

## 6. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA SUELO-PLANTA.

Para que haya absorción de elementos traza desde el suelo por las raíces, éstos deben entrar en contacto con su superficie. Hay tres procesos físicos que gobiernan la absorción de nutrientes y otros iones al interior de las plantas: intercepción radical, flujo de masas y difusión (Junk, 2002).

La intercepción radical permite la absorción de iones de escasa movilidad en el suelo como el fósforo y algunos micronutrientes (Claassen y Steingrobe, 1999).

Cuando las raíces absorben agua y nutrientes, crean gradientes de potencial para el agua del suelo y de los nutrientes de la solución suelo. En términos físicos se producen simultáneamente flujos de masa y flujo por difusión.

$$F_T = F_M + F_D$$

Donde  $F_T$  es el flujo total,  $F_M$  es el flujo de masas y  $F_D$  es el flujo por difusión.

El flujo de masas corresponde a una convección de nutrientes disueltos en la solución desde la matriz del suelo hacia la raíz arrastrados por la corriente transpiratoria.

El flujo de masas se describe como,

$$F_M = J C_L$$

Donde  $F_M$  es el flujo de masa ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),  $J$  es el flujo de agua por transpiración ( $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), y  $C_L$  es la concentración del ión en la solución ( $\text{mol m}^{-3}$ ). Si  $F_M$  es mayor a la absorción de iones se produce una acumulación de nutrientes en la interfase suelo-raíz. El flujo por difusión, en soluciones acuosas como la solución del suelo, se lleva a cabo de acuerdo a la ley de Fick.

$$J = -D \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad \left[ \frac{\text{mol}}{\text{cm}^2 \text{ seg}} \right]$$

donde  $J$ , flujo difusivo medido en  $\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,  $(\partial c/\partial x)$  es el gradiente de concentración y  $D$  es el coeficiente de difusión  $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ .

Bajo condiciones transientes, es decir de estado de régimen no estacionario, se tiene que,

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right) \quad \left[ \frac{\text{mol}}{\text{cm} \text{ seg}} \right]$$

Debido a la forma cilíndrica de las raíces, la difusión ocurre en una geometría no rectangular cuya ecuación de continuidad expresada en coordenadas cilíndricas es:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad \left[ \frac{\text{mol}}{\text{cm seg}} \right]$$

Donde  $C$  es la concentración iónica o molecular,  $D$  es el coeficiente de difusión efectiva y  $r$  es la distancia radial desde el eje de la raíz hasta su límite de influencia o traslape.

Según Junk (2002), los factores de la planta que afectan la cantidad de nutrientes en los brotes (capacidad de adquisición) son:

- Absorción por unidad de longitud de raíz ( $I$ )
- Relación longitud radical ( $LR$ ) y masa área ( $MA$ )
- Duración de la absorción en cada segmento de raíz ( $t$ )

Estos factores se combinan en una expresión que representa el porcentaje del elemento en el brote ( $N_b$ ) como,

$$N_b = \left( I \frac{LR}{MA} t \right) 100$$

La cinética de absorción de iones en las plantas sigue la curva de Michaelis-Menten que combina cinética de primer orden de orden cero. La tasa de absorción se representa a través de la siguiente ecuación,

$$I_n = \frac{I_{m\acute{a}x} (C_L - C_{Lm\acute{i}n})}{K_m + C_L - C_{Lm\acute{i}n}}$$

Donde  $I_n$  representa la tasa de absorción del elemento  $n$  (mol / s),  $I_{m\acute{a}x}$  es la tasa de absorción máxima,  $K_m$  es constante de Michaelis-Menten que describe la afinidad de la raíz por el elemento e indica la eficiencia de absorción a baja concentración,  $C_L$  es la concentración del elemento y  $C_{Lm\acute{i}n}$  es la concentración en la que  $I_n$  es cero (Junk, 2002). Las raíces son altamente eficientes cuando absorben en rangos de baja concentración la absorción es dependiente de la especie química del elemento a absorber, de la especie vegetal (variedad), edad de la raíz y estado fenológico de la planta, y del estado nutricional del vegetal. Claassen y Steingrobe (1999), resumieron los factores involucrados en la transferencia de nutrientes desde el suelo a las plantas (**Cuadro 6.1.1**)

**Cuadro 6.1.1.** Factores involucrados en la transferencia de nutrientes desde el suelo a las plantas.

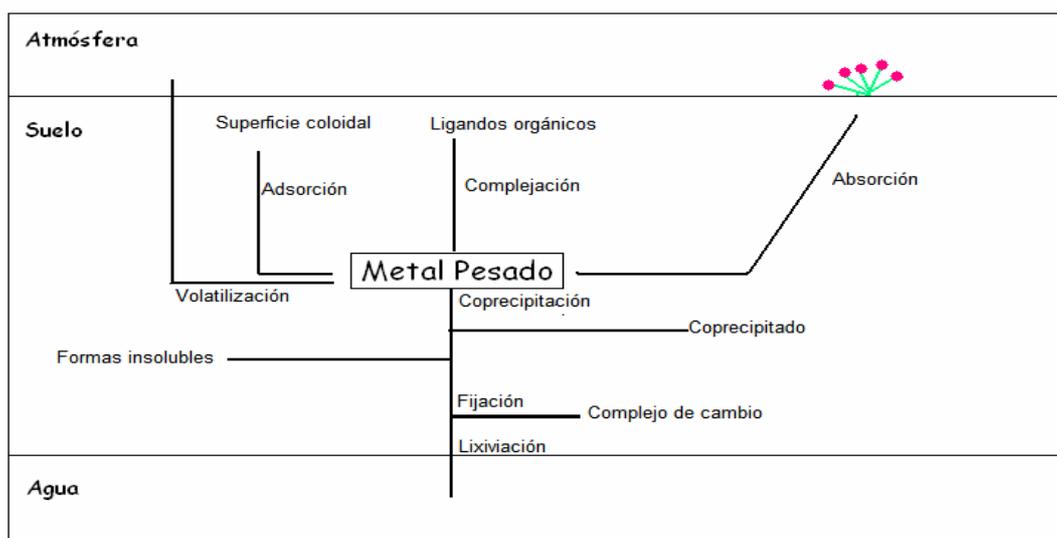
Procesos	Factores involucrados
Desarrollo radical	Longitud radical Distribución radical Morfología radical (arquitectura, diámetro, pelos radicales)
Absorción de nutrientes	Concentración en la superficie de la raíz Cinética de absorción
Transporte desde el suelo a la raíz (difusión – flujo de masas)	Transpiración Concentración en la solución suelo Gradiente de concentración Coeficiente de difusión
Movilización por las raíces desorción, disolución, hidrólisis de compuestos orgánicos.	Extracción de la solución suelo Exudados radicales (iones $H^+$ / $OH^-$ , agentes reductores, quelantes y carboxilantes) Composición química del suelo (pH, humus, minerales). Propiedades físicas del suelo (textura, densidad, impedancia mecánica)
Movilización por asociación de organismos	Infección de micorrizas Bacterias

Un modelo que describa el transporte y destino de un metal pesado en un suelo bajo condiciones no saturadas, debe considerar las reacciones de precipitación mineral y disolución, intercambio iónico, adsorción y desorción, complejación acuosa, inmovilización y movilización biológica, y absorción por las plantas.

Los primeros esfuerzos por modelar el transporte acuoso de metales no consideraban la reactividad química del suelo, otros, consideraban reacciones simples de decaimiento lineal del contaminante. La investigación del modelamiento del destino de contaminantes ha avanzado en dos direcciones, una en la cual las reacciones químicas han sido incorporadas directamente en las ecuaciones de transporte, y otra en que las reacciones químicas han sido desacopladas de las ecuaciones de transporte y resueltas en forma separada y acoplados con posterioridad. La mayoría de los trabajos sobre el modelamiento del movimiento de contaminantes en medios porosos se ha focalizado en la zona saturada subterránea (carga y descarga de acuíferos), sin embargo, es importante modelar el comportamiento de los

contaminantes donde se producen interacciones con la materia orgánica del suelo y los exudados radicales en la rizósfera.

Es indudable que para avanzar en el conocimiento y aplicación más racional de la información sobre metales pesados en agua, suelo y rizósfera deberá adaptarse desarrollarse un modelo que integre estos componentes. Un modelo esquemático del destino y transferencias de los metales pesados en los suelos se muestra en la siguiente figura:



### Literatura citada

- Claassen, N. and Steingrobe, B. 1999. Mechanistic simulation models for a better understanding of nutrient uptake from soil. *In*: Mineral nutrition of crops. Fundamental mechanisms and implications. Rengel, Z. (Ed.). (número de páginas?)
- Junk, A. 2002. Dynamics of nutrient movement at the soil-root interface. *In*: Plant roots the hidden half. Waisel, Y. and Eshel, A (Ed.). Third Edition.