

FERTILIDAD DE SUELOS Y NUTRICIÓN MINERAL

- El primer paso fue reconocer que el crecimiento de las plantas depende de la disponibilidad de nutrientes
- Dentro de los componentes de las plantas podemos distinguir entre elementos constitutivos como C, H y O, cuya disponibilidad no es manejable, y nutrientes
- Los nutrientes son elementos obtenidos por las plantas, generalmente del suelo

DEFINICIONES

- **FÉRTIL:** Capaz de producir en forma abundante, fructífero, prolífico
- **FERTILIDAD DE SUELOS:** Es el estado del suelo con respecto a su habilidad para suministrar nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal
- **NUTRIENTE DISPONIBLE:** Nutriente en condiciones de ser absorbido (nutriente asimilable)
- **EVALUACIÓN DE LA FERTILIDAD:** Determinación de la capacidad del suelo para suministrar nutrientes esenciales a las plantas
- **MANEJO DE LA FERTILIDAD:** Medios prácticos que permiten mantener o mejorar la habilidad del suelo de aportar nutrientes a las plantas, conservando la calidad del suelo y del ambiente

NECESIDADES DE NUTRIENTES: NUTRIENTES ESENCIALES

Un nutriente es esencial para la planta cuando:

- Sin el nutriente la planta no puede completar su ciclo de vida
- Su deficiencia puede ser corregida solamente con el agregado de ese nutriente

Son nutrientes esenciales:

N, P, K, Ca, Mg, S (Macronutrientes)

Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, B, Cl (Ni) (Micronutrientes)

Se consideran nutrientes beneficiosos:

Na, Si, Co, Al, Va (otros para algunas plantas)

OTRA CLASIFICACIÓN DE NUTRIENTES

- **Se consideran macronutrientes primarios:
N P K**
- **Son macronutrientes secundarios:
Ca, Mg, S, (Na)**

Esta clasificación se basa no tanto en las cantidades necesarias, sino en las posibilidades de que los nutrientes sean deficitarios

FUNCIONES DE LOS NUTRIENTES EN LAS PLANTAS

Bibliografía recomendada:

- **Mineral nutrition of higher plants. Marschner, H. 2003 (Disponible en Biblioteca)**
- **El material correspondiente a la dinámica de cada nutriente durante el curso de Fertilidad de Suelos**

NECESIDADES Y EXCESOS DE NUTRIENTES

- **La necesidad de nutrientes es diferente en los diferentes cultivos, en tanto que la disponibilidad de nutrientes es diferente en los diferentes suelos**
- **Cada situación suelo-cultivo es única y debemos contar con conocimientos sobre ambos para evaluar la adecuación de lo disponible a lo requerido**
- **No hay relación directa entre los nutrientes que contiene una planta y los que necesita. En muchos casos se absorbe nutriente en exceso, y en otros la planta sobrevive aunque el nutriente sea deficitario**
- **La absorción de cantidades excesivas de nutrientes es muchas veces perjudicial para las plantas**

LLEGADA DE NUTRIENTES A LAS RAÍCES

BIBLIOGRAFÍA

- **Nutrición Catiónica. Dpto. de Suelos y Aguas. Facultad de Agronomía- Montevideo – Uruguay**
- **Mineral nutrition of higher plants. Capítulo 13. Nutrient availability in soils. Marschner, H. 2003**

ABSORCIÓN DE NUTRIENTES

- Para que un nutriente pueda ser absorbido por las raíces de las plantas debe encontrarse disuelto en la solución del suelo
- Generalmente las plantas absorben formas minerales iónicas de los nutrientes
- En algunos casos pueden absorber moléculas orgánicas simples pero en general son procesos minoritarios respecto a los anteriores

CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES EN LA SOLUCIÓN DEL SUELO

- La concentración de nutrientes en la solución del suelo es generalmente baja.
- Hay grandes diferencias entre suelos
- Existen importantes diferencias de concentración entre nutrientes y sus formas
- Se trata de un sistema dinámico donde continuamente las plantas están retirando nutrientes, mientras los sólidos minerales y la MO del suelo están liberando nutrientes

-----concentración μM -----								
K	Ca	Mg	N-NH ₄	N-NO ₃	S-SO ₄	P-PO ₄	Zn	Mn
510	1650	490	48	3100	590	1.5	0.48	0.002

Concentración promedio de nutrientes en la solución en la capa arable (0-20 cm) de un suelo agrícola (pH 7.7)

Adaptado de Peters, 1990

MECANISMOS DE LLEGADA DE NUTRIENTES A LAS RAÍCES

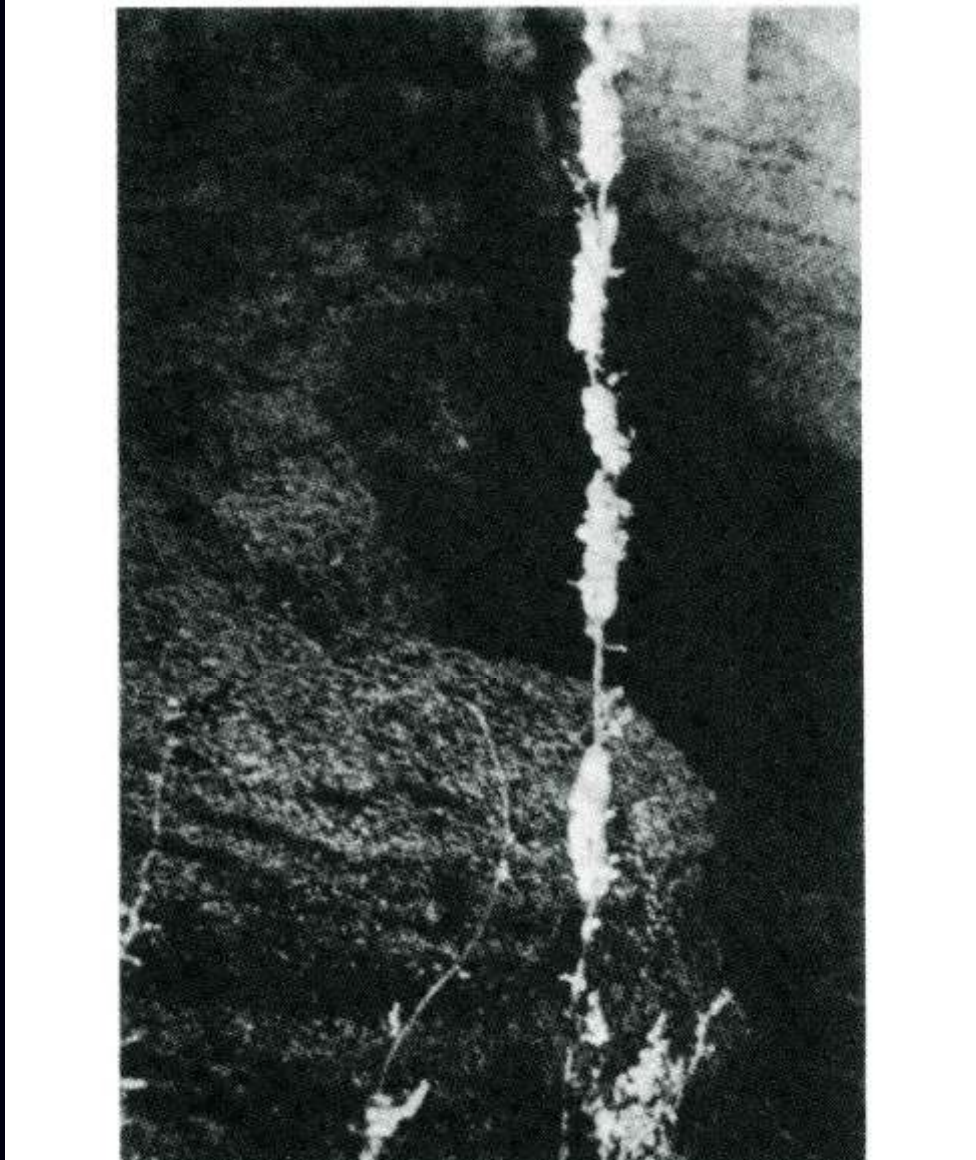
- **Intercepción radicular**
- **Flujo masal**
- **Difusión**

INTERCEPCIÓN RADICULAR

- Las raíces al crecer van explorando porciones de suelo nuevas y pueden absorber los nutrientes que interceptan
- La cantidad de nutriente potencialmente absorbida depende del volumen radicular, pero es muy pequeña en todos los casos, dado que el volumen radicular generalmente es alrededor de 1% del volumen del suelo explorado
- Para que este mecanismo sea eficiente, la cantidad de nutriente requerida debe ser muy pequeña (algunos micronutrientes en algunos suelos) o la cantidad de nutriente disponible en el suelo debe ser muy alta (Ca en algunos suelos)

FLUJO DE MASA

- Flujo convectivo de nutrientes disueltos en la solución del suelo. Los nutrientes se mueven con el agua
- La fuerza motriz es la transpiración de la planta
- Los nutrientes son transportados hacia las raíces pero no dentro de las raíces
- La cantidad de nutriente transportada por flujo masal es el resultado del volumen de solución (V_0) multiplicado por la concentración del nutriente en la solución (C_L)
$$FM = V_0 * C_L$$
- Para que este mecanismo sea eficiente, la cantidad de nutriente requerida debe ser pequeña o la conc. del nutriente en la solución debe ser muy alta. El, Mg, el N como NO_3^- y el S como SO_4^{2-} se absorben mayoritariamente por este mecanismo



**Acumulacion de carbonato de Ca
alrededor de una raíz de achicoria
creciendo en un suelo arenoso**

Barber, 1974

**El flujo de masa
implica que los
nutrientes se
mueven con el agua
hacia las raíces de
las plantas**

**Una vez que llegan
a la superficie
puede ocurrir que la
planta absorba el
agua pero no los
nutrientes, los
cuales se acumulan
y pueden precipitar**

Cuadro 1. Importancia relativa de los principales mecanismos de llegada de iones a las raíces

Nutriente	Requerimiento (kg/ha)	Porcentaje de los requerimientos aportado por:		
		Intercepción radicular	Flujo de agua	Difusión
Nitrógeno	190	1	99	0
Fósforo	40	3	6	91
Potasio	196	2	20	78
Calcio	40	171	429	0
Magnesio	45	38	250	0
Azufre	22	5	95	0
Cobre	0.1	10	400	0
Zinc	0.3	33	33	33
Boro	0.2	10	350	0
Hierro	2.1	11	53	36
Manganeso	0.3	33	133	0
Molibdeno	0.01	10	200	0

Adaptado de Tisdale, 1993

DIFUSIÓN

- Difusión de nutrientes a través de gradientes de concentración en la solución del suelo. Es causada por una zona de empobrecimiento inducida por la absorción de nutrientes cerca de la superficie radicular.
- La difusión es un proceso por el cual partículas de un líquido (iones, moléculas) se mezclan sin fuerzas externas. La causa es la agitación térmica de las moléculas (movimiento Browniano) que resulta en un movimiento aleatorio de partículas.
- Cuando existe un gradiente de concentración hay un movimiento mayor desde la zona de alta a la zona de baja concentración.

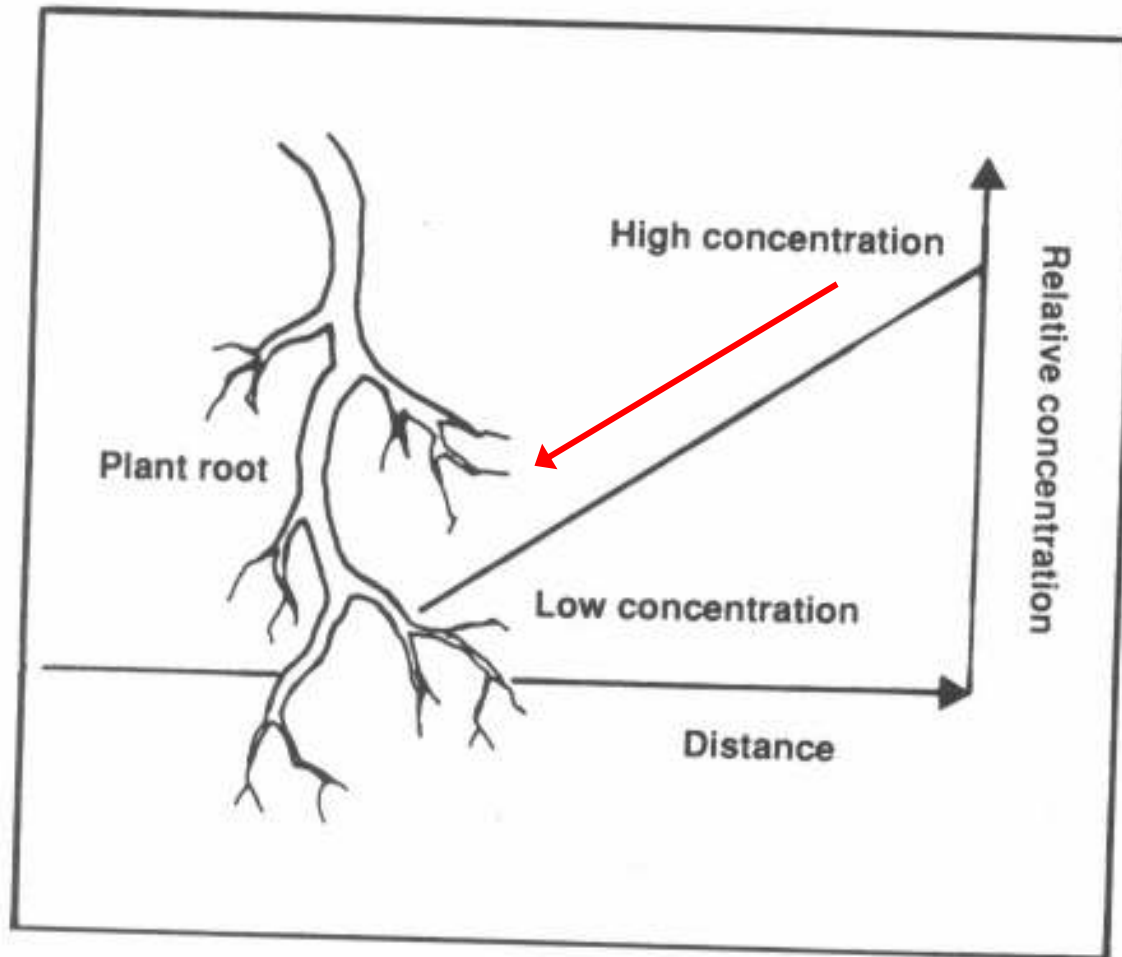
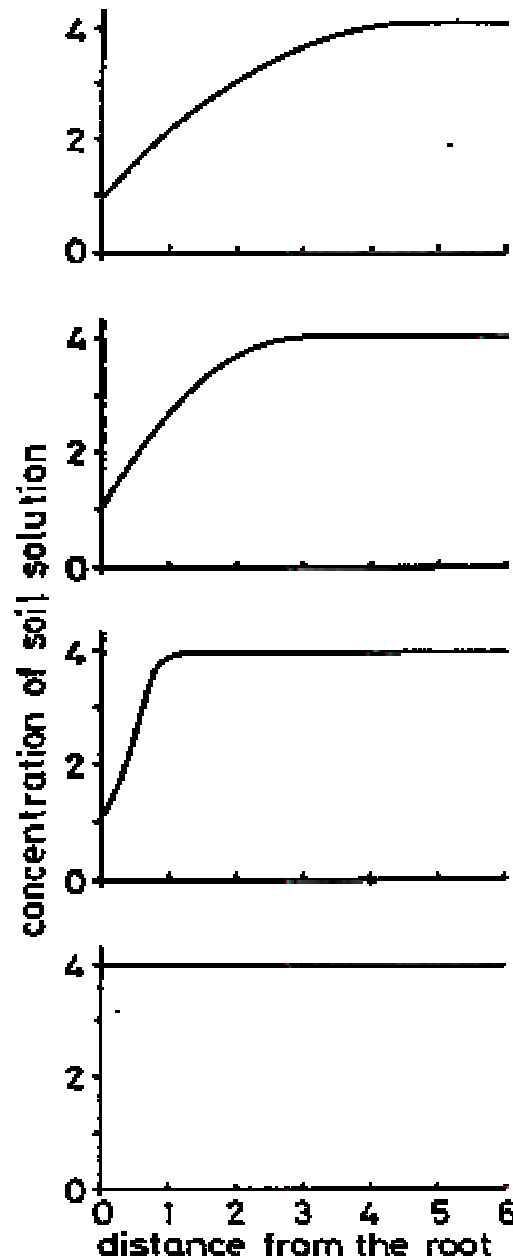
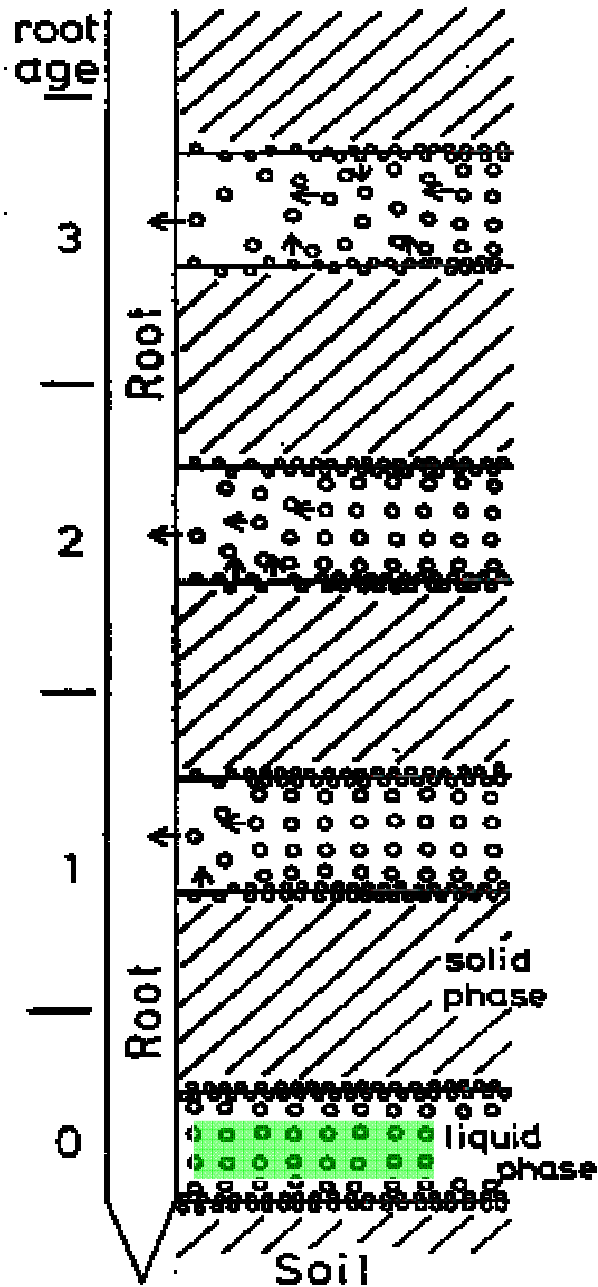


Figure 13.6: Nutrient concentration gradient around a plant root.

Esquema de la difusión que muestra el gradiente de concentración de un nutriente en la solución del suelo

MacLaren y Cameron, 1996



Esquema de la difusión de un nutriente desde la solución del suelo hacia la raíz de una planta (izquierda)

Concentración del nutriente en la solución del suelo a medida que se aleja de la raíz (derecha)

DIFUSIÓN

- La difusión puede ser descrita por la ley de Fick, (1855).
- $dC/dt = - D A dC/dX$
- dC/dt = Tasa de difusión (cambio de concentración con el tiempo)
- dC/dX = Gradiente de concentración (cambio de concentración con la distancia)
- A = área de sección transversal a través de la cual difunde el ión
- D = Coeficiente de difusión

El signo negativo indica que el flujo se produce de la zona de mayor a la de menor concentración

DIFUSION EFECTIVA EN EL SUELO

- La difusión en el suelo es diferente para cada nutriente.
- El coeficiente de difusión varía con el contenido de agua, con la tortuosidad y capacidad buffer del suelo para cada nutriente.
- $D_e = D_w \theta f (1/b)$

Donde:

D_e = Coeficiente de difusión efectiva

D_w = Coeficiente de difusión en agua

θ = Contenido volumétrico de agua

f = Impedancia, $1/T$ (tortuosidad)

b = Capacidad buffer del suelo

D_w

Table 2.2 (a) Ionic diffusion coefficients at 25 °C in infinitely dilute solution, and (b) effect of concentration on diffusion coefficient of sodium chloride (Parsons, 1959)

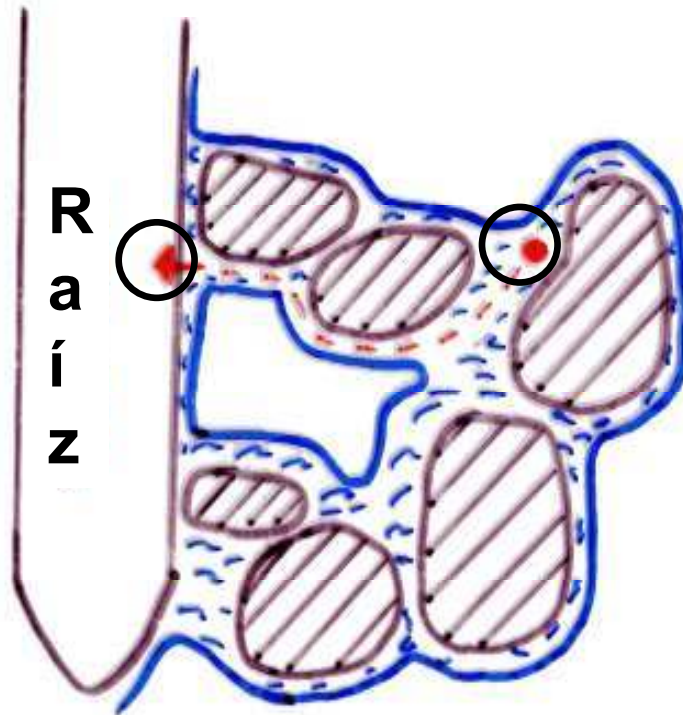
	(a)	(b)	
	$D \times 10^5 \text{ (cm}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$	$D \times 10^5 \text{ (cm}^2 \text{ s}^{-1}\text{) (Na}^+\text{)}$	
Na ⁺	1.35	0.005 M NaCl	1.32
K ⁺	1.98	0.05 M NaCl	1.30
Ca ²⁺	0.78	0.20 M NaCl	1.32
Cl ⁻	2.03	1.0 M NaCl	1.25
NO ₃ ⁻	1.92		
H ₂ PO ₄ ⁻	0.87		
SO ₄ ²⁻	1.08		

$$D_e = D_w \theta f (1/b)$$

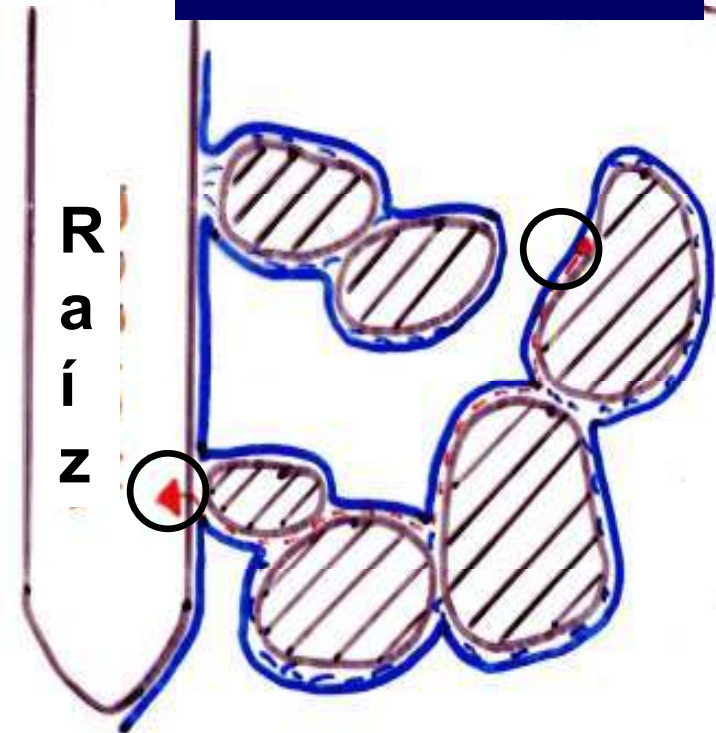
- Los coeficientes de difusión en líquido no difieren mucho entre nutrientes . En consecuencia la diferencia entre nutrientes en cuanto a difusión se debe a su dinámica en el suelo
- Los coeficientes de difusión en líquido aumentan con la temperatura

TORTUOSIDAD

Suelo húmedo



Suelo seco



Esquema mostrando el efecto de la humedad de suelo sobre la tortuosidad del camino a recorrer por el nutriente en solución
Adaptado de Claassen, 2006

FACTOR DE IMPEDANCIA (f)

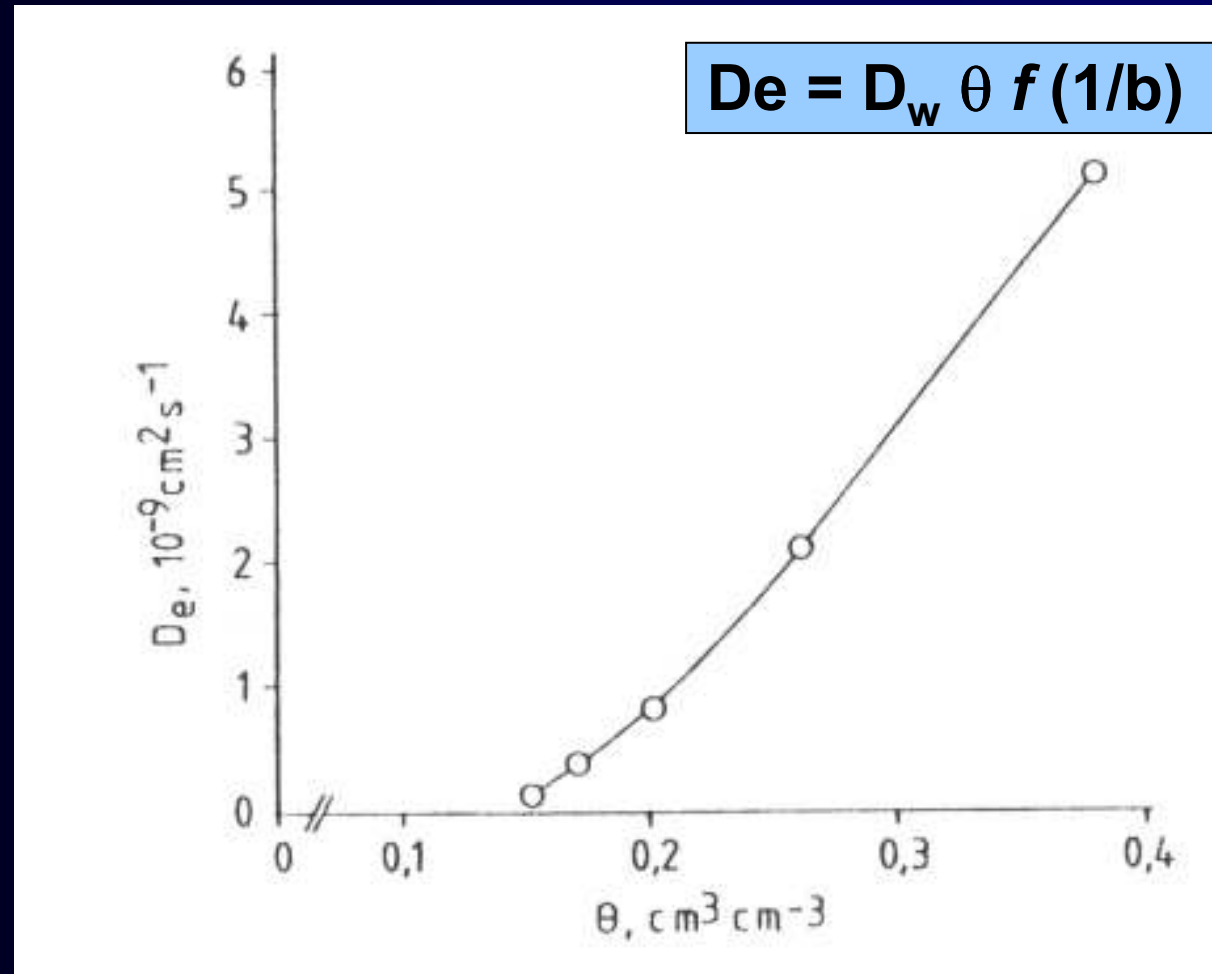
- El agua forma una capa que cubre las superficies de los sólidos del suelo
- Cuando los iones difunden en el suelo, el camino efectivo es más largo que la línea recta
- Para cuantificar esta propiedad se usa el factor de impedancia f . Este factor se relaciona a la tortuosidad: $f=1/T$

$$f = (L/Le)^2$$

Donde L es la longitud en línea recta y Le es la distancia efectiva de difusión

- Cuando el contenido de agua aumenta, el camino se hace más recto y aumenta f
- Este hecho hace que el contenido de agua del suelo sea el factor que más influye en la difusión (directamente y por medio de f)

EFFECTO DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO SOBRE LA DIFUSIÓN

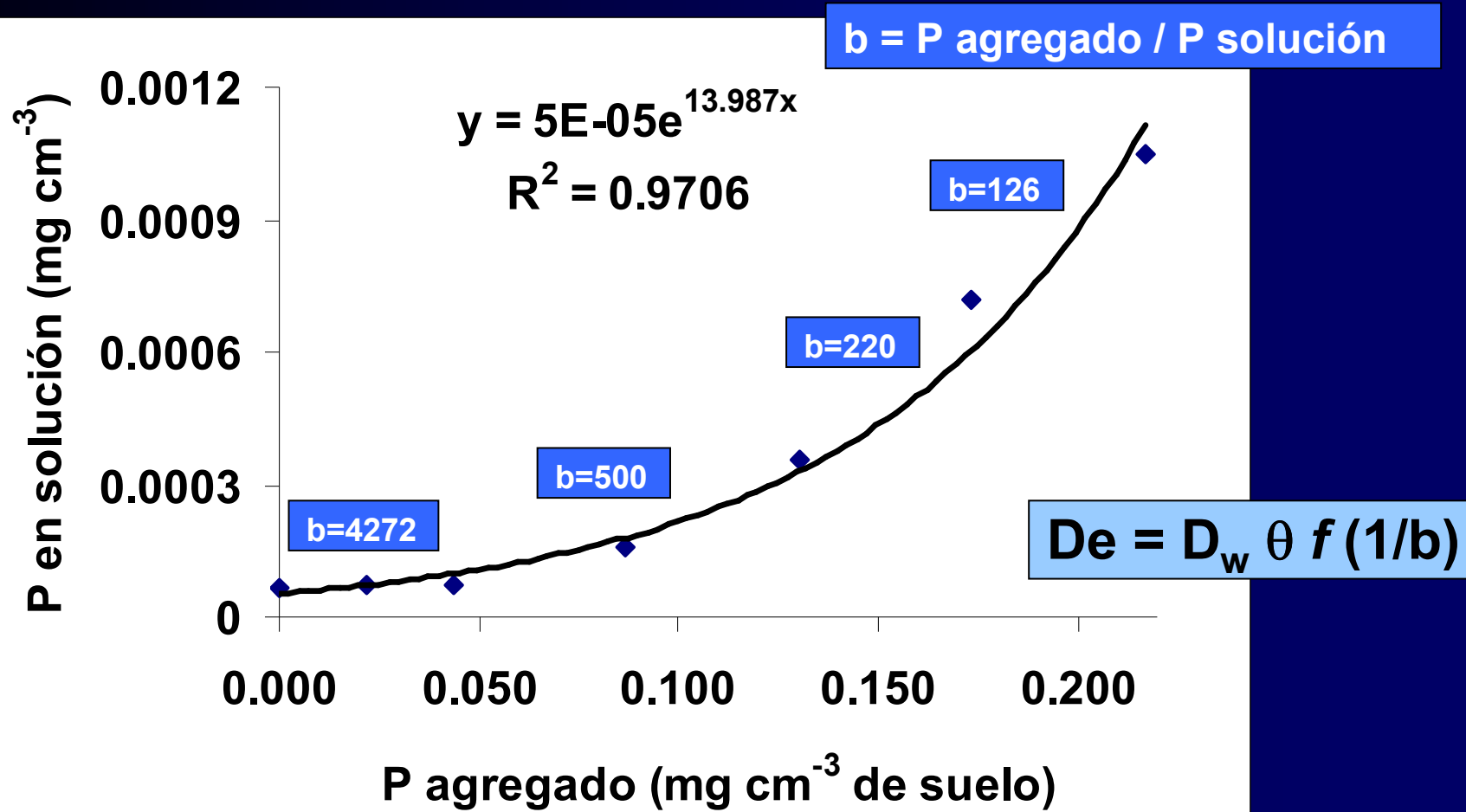


Coeficiente de difusión efectiva de P en función de contenido de agua de un Luvisol

Bhadoria, 1991

CAPACIDAD BUFFER PARA LOS NUTRIENTES EN EL SUELO

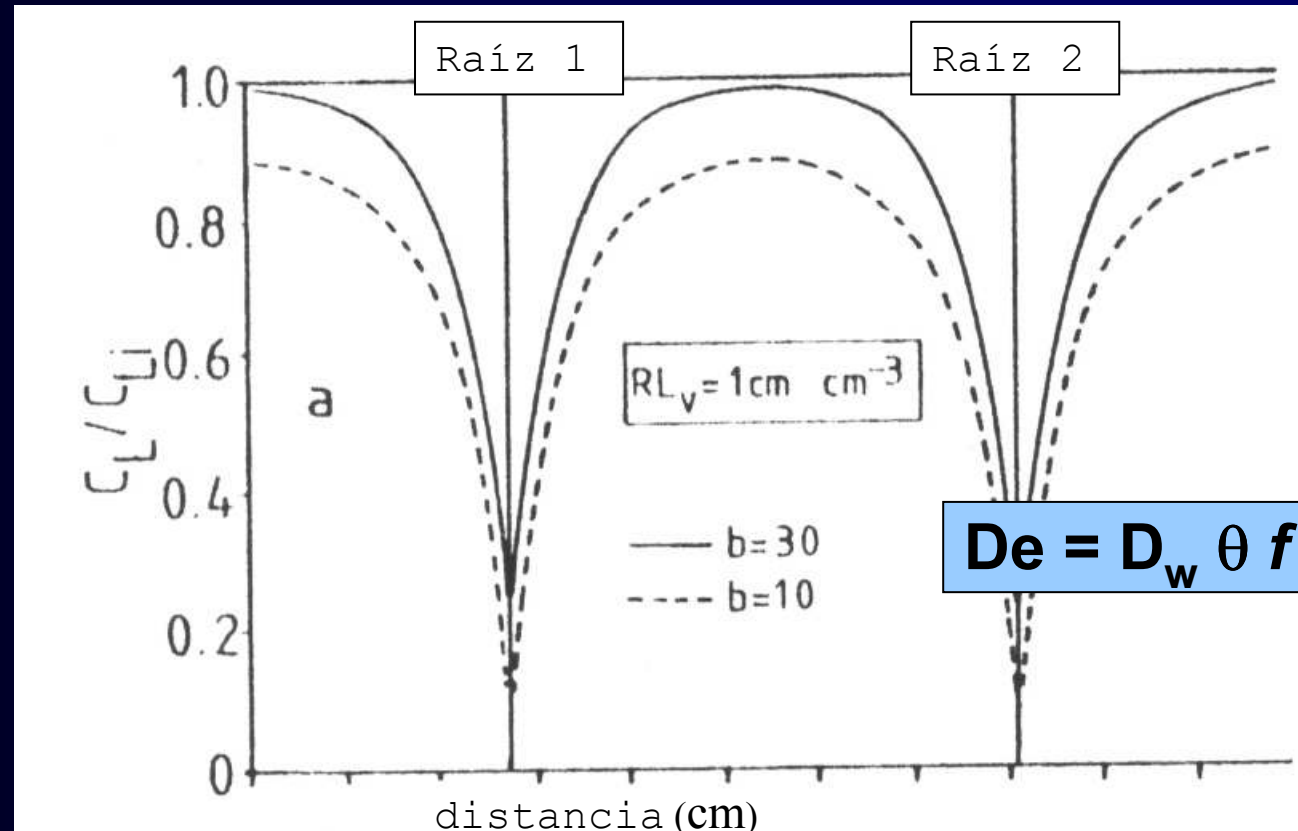
- **Capacidad buffer es definida como un cambio en el factor cantidad de un nutriente dividida por el cambio en el factor intensidad de ese nutriente.**
- **Factor intensidad es la concentración del nutriente en la solución del suelo**
- **Factor cantidad es la suma de la cantidad del nutriente en la solución + nutriente disponible (difusible) de la fase sólida.**
- **La capacidad buffer implica que se requiere una gran absorción del nutriente para decrecer significativamente el factor intensidad. Esto ocurre cuando los nutrientes son mantenidos por reacciones de intercambio o cuando tienen limitada solubilidad. (Ej. K, P)**



Cálculo de poder buffer para P en un suelo arenoso de Uruguay. Los suelos fueron mezclados con diferentes cantidades de P e incubados en invernáculo durante dos semanas. (Curso Procesos en la Rizosfera y Absorción de Nutrientes por las Plantas, 2006)

EFFECTO DE LA CAPACIDAD BUFFER DEL SUELO SOBRE LA DIFUSIÓN DE NUTRIENTES

C_L/C_{Li} =
Concentra
ción actual
del
nutriente
en la
solucion
respecto a
la original

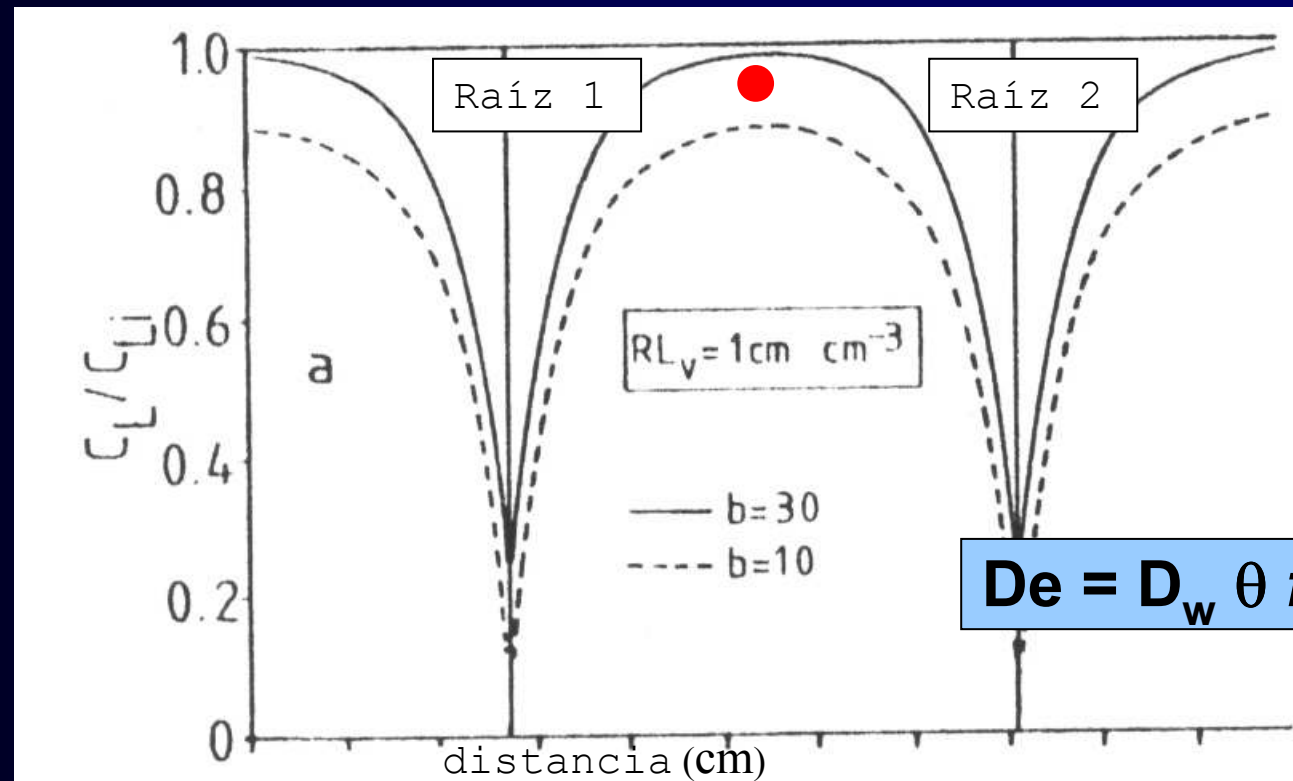


En el suelo con menor poder buffer (línea punteada) la conc. del nutriente en la solución baja hasta una mayor distancia de la raíz. En cambio en el suelo con mayor poder buffer (línea entera) existe una zona del suelo donde la concentración del nutriente no baja.

Claassen y Junk, 1995

Competencia entre raíces por nutrientes

$CL/CL_i =$
Concentra
ción actual
del
nutriente
en la
solucion
respecto a
la original



La posibilidad de competencia entre raíces por nutrientes es consecuencia del poder buffer del suelo para los nutrientes y de la distancia de la zona de empobrecimiento.

Un nutriente disuelto en la solución en una zona de suelo equidistante de dos raíces será objeto de competencia en caso de bajo poder buffer para ese nutriente, de lo contrario permanecerá en el suelo y será absorbido solamente si aumenta la densidad de raíces

CONSECUENCIAS DEL PROCESO DE DIFUSIÓN

- **Debido a la difusión la zona de empobrecimiento de nutrientes alrededor de una raíz crece cuando la absorción continúa cierto tiempo**
- **La concentración de nutrientes en la superficie radicular decrece con el tiempo**
- **Después de cierto tiempo la tasa de difusión de un nutriente a través del suelo es un factor afectando la absorción de ese nutriente**
- **Para nutrientes que se mueven hacia la raíz por difusión la disponibilidad de nutrientes se incrementa cuando se incrementa la densidad de raíces dentro del suelo**
- **Cuando para un nutriente las zonas de empobrecimiento de dos raíces contiguas se superponen, se inicia la competencia entre raíces por ese nutriente**
- **Cuanto más móvil es el nutriente en el suelo, mayor posibilidad de competencia**

ABSORCIÓN DE NUTRIENTES Y EXPLORACIÓN RADICULAR

- **Para los nutrientes que se transportan por flujo masal es menos importante la densidad de raíces en el suelo que el volumen de suelo con raíces. Existe competencia entre las raíces y éstas pueden casi agotar el nutriente en la porción de suelo explorada**
- **Para los nutrientes que se transportan por difusión es más importante la cantidad de raíces en el suelo que el volumen de suelo con raíces. Raras veces existe competencia entre las raíces y éstas no llegan a agotar el nutriente en la porción de suelo explorada**
- **Recordar que el sistema radicular es único: una misma raíz absorbe nutrientes que llegan por flujo masal y por difusión**

ABSORCIÓN DE NUTRIENTES Y EXPLORACIÓN RADICULAR: CONSECUENCIAS AGRONÓMICAS

El mecanismo de transporte de nutrientes tiene consecuencias agronómicas:

- **En el primer caso (nutrientes que se llegan a la raíz por flujo masal) al aumentar la población de plantas se debe aumentar la dosis de fertilizante, en el segundo no**
- **En el segundo caso (nutrientes que llegan a la raíz por difusión) es más importante la localización del fertilizante cercano a las raíces que para los nutrientes que se mueven por flujo masal.**

LIMITACIONES FÍSICAS AL CRECIMIENTO RADICULAR

- **Impedimentos mecánicos**
- **Disponibilidad de oxígeno**

Efectos del laboreo

IMPEDIMENTOS MECÁNICOS AL DESARROLLO RADICULAR

- El suelo presenta un espacio poroso que ocupa gran parte de su volumen
- Los poros tienen diferente tamaño: macroporos y microporos
- Se dice que un suelo está compactado cuando su volumen de poros ha disminuido
- Generalmente se pierden los macroporos, que son los que mantienen la aireación del suelo

IMPEDIMENTOS MECÁNICOS AL DESARROLLO RADICULAR

- **Las raíces de las plantas crecen a través de los macroporos del suelo**
- **La compactación impide el desarrollo radicular tanto de raíces principales como secundarias**
- **A veces los poros permiten crecimiento de raíces laterales finas, y en consecuencia un sistema radicular denso en la superficie pero con problemas de anclaje**
- **Puede haber mayor crecimiento de pelos radiculares**

ANAEROBIOSIS EN EL SUELO Y SU EFECTO SOBRE EL CRECIMIENTO

- **Generalmente la saturación de agua es la causa más común de anaerobiosis**
- **La anaerobiosis se produce cuando los suelos se anegan durante el tiempo suficiente para que se agote el O_2**
- **En un suelo compactado se produce anaerobiosis más fácilmente que en un suelo con sus macroporos intactos**
- **Hay diferencias en sensibilidad entre plantas, incluso hay plantas adaptadas a condiciones de anaerobiosis en los suelos (arroz)**

ANAEROBIOSIS EN EL SUELO Y SU EFECTO SOBRE EL CRECIMIENTO VEGETAL

- Principales efectos de la anaerobiosis en las plantas:

Morfológicos:

Marchitamiento, hojas cloróticas, menor crecimiento de raíces y parte aérea

Fisiológicos:

- **Permeabilidad reducida (menor absorción de agua y nutrientes)**
 - **Inhibición del metabolismo respiratorio, falta de O₂**
 - **Inhibición de translocación de hormonas hacia las raíces**
 - **Sustancias tóxicas producidas en el suelo**
- **También la anaerobiosis afecta la disponibilidad de nutrientes (P Ej. mineralización de MO)**

MANEJO DE SUELOS Y DESARROLLO RADICULAR

- **El laboreo se inventó para lograr mejores condiciones para la germinación y el desarrollo radicular**
 - **Inmediatamente de realizado el laboreo, el suelo se afloja y aumenta la porosidad**
 - **Sin embargo existen consecuencias negativas del laboreo sobre el desarrollo de las raíces:**
 - 1) **Compactación en profundidad debida a realizar laboreo durante muchos años a la misma profundidad (suela de arado)**
 - 2) **Compactación en las huellas de las maquinarias pesadas**
 - 3) **Encostramiento superficial debido al golpeteo de la lluvia sobre el suelo afinado**
 - 4) **Paulatina pérdida de estructura del suelo**
- Estas situaciones provocan restricciones al crecimiento radicular y la aireación**

Restricción al crecimiento radicular y su efecto sobre la absorción de nutrientes

- **Se realizó un experimento simulando diferentes condiciones de compactación (García et al., 1993)**
- **Los tratamientos fueron:**
- **1) Suelo sin compactar**
- **2) Suelo compactado en profundidad (de 13 a 18 cm) simulando suela de arada**
- **3) Suelo compactado en fajas a ambos lados de la línea de siembra simulando pasaje de maquinaria**
- **Se sembró maíz en filas**
- **Se midió la distribución de las raíces y la absorción de N y agua por las plantas**

Distribución de raíces en profundidad

Tratamiento	% raíces en cada horizonte del suelo		
	0-13 cm	13-27 cm	27-40 cm
Sin compact.	49.9	32.8	18
Compact . entrefila	43.9	26.1	30
Compact. 13 – 27 cm (suela arada)	82.2	9.3	8.5

- El suelo sin compactar tenía una proporción alta de raíces en la capa superficial, que va decreciendo en profundidad
- El suelo compactado en la entrefila tiene una gran proporción de raíces en profundidad, debido a que éstas no pudieron extenderse lateralmente
- El suelo compactado en la capa de 13-27 cm tiene una gran proporción de raíces en la capa superficial, debido a que éstas no pudieron extenderse hacia las capas profundas

Consecuencias de la distribución de raíces

Localización en la aplicación de N	Tratamiento de compactación		
	Sin compact.	Entrefila	Suela arada
% de N absorbido del N aplicado entrefila	29.1	11.9	41.7
% de N absorbido del N aplicado en la hilera de plantas	53.3	63.8	68.8

- La planta absorbe mas nutrientes en la porción del suelo donde tiene más raíces. Absorbe más el N de la propia fila de plantación
- Cuando el suelo está compactado entre las filas, las plantas no pueden absorber el N aplicado en esa zona
- Cuando existe suela de arada las raíces de las plantas son superficiales y extendidas lateralmente. Por lo tanto consumen una gran proporción del N aplicado entre las filas
- El N es un nutriente móvil, si este experimento se hiciera con P (poco móvil) los resultados serían mucho mas marcados.

Algunas soluciones para evitar y/o remediar la compactación de suelos

- **Siembra sin laboreo**
- **Rotaciones cultivos – pasturas**
- **Aumentar el nivel de MO del suelo para evitar la compactación (enmiendas orgánicas, abonos verdes, etc)**