

Nutrición vegetal

Nelson Walter Osorio

Ing. Agrónomo, M. Sc., Ph. D.

Universidad Nacional de Colombia

Profesor Asociado - Biotecnología Ambiental

Escuela de Biociencias- Facultad de Ciencias

Correo-e: nwosorio@unal.edu.co, nwosorio@gmail.com

Web-page: <https://sites.google.com/site/nwosorio/>

Tabla 2.1. Lista de los nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo vegetal, autor(es) y año en que se determinó su esencialidad para las plantas.

Elemento	Forma química aprovechable	Rango de concentración en el tejido vegetal	Autor y año del descubrimiento de esencialidad
C	CO ₂	450 g kg ⁻¹	De Saussure, 1804
H	H ₂ O	60 g kg ⁻¹	De Saussure, 1804
O	O ₂ , H ₂ O	450 g kg ⁻¹	De Saussure, 1804
N	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	20-60 g kg ⁻¹	De Saussure, 1804
P	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻	1-4 g kg ⁻¹	Ville, 1860
K	K ⁺	20-50 g kg ⁻¹	Lucanus, 1865

Tabla 2.1. Lista de los nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo vegetal, autor(es) y año en que se determinó su esencialidad para las plantas.

Elemento	Forma química aprovechable	Rango de concentración en el tejido vegetal	Autor y año del descubrimiento de esencialidad
Ca	Ca^{2+}	5-15 g kg ⁻¹	Von Sachs, Knop, 1860
Mg	Mg^{2+}	1-4 g kg ⁻¹	Von Sachs, Knop, 1860
S	SO_4^{2-}	1-4 g kg ⁻¹	Von Sachs, Knop, 1860

Tabla 1. Lista de nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo vegetal.

Elemento	Forma química aprovechable	Rango de concentración en el tejido vegetal	Autor y año del descubrimiento de esencialidad
Fe	Fe^{2+}	50-500 mg kg ⁻¹	Von Sachs, Knop, 1860
Mn	Mn^{2+}	50-300 mg kg ⁻¹	McHargue, 1922
Cu	Cu^{2+}	20-50 mg kg ⁻¹	Sommer <i>et al.</i> , 1931
Zn	Zn^{2+}	10-50 mg kg ⁻¹	Sommer & Lipman, 1926
B	H_3BO_3	20-100 mg kg ⁻¹	Sommer & Lipman, 1926
Cl	Cl^-	100 mg kg ⁻¹	Broyer <i>et al.</i> , 1954
Mo	MoO_4^{2-}	0.1 mg kg ⁻¹	Arnon & Stout, 1939
Ni	Ni^{2+}	~0.1 mg kg ⁻¹	De Brown <i>et al.</i> , 1987

Tabla 2.2. Principales funciones de los nutrientes. Fuente: Glass (1989)

Nutriente	Función(es) principal(es)
Componentes de compuestos orgánicos	
C	Hace parte de la estructura de carbohidratos, proteínas, lípidos, ácidos nucleicos, ATP, NADP, clorofila, reguladores de crecimiento (p.e., IAA)
H	Hace parte de la estructura de carbohidratos, proteínas, lípidos, ácidos nucleicos
O	Hace parte de la estructura de carbohidratos, proteínas, lípidos, ácidos nucleicos, acceptor de electrones
N	Aminoácidos, proteínas, enzimas, coenzimas, ácidos nucleicos, clorofila
S	Sulfo-aminoácidos (cisteína y metionina), responsable de la conformación estructural y estabilidad de proteínas, coenzima A, vitaminas, responsable de aromas y sabores
P	ATP, NADP, lípidos de las membranas celulares, ácidos nucleicos, fosfo-azucars

Nutriente	Función(es) principal(es)
Activadores de enzimas	
K	Activador de ~60 enzimas. Esencial en síntesis de proteínas, responsable de la turgencia y apertura de estomas
Ca	Activador de enzimas. Esencial para la permeabilidad de la membrana. Asociado con las pectinas de la pared celular
Mg	Activador de enzimas y ATP, componente de la clorofila
Mn	Activador de enzimas, esencial en la fotólisis del agua
Zn	Cofactor de varias enzimas (dehidrogenasas, aldolasa, fosfatasas, DNA y RNA polimerasa)
Ni	Parte fundamental de la enzima ureasa

Nutriente	Función(es) principal(es)
Agentes Redox	
Fe	Componente de citocromos, peroxidasa y ferredoxina, en los cuales es responsable de reacciones redox
Cu	Componente de la citocromo oxidasa (respiración) y plastocianina (fotosíntesis), superóxido dismutasa (radicales O_2^-), fenol oxidasa (síntesis de lignina), y responsable de reacciones redox
Mo	Componente de la nitrato reductasa (reducción del NO_3^-) y de la nitrogenasa (reducción de N_2 en Rhizobios)
Otras funciones	
B	Crecimiento de tubo polínico, estabilidad de la estructura de la pared celular por formación de enlaces <i>cis-diol</i> con compuestos orgánicos.
Cl	Osmosis, balance de cargas y fotólisis del agua

Carbono (CO_2 , C-orgánico): fuente de energía, componentes de estructuras y compuestos (50% M.S.)

Hidrogeno (H_2O , H_2 , H^+): agua, compuestos

Oxígeno (H_2O , O_2): agua, compuestos, aceptor de e^-

Nitrógeno (NO_3^- , NH_4^+ , NH_3 , N-orgánico): aminoácidos, proteínas (5-12%)

Fósforo (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}): ATP, membranas celulares, Ac. Nucleicos (0.5-1%)

Azufre (S_2 , SO_2 , SO_4^{2-}): aminoácidos, vitaminas, fuente de energía

Funciones

Funciones

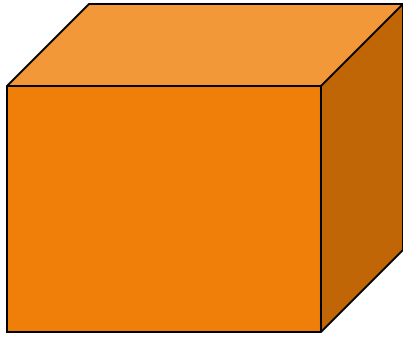
- Potasio (K^+): activador de enzimas, osmoregulación
- Magnesio (Mg^{2+}): activador de enzimas, ATP, clorofila
- Calcio (Ca^{2+}): estabiliza la pared celular, termoresistencia de esporas, no es requerido por todos los mos.
- Sodio (Na^+): osmoregulación, requerido por algunos mos.
- Hierro: citocromos de la CTe- (sideroforos)

- Micronutrientes

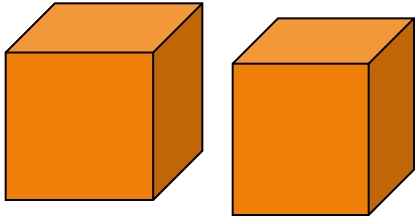
- Factores de crecimiento

Matriz sólida del suelo

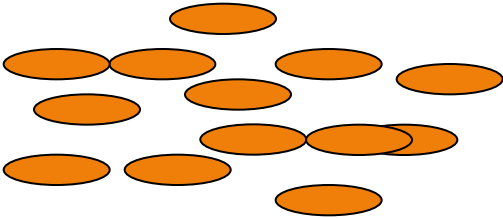
Componentes inorgánicos (A, L, Ar, Ox.) y orgánicos



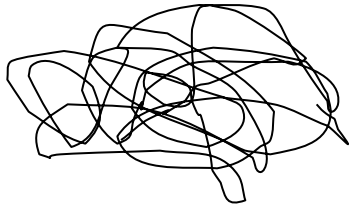
Partículas de Arena (A)



Partículas de Limo (L)



Partículas de Arcilla (Ar)



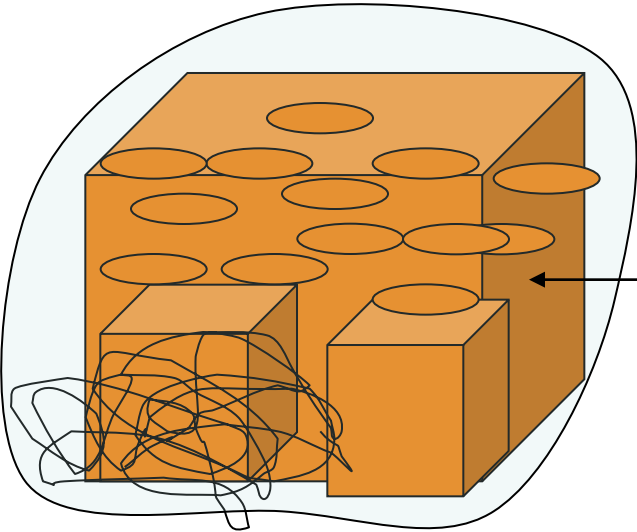
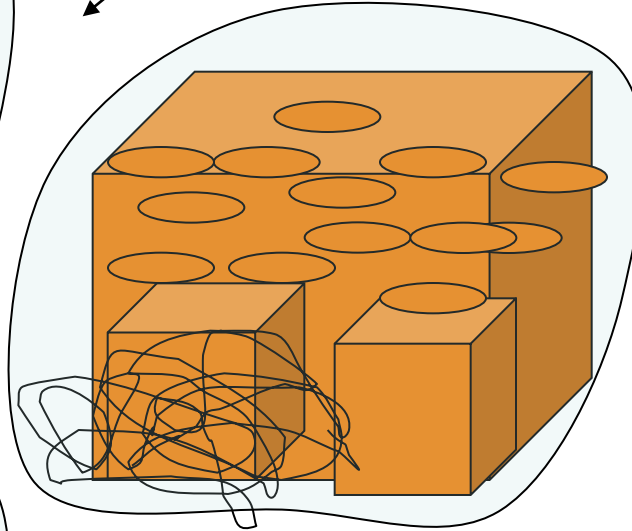
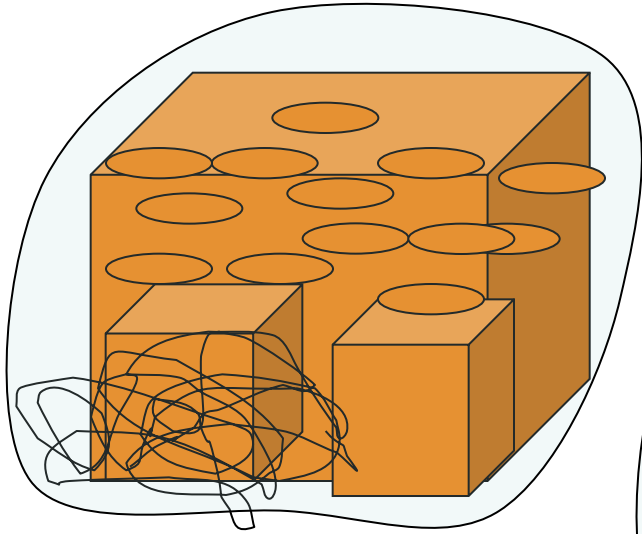
Materia orgánica humificada (H)



Materia orgánica fresca (hojarasca, ...)

Agregados del suelo

Macroporos (Interagregados): circula aire y agua



Microporos (Intraagregados): se retiene agua

Agua retenida
(solvente)

Contiene iones disueltos
(solutos)



Cationes (+): K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+}

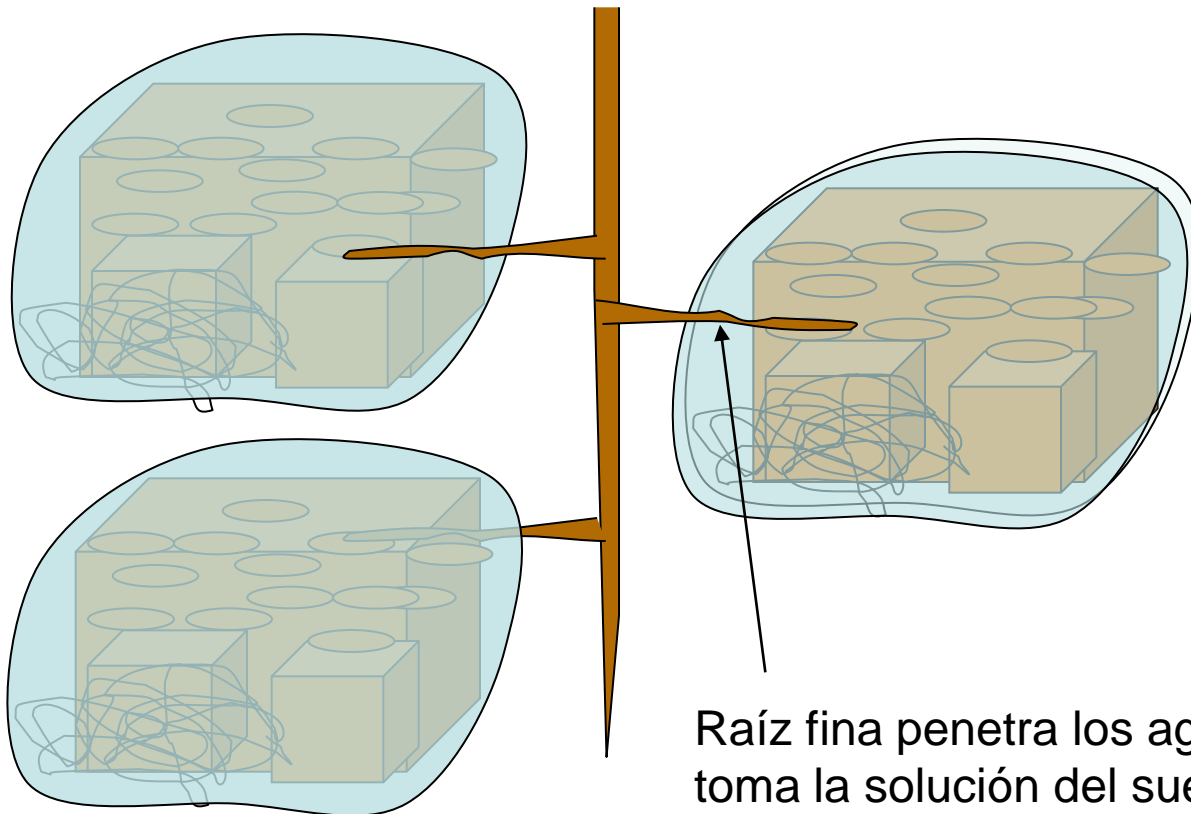
Aniones (-): Cl^- , NO_3^- , $H_2PO_4^-$, SO_4^{2-}

Solución del suelo

Rango de concentración de algunos nutrientes en la solución del suelo.

Nutriente	Concentración solución (mM)
NO_3^-	0.1-5.0
NH_4^+	0.1-1.0
H_2PO_4^- y HPO_4^{2-}	0.001-0.05
K^+	0.1-1.0
Ca^{2+}	0.1-5.0
Mg^{2+}	0.1-2.5
SO_4^{2-}	0.1-1.0

Raiz

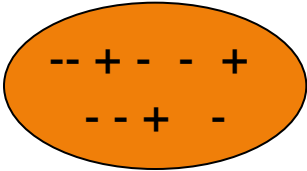


Raíz fina penetra los agregados y toma la solución del suelo

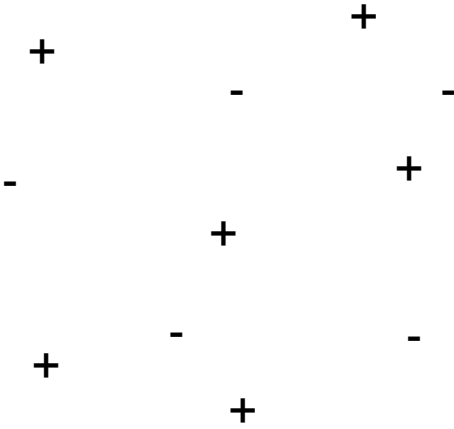
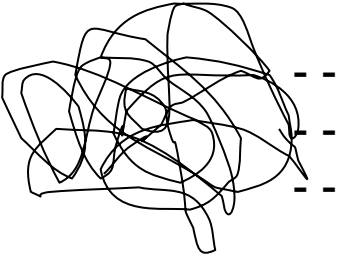
Solución del suelo



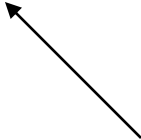
Arcillas
y
Oxidos



Humus



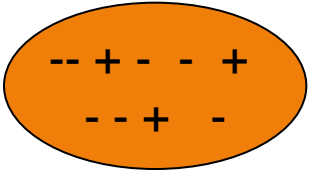
Iones disueltos



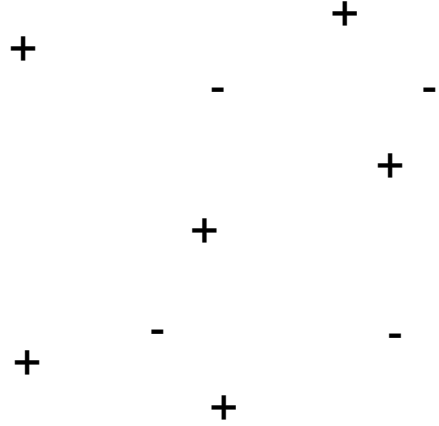
Solución del suelo



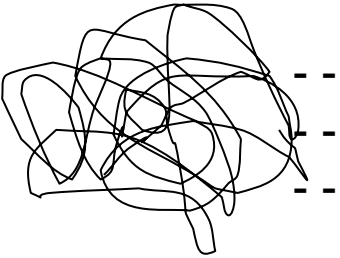
Arcillas
y
Oxidos



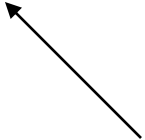
Adsorción



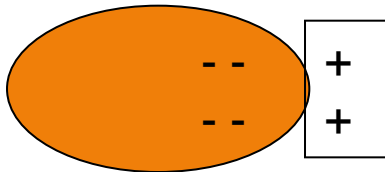
Humus



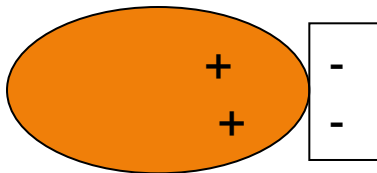
Iones disueltos



Adsorción de cationes y aniones sobre las superficies cargadas del suelo



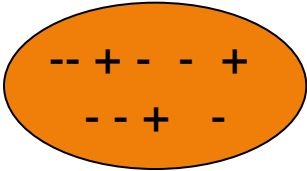
Cationes y aniones son retenidos



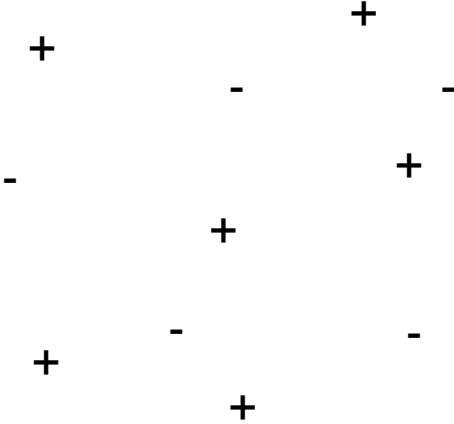
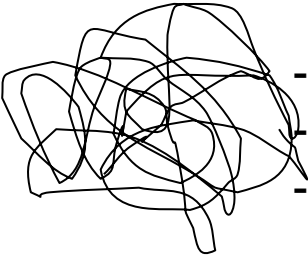
Solución del suelo



Arcillas
y
Oxidos



Humus



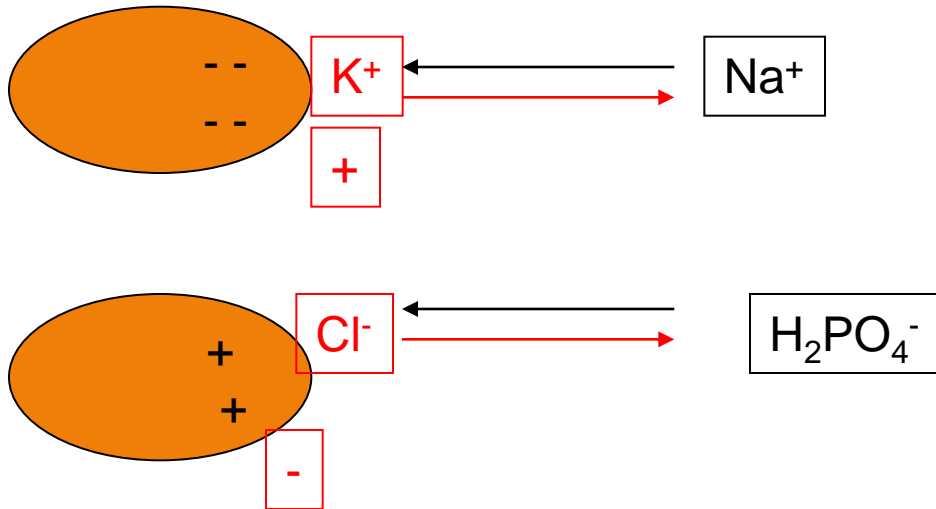
intercambio

Iones retenidos

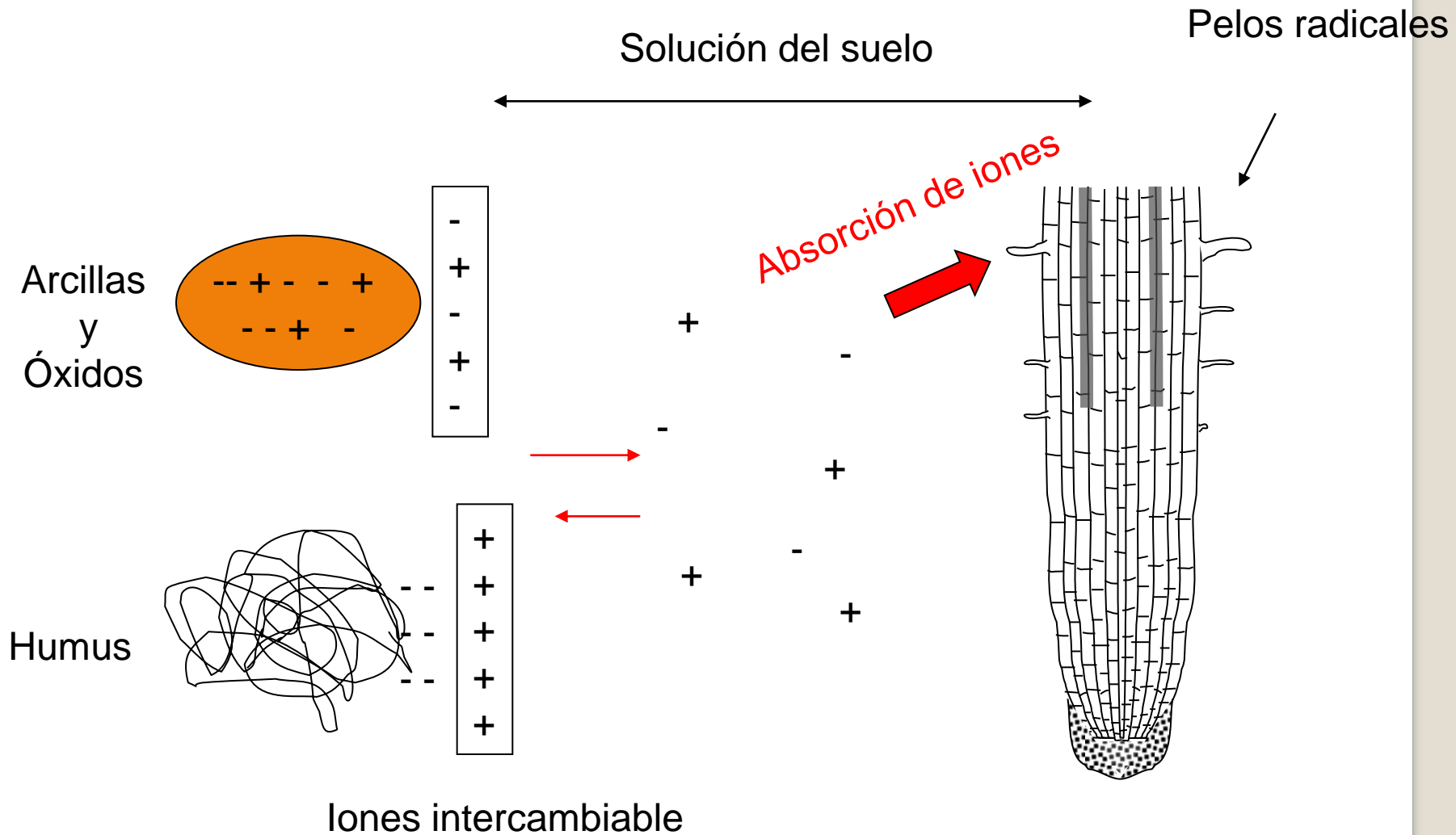


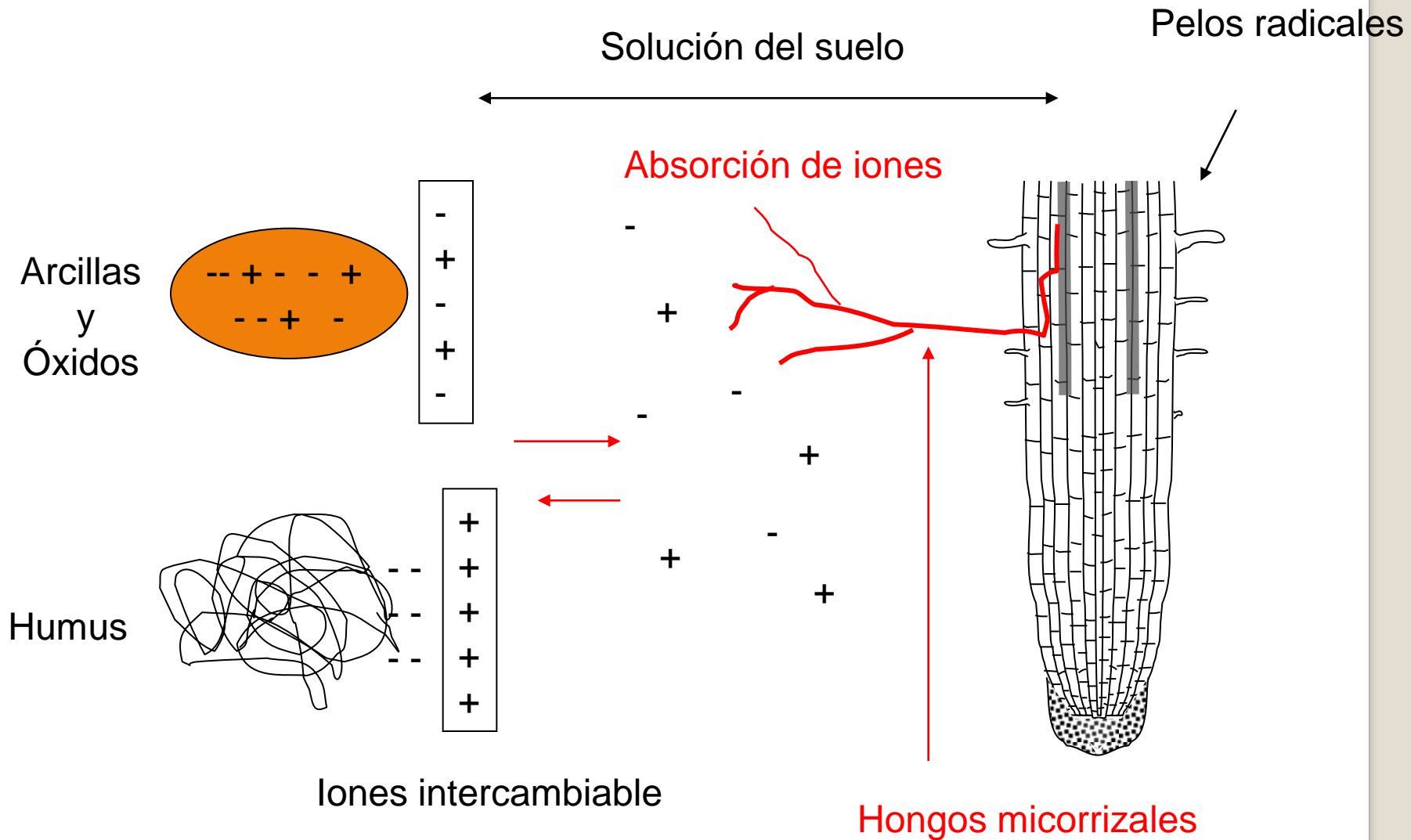
Iones disueltos

Intercambio iónico



Iones intercambiables





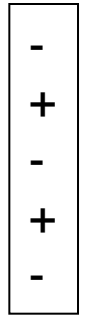
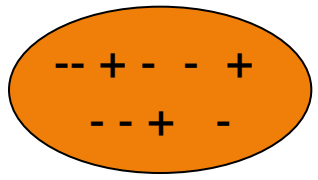
Materia orgánica fresca

Descomposición microbial

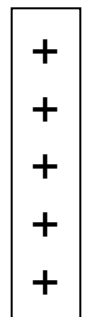
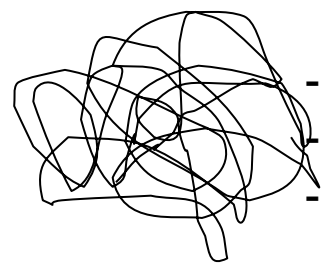
Solución del suelo

Pelos radicales

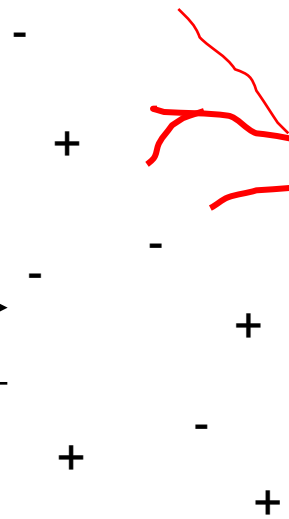
Arcillas y Óxidos



Humus



Absorción de iones



Iones intercambiable

Hongos micorrizales

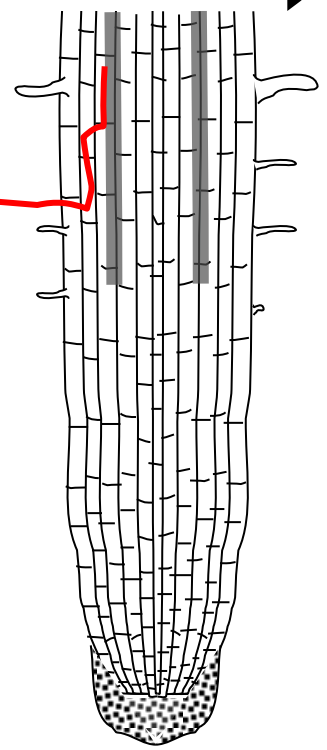
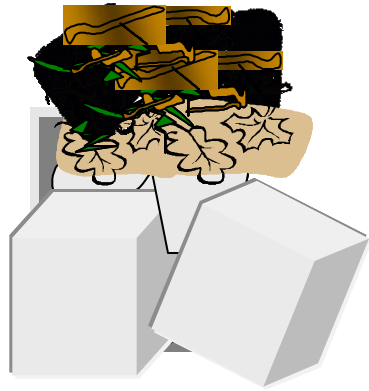
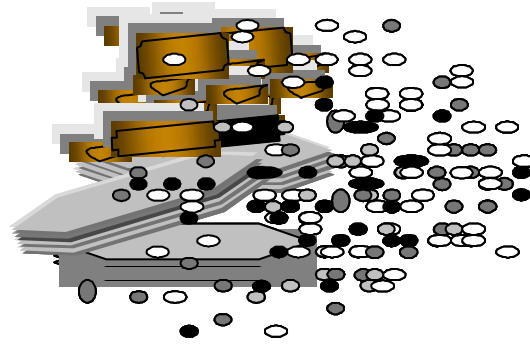


Figura 2.1. Disponibilidad relativa de elementos nutritivos en diferentes fracciones del suelo.



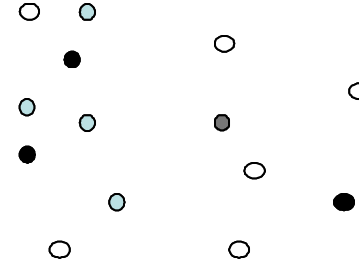
Minerales primarios y residuos orgánicos frescos que contienen en su estructura nutrientes *no-disponibles*

Análogo a inversiones en bienes inmuebles



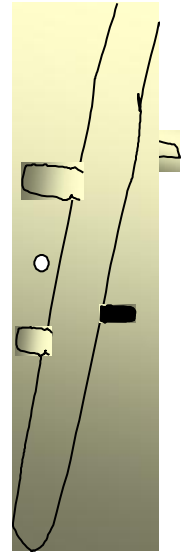
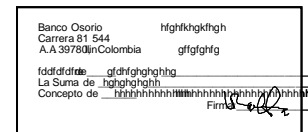
Arcillas y humus que contienen en su estructura nutrientes *lentamente disponibles*

Análogo a inversiones en CDT y Bonos



Nutrientes intercambiables *moderadamente disponibles*

Análogo a una cuenta de ahorros



Nutrientes en la solución del suelo *Inmediatamente disponibles*

Análogo al dinero en el bolsillo



- Mecanismos por los cuales los nutrientes **pasan** de la matriz sólida a la solución del suelo.
- La fase sólida es el **reservorio** final de los nutrientes en el suelo, el paso de estos a la solución del suelo está mediado por la ocurrencia de reacciones de

Movilidad de nutrientes entre las fases sólida y líquida

(i) intercambio iónico para aquellos nutrientes retenidos electroestáticamente en la superficie de arcillas y humus (Ca^{2+} , Mg^{2+} , H_2PO_4^- y NO_3^-),

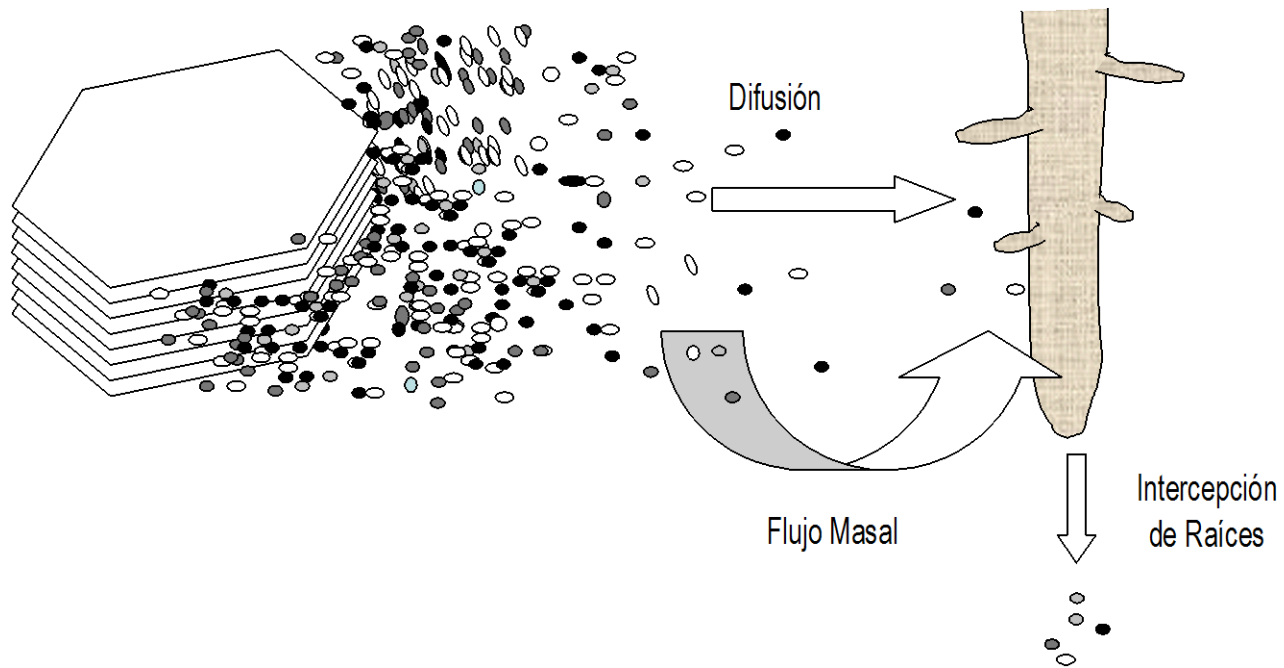
(ii) desorción de nutrientes adsorbidos sobre las arcillas (H_2PO_4^-),

(iii) disolución de sales precipitadas ($\text{CaSO}_4 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$),

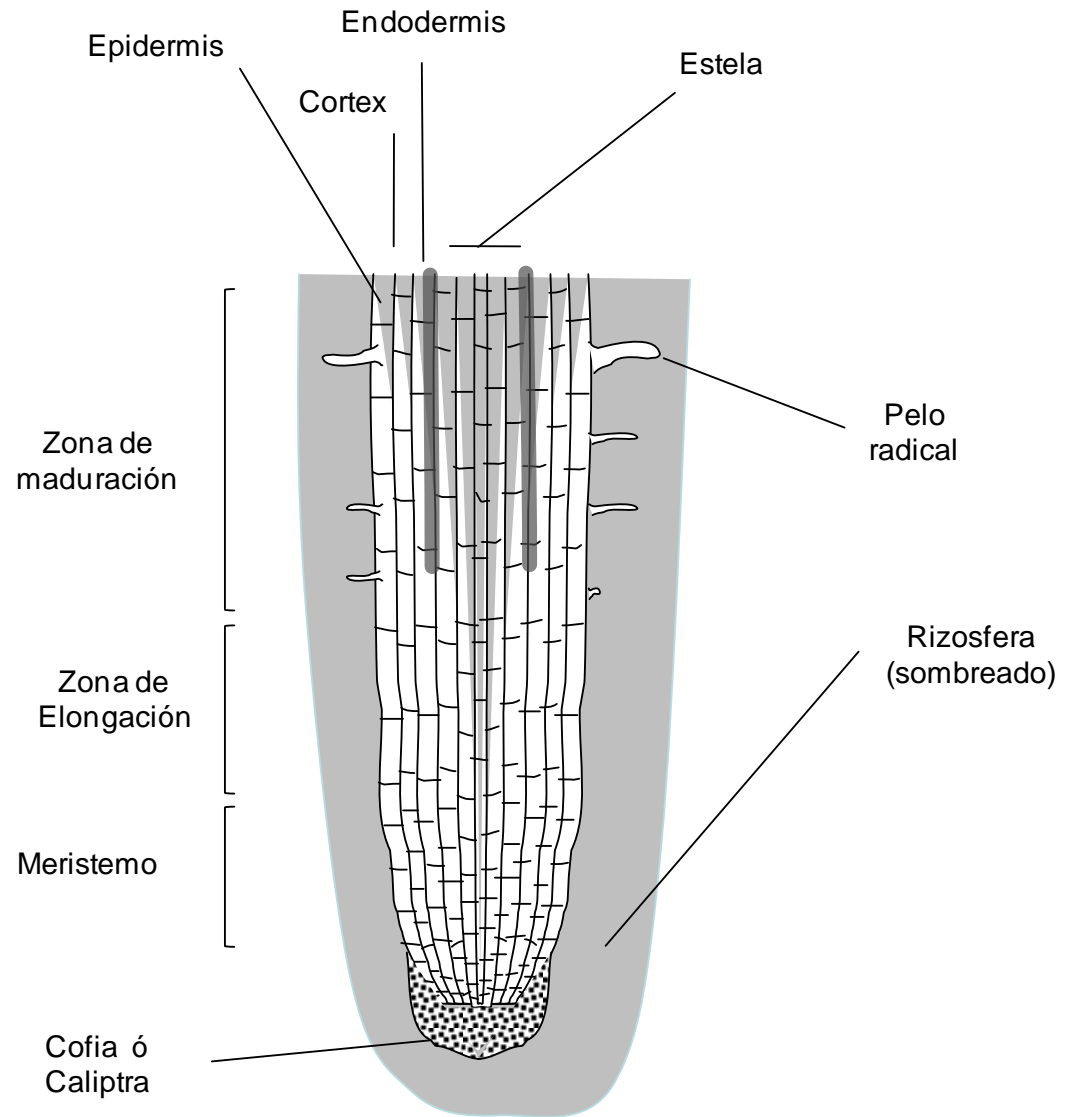
(iv) mineralización de residuos orgánicos (NH_4^+), y

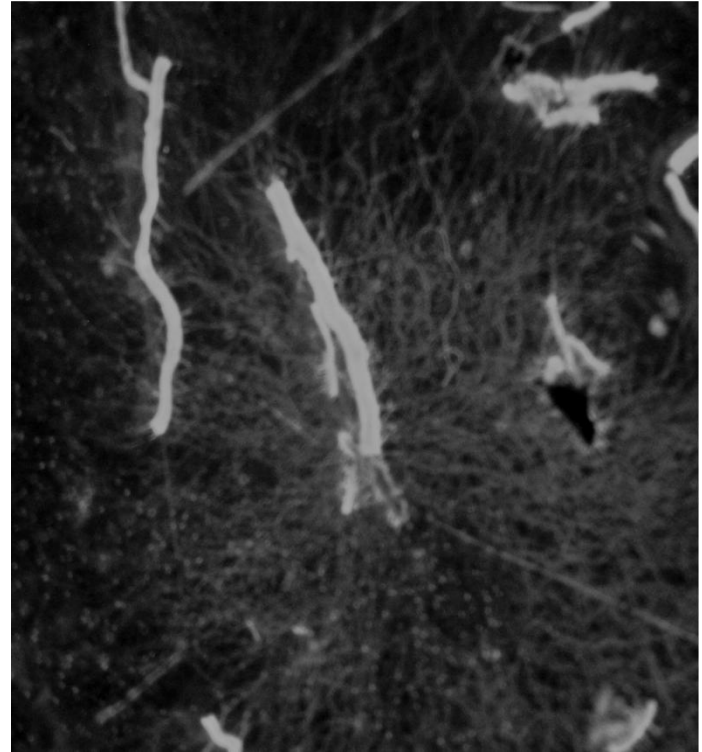
(v) formación de complejos solubles órgano-metálicos en los que se quelatan nutrientes (EDTA-Cu^{2+}).

Movilidad de los nutrientes en la solución del suelo

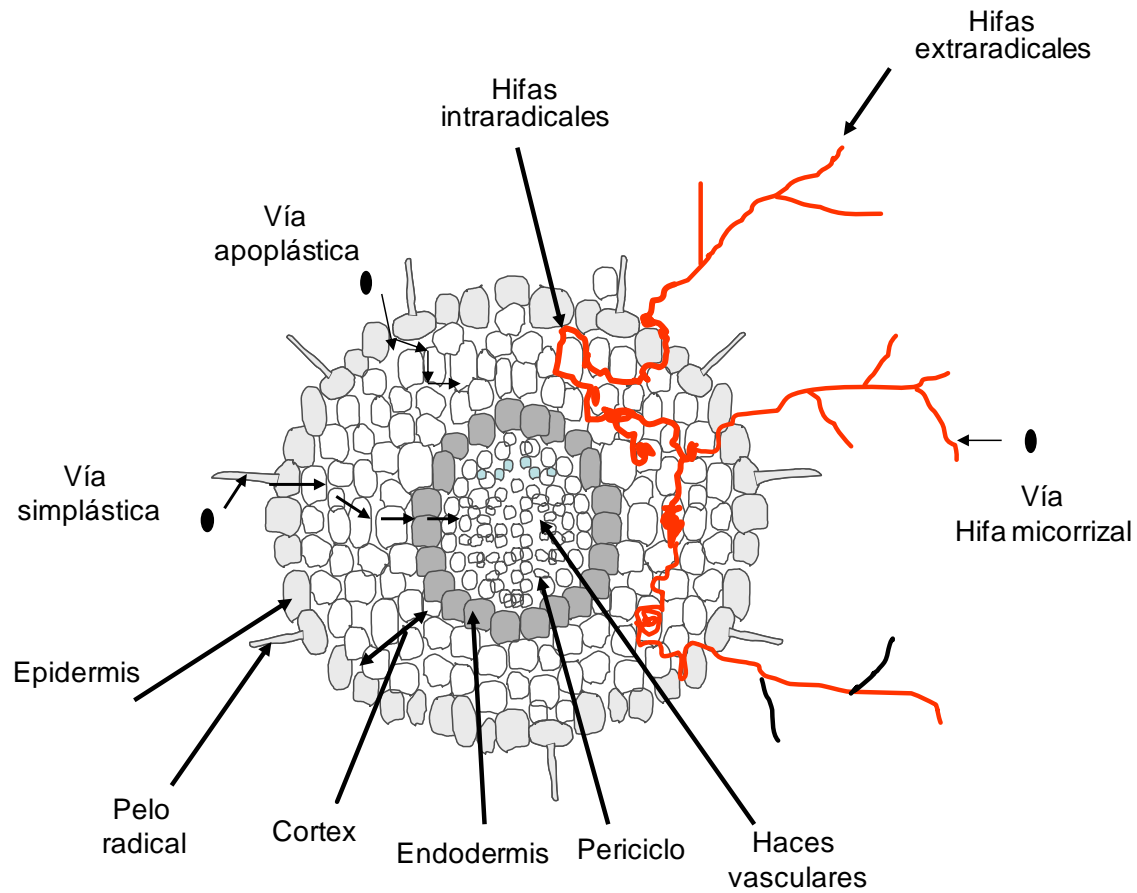


Anatomía de la raíz

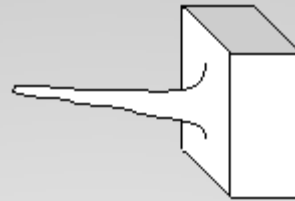




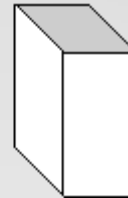
Simplasto y Apoplasto

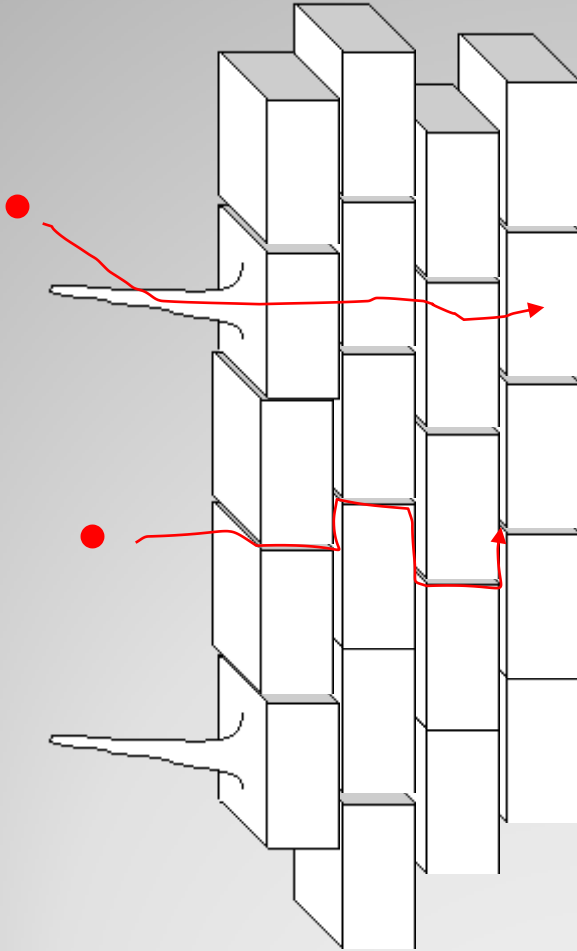


Célula epidermal modificada,
llamada pelo radical



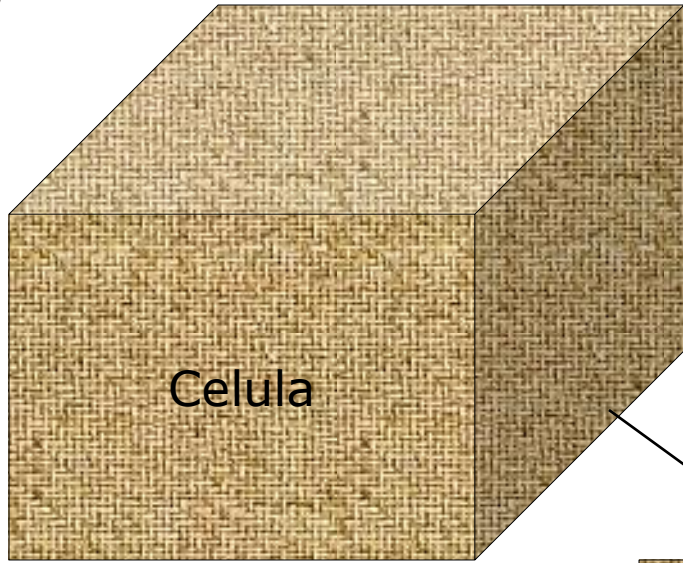
Célula epidermal normal



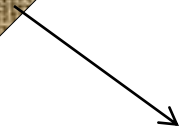


Ruta simplástica

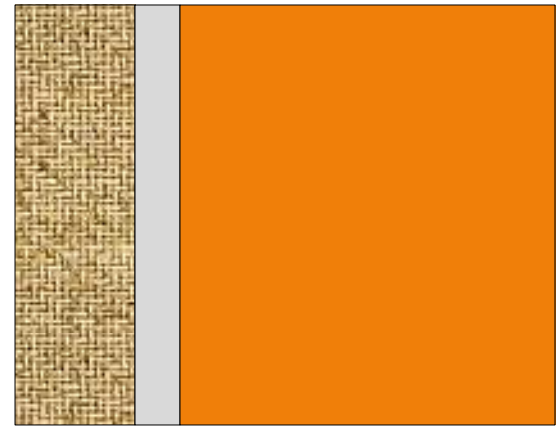
Ruta apoplástica



Celula



Solución
Externa
(sin del suelo)



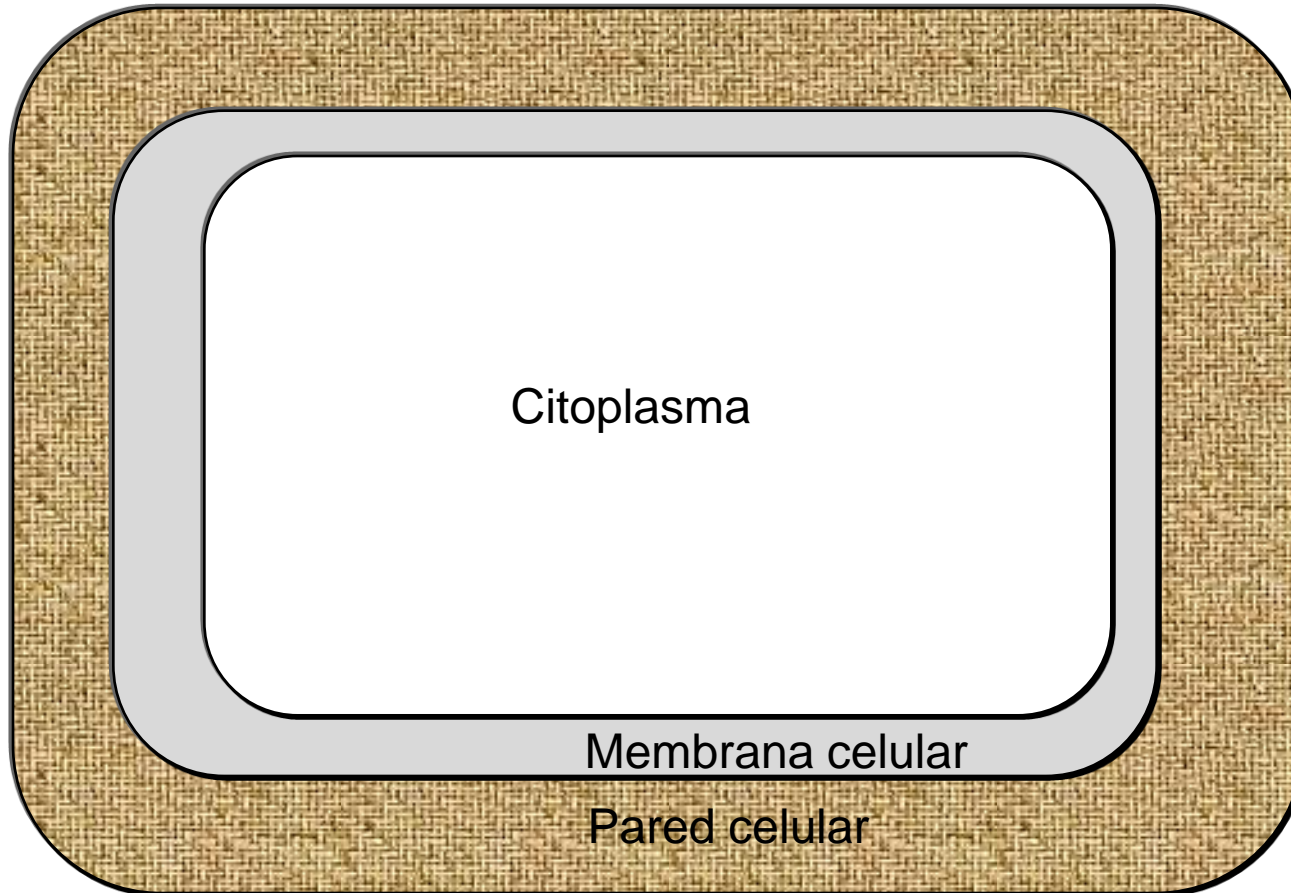
↑
Pared
celular

↑
Membrana
celular

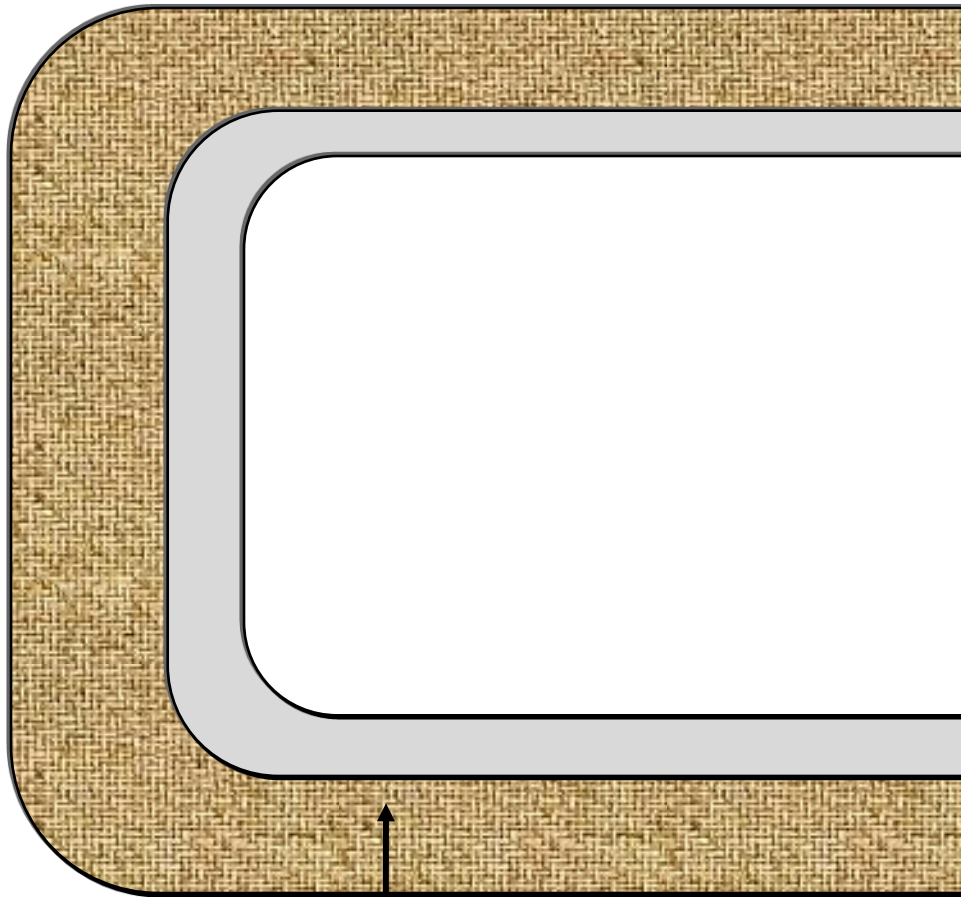
↑
Citoplasma

Solución del suelo

(cationes, aniones; en la rizosfera compuestos carbonaceos)



Pared Celular



↕ Espesor: 1-2 μm

Composición:

Celulosa, hemicelulosa,
sustancias pecticas,
proteinas (extensinas),

Grupos $-\text{COO}^{(-)}$

Fibras de celulosa (4-8 nm)
entrelazadas que forman
poros de 3.5-5.2 nm de
diámetro

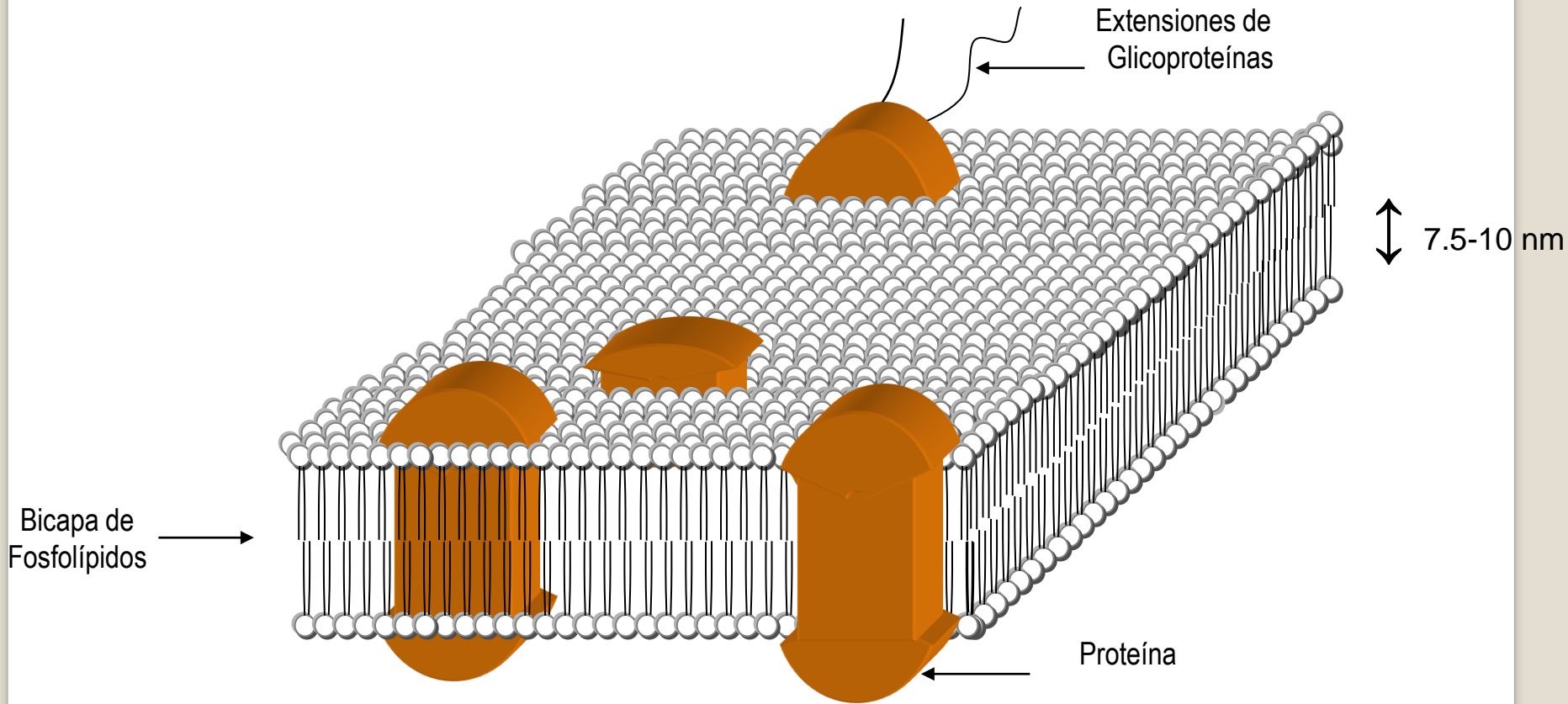
La solución del suelo
puede fluir libremente por
los poros de la PC hasta
llegar a la Membrana
Celular

Radio (nm) del H_2O = 0.3; Ca= 0.96; Mg= 1.08; K= 0.53; NH_4 = 0.56; Na= 0.79; glucosa 1.0 nm

- Paso de nutrientes hacia el citoplasma a través de la membrana celular

Absorción de nutrientes

Solución de suelo



Citoplasma

- Difusión de nutriente a través de un gradiente de concentración

Mayor

Concentración

Concentración

Menor



Absorción

- Difusión de nutriente a través de un gradiente de concentración

Mayor

Concentración

Concentración

Menor



Absorción

- Difusión de nutriente a través de un gradiente de concentración



Rango de concentración de algunos nutrientes en la solución del suelo.

Nutriente	Concentración solución (mM)	Citoplasma microbial (mM)
NO_3^-	0.1-5.0	50-100
NH_4^+	0.1-1.0	50-100
H_2PO_4^- y HPO_4^{2-}	0.001-0.05	0.1-0.5
K^+	0.1-1.0	100-200
Ca^{2+}	0.1-5.0	100-200
Mg^{2+}	0.1-2.5	100-200
SO_4^{2-}	0.1-1.0	0.1-0.5

- Química: diferencia de concentración
- Eléctrica: diferencia de potencial eléctrico

Potencial electroquímico

$$\Delta\mu_n = \mu_n^* + RT \ln (C_1/C_2)$$

μ^* = potencial químico de n en el estado estándar

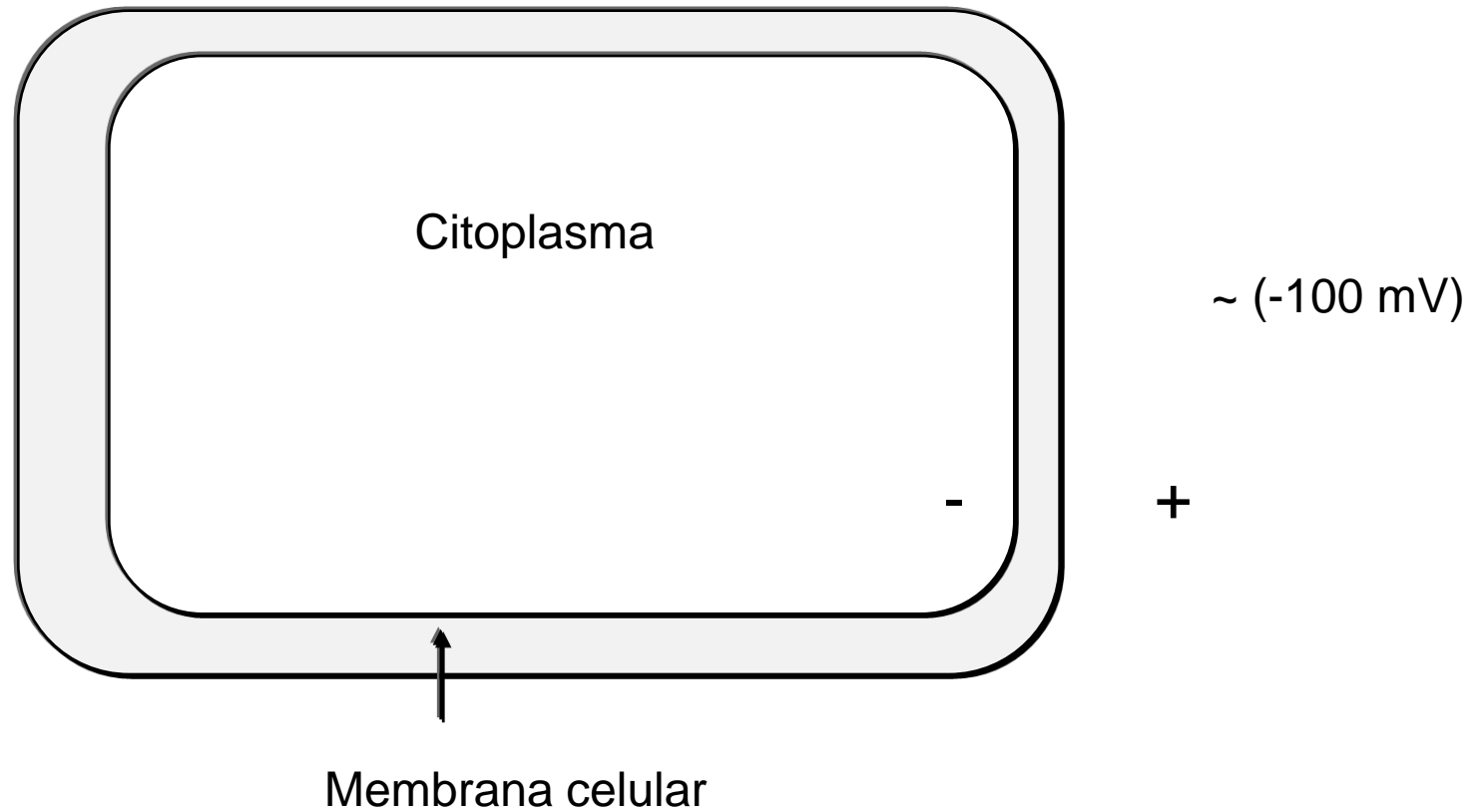
R = constante de la ecuación general de los gases (8.31 J K⁻¹ mol⁻¹)

T = temperatura absoluta (K)

Cuando $C_1 > C_2$, el soluto i se moverá desde el punto 1 hacia el punto 2, y viceversa.

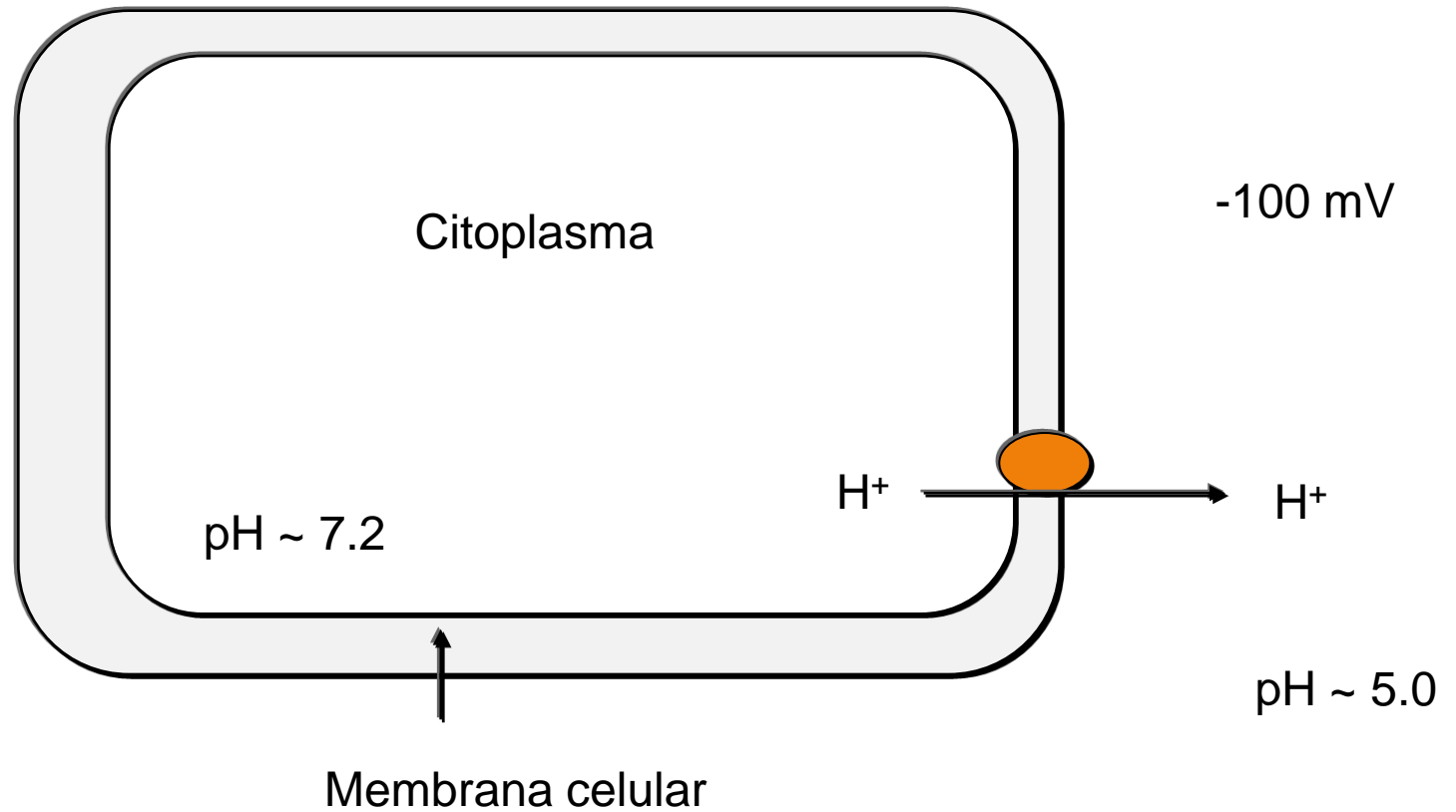
Solución del suelo

(cationes, aniones; en la rizosfera compuestos carbonaceos)



Solución del suelo

(cationes, aniones; en la rizosfera compuestos carbonaceos)



$$\bar{\mu}_n = \bar{\mu}_n^* + RT \ln C_n + z_n F \Psi$$

Donde,

$\bar{\mu}^*$ = potencial electroquímico de n en el estado estándar

z = carga eléctrica del ión (+1 para K^+ , -1 para Cl^-)

F = constante de Faraday ($96.5 \text{ J mol}^{-1} \text{ mV}^{-1}$)

Ψ = potencial eléctrico, medido en mV

La diferencia de potencial electroquímico entre el exterior (e) y el interior (i) de la membrana, permite predecir la dirección del movimiento del ión n (nutriente):

$$\bar{\mu} = \bar{\mu}_n^* + RT \ln C_{ne} + z_n F \Psi_e \quad (\text{Exterior})$$

$$\bar{\mu} = \bar{\mu}_n^* + RT \ln C_{ni} + z_n F \Psi_i \quad (\text{Interior})$$

Si $\bar{\mu}_e > \bar{\mu}_i$, entonces el nutriente entrará al citoplasma. Si $\bar{\mu}_e < \bar{\mu}_i$, entonces el nutriente saldrá del citoplasma. Si $\bar{\mu}_e = \bar{\mu}_i$ ($\Delta\bar{\mu} = 0$), entonces no habrá flujo en ninguna dirección ya que no habrá fuerza que mueva el nutriente:

