

# Tema 5. Nutrición mineral de las plantas

Elementos minerales. Concepto de mineral esencial. Clasificación

Metodología

Relaciones cuantitativas entre nutrición-productividad

Diagnóstico de nutrición

Factores que afectan a la absorción de nutrientes: suelo, raíz, interacción planta-microorganismos

Estrategias de las plantas para la movilización de nutrientes

Adaptaciones nutricionales

Nutrición foliar

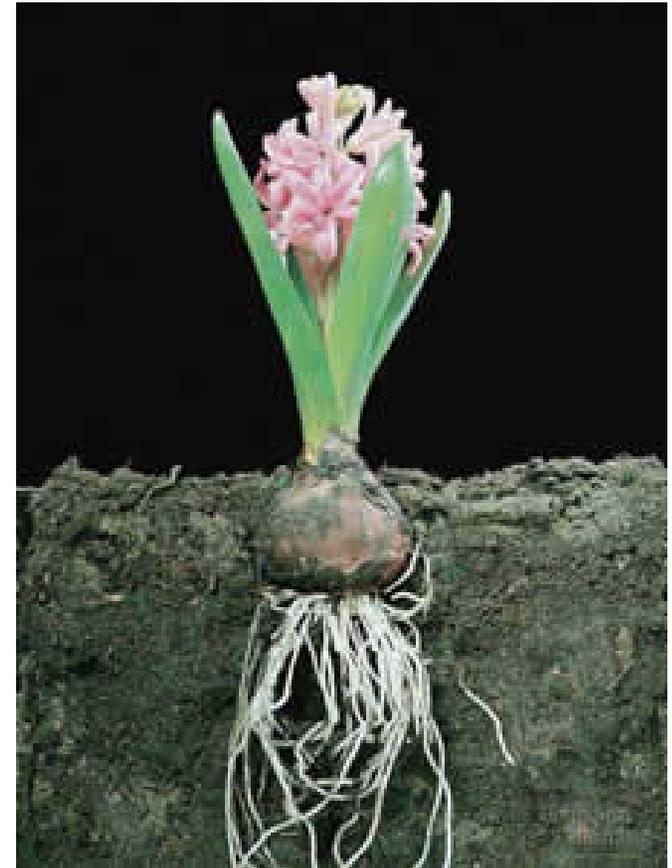


Imagen tomada de Campbell & Reece (2005).  
Biology. Pearson. Benjamin Cummings

# Las plantas necesitan:

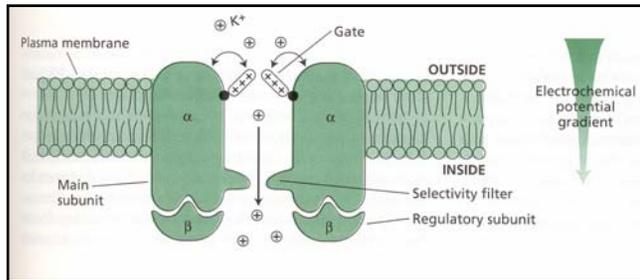
Luz, Agua, CO<sub>2</sub>, 14 elementos minerales



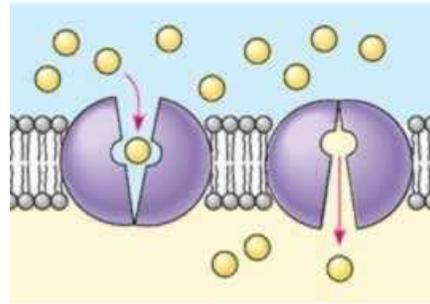
La falta o exceso de estos elementos da lugar a graves alteraciones del desarrollo

# ¿cómo podemos determinar los nutrientes minerales esenciales para las plantas?

## Análisis de cenizas



**Canales iónicos**



**Transportadores (carriers)**

**Especificidad de las proteínas transportadoras no es absoluta. □Ej. Canales de K<sup>+</sup> entra Na<sup>+</sup>.**

**Cómo funcionan**

Poros selectivos

Cambios conformacionales reversibles

**Especificidad transporte:** Tamaño poro y densidad de carga

Unión específica transportador-sustrato

**Caract. transporte:**

No unión al soluto

Unión al soluto

Presencia de puertas

Cambios reversibles del transportador

Pasivo

Pasivo o Activo

**Nº iones transportados:** 10<sup>8</sup> moléculas/s

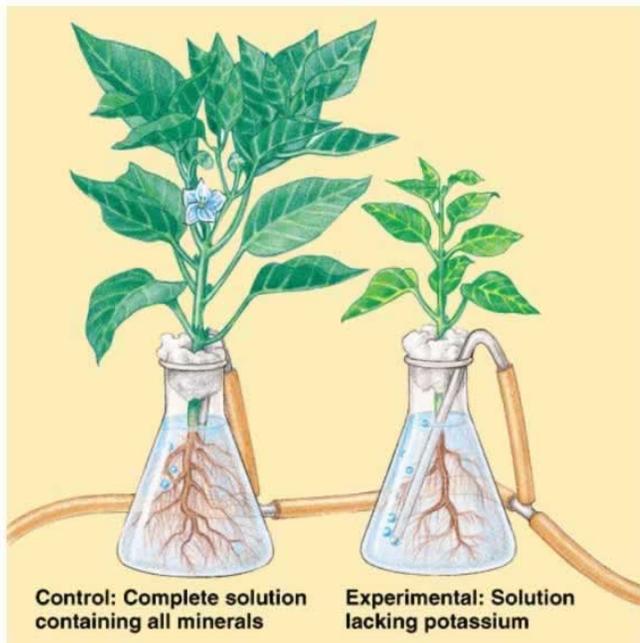
10<sup>2</sup>-10<sup>3</sup> moléculas/s

# Uso de soluciones nutritivas

**1860 Julius von Sachs:** plantas pueden desarrollarse en ausencia de suelo

**Criterios para considerar un *elemento esencial* para una planta (Arnon & Stout, 1939):**

- su ausencia debe impedir completar el ciclo vital
- debe tener al menos una determinada función fisiológica no realizable por otro elemento
- debe formar parte de una molécula esencial o debe ser requerido para una reacción enzimática



Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

## Elementos beneficiosos

Elementos no esenciales pero que favorecen el crecimiento y el desarrollo de algunas especies.

Ti (IV) pimienta:  $\uparrow$  biomasa

Al. Reduce toxicidad exceso Ca, Mg.

Imagen tomada de Campbell & Reece (2005).  
Biology. Pearson. Benjamin Cummings

# Clasificación de elementos esenciales:

## la concentración en la planta. (Epstein, 1994)

- **Macronutrientes** (>0.1%): H-C-O; N-P-K-Ca-Mg-S-Si
- **Micronutrientes** (<0.1%): Cl-Fe-B-Mn-Zn-Cu-Ni-Mo-Na

## la función bioquímica o biológica. (Mengel y Kirby, 1987)

- Elementos "formadores" de compuestos orgánicos: N-S
- Elementos relacionados con la conservación de energía y/o compuestos estructurales: P-B-Si
- Elementos que permanecen como iones: K-Na-Mg-Ca-Mn-Cl
- Elementos involucrados en reacciones redox: Fe-Cu-Zn-Mo-Ni

## la movilidad y transporte (planta)

- Elementos móviles: N-K-P-S-Cl-Na-Mg-Rb-Cs
- Elementos moderadamente móviles: Fe-Mn-Zn-Cu-Mo-Co-B
- Elementos inmóviles: Ca-Ba-Al-Pb-Po-Ag-F

# Soluciones nutritiva Hoagland modificada

P 62 ppm; 0,06 ppm

N-P-K-  
Ca-Mg-  
S-Si

Cl-Fe-  
B-Mn-  
Zn-Cu-  
Ni-Mo-  
Na

## Ventajas de las soluciones nutritivas actuales:

- La adición de Fe en forma de quelato.

-La adición de los micronutrientes.

	Peso molecular (g mol <sup>-1</sup> )	Concentración solución madre (mM)	Concentración solución madre (g L <sup>-1</sup> )	Volumen solución madre para preparar 1 L (mL)
<b>Macronutrientes</b>				
KNO <sub>3</sub>	101,10	1000	101,01	6
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4 H <sub>2</sub> O	236,16	1000	236,16	4
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	115,08	1000	115,08	2
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	264,48	1000	246,48	1
<b>Micronutrientes</b>				
KCl	74,55	25	1,864	}
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	61,83	12,5	0,773	
MnSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	169,01	1,0	0,169	
ZnSO <sub>4</sub> · 7 H <sub>2</sub> O	287,54	1,0	0,288	
CuSO <sub>4</sub> · 5 H <sub>2</sub> O	249,68	0,25	0,062	
H <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	161,97	0,25	0,040	}
NaFeDTPA	468,20	64	30	
<b>Opcional<sup>o</sup></b>				
NiSO <sub>4</sub> · 6 H <sub>2</sub> O	262,86	0,25	0,066	2
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> · 9 H <sub>2</sub> O	284,20	1000	284,20	1

<sup>o</sup>Ni: presente como contaminante en sales por lo que no es necesario añadir este compuesto.

El Si si se incluye debe añadirse en primer lugar y ajustar el pH con HCl para prevenir la precipitación de otros nutrientes.

# Cultivos hidropónicos

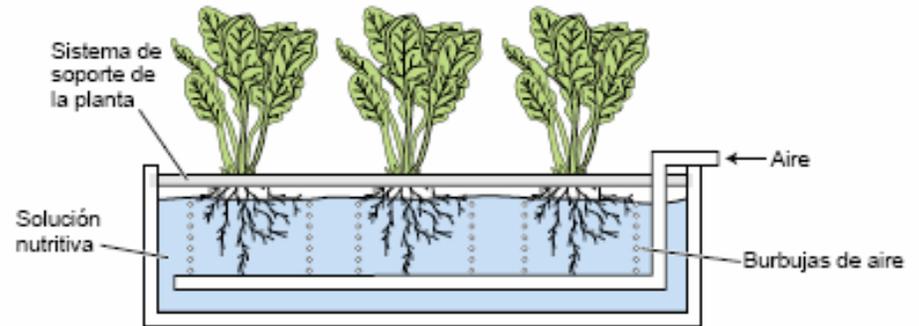


**Sustrato inerte** que sirve además de soporte físico para las plantas

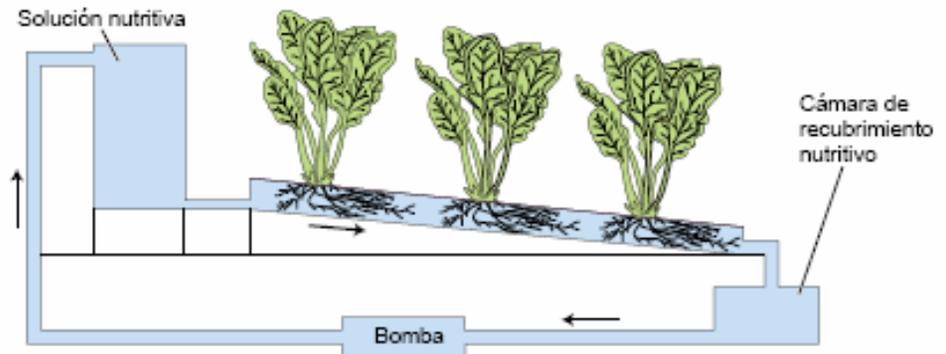
- **Arena de cuarzo**
- **Vermiculita** (mineral vermiculita: silicato hidratado de Fe-Mg-Al)
- **Perlita** (procede rocas volcánicas y se emplea para incrementar los espacios aéreos y el drenaje)

Imagen tomada de Campbell & Reece (2005). Biology. Pearson. Benjamin Cummings. ([www.campbellbiology.com](http://www.campbellbiology.com))

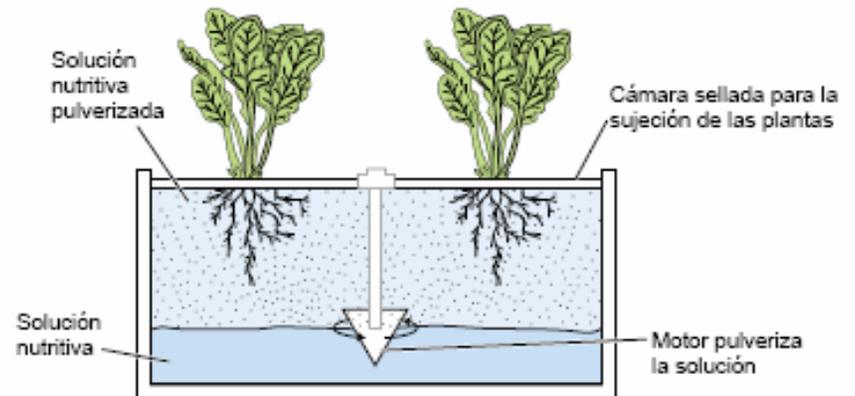
(A) Sistema de cultivo hidropónico



(B) Sistema de cultivo con lámina nutritiva

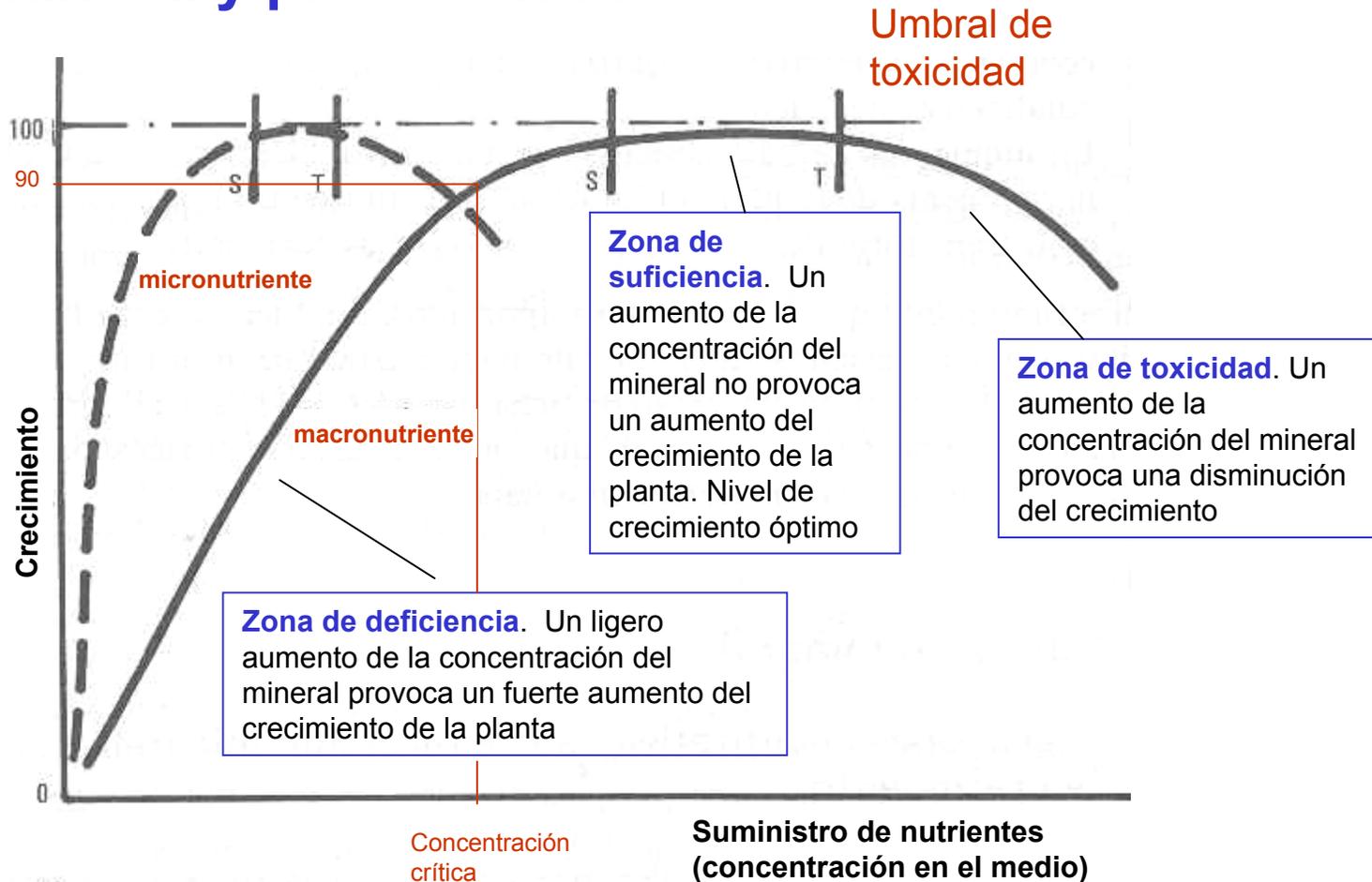


(C) Sistema de cultivo aeropónico



Tomado de: Taiz & Zeiger 2006. Fisiología Vegetal. Colección Ciències experimentals. Universitat Jaume I

# Relaciones cuantitativas entre nutrición mineral y productividad



Calcular para cada nutriente su concentración crítica y su intervalo de suficiencia (interacciones; N/S, N/P, N/K)

# Diagnóstico de nutrición

La deficiencia o toxicidad de un elemento esencial provoca una disrupción en su funcionalidad → **sintomatología visible** (ciertos casos es específica)

## Deficiencias minerales. Descripción general de los síntomas de carencia

Síntoma	Descripción
<b>Clorosis</b>	Pérdida de clorofila; e.j., hojas amarillentas
<b>Clorosis intervenal</b>	Las venas permanecen verdes y los tejidos situados entre las venas aparecen amarillentos
<b>Necrosis</b>	Muerte del tejido
<b>Stunting</b>	Acortamiento de entrenudos
<b>Coloración atípica</b>	Roja, púrpura, coloración parda. Acumulación de pigmentos



**Deficiencia en N: En maíz y tomate se observa una coloración purpúrea causada por la acumulación de pigmentos antocianos.**

Imágenes tomadas de:  
<http://agri.atu.edu/people/Hodgson/FieldCrops/Mirror/Nutrient%20Def.htm>



**Deficiencia en K: En alfalfa aparecen manchas cloróticas en los extremos de las hojas adultas**

## ¿Qué fotografía ilustra una deficiencia en Mn y cual muestra una deficiencia en Fe?



### Maíz:

- Deficiencia en Mn y Fe:
  - Clorosis intervenal en hojas jóvenes

### Conclusión:

diferentes deficiencias pueden provocar el mismo síntoma

# Análisis foliar

Para cada nutriente y especie se puede determinar su concentración crítica (90% del máximo producción) y su intervalo de suficiencia (100%).

## Ventajas

- Precisión
- Permite detectar deficiencias y/o toxicidad

## Toma de muestras

- Representativa
- Tomarla en el momento adecuado
- Tejido apropiado (hojas jóvenes y/o adultas)

## FRESAS

*Tiempo:* antes de la floración

*Tejido:* hojas jóvenes completamente expandidas y peciolo

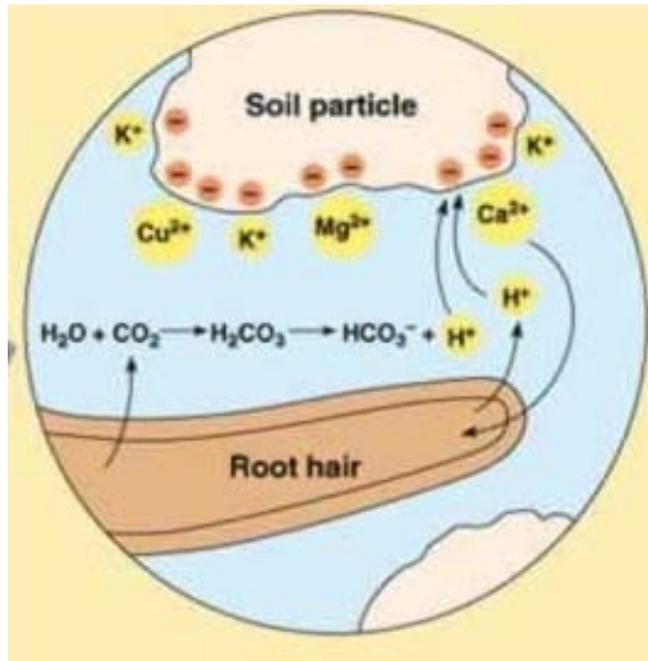
*Número:* 2 hojas/25 plantas

# Factores que afectan a la absorción de nutrientes: suelo

**Suelo:** soluble (iones)

partículas del suelo: cargas (-): adsorción de cationes

competencia: escala de afinidad:  $\text{Al}^{3+} > \text{H}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ = \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+$



Los iones  $\text{H}^+$  en la solución del suelo permiten mantener disponibles ciertos nutrientes como el  $\text{Ca}^{2+}$  para las plantas.

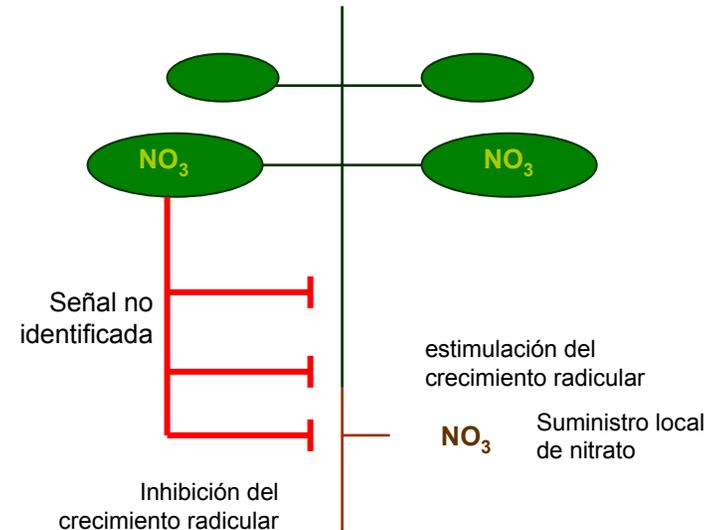
Las plantas pueden **incrementar el pool de  $\text{H}^+$**  de dos modos: **secretando  $\text{H}^+$**  o bien mediante la **respiración**. Durante la respiración se libera  $\text{CO}_2$  y éste reacciona con el  $\text{H}_2\text{O}$  para formar  $\text{H}_2\text{CO}_3$ . La disociación de este ácido libera iones  $\text{H}^+$  al suelo

# Factores que afectan a la absorción de nutrientes: raíz

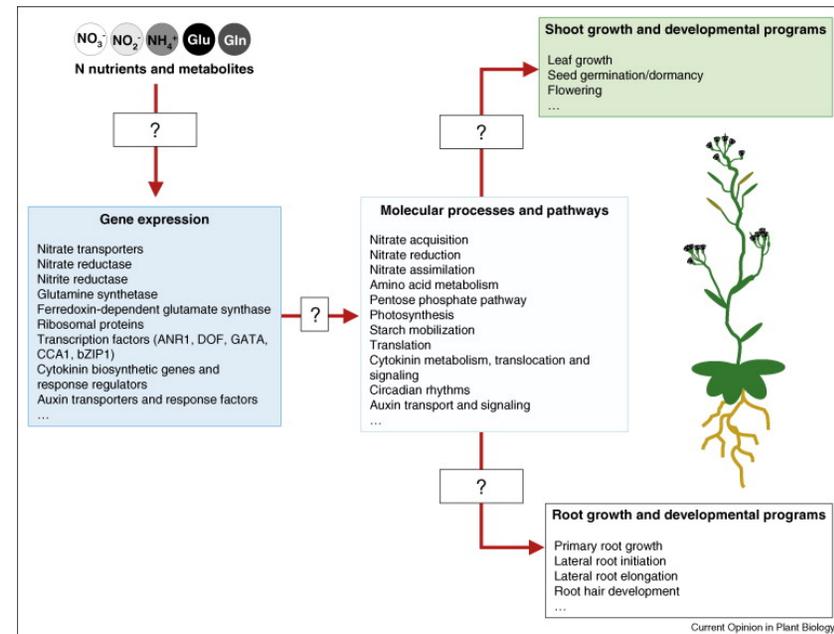
## Desarrollo radicular:

Condicionado disponibilidad de H<sub>2</sub>O y N

- **H<sub>2</sub>O y nutrientes: abundantes**
  - Sistema radicular pequeño (20-50% biomasa total)
- **H<sub>2</sub>O y N: deficientes**
  - Gran sistema radicular (90% biomasa total)
  - Modificación arquitectura radicular
    - Si falta N → estimulación crecimiento lateral
    - El N regula la relación vástago/raíz
      - N elevado en vástago → inhibe el crecimiento lateral radicular



Adaptado de: Curr Opin Plant Biol 2(1999):178



Tomado de: Curr Opin Plant Biol 11(2008):521

## ¿Dónde tiene lugar la absorción de iones en la raíz?

Mayor grado de absorción → **zona apical**

- dependiendo del ion y de la especie
  - mismo grado de absorción en toda la raíz

# Interacción planta-microorganismos. Bacterias

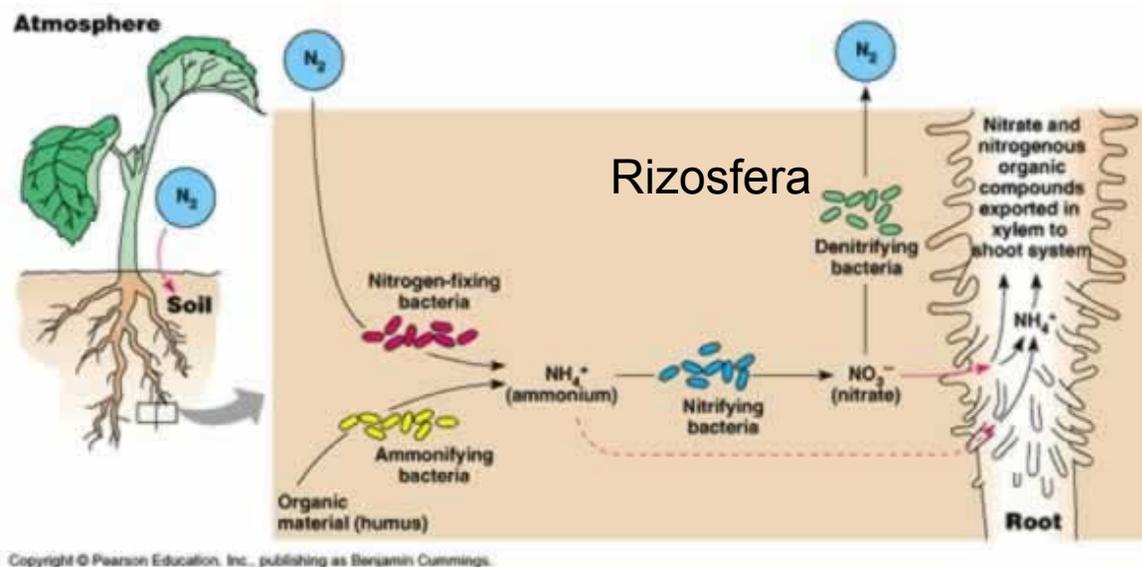
Las bacterias favorecen la toma de nutrientes

**Aumentan la biodisponibilidad de nutrientes**

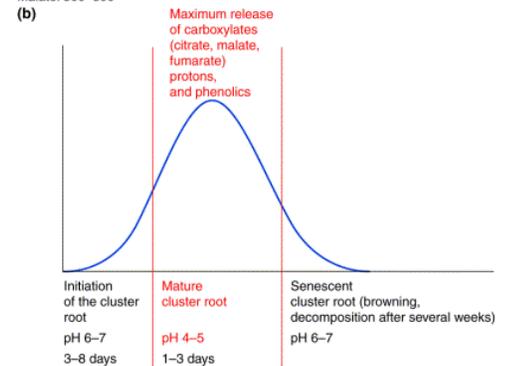
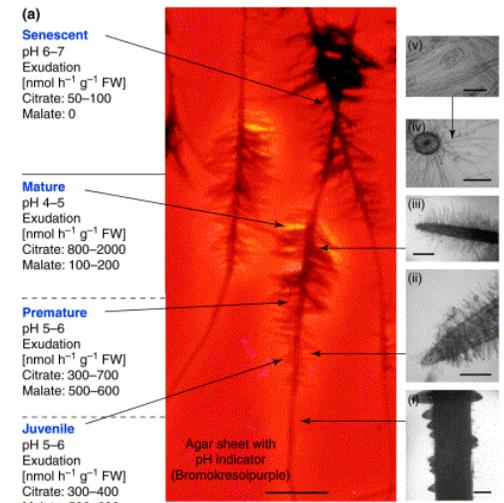
- Bacterias implicadas en la amonificación, nitrificación

**Modificar arquitectura radicular**

- PGPR (*plant growth promoting rhizobacteria*) : secretan reguladores del crecimiento: modifican la arquitectura radicular



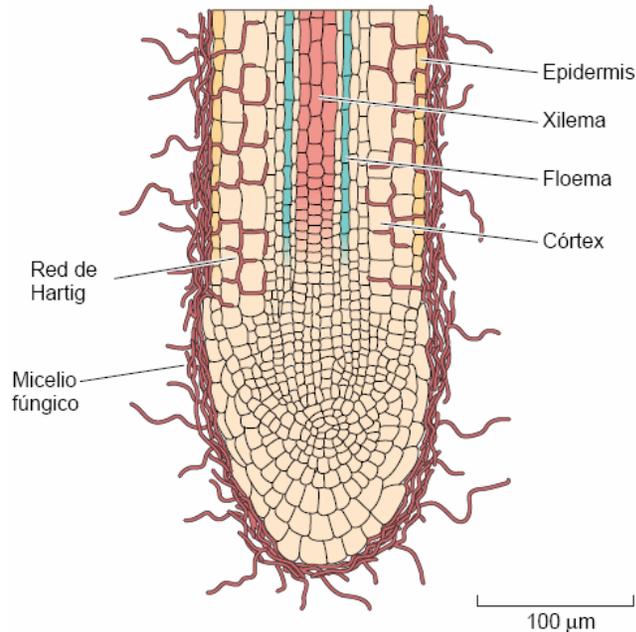
Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.



TRENDS in Plant Science

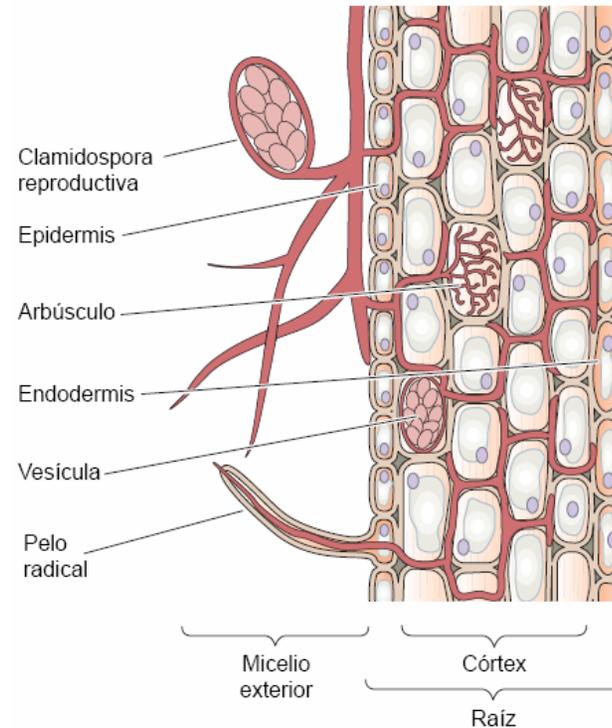
**Raíces proteoides.** Secreción de AIA por bacterias que favorece el crecimiento de raíces laterales. Características de las Proteaceae. Estas especies viven en suelos de baja fertilidad y no suelen presentar micorrizas. La presencia de estas raíces se asocia a una intensa movilización de nutrientes (P, Fe, Zn, Mn) debido a cambios inducidos por la raíz en la rizosfera (pH, exudados radicales, potencial redox).

# Interacción planta-microorganismos. Micorrizas



## Ectomicorrizas.

Las hifas no penetran en las células de la raíz, sino que forman una red apoplástica o red de Hartig y un manto externo que cubre la raíz.

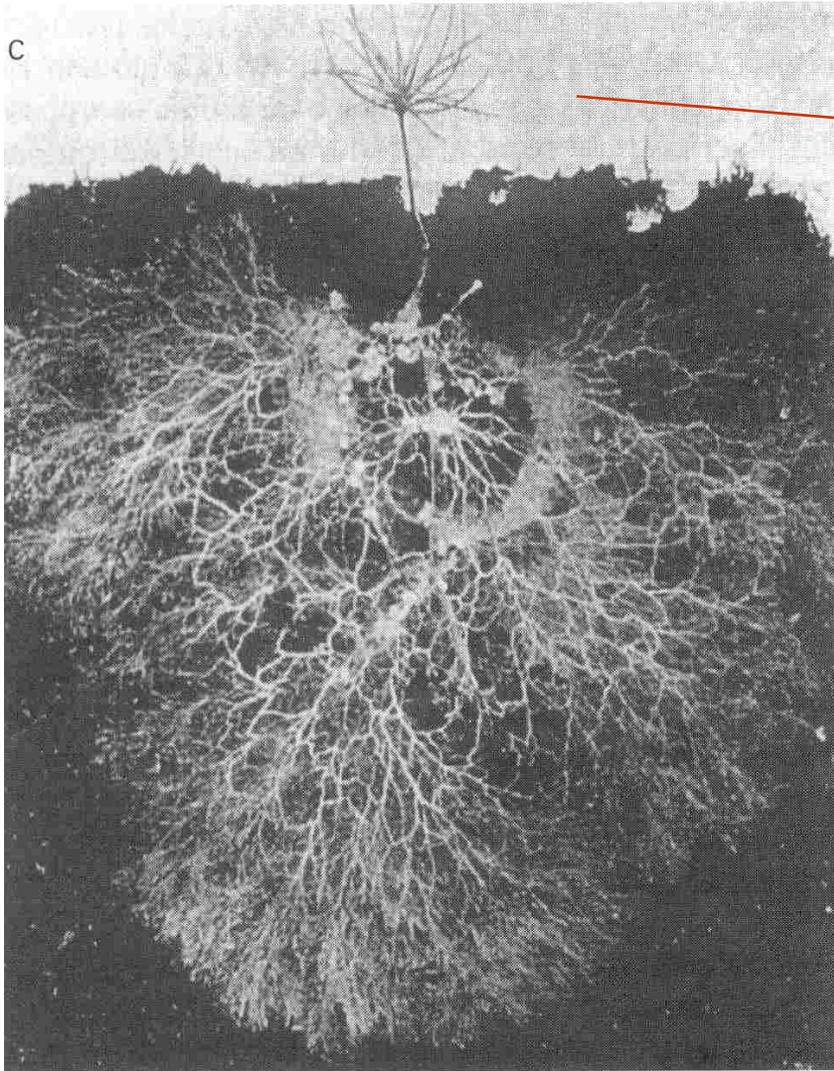


## Endomicorrizas.

No forman un manto externo; se desarrollan en las células de la raíz inter- e intracelularmente, dando lugar a los elementos típicos de la infección: Vesículas y arbuscúlos.

## Asociación mutualista

- **Planta:** azúcares al hongo
- **Hongo:** mejora la capacidad de la raíz para absorber  $H_2O$  e iones

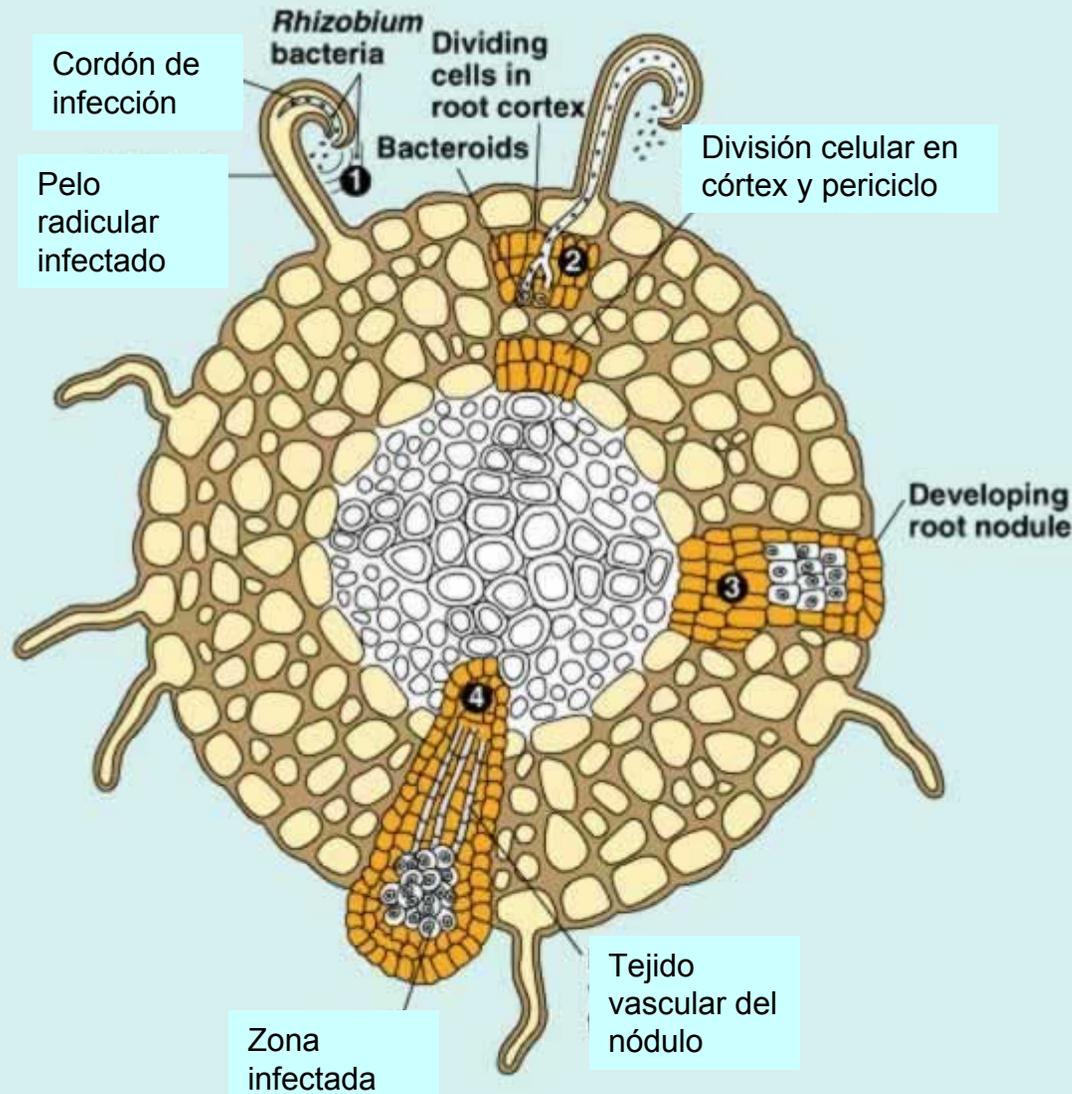


## Ectomicorrizas

Plántula *Pinus contorta* de  
4 cm de tamaño!!!

Desarrollo espectacular de  
sus raíces colonizadas por  
micorrizas

# Fijación simbiótica de nitrógeno: complejas interacciones raíz-bacterias



1. Las **raíces** secretan compuestos químicos (**flavonoides**) que atraen a las bacterias (quimiotaxis). Las **bacterias segregan sustancias** (similares a la quitina) que estimulan la **elongación de los pelos radiculares** y forman el **cordón de infección** mediante una invaginación del plasmalema.

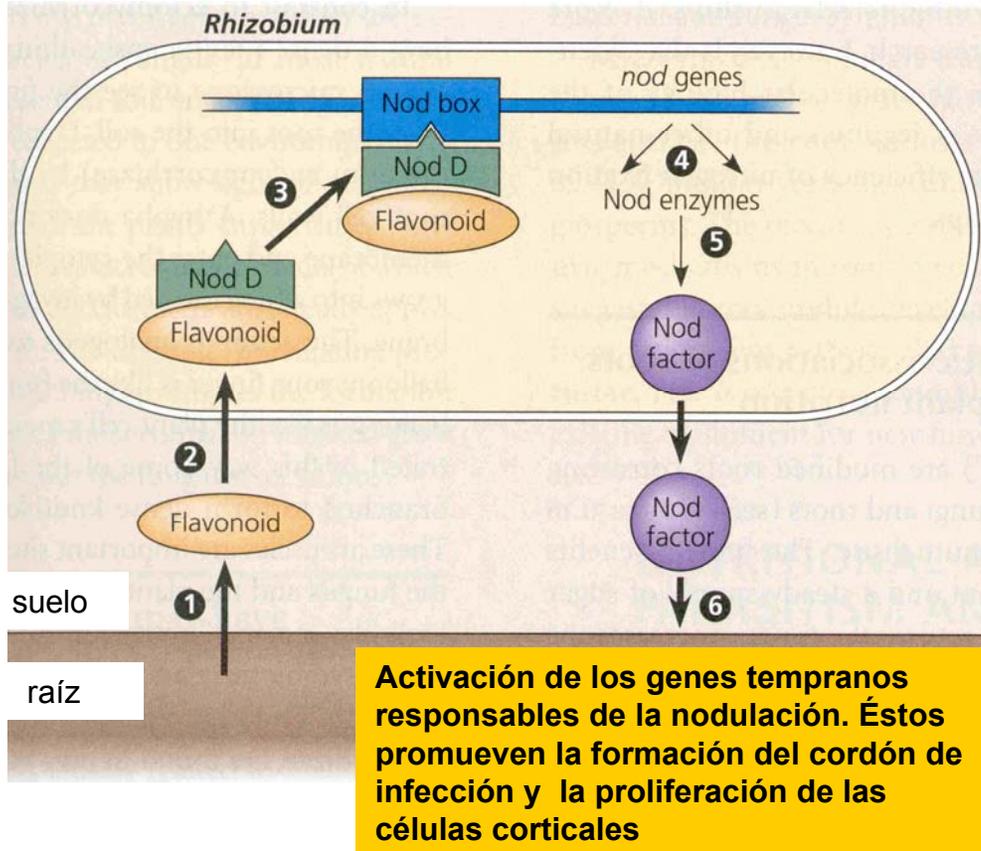
2. Cuando el cordón de infección alcanza el periciclo, las células del córtex y del periciclo se dividen y comienza la diferenciación del nódulo. Las bacterias se liberan del cordón y pasan al citosol de las células de la planta a través de un proceso similar a la endocitosis: las bacterias quedan englobadas en una vesícula denominada simbiosoma. Las bacterias se diferencian en bacteroides: expresan nitrogenasa y determinados citocromos.

3. El crecimiento de la región afectada continúa tanto en el periciclo como en el córtex y las dos masas de células se fusionan y forman el nódulo.

4. El nódulo continúa creciendo y se desarrollan las conexiones de éste con el xilema y floema. Estas conexiones facilitan el aporte de nutrientes al nódulo (sacarosa) y la exportación de compuestos nitrogenados (ureidos/amidas) sintetizados en el nódulo vía xilema.

# Formación del nódulo. Biología molecular

¿Cómo es posible que una leguminosa reconozca a una especie concreta de *Rhizobium* entre la “multitud” de bacterias que habitan en la rizosfera?



1. La raíz secreta una señal (flavonoide) específica que es detectada por una única especie de rizobio. Interacción específica
2. El flavonoide activa un gen regulador de *Rhizobium* denominado *Nod D*.
3. *Nod D*, es un factor de transcripción, que se une a una región específica del ADN y activa la transcripción de los genes *nod*.
4. Los productos de los genes *nod* son enzimas implicadas en una ruta metabólica.
5. Esta ruta metabólica produce una sustancia similar a la quitina (lipo-quitín-oligosacárido) denominada factor Nod.
6. El factor Nod funciona como una señal específica entre *Rhizobium* y la raíz: favorece el desarrollo del cordón de infección y del nódulo.

# Micorrizas y los nódulos radiculares podrían estar relacionados

Los genes que se **activan** en la planta durante los **primeras etapas de la formación del nódulo** son muy **similares** a los que se activan en las etapas iniciales de la formación de **endomycorrizas**.

- **Mutaciones** en esos genes bloquean el desarrollo de los nódulos y micorrizas.

- **Rutas de transducción** de señal de ambos procesos comparten algunos componentes:

- **Citoquininas (CK):** Aplicación de CK activa la expresión genes tempranos en ausencia de bacterias/hongos simbióticos
- Infección de rizobacterias y hongos micorrícicos aumenta los niveles endógenos CK
- **Señal química: Factores Nod** secretados por *Rhizobium* relacionados con las quitina. La PC de los hongos está compuesta por quitina

*Origen evolutivo:*

- **Micorrizas.** Origen 400 millones de años, al inicio del plantas vasculares
- **Nódulos-leguminosas** 65-150 millones de años. Primeros estadios de la evolución de las angiospermas

# Estrategias de las plantas para la movilización de iones en la rizosfera

## *Secreción de mucigel:*

- facilita la absorción y la transferencia de nutrientes,
- lubrica la raíz, facilitando su penetración en el suelo,
- protege al ápice radicular de la desecación, y
- favorece la proliferación selectiva de microorganismos

## **Composición:**

- polisacáridos con grupos  $\text{COO}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ 
  - facilitar la adsorción de iones
- aminoácidos, vitaminas
  - favorece crecimiento selectivo microorganismos (esenciales para nutrición)



**Relación planta-suelo es muy dinámica. Se regula según las necesidades nutricionales**

# Mecanismos para la movilización de los nutrientes

## • *Mecanismos específicos*

- Deficiencia de un nutriente
- **Inducibles**

## • *Mecanismos no específicos*

- condiciones normales
- **Constitutivos**

# Mecanismos no específicos

Movilizar los iones del suelo → **acidificación no específica**

## • **Exudados radicales**

- **Ácidos** dicarboxílicos y tricarboxílicos y aminoácidos
  - poder quelante (complejante) de cationes divalentes → solubilizar Ca, Cu, Mg, Fe, Zn

## • **Azúcares**

- favorecen desarrollo microorganismos → niveles O<sub>2</sub> disminuyan.) facilita el paso de Fe<sup>3+</sup> a Fe<sup>2+</sup> y de Mn<sup>4+</sup> a Mn<sup>2+</sup> que son formas más solubles.

## • **Síntesis y secreción de sideróforos**

- capaces de movilizar Fe, Cu, Zn, Mn → quelantes

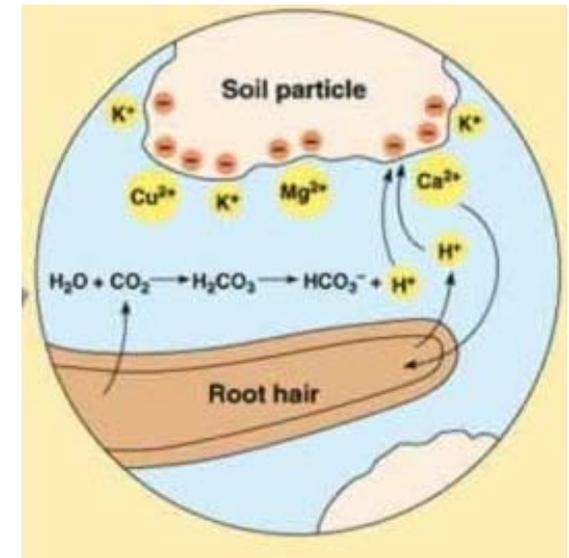
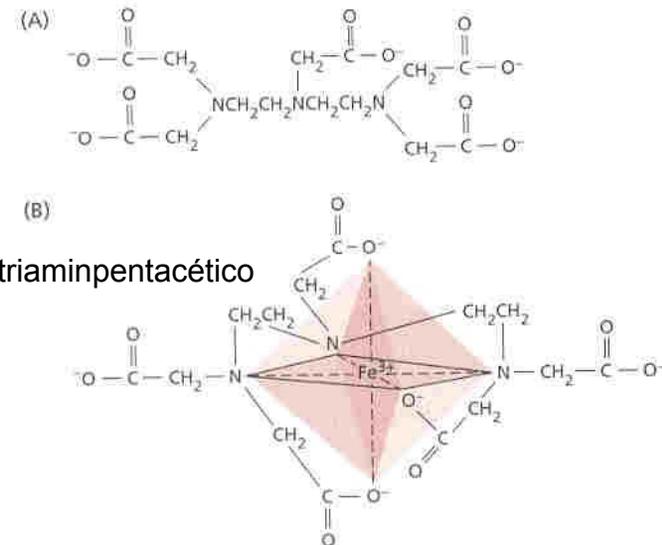


Imagen tomada de Campbell & Reece (2005). *Biology*. Pearson. Benjamin Cummings

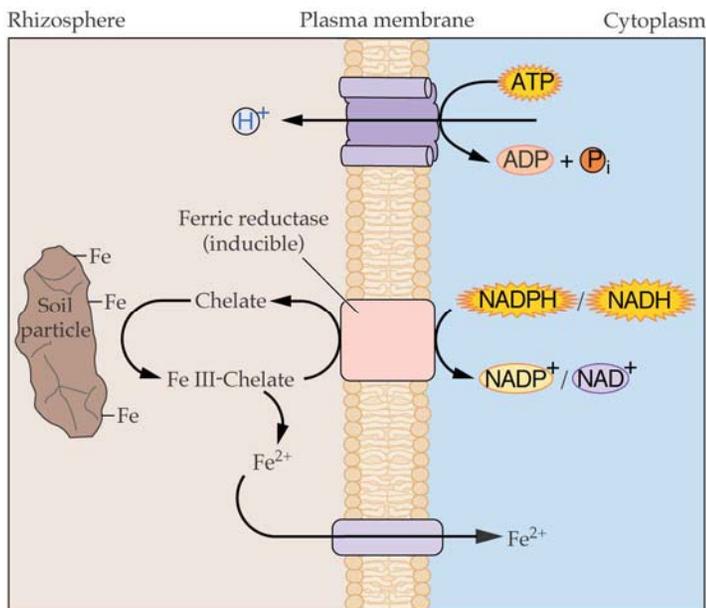


Tomado de Taiz & Zeiger 2006. *Plant Physiology*. Sinauer Associates, Inc.

# Mecanismos específicos

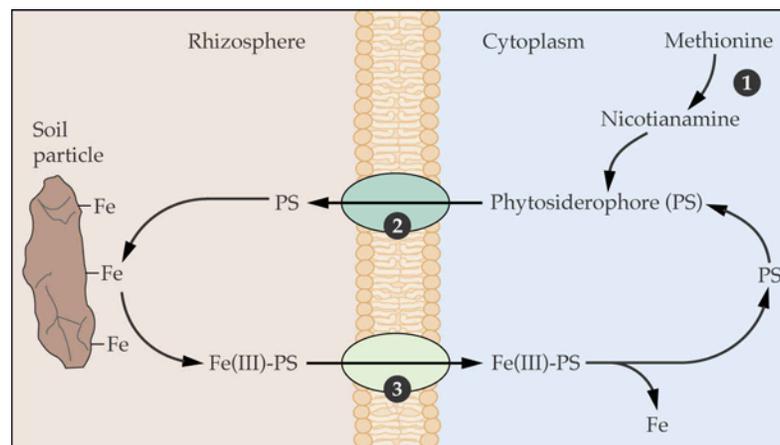
Aumentar la biodisponibilidad y absorción del nutriente deficitario

## Deficiencia de Fe



### Estrategia I (excepto Poáceas)

- **Disminución del pH:** excreción  $H^+$  y ácidos quelantes
- **Inducción de una reductasa férrica** (plasmalema)  $Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$
- **Absorción de  $Fe^{2+}$**   $\rightarrow$  transportador específico

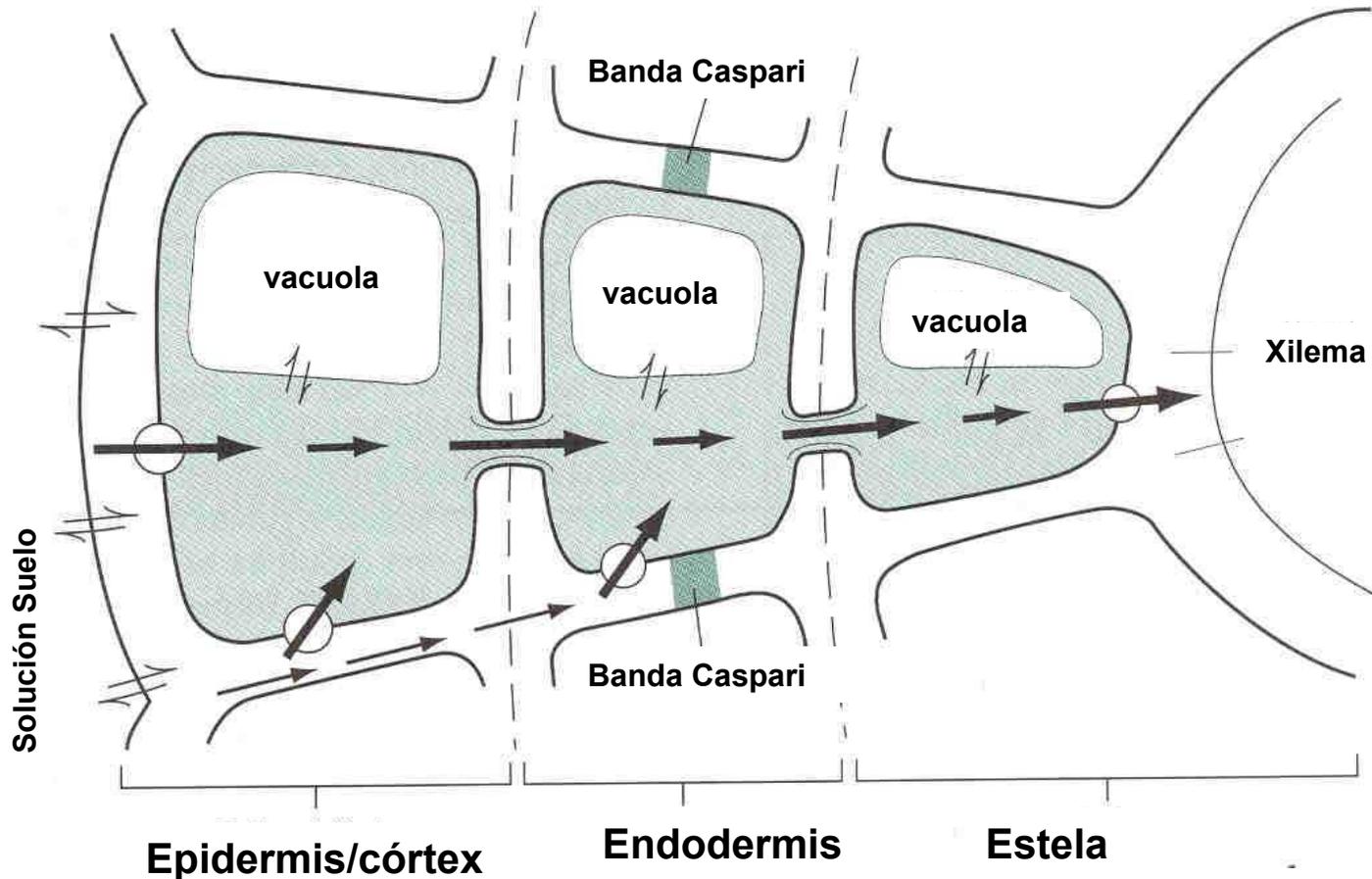


### Estrategia II (Poáceas)

- **Excreción ácido mugínico**  $\rightarrow$  complejos fitosideróforo (PS)-  $Fe^{3+}$
- **Absorción del complejo ácido mugínico- $Fe^{3+}$**   $\rightarrow$  transportador específico inducible
- **Reducción a  $Fe^{2+}$**  en el interior célula

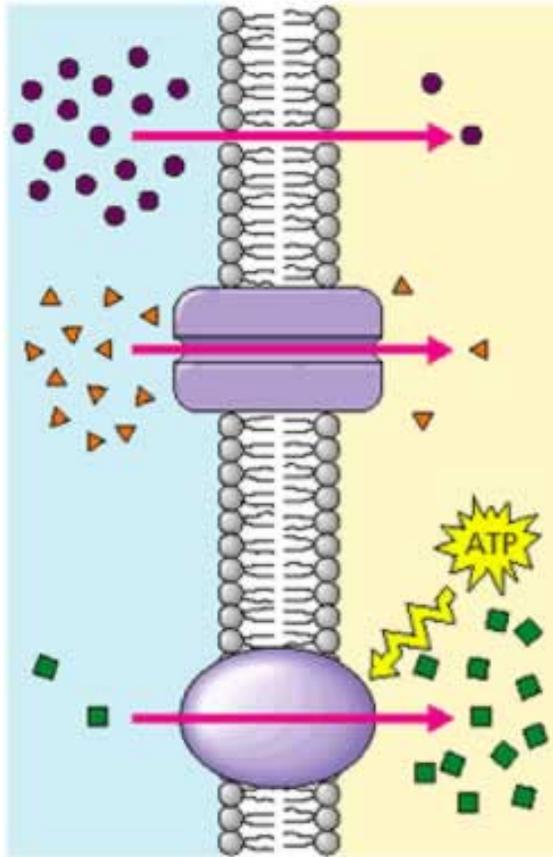
# Transporte iónico en la raíz

Tomado de Hopkins et al. (2004.)  
Plant Physiology. John Wiley & Sons, Inc



**Entrada de iones a la raíz: apoplástica, simplástica o micorrícica**  
**Entrada al interior célula**

# Transporte de iones



## Transporte de nutrientes

- Pasivo
  - Activo
- } Capacidad selectiva limitada

## Determinación del tipo de transporte

- Potencial electroquímico ion

- Ecuación de Nernst

$$E_j^N = (RT/zF) * \ln (C_j^e / C_j^i)$$

$$E_j^N = (59/z) \log (C_j^e / C_j^i)$$

- Fuerza ion motriz ( $\Delta\mu/F$ ; mV)

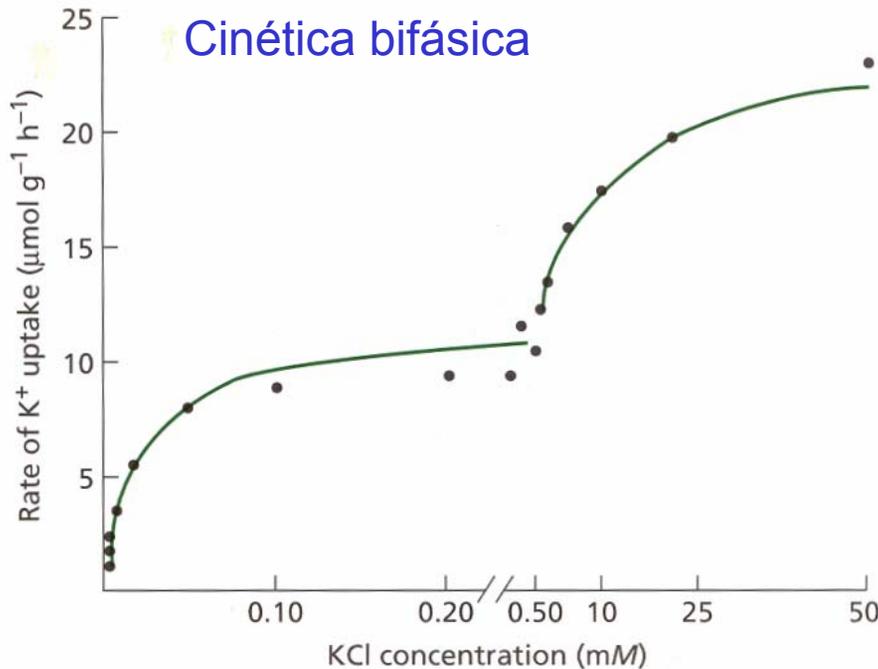
$$\Delta\mu/F = z (E_m - E_j^N)$$

- Si  $\Delta\mu/F = +$  → salida del ion de la célula pasiva

- Si  $\Delta\mu/F = -$  → entrada del ion pasiva

- Si  $\Delta\mu/F = 0$  → equilibrio

# Velocidad de absorción de iones y concentración



## Absorción del ion K<sup>+</sup>: dos mecanismos

### [K<sup>+</sup>] baja

#### Características de la toma K<sup>+</sup>:

- Transporte de alta afinidad  $K_M \sim 25 \mu\text{M}$
- **Saturable**
  - depende concentración del transportador
- *Tipo de transportador:*
  - transportador activo secundario (simporte)

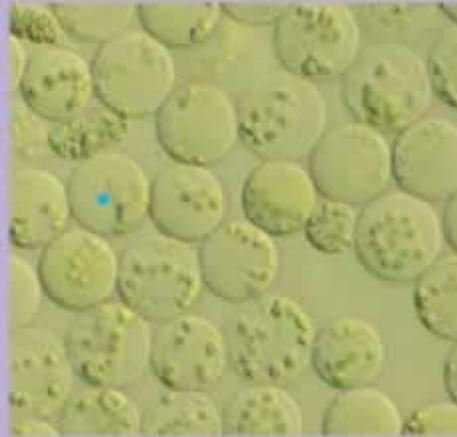
### [K<sup>+</sup>] alta

#### Características de la toma K<sup>+</sup>:

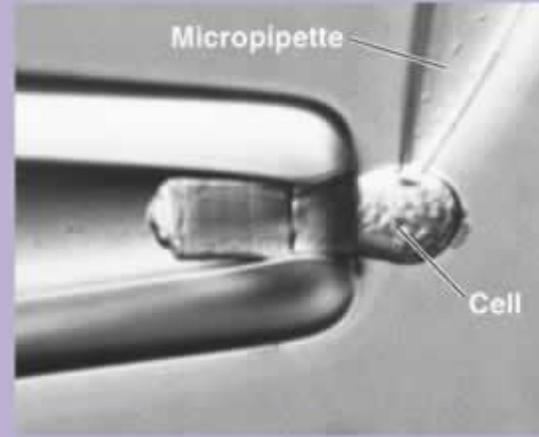
- Transporte de baja afinidad
- **No saturable**
  - Depende concentración de K<sup>+</sup>
- *Tipo de transportador:*
  - canal

# Electrofisiología. Técnica del *patch-clamp*

1. Protoplastos de *Nicotiana* sp.

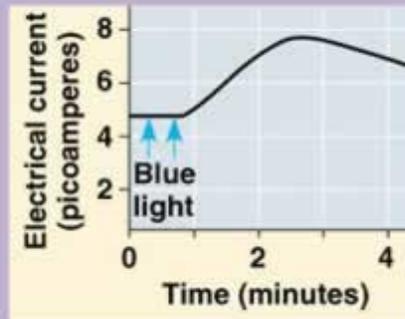
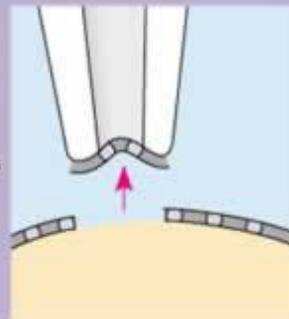
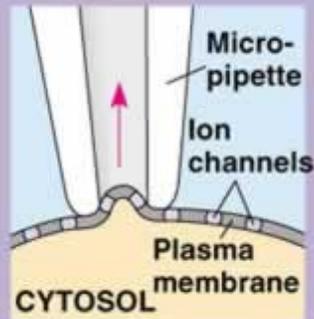


6  $\mu$ m



6  $\mu$ m

3. Sellado pipeta-célula. Si se succiona se puede acceder al interior de la célula (*whole-cell configuration*) y registrarse la suma de todos los flujos iónicos que se dan en la superficie entera del protoplasto



4. Cuando se tira de la micropipeta se puede retirar una pequeña porción del plasmalema (*membrane patch configuration*). En ese caso, se registra la actividad de los canales incluidos en dicha membrana. La cara citoplasmática queda expuesta a la solución externa de la micropipeta, cuya composición se conoce y se puede modificar libremente.

2. *Patch-clamp* (ing. *patch*, remiendo; *clamp*, casquillo) se emplea una micropipeta (1  $\mu$ m de diámetro) y otra de succión de para “sujetar” la célula

5. Representación gráfica del transporte de H<sup>+</sup> a través de un segmento de membrana. El paso de H<sup>+</sup> a través del canal se registra midiendo la intensidad de corriente asociada a dicho flujo

# Adaptaciones nutricionales: parasitismo y depredación

## Plantas parásitas

### Fotosintéticas:

**Muérdago** “mistletoe” (*Phoradendron macrophyllum*; *Arceuthobium* spp)

- Suplementa su nutrición insertando en el xilema de las plantas que parasita **haustorios**

### No fotosintéticas:

*Obtención de nutrientes:*

#### •Directa:

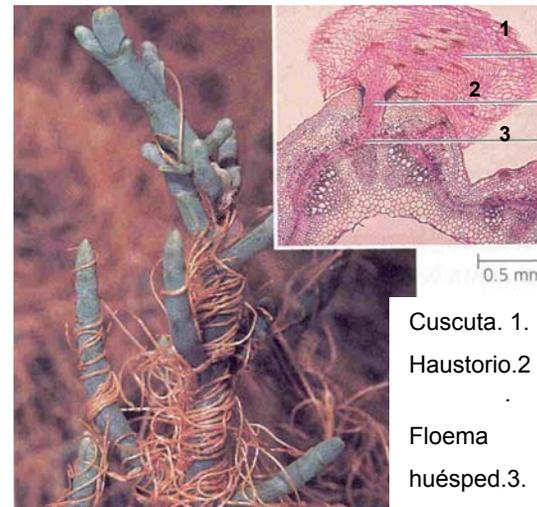
##### •*Cuscuta* spp:

- Inserta haustorios en el floema huésped

#### •Indirecta

##### •*Monotropa uniflora* (Indian pipe):

- asociación con hifas de las micorrizas



Cuscuta. 1.  
Haustorio.2  
Floema  
huésped.3.



# Plantas carnívoras suplementan su nutrición mineral mediante la ingesta de animales

Plantas fotosintéticas

Hábitats: suelos pobres en  $N_2$  (ácidos)

Algunos nutrientes: digestión de insectos

## Métodos de captura:

**Activas.** Bisagra (*Dionaea*)  
Hojas modificadas en forma  
de cepo; márgenes espinas  
Centro del limbo foliar → pelos  
disparadores

**Pasivos.** Fosa. (*Jarra sp.*)

**Pasivos y activos** (*Drosera sp.*)  
limbo foliar → pelos terminados en una glándula que  
excreta un fluido pegajoso.  
Si un insecto se posa en la hoja o la toca levemente,  
queda sujeto por los pelos pegajosos, que se curvan  
hacia adentro y comprimen a la víctima junto a la  
superficie foliar, donde es digerida.



Imagen tomada de Campbell & Reece (2005). Biology. Pearson. Benjamin Cummings

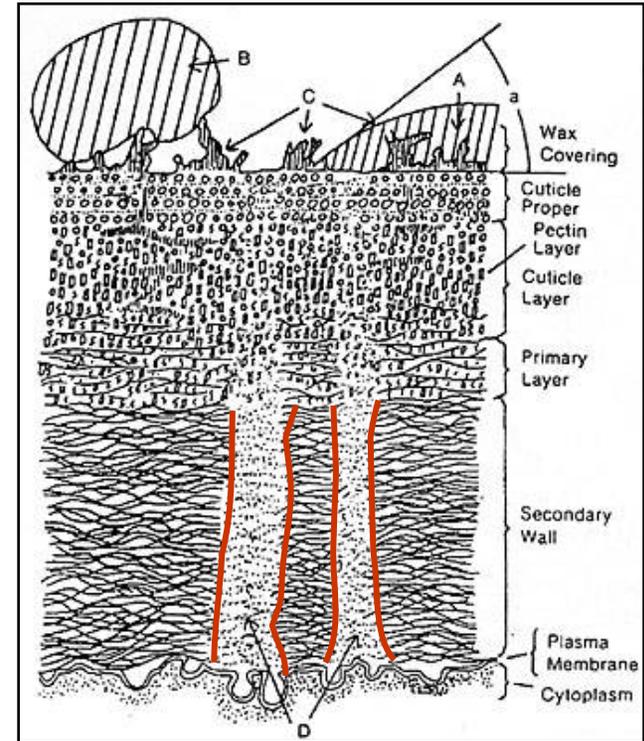
# Absorción foliar de nutrientes

## Vías de entrada:

- estomas
- cutícula
- ectodesmos

## Fertilización foliar

- Baja disponibilidad de nutriente en los suelos.
  - suelos calcáreos → baja disponibilidad de hierro
- Disminución de la actividad de las raíces durante el estado reproductivo.
  - Competencia por carbohidratos → baja actividad de la raíz
- Incremento en el contenido de proteína en la semilla de cereales
  - aplicación foliar de nitrógeno en los últimos estados de crecimiento .
- Incremento del contenido de calcio en frutos.
  - Calcio (baja movilidad vía floema)
    - Frutales: aplicar Ca vía foliar a frutos → evitar carencias



ectodesmos

**Estructura de la pared externa de una célula epidérmica** mostrando la ordenación de los ectodesmos (D) y la influencia de los agentes surfactantes en la adhesión de las gotas de solución a la superficie. A, retención de una gota con surfactante; B, retención de una gota sin surfactante; C, excrecencias cerasas.