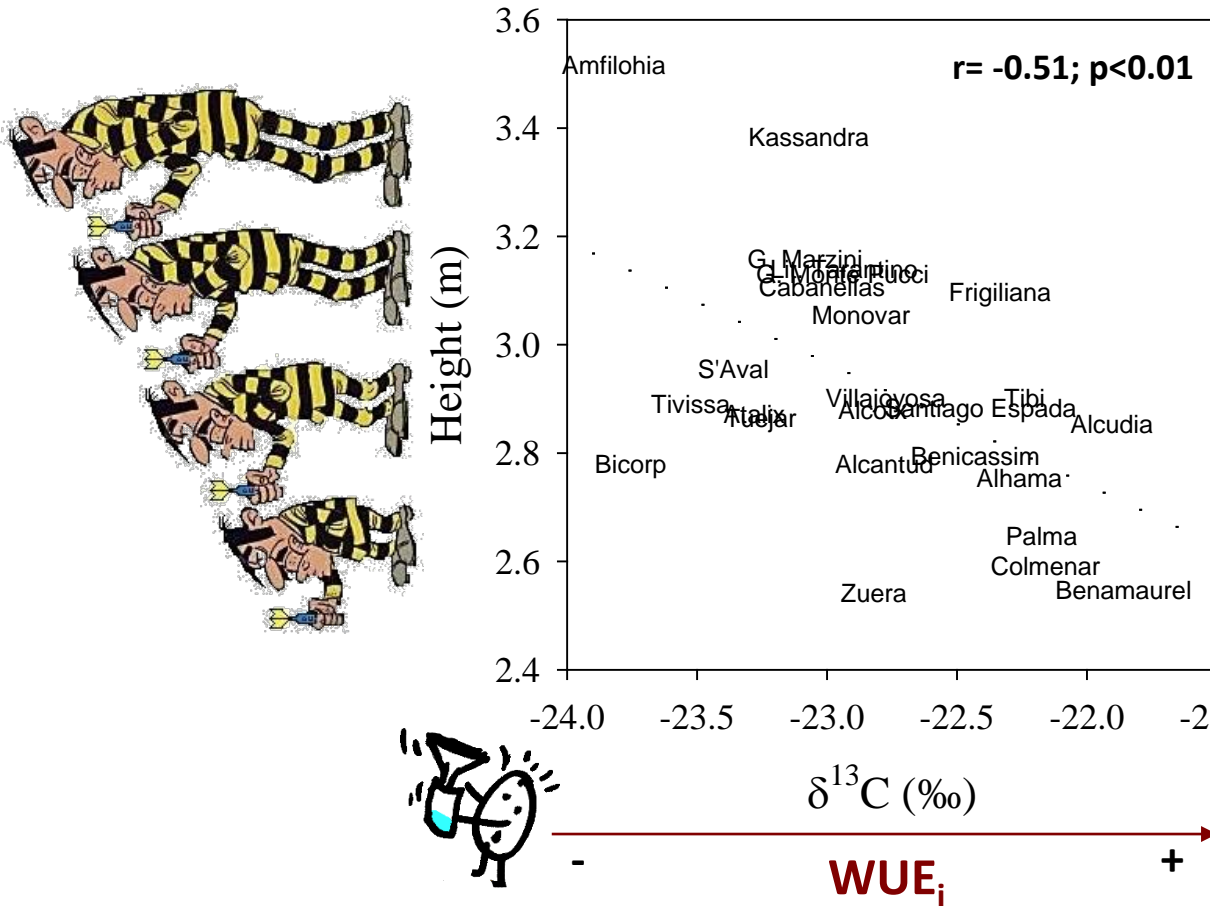


Variación genética en ^{13}C



pero... ¿a qué precio?

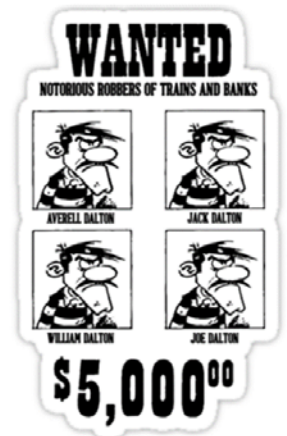
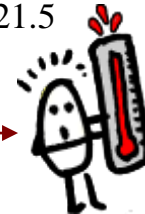
asociación negativa entre WUE y crecimiento



-

WUE_i

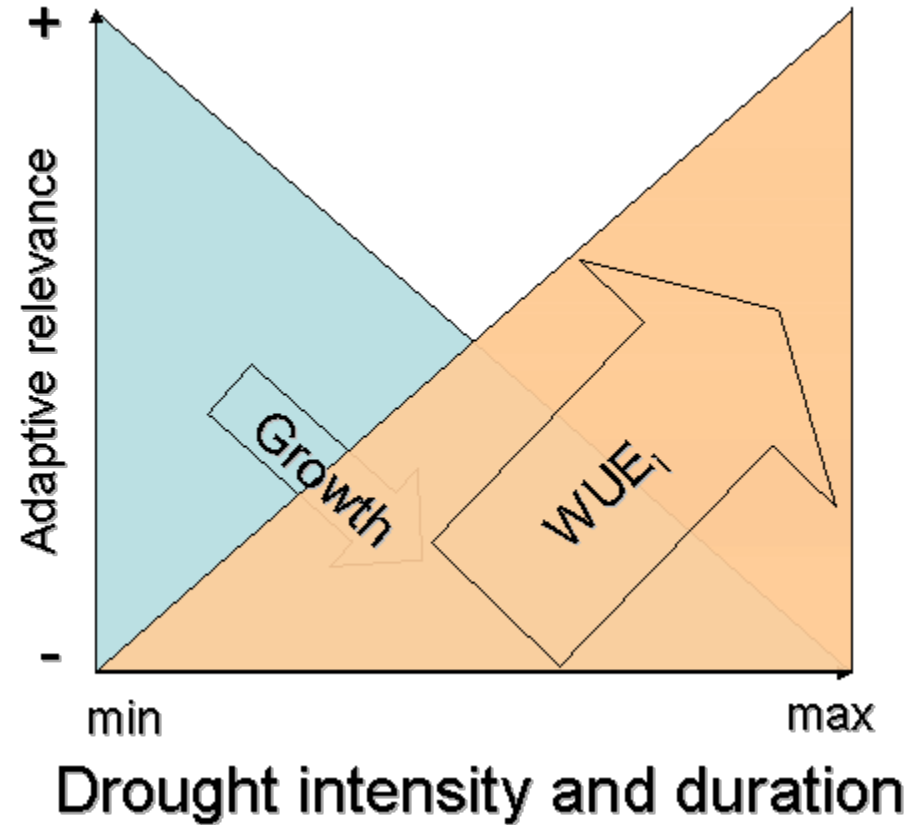
+



Asociación EUA vs crecimiento



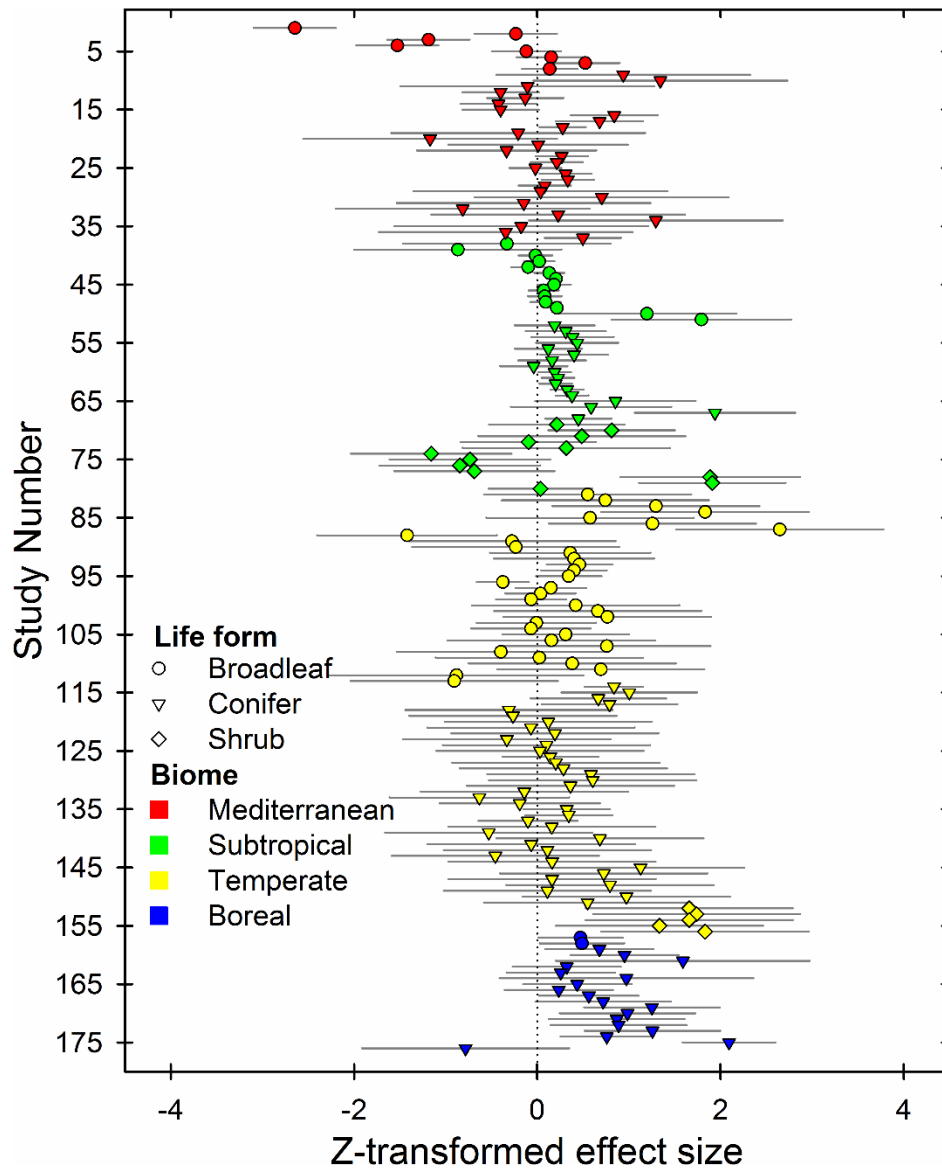
	Mésico	Xérico
EUA	-	++
Altura planta	++	-



ESCENARIO 1:

Ahorro de agua = mayor EUA, menor crecimiento

Pero... tendencia global positiva



**Relación positiva
entre
 $\delta^{13}\text{C}$ y crecimiento**

ESCENARIO 2:

**Fotosíntesis más eficiente
(elevada A)**



Alta $\text{EUA}_i (A/g_s)$



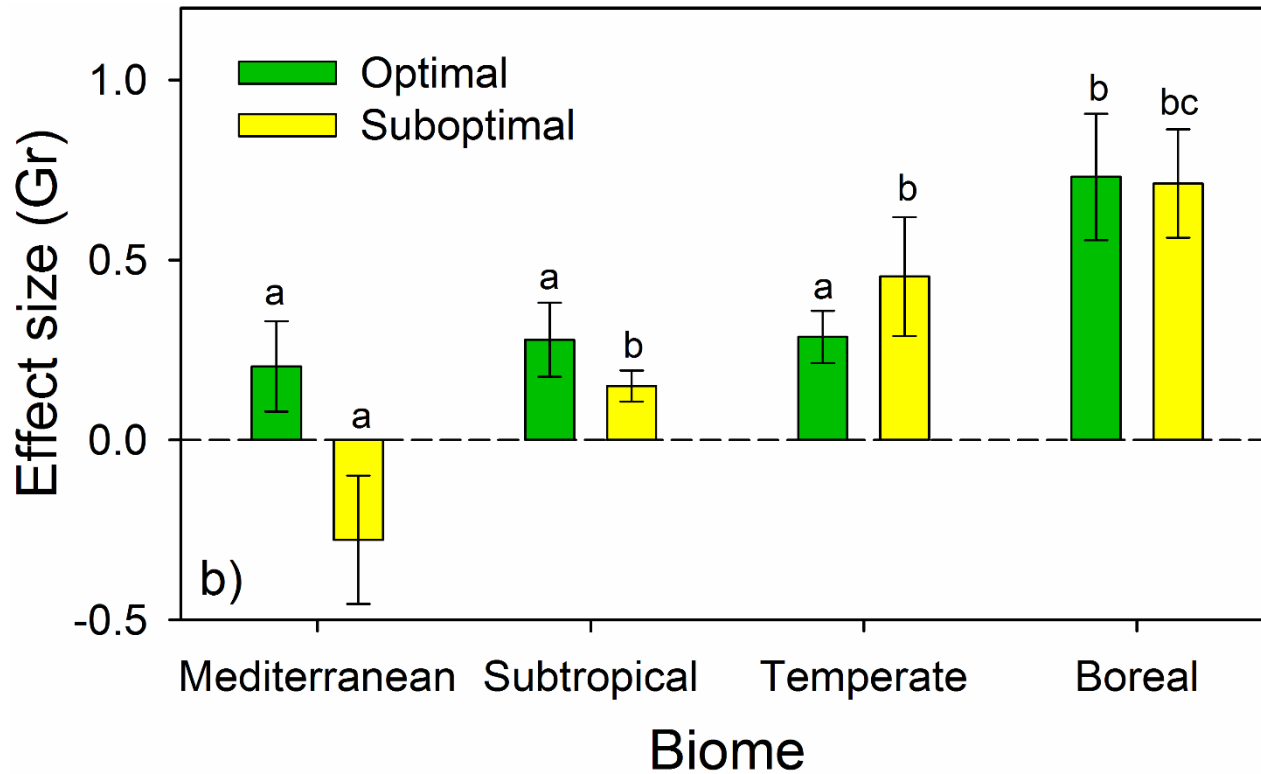
Alto crecimiento

Pero... tendencia global positiva



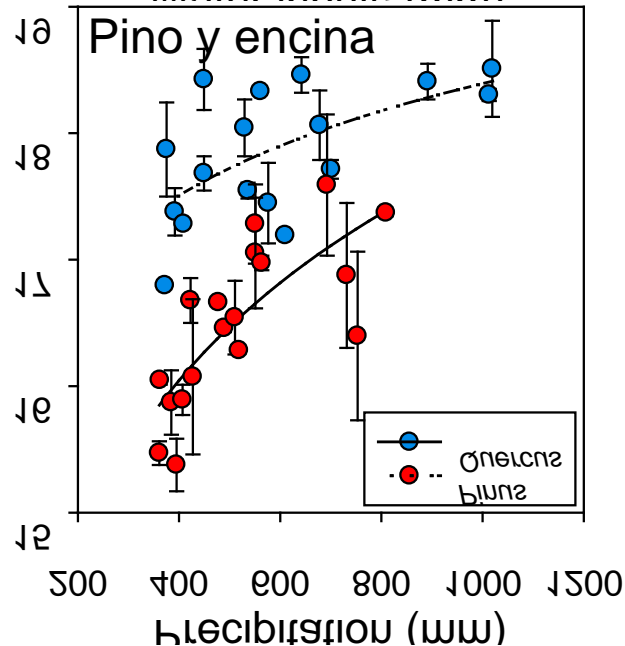
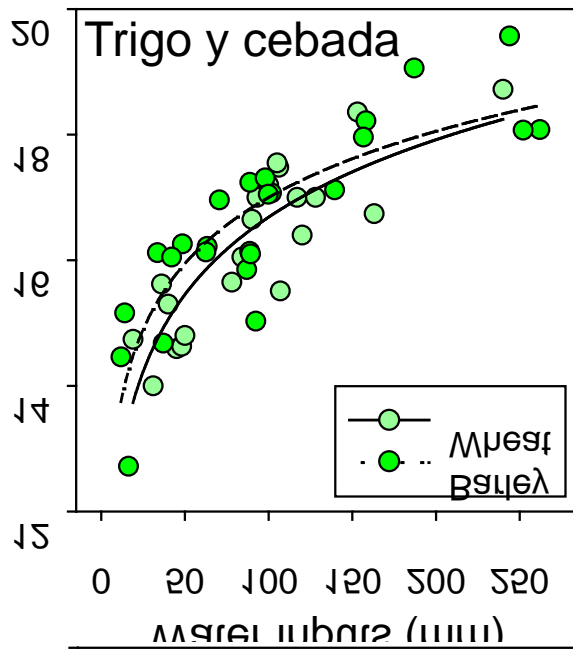
LIMITACIÓN AGUA

LIMITACIÓN ENERGÍA

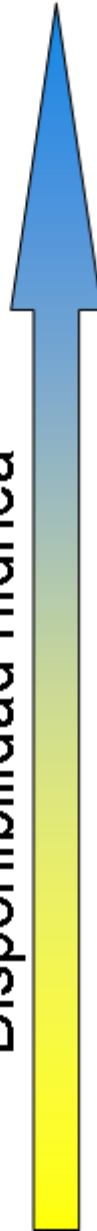


La asociación positiva aumenta del bioma Mediterráneo al Subtropical, Templado y Boreal

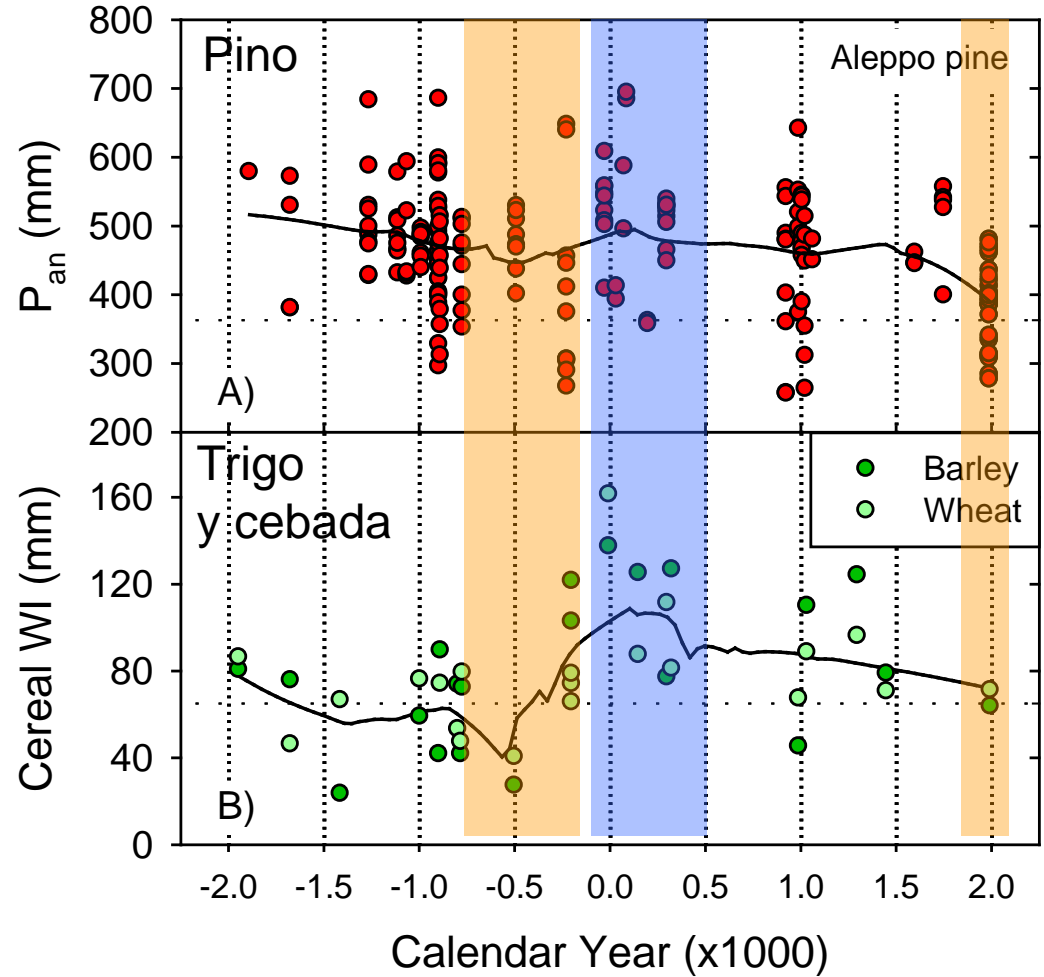
Clima y condiciones de cultivo



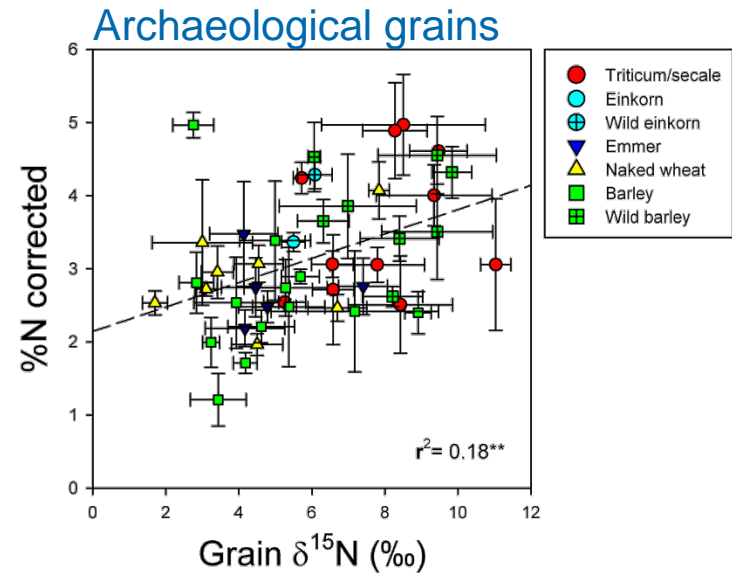
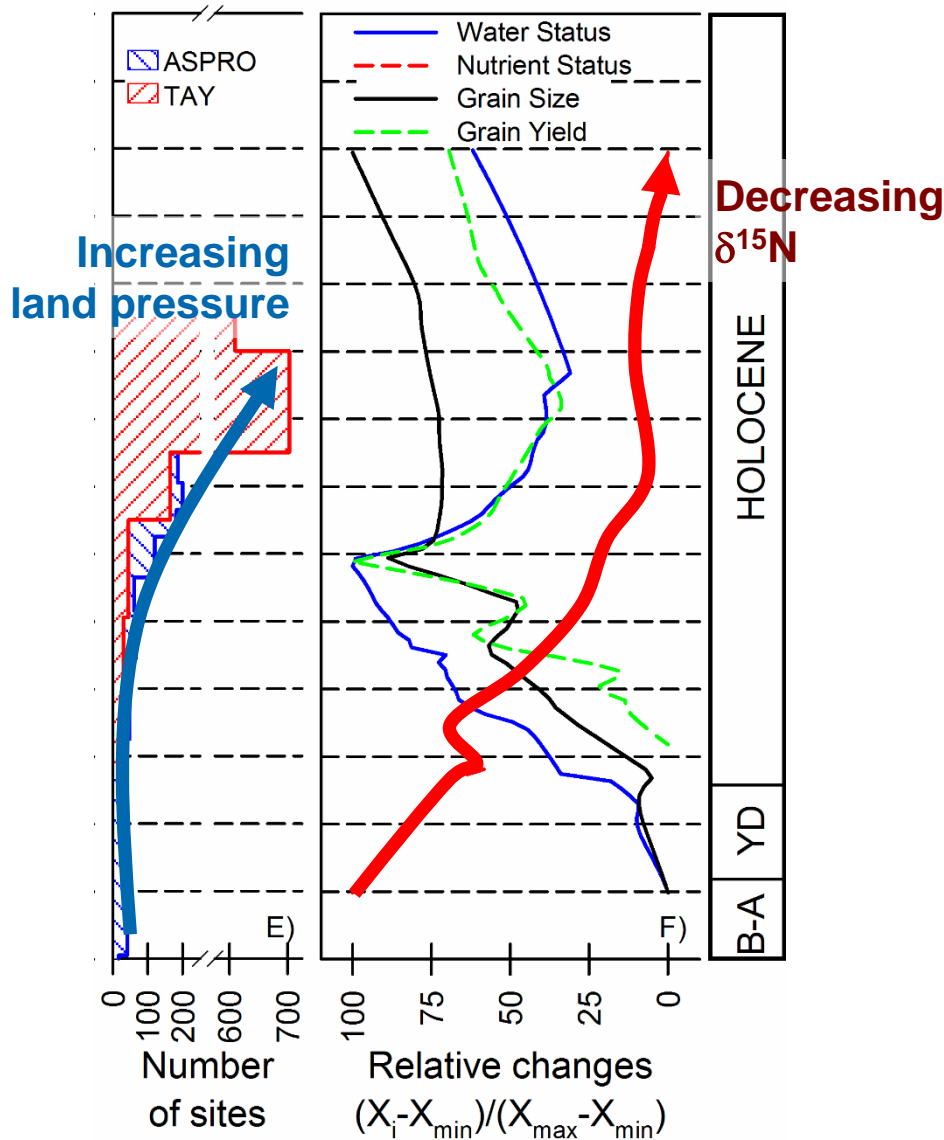
Disponibilidad hídrica



Clima últimos 4000 años



Past changes in nitrogen status?



-Highest $\delta^{15}\text{N}$ in oldest sites,
then relatively stable values
≈ Higher N status?

-Expansion of agriculture
increased land use pressure
≈ Cultivation in poorer soils

Ejemplo: plantas beben 'agua mineral'



The “Monegros desert”

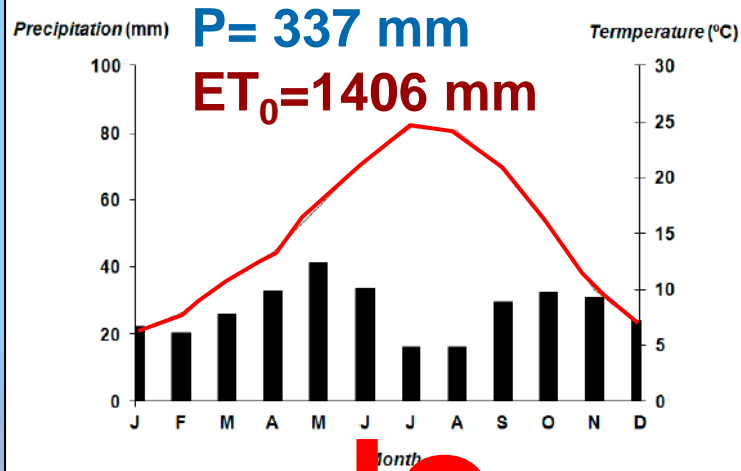
- Gypsum-rich soils (70-80%)
- High water deficit
(Annual ETo-P = 1069 mm)



Shallow-rooted plants flowering in summer



Saragosse, 320 m a.s.l.



Helianthemum squamatum

- Small perennial shrub (camephyte)
- Shallow root
- Flowers in summer
- Exclusive of gypsum soils (gypsophyte)

Gypsum as a source of water?



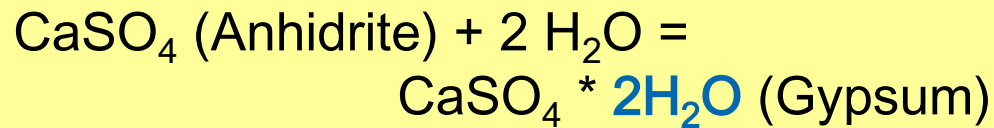
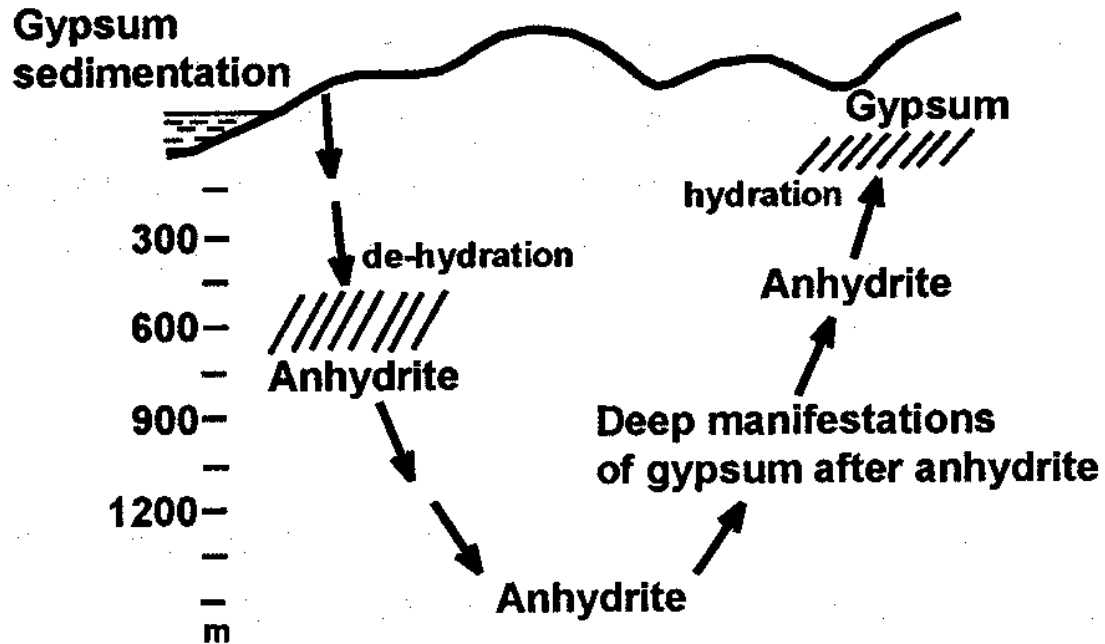
Gypsum-rich
soils (70-80%)

“mineral water”
(gypsum)

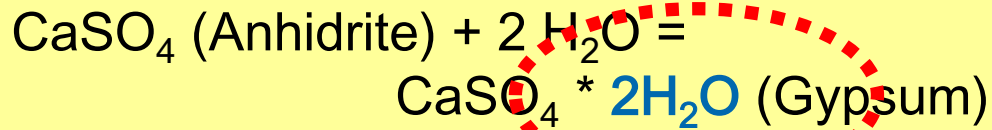
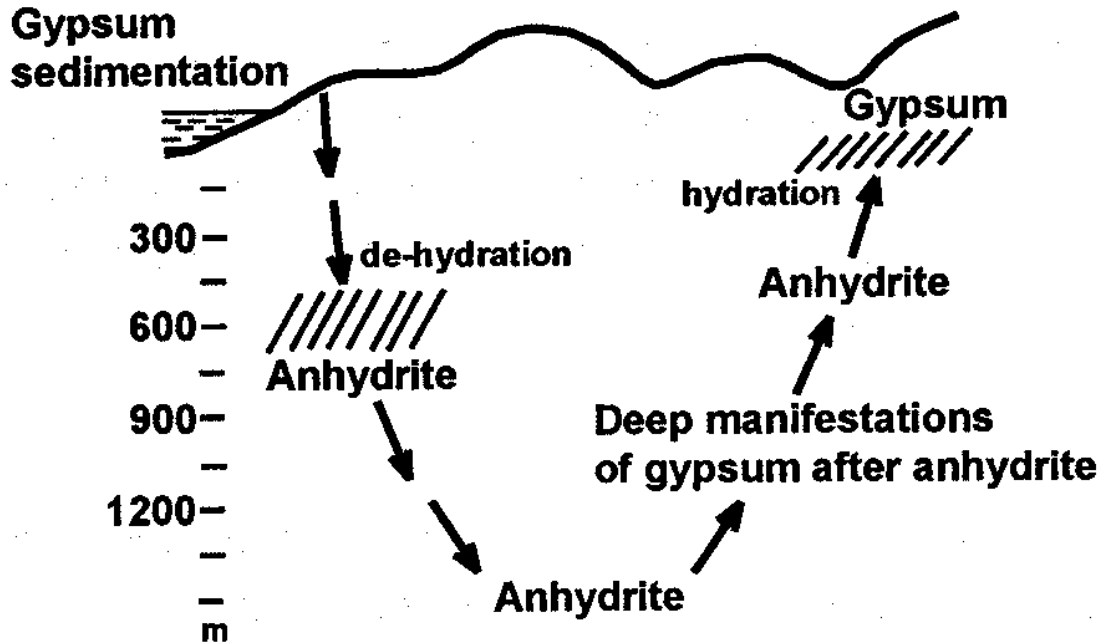


Meteorization of petrogypsic soil
by fine roots of *H. squamatum*

Why gypsum?



Why gypsum?



Water is part of the crystalline structure (>20% of weight)

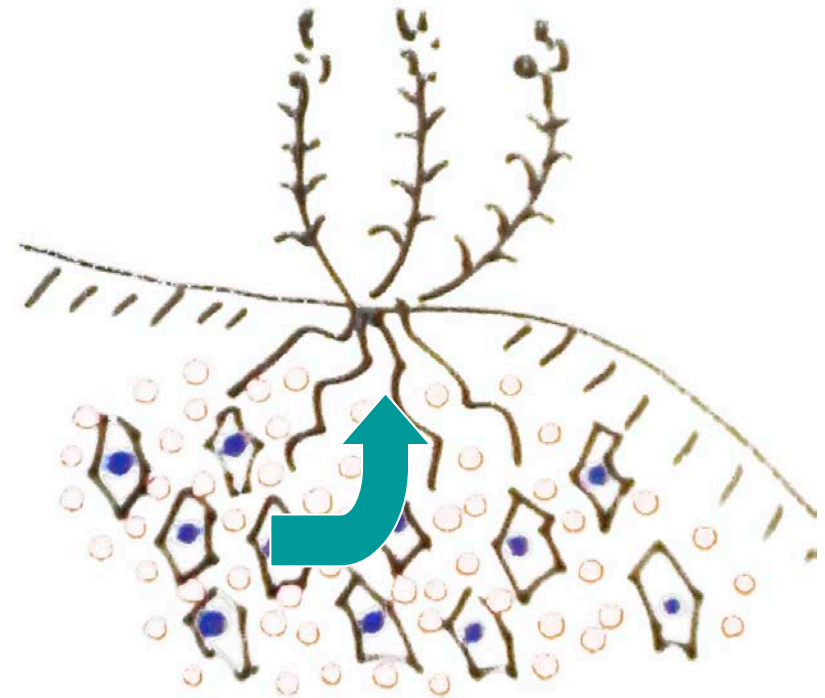
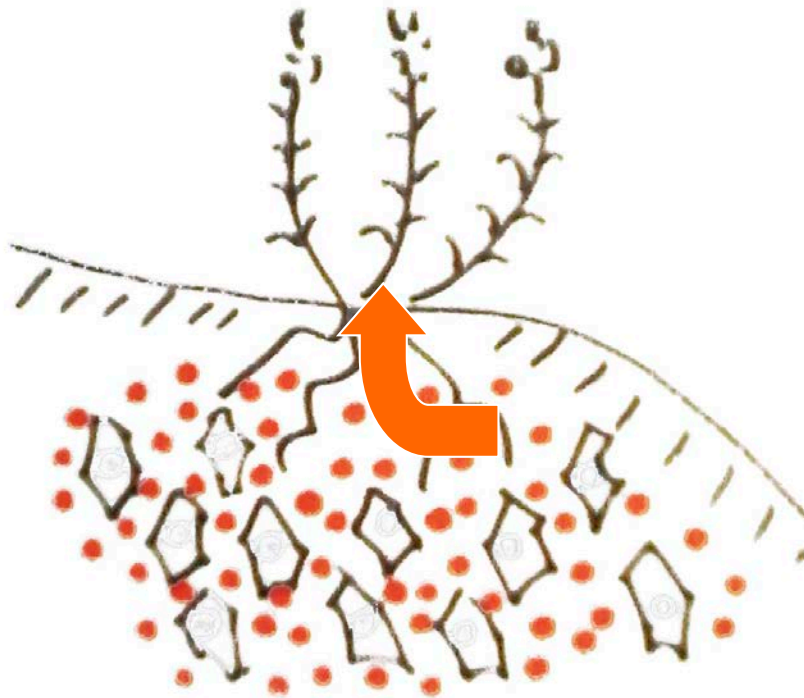


Gypsum as a water reservoir



Two potential sources of water

- free water in the soil
- crystallization water in gypsum mineral



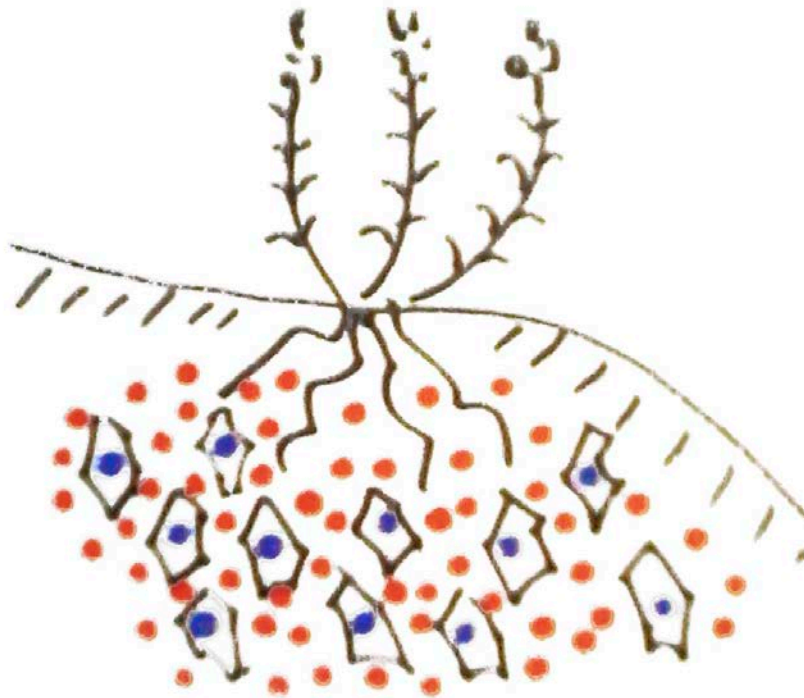
We are lucky!!

strong fractionation during crystal formation
→ isotopic composition is very different

Gypsum as a water reservoir



Sequential distillation to separate the two water pools from soil samples



Sequential (2 steps)
cryogenic distillation

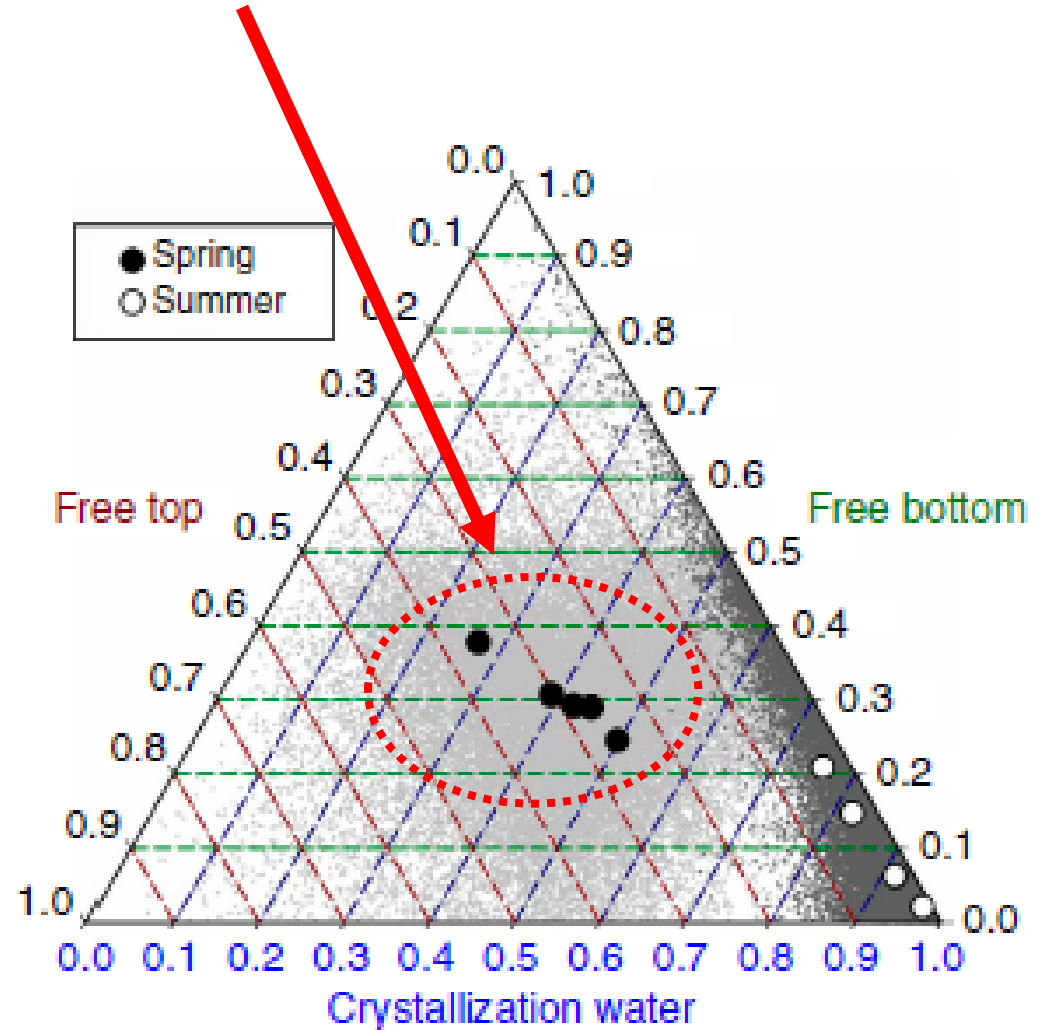
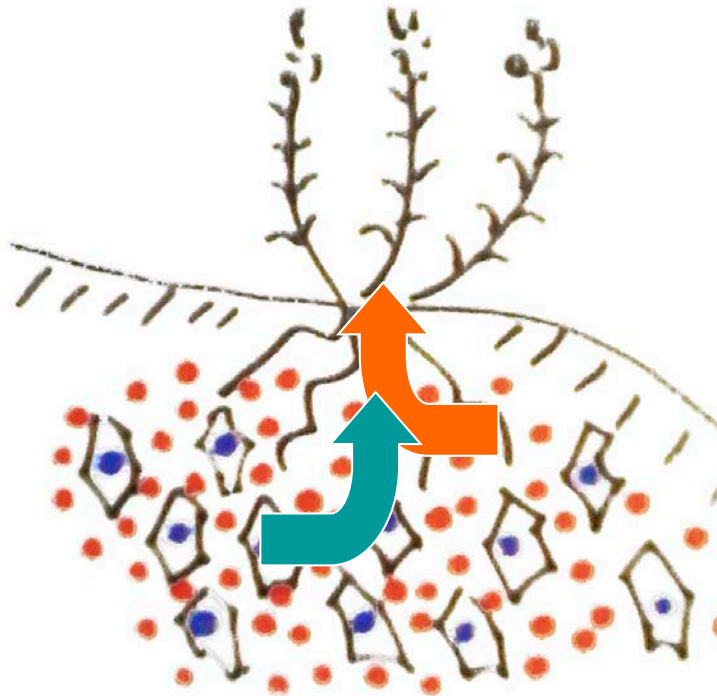
35°C → free water

125°C → crystal water

1st scenario, wet spring



Free water still available in the soil
Mixed contribution of free & crystal water

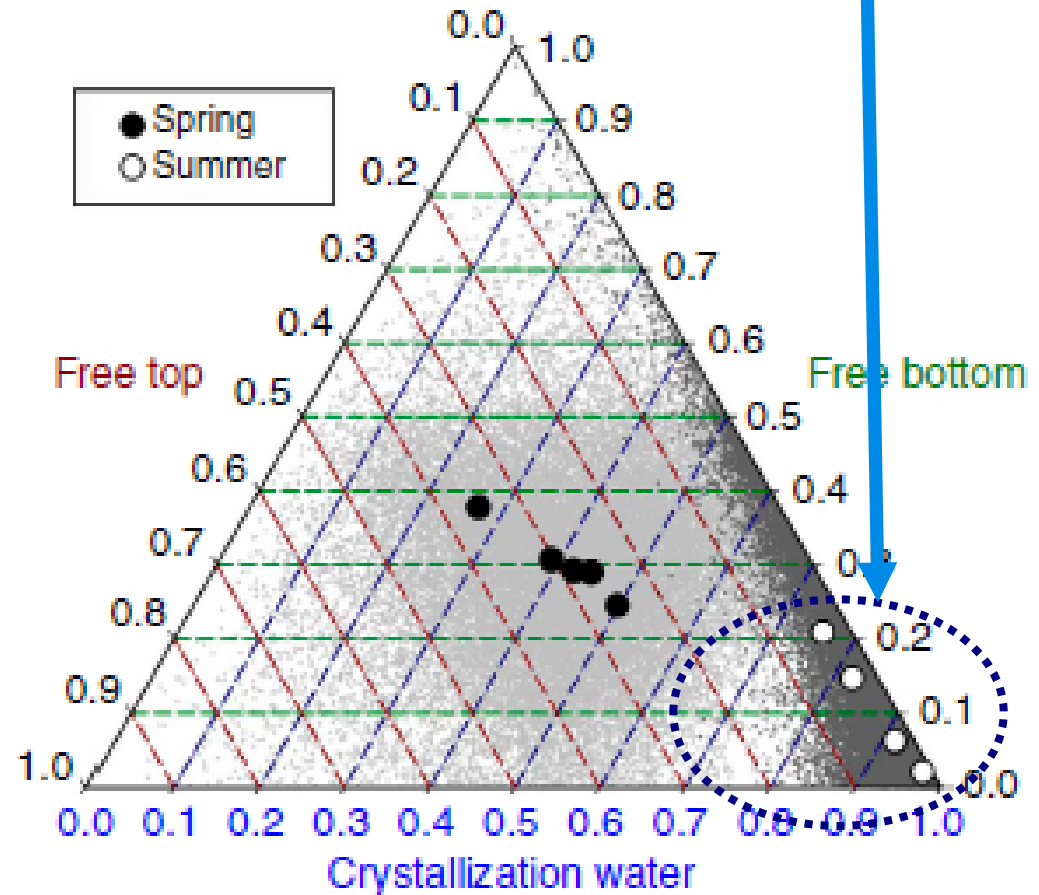
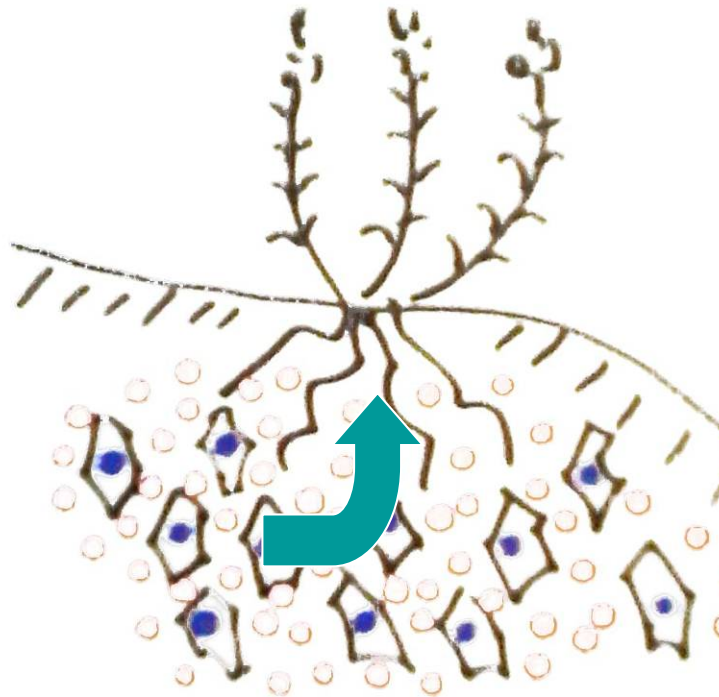


2nd scenario, dry summer



No free water available

Strong (70-90%) contribution of gypsum water





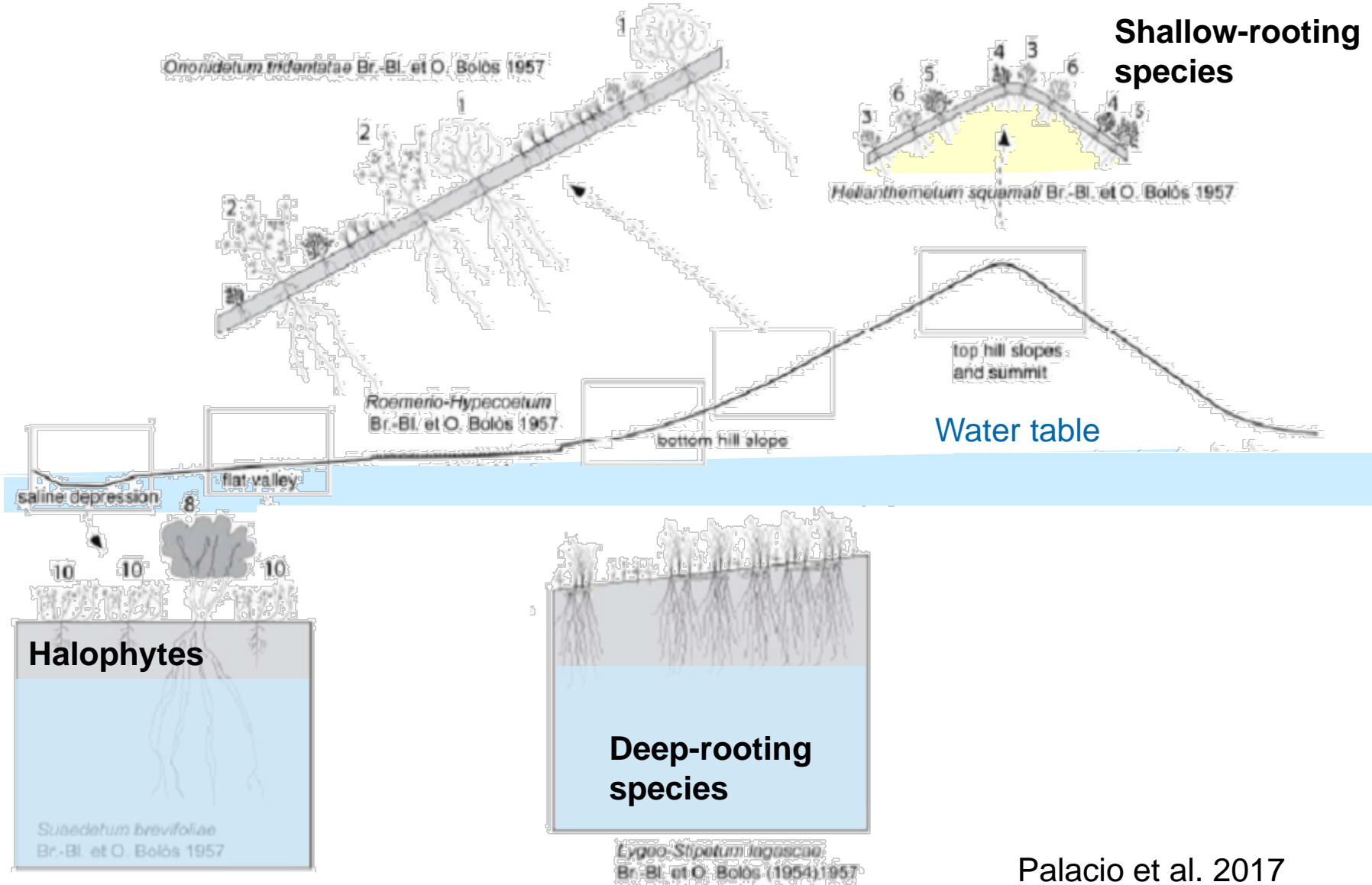
Salinity

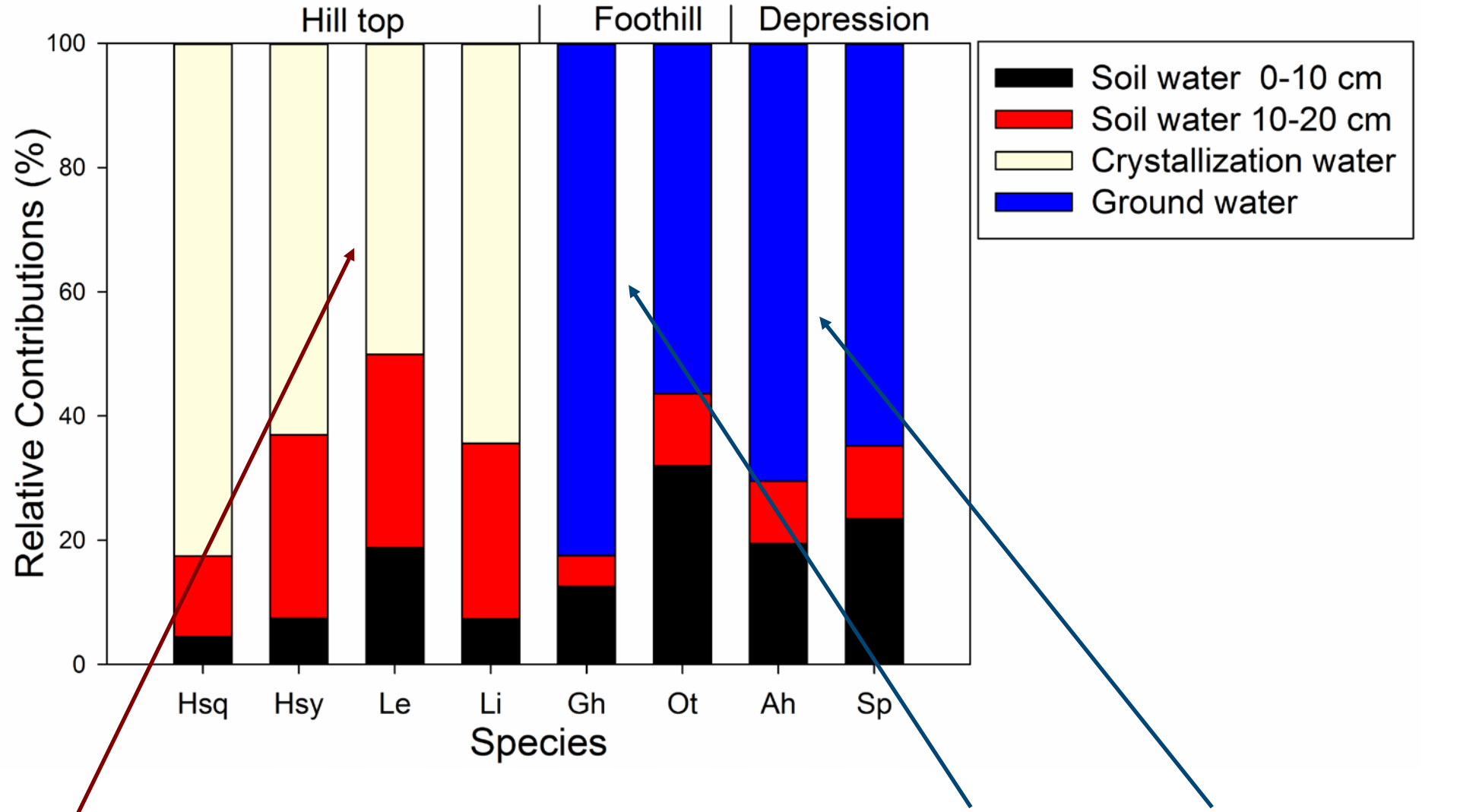
Depression

Plane

Foothill

Top hill





**ALL shallow-rooting species on hill top
Rely on gypsum water during summer
NOT ONLY GYPSOPHYTES!**

**Deep-rooting species on the hill
rely on groundwater during summer
(similar to plants from the depression)**

Species-specific or community-level?



Use of gypsum water by non-specialized species
¿General ability or nursing effect?

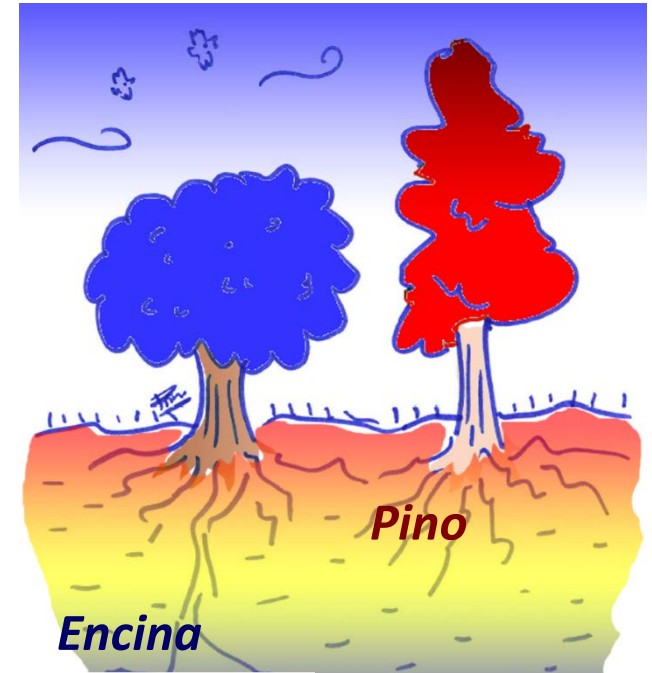
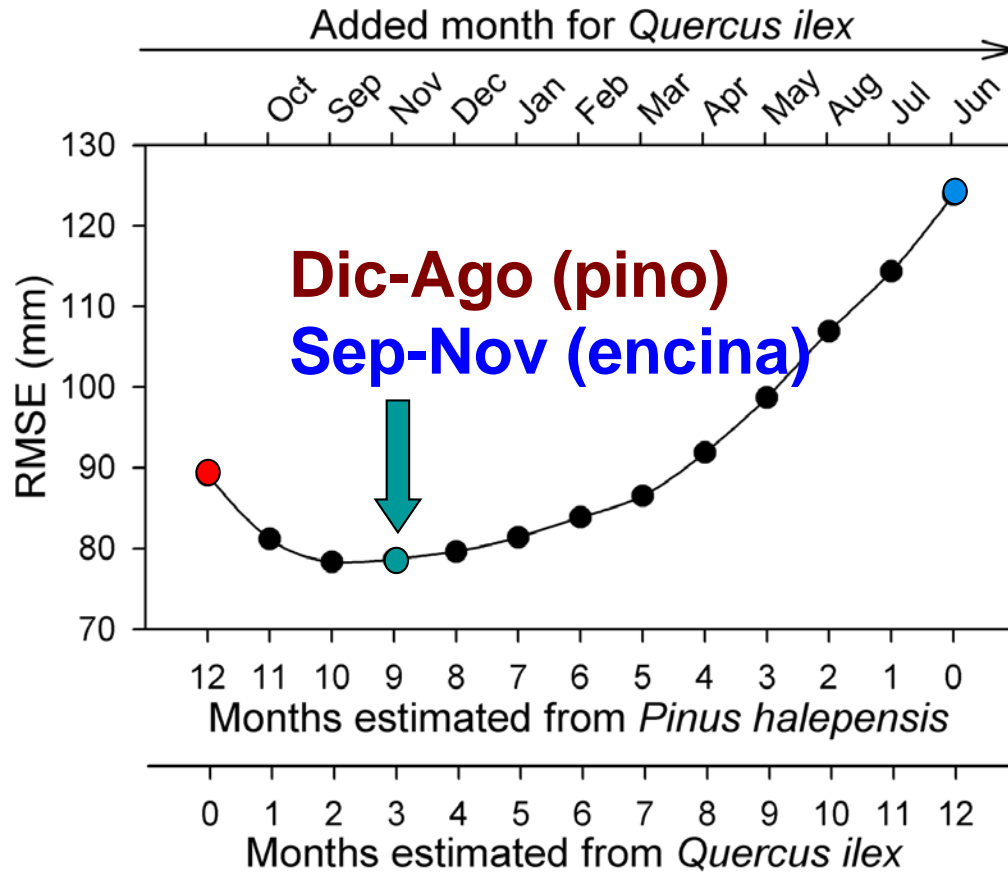


Gypsophyte:
Specialized, only grows
on gypsum soils

Gypsovag:
Tolerant to gypsum,
but not exclusive
(grows elsewhere)

Modelizando precipitación por isoscapes

Función de transferencia ($\Delta^{13}\text{C}$ vs. Precip.)



$$P_{s-n} = f(\Delta_{oak})$$

$$P_{d-a} = f(\Delta_{pine})$$

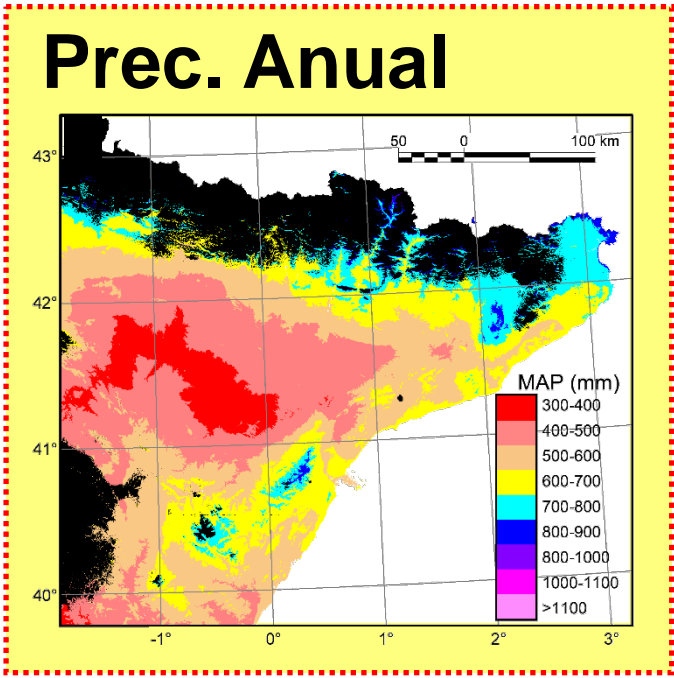
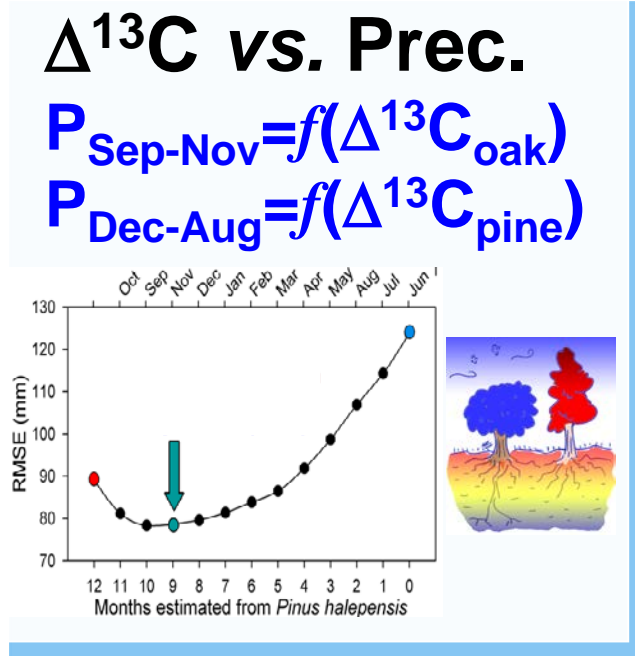
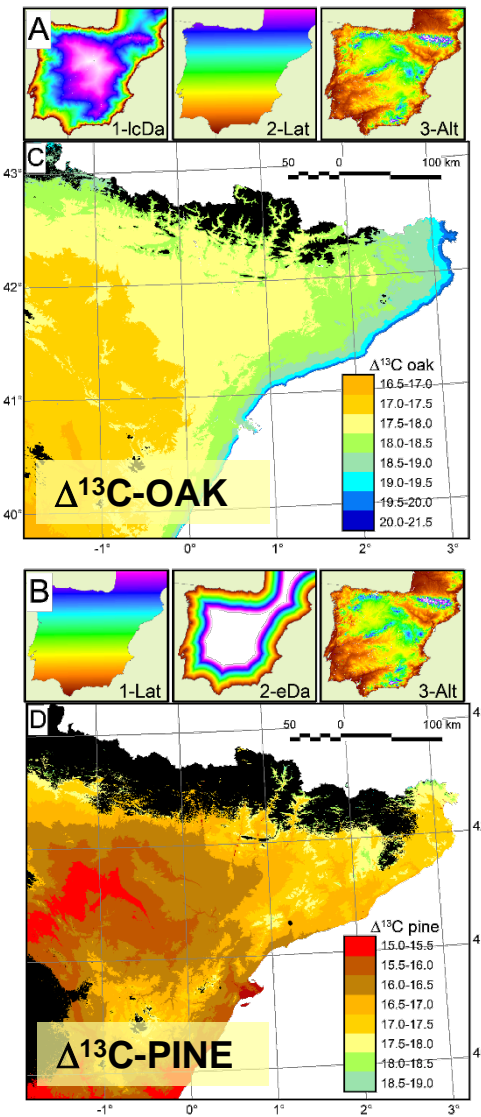
$$R^2 = 0.41$$

$$R^2 = 0.63$$

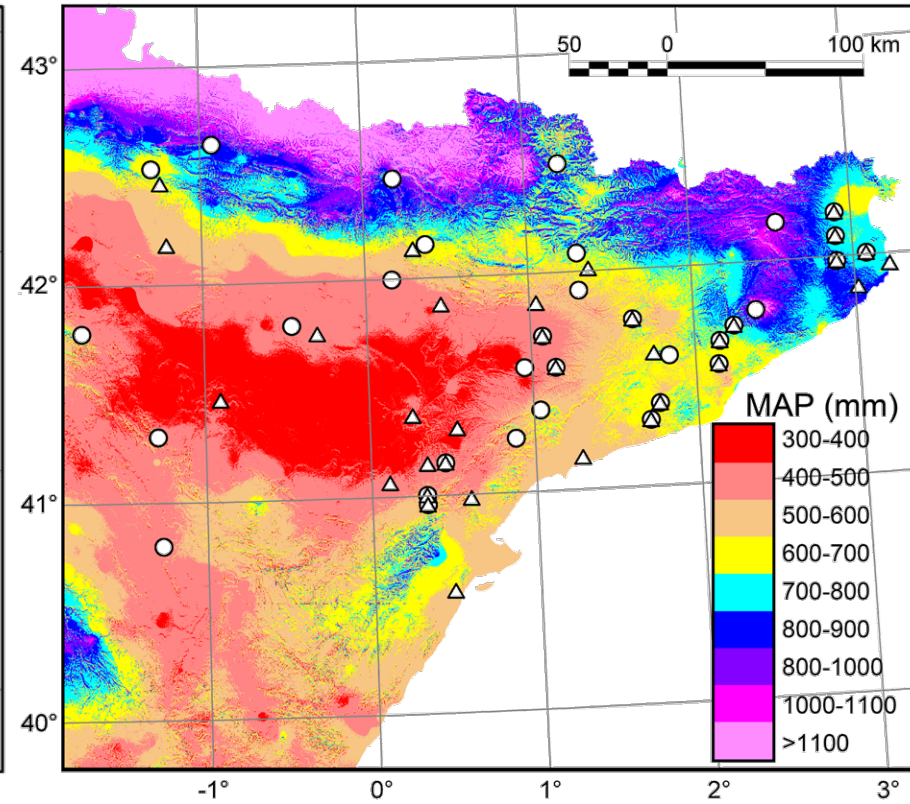
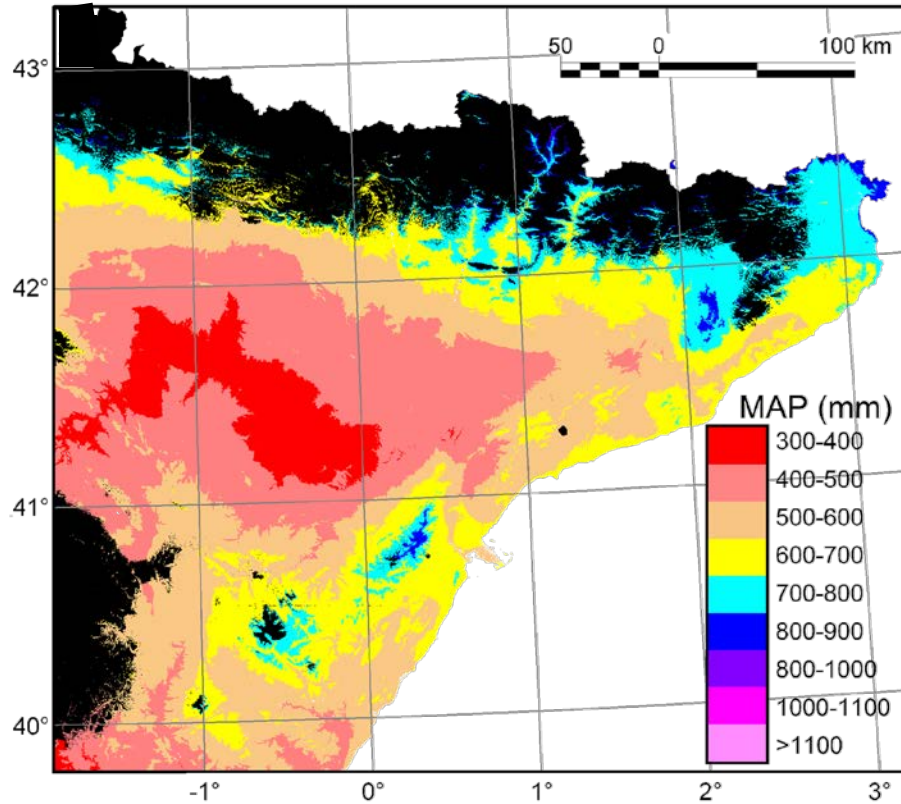
$$MAP = P_{s-n} + P_{d-a}$$

Modelizando precipitación por isoscapes

Isoscapes



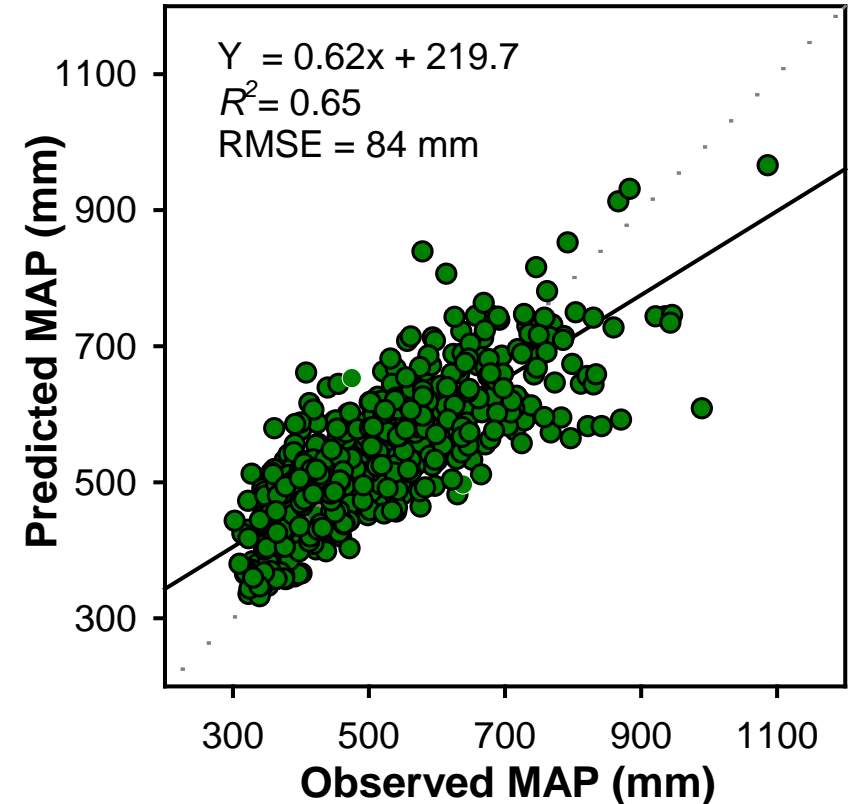
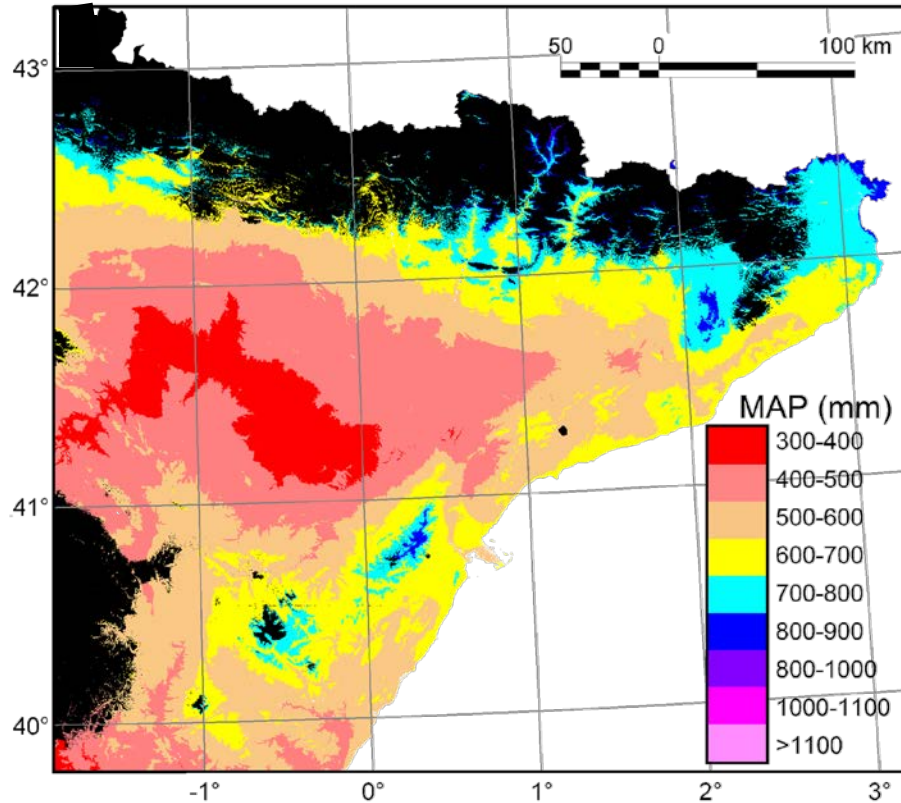
Predicción espacial de la precipitación



Patrones comparables a los del Atlas Climático
(basado en datos meteorológicos)



Predicción espacial de la precipitación



Buena capacidad predictiva (valid. 573 estaciones climáticas)

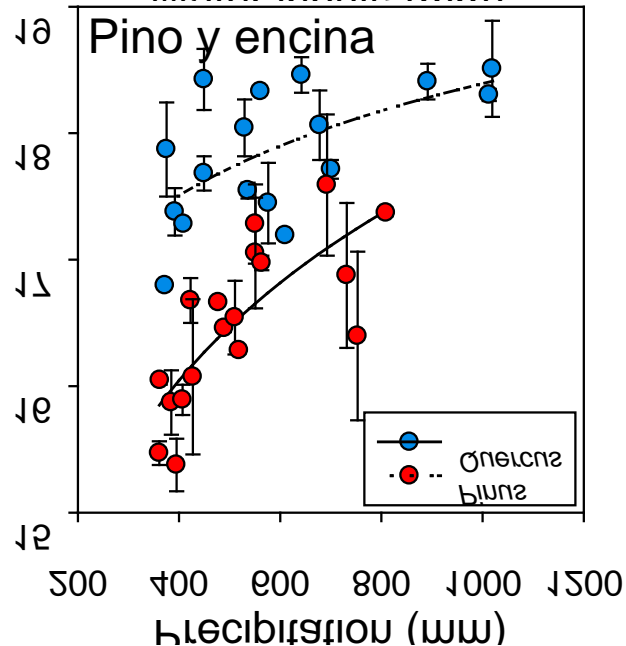
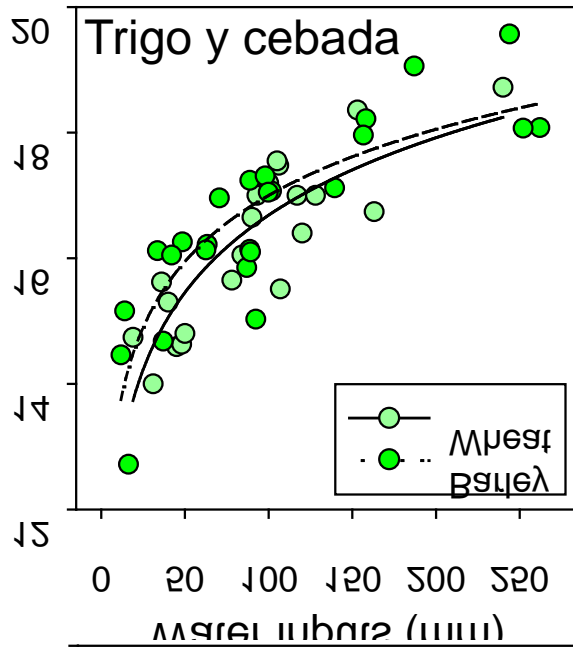
→ RMSE en el rango de los modelos basados en datos climáticos directos (ca. 50-150 mm)

Resultados: isoscapes vs. redes climáticas

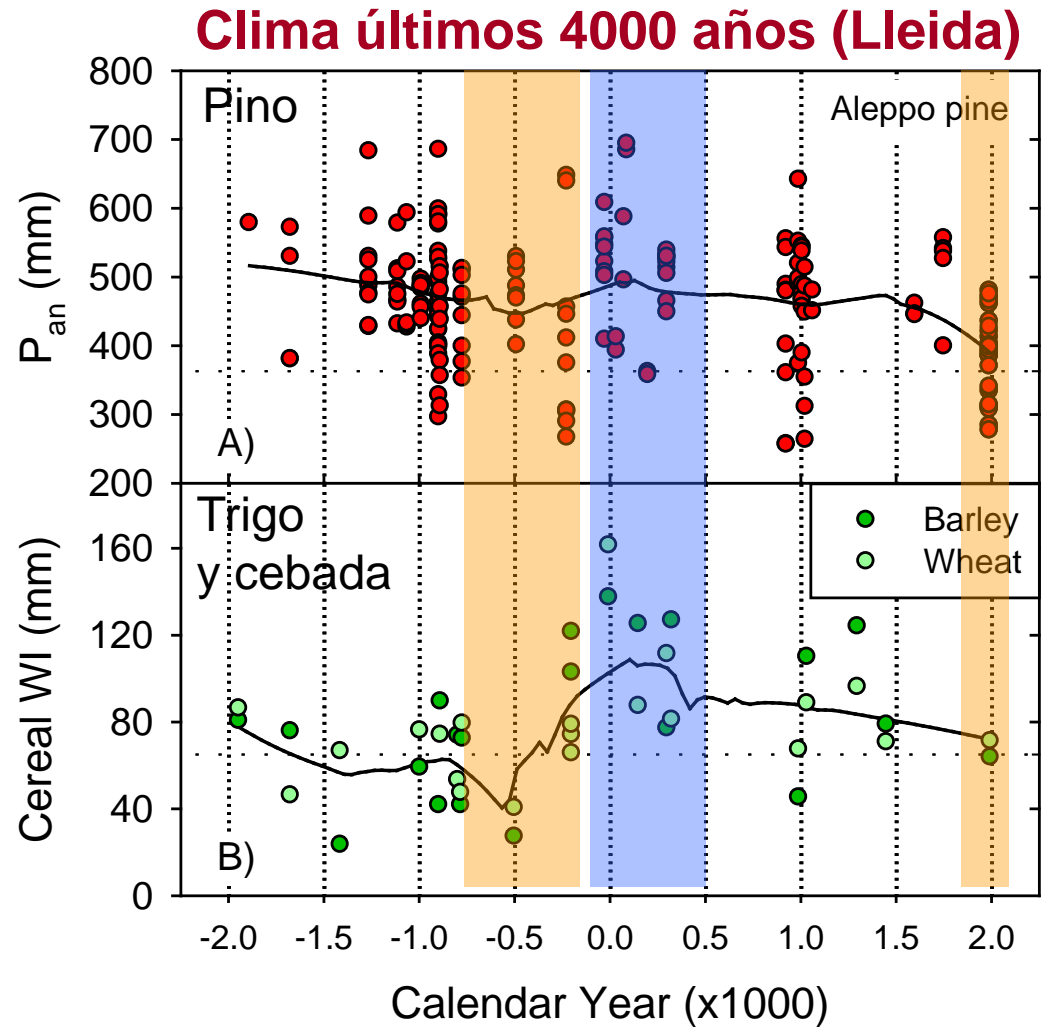
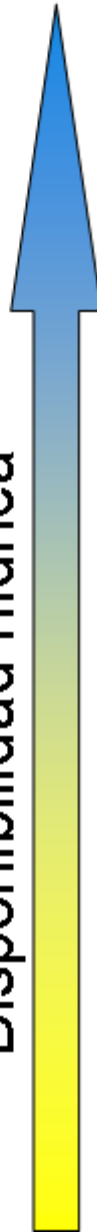
Calibration network	N_{cal}	N_{val}	MLR		MLR + RI	
			RMSE	CV	RMSE	CV
Tree-ring Sampling sites	44 38	573	101	19.7	84	16.4
Weather stations (Low-density)	65	508	111	22.1	80	15.9
Weather stations (High-density)	340	233	100	19.9	57	11.3

Capacidad de predicción **sólo** es superada por **red meteorológica con mayor densidad de puntos**

^{13}C refleja respuesta al clima

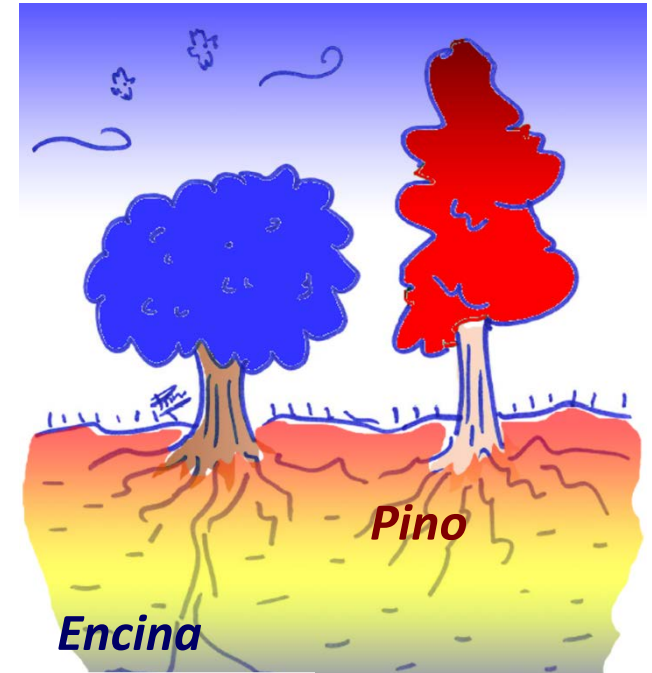
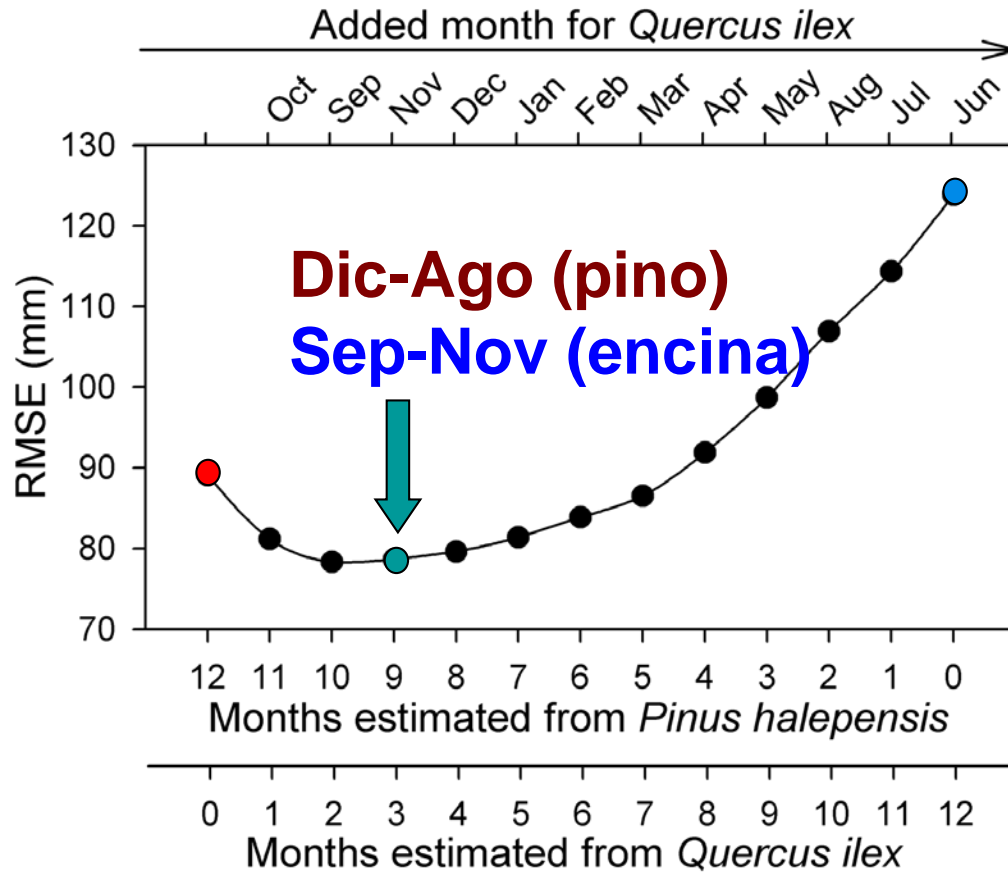


Disponibilidad hídrica



Modelizando precipitación por isoscapes

Función de transferencia ($\Delta^{13}\text{C}$ vs. Precip.)



$$P_{s-n} = f(\Delta_{oak})$$

$$P_{d-a} = f(\Delta_{pine})$$

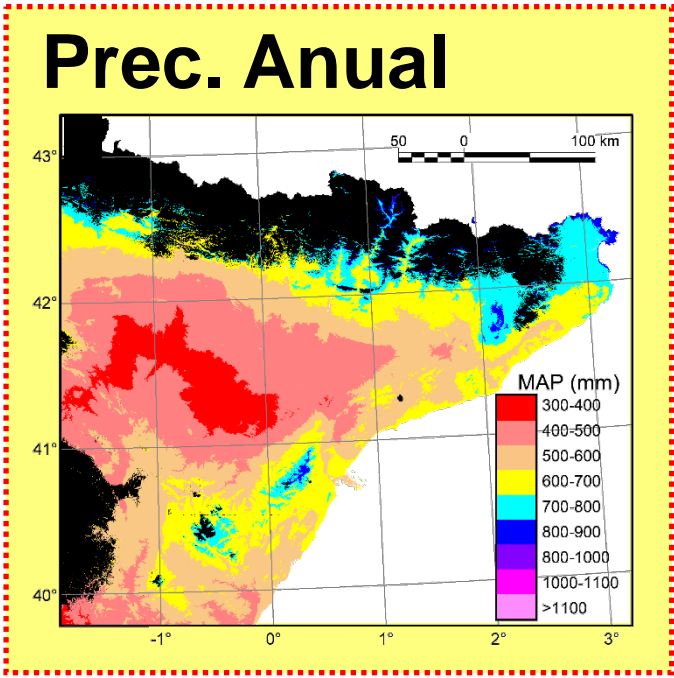
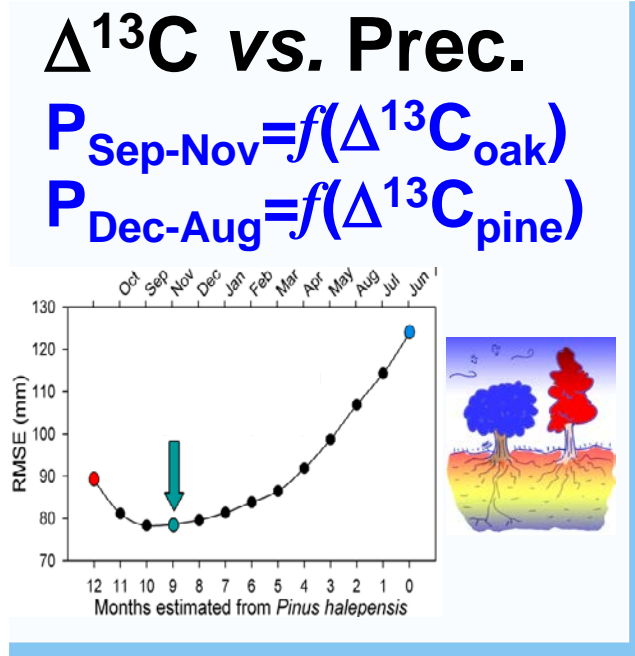
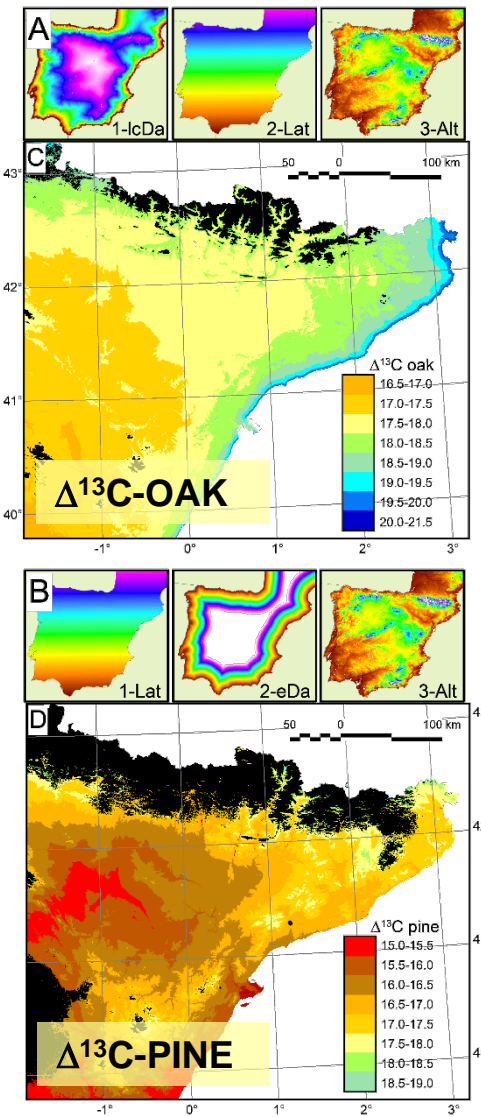
$$R^2 = 0.41$$

$$R^2 = 0.63$$

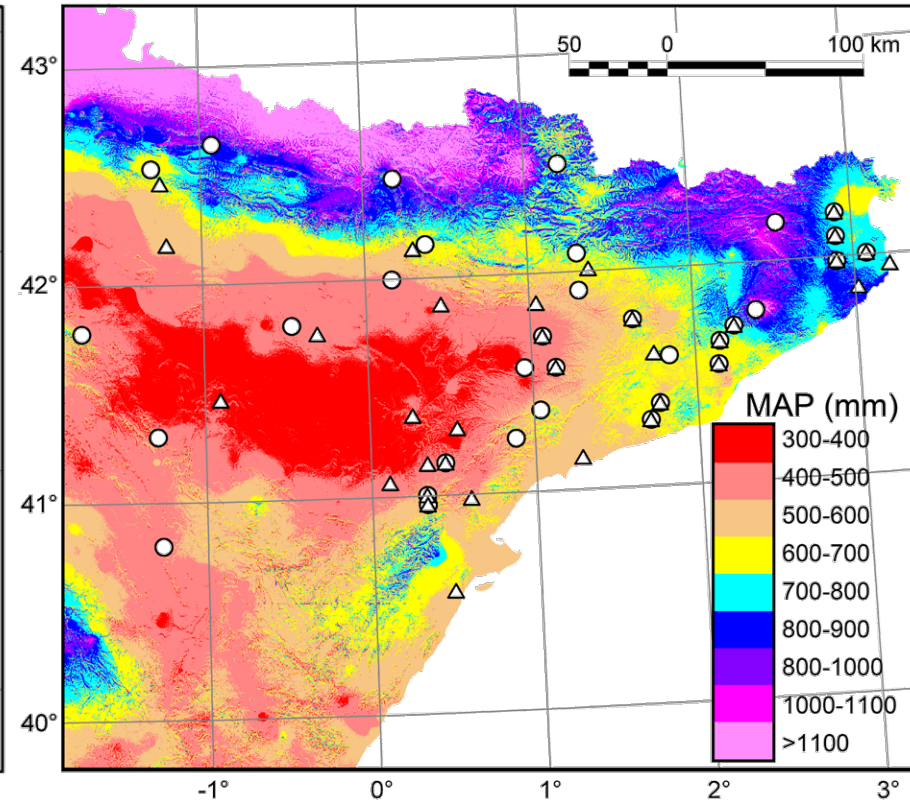
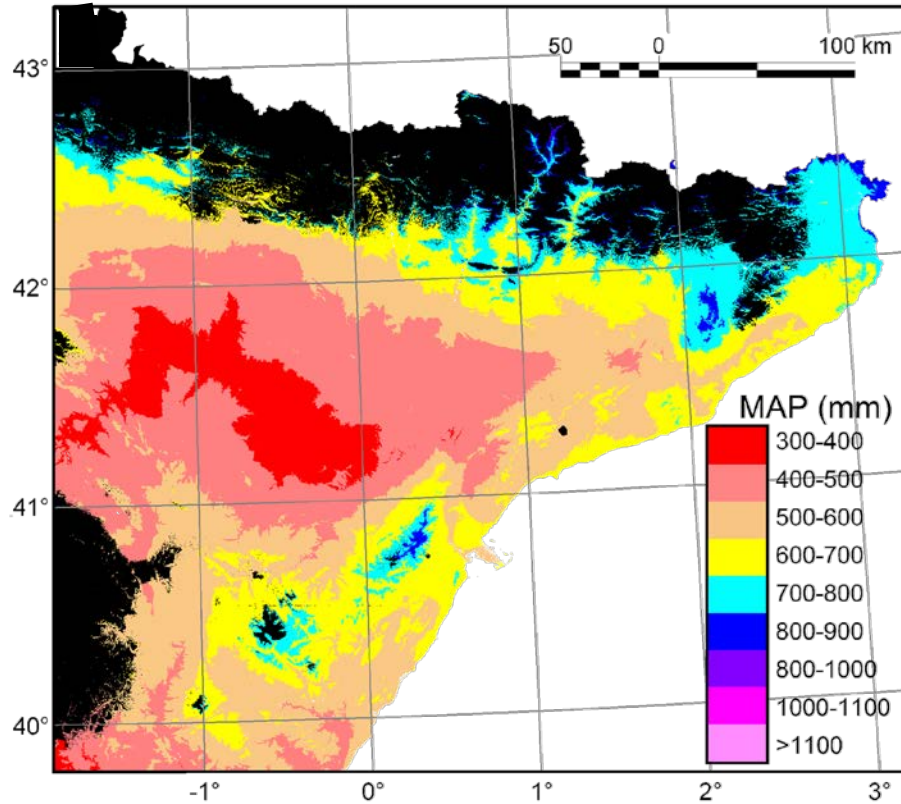
$$MAP = P_{s-n} + P_{d-a}$$

Modelizando precipitación por isoscapes

Isoscapes



Predicción espacial de la precipitación



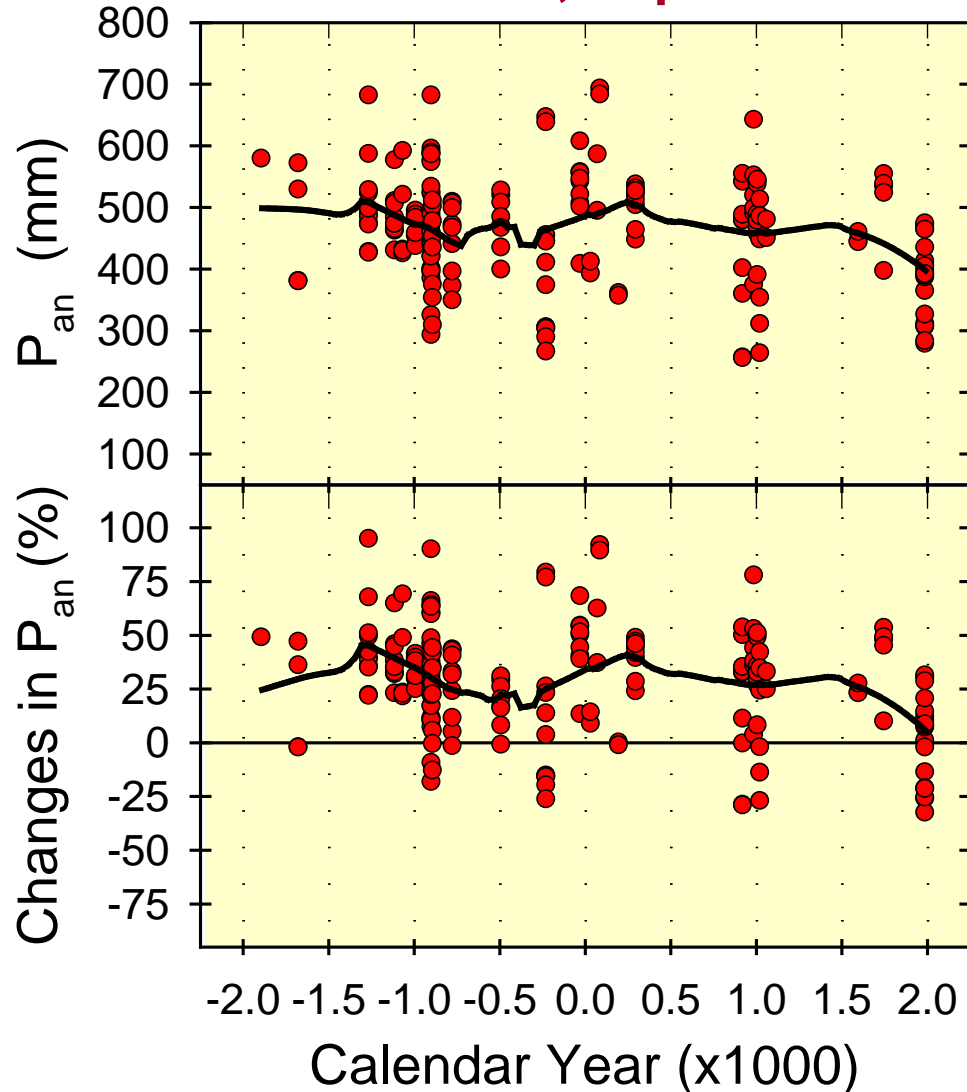
Patrones comparables a los del Atlas Climático
(basado en datos meteorológicos)



Restos arqueobotánicos: clima



Pino carrasco, Depresión Central Ebro (NE Spain)

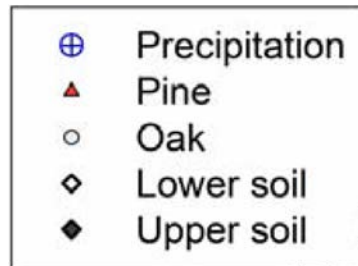
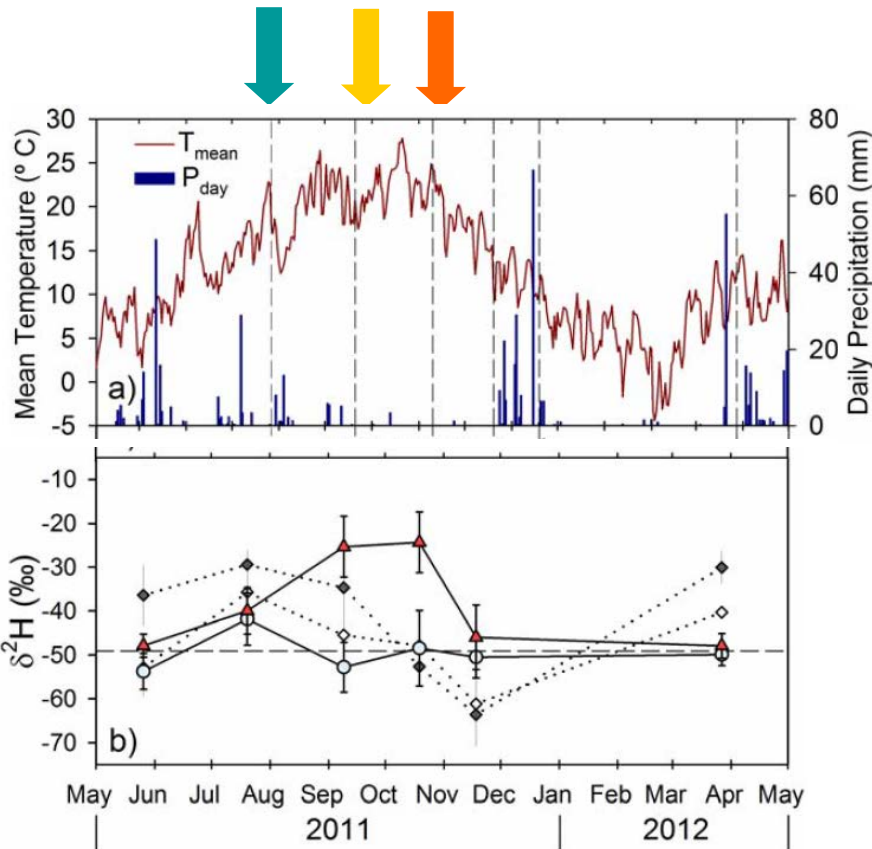


Estima de precipitación annual de los últimos **4,000 years**:

- **Pasado**= 450-520 mm
- **Presente**= 350-400 mm

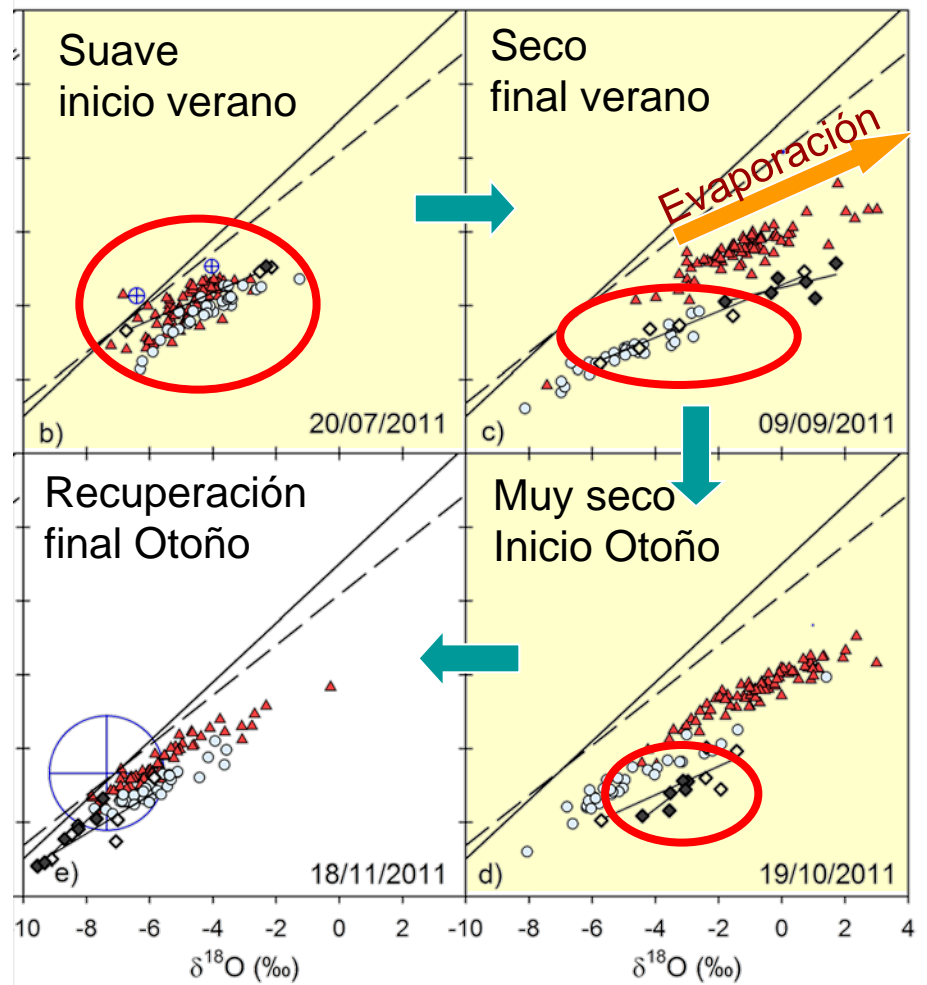
En promedio, 20-40% más precipitación en el pasado

Cambios en agua de suelo



Cambios bruscos en la composición del agua del suelo

-SIN NUEVO APOORTE DE AGUA
-NO EXPLICABLE POR ENRIQUECIMIENTO



Restos arqueobotánicos



Sistema de flotación (Grup d'Investigació Prehistòrica, Univ. Lleida)

Restos arqueobotánicos

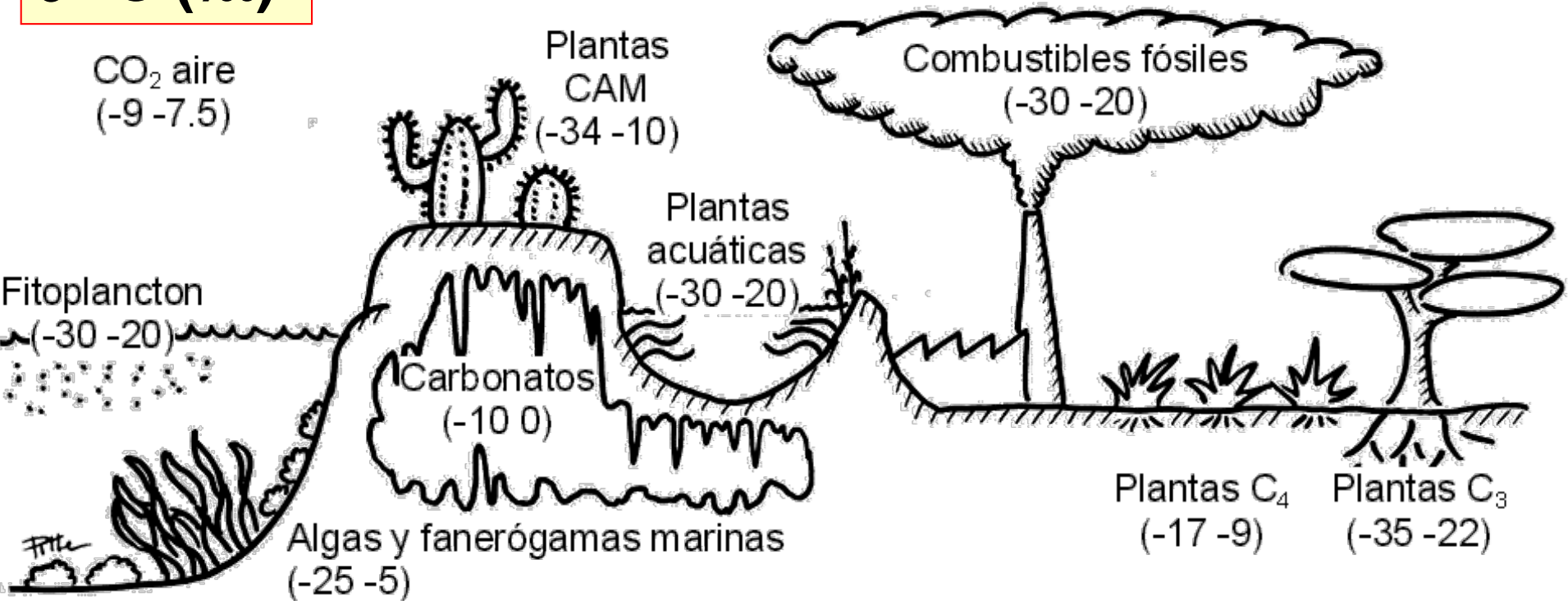


Semillas carbonizadas de cebada en *Ciutat de Lleida* (N. Alonso)
carbones de Pino carrasco de *Tossal de les Tenalles* (J.P. Ferrio)

Isótopos de carbono



$\delta^{13}\text{C}$ (‰)



Isótopos de carbono



$\delta^{13}\text{C}$ (‰)

CO_2 aire
(-9 -7.5)

Plantas
CAM
(-34 -10)

Combustibles fósiles
(-30 -20)

Plantas
acuáticas
(-30 -20)

Fitoplancton
(-30 -20)

Carbonatos
(-10 0)

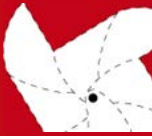
Algas y fanerógamas marinas
(-25 -5)

Plantas C_4
(-17 -9)

Plantas C_3
(-35 -22)

- $\delta^{13}\text{C}$ (‰) en plantas es menor que en CO_2
→ **Discriminación isotópica ($\Delta^{13}\text{C}$)**

Isótopos de carbono



$\delta^{13}\text{C}$ (‰)

CO_2 aire
(-9 -7.5)

Plantas
CAM
(-34 -10)

Combustibles fósiles
(-30 -20)

Plantas
acuáticas
(-30 -20)

Fitoplancton
(-30 -20)

Carbonatos
(-10 0)

Algas y fanerógamas marinas
(-25 -5)

Plantas C_4
(-17 -9)

Plantas C_3
(-35 -22)

- $\delta^{13}\text{C}$ (‰) en plantas es menor que en CO_2
→ **Discriminación isotópica ($\Delta^{13}\text{C}$)**
- **Discriminación variable**
→ **via fotosintética ($\text{C}_3, \text{C}_4, \text{CAM}$) y fisiología**