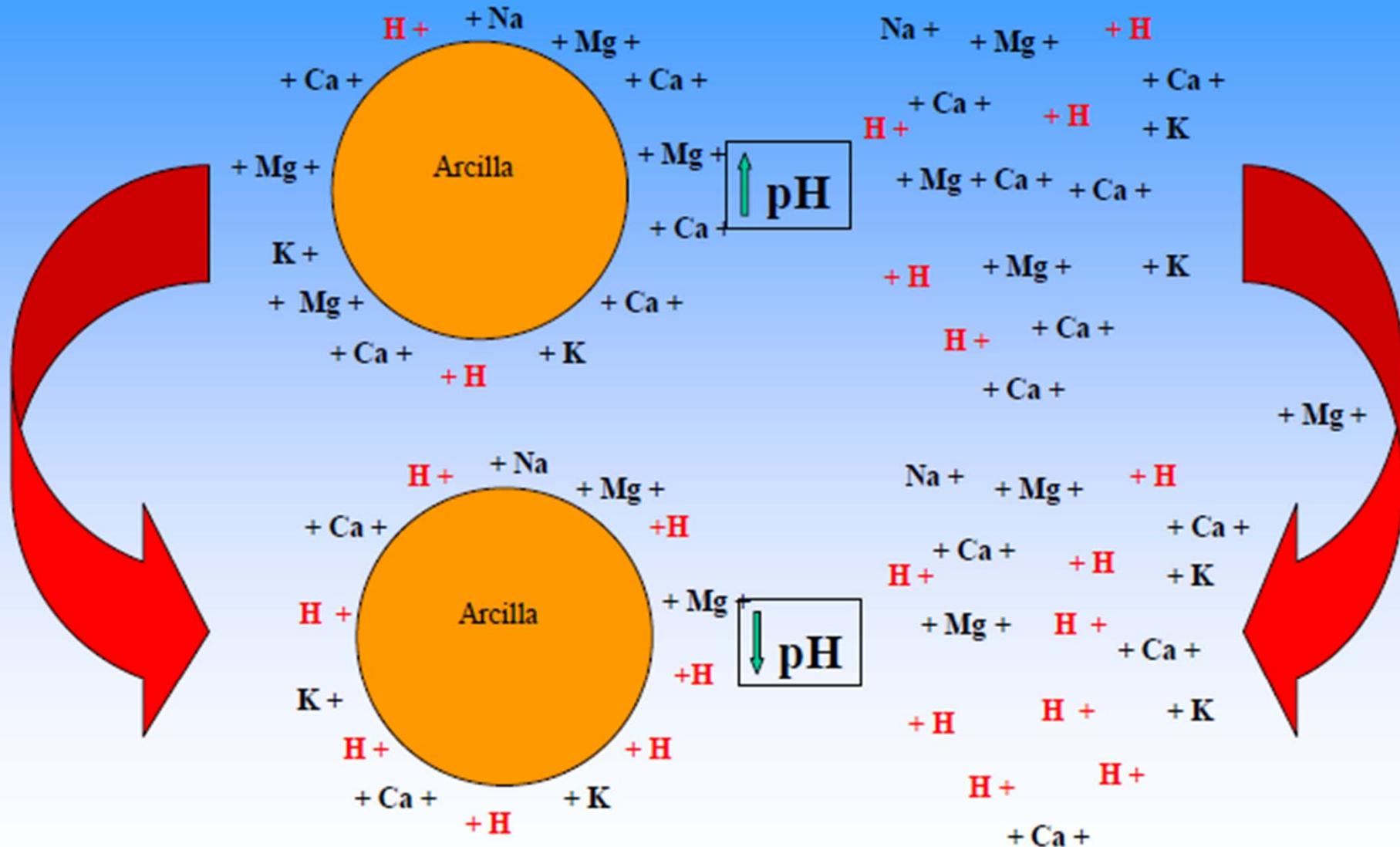


ARCILLA

SOLUCIÓN DEL SUELO



SUELOS ÁCIDOS

CONCEPTOS BÁSICOS

MATERIAL ORIGINARIO

→
intemperismo

ARCILLAS (carga eléctrica -)

Caolinita 1:1

Montmorillonita e illita 2:1

Bordes de los cristales

Sustitución isomórfica
en la red cristalina: Al-
Mg

SOLUCIÓN DEL SUELO

→
Disolución de
silicatos

**CATIONES: Al, H, Ca, Mg, K, Na,
NH₄, Fe**

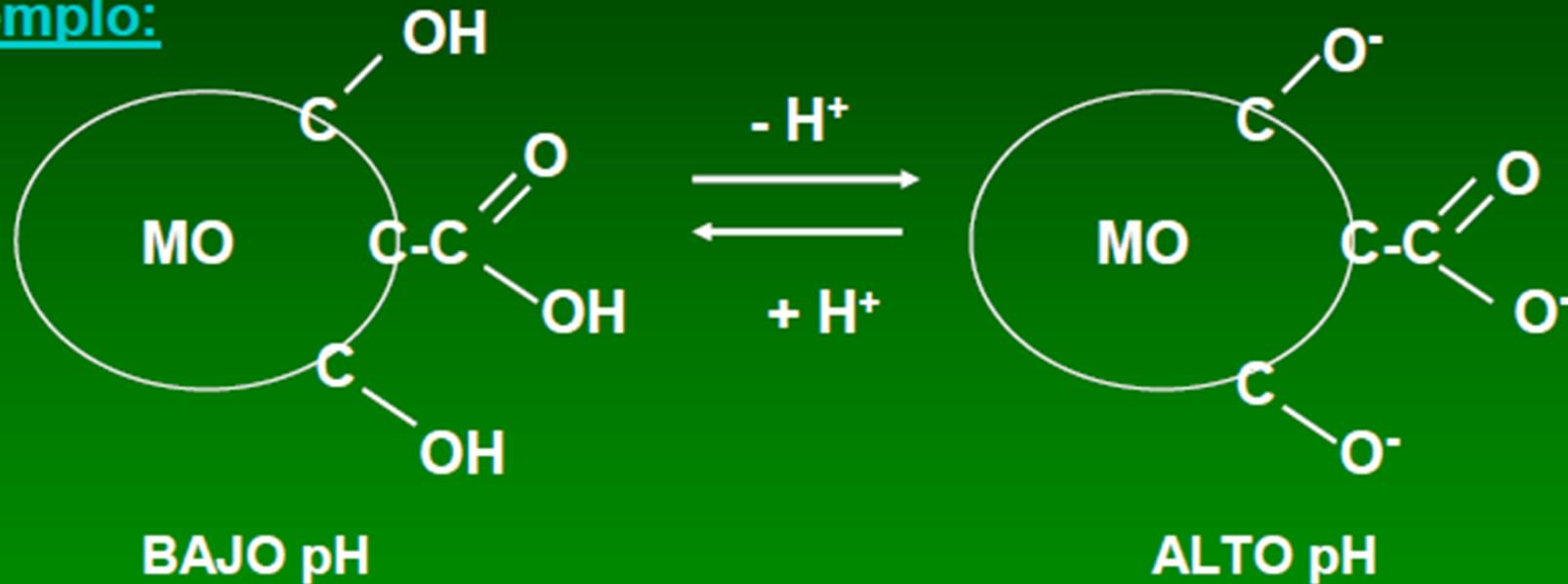
Los coloides del suelo (arcillas, óxidos e hidróxidos de Fe y Al y humus tienen cargas eléctricas)

→ Permanentes: **carga neta negativa en las arcillas**

→ Variables o dependientes del pH: **en el humus y los óxidos e hidróxidos de Fe y Al, por disociación de H⁺ de los grupos funcionales (carboxilos y fenólicos)**

CONCEPTOS BÁSICOS

Ejemplo:

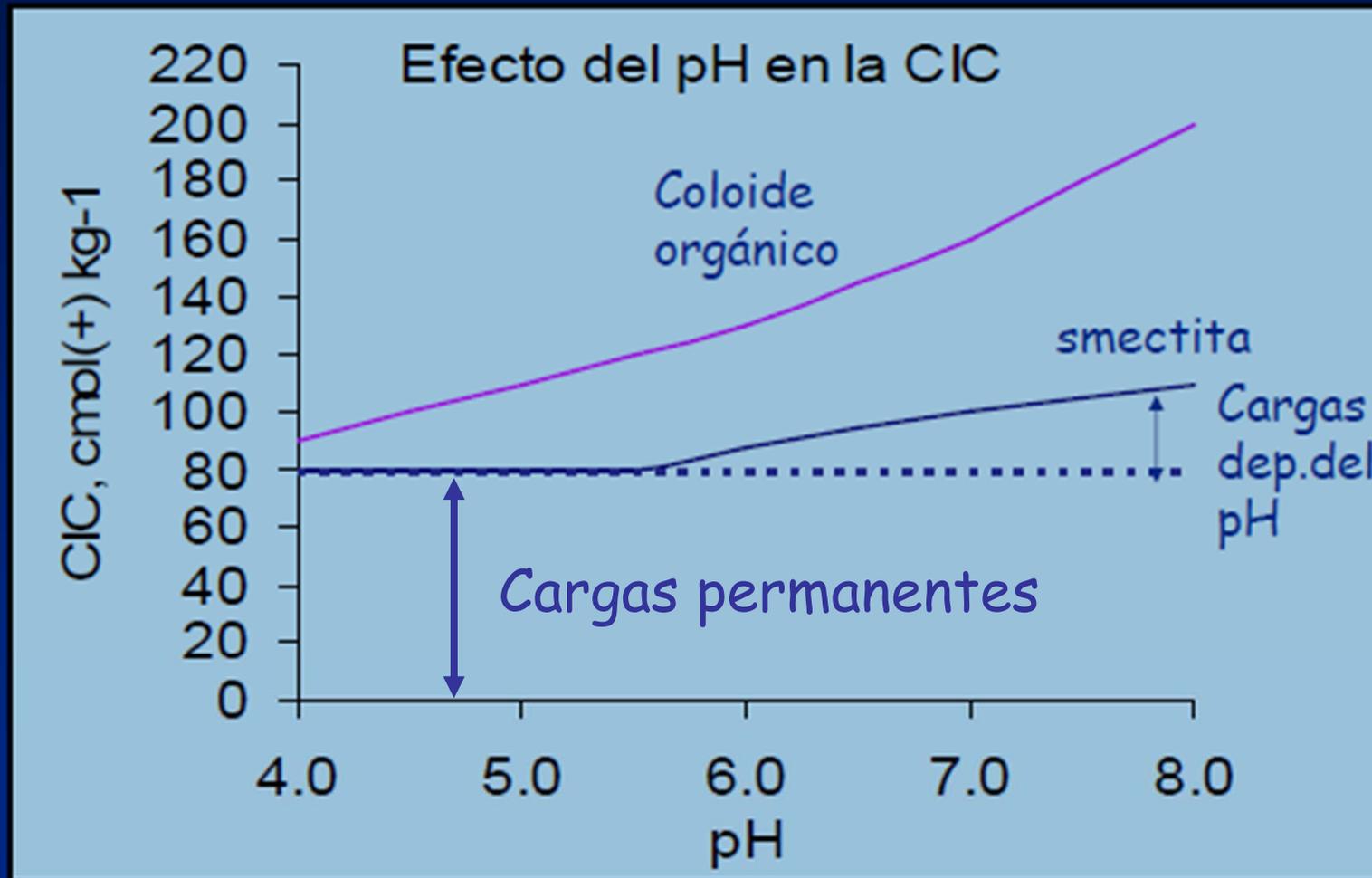


A pH bajo estos compuestos no tienen carga

Al subir el pH estos compuestos tienen cargas negativas: Aumenta la CIC

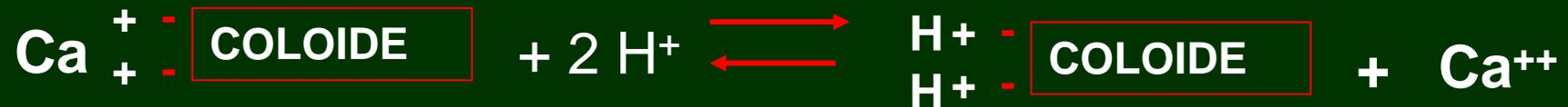
AL AUMENTAR EL pH, AUMENTA LA CIC

Influencia del pH en la CIC de los suelos

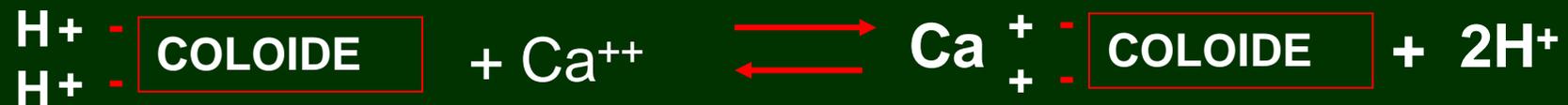


(I) Regiones húmedas + suelos bien drenados ----→ suelos ácidos

El orden con que están retenidos o fuerza de adsorción es: Al, H, Ca, Mg, K, Na

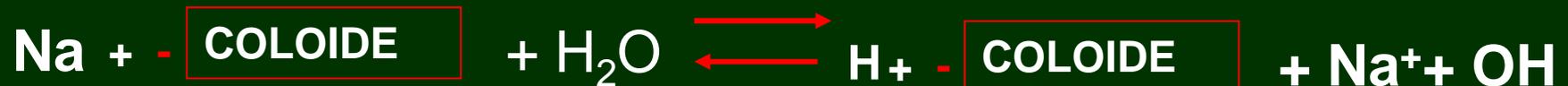


(II) Regiones áridas, semiáridas o subhúmedas, con menores precipitaciones, dominan el complejo de cambio el Ca, Mg y K porque no se lavan ----→ suelos neutros o ligeramente alcalinos



Bajo estas condiciones el Al forma compuestos insolubles

(III) Regiones húmedas o subhúmedas con drenaje impedido, se acumula Na^{+} , a pesar de su débil retención por los coloides, que ocupa más de 15% del complejo de cambio ----→ suelos sódicos



CONCEPTOS BÁSICOS

Proporción relativa de cationes metálicos adsorbidos en el complejo de intercambio de diferentes suelos pampeanos (CAPA ARABLE). Darwich, 2006

CATIONES DE INTERCAMBIO (%)

SUELO	pH	Ca	Mg	Na	K
ARGIUDOL	5.8	80.8	13.0		6.2
NATRALBOL	6.5	65.2	21.1	1.8	11.9
HAPLUDOL	6.3	51.0	32.7	5.0	11.3
NATRACUOL	9.8	50.0	13.7	26.4	9.9

CONCEPTOS BÁSICOS

LA CIC SE EXPRESA EN meq/100 g de suelo o cmol/kg de suelo

1 equivalente/g = peso atómico/valencia

Ca = $40/2 = 20$ g -----→ 1 meq = 0,02g

1 meq/100g suelo = 1 cmol/ kg suelo

Los cationes son intercambiados sobre bases químicamente equivalentes: si un suelo tiene una CIC de 10 meq/100g de suelo o 10 cmol/kg de suelo, significa que este suelo es capaz de adsorber, por kg de suelo, 10 cmol de H⁺ o de K⁺ o de Na⁺; o 5 cmol de Ca⁺⁺ o Mg⁺⁺.

Valores de CIC para algunos constituyentes del suelo:

	meq/100g o cmol/kg
Materia orgánica:	240 - 400
Montmorillonita (arcilla 2:1)	120
Illita (arcilla 2:1):	20
Caolinita (arcilla 1:1):	10

CONCEPTOS BÁSICOS

Porcentaje de saturación con bases (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+)

$$\%SB = \frac{\text{BASES INTERCAMBIABLES (meq/100g de suelo)}}{\text{CIC (meq/100g de suelo)}}$$

Neutralizan la acidez del suelo y dominan en suelos neutros y alcalinos

En suelos ácidos predominan el H^+ y el Al^{+++}

Los H^+ adsorbidos al ser liberados aumentan la [] de H^+ en la solución, en cambio el Al^{+++} lo hace a través de la hidrólisis, produciendo protones

Ejemplo: si el % de saturación con bases es del 75%, significa que solo $\frac{1}{4}$ de la CIC está ocupada con H^+ y Al^{+++}

En regiones templadas-húmedas para rangos de pH entre 5 y 6, se espera que por cada 0.10 unidades de cambio en el pH, aumente un 5% el %SB. Una unidad de cambio en el pH del suelo (de 7 a 6) significa 10 veces más H^+ activo

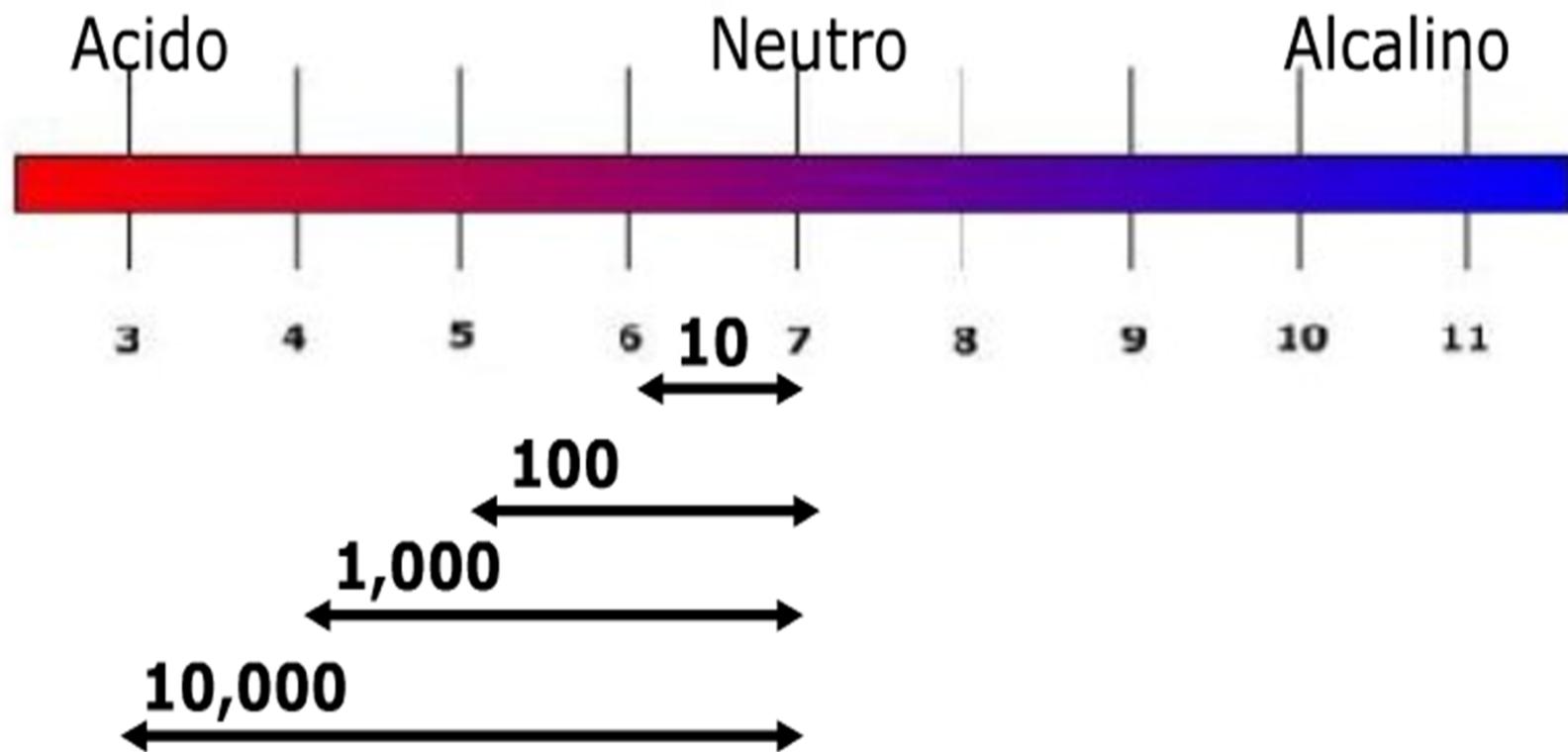
Escala de pH

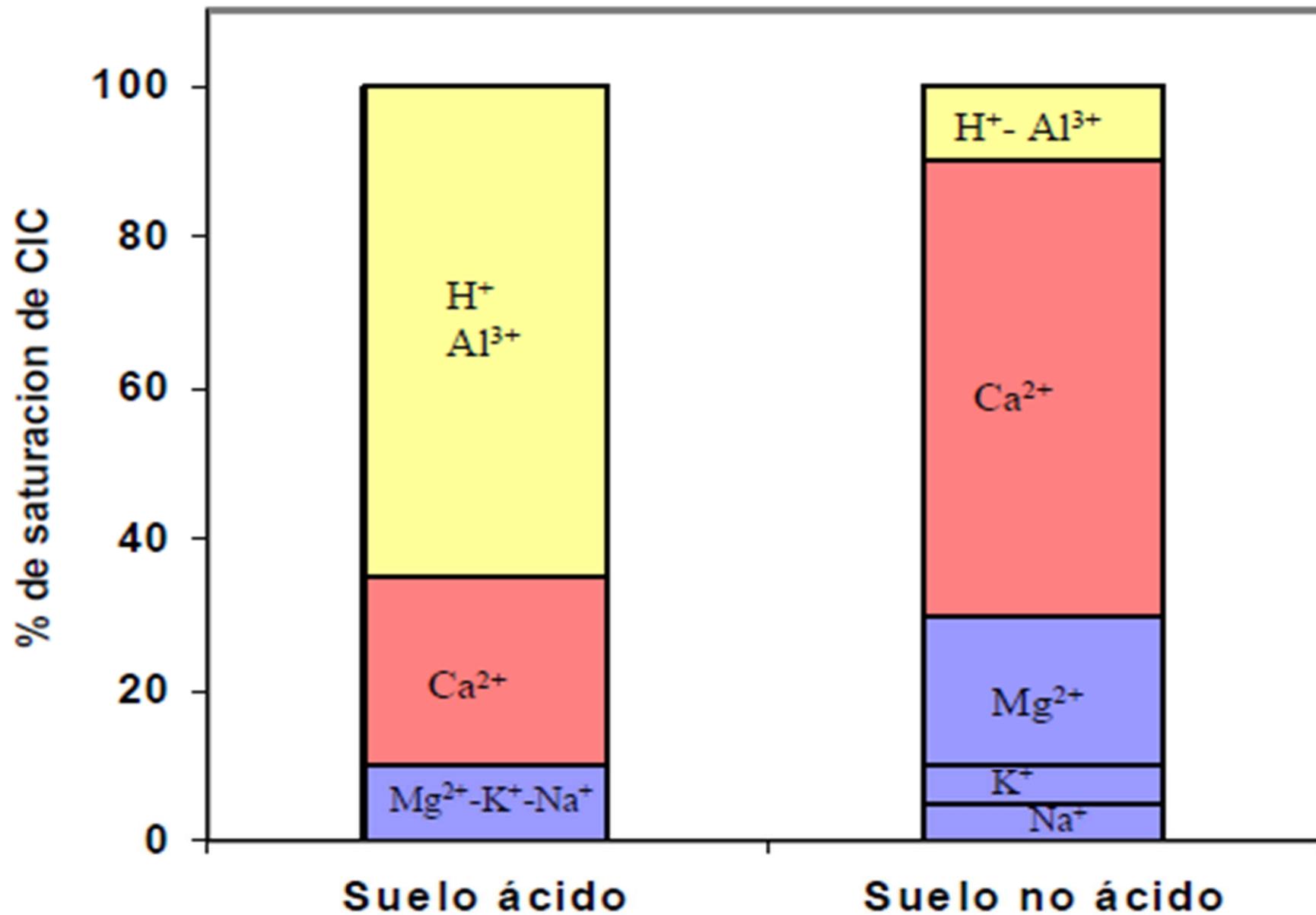
$$\log_{10} 10 = 1$$

$$\log_{10} 100 = 2$$

$$\log_{10} 1000 = 3$$

$$\log_{10} 10000 = 4$$

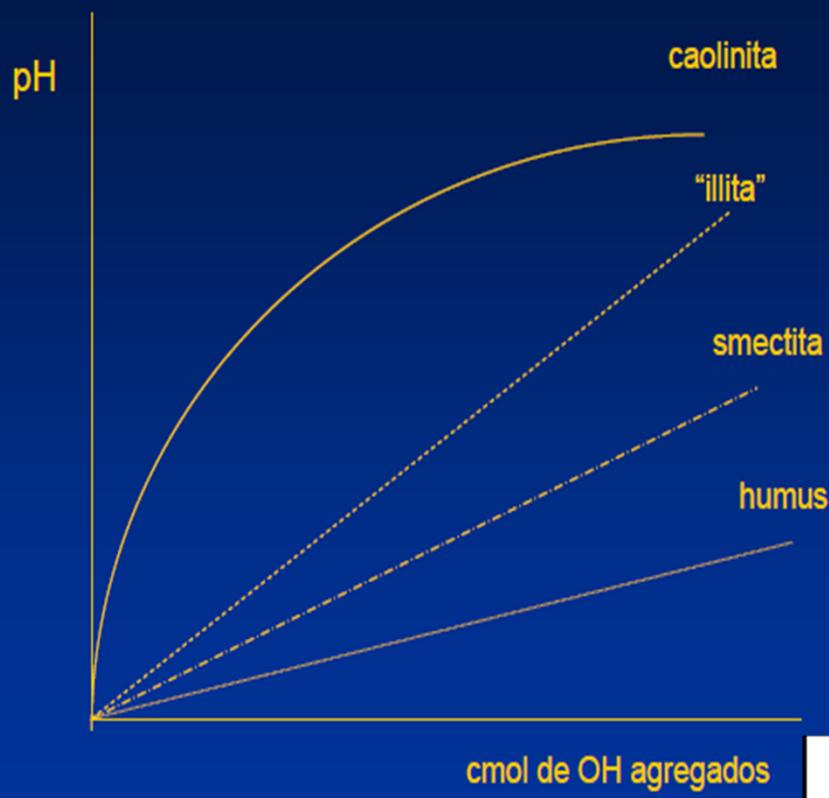




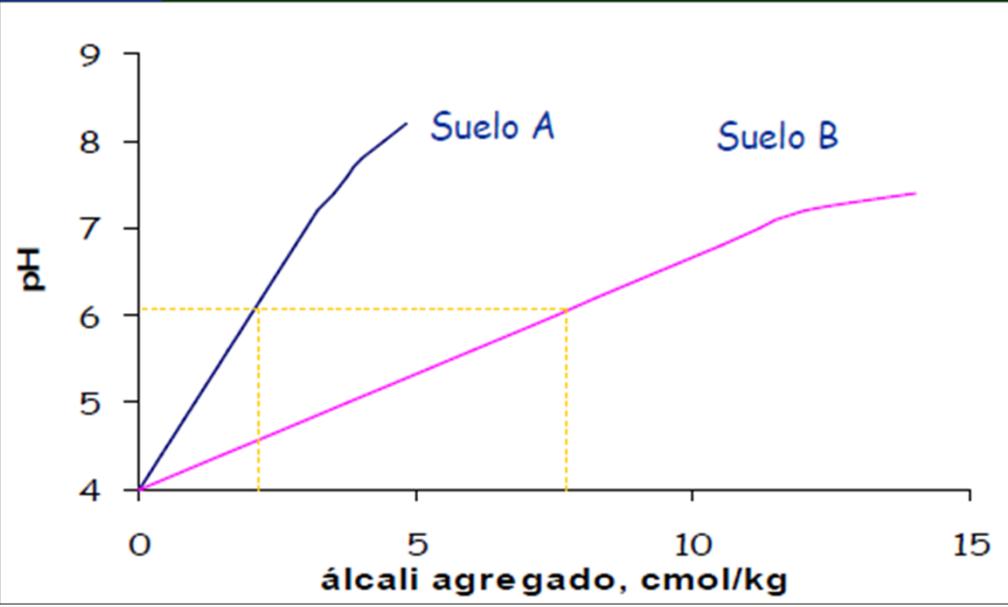
Adaptado de McLaren y Cameron, 1998

ACIDEZ DE LOS SUELOS

- Se refiere a la $[H^+]$ en la solución del suelo
- Se mide como $pH = -\log_{10} [H^+] = \log_{10} 1/[H^+]$
- Está inversamente relacionado a la $[]$ de bases
- El pH de los suelos varía de 4 – >9
- Los suelos tienen capacidad buffer que les permite resistir cambios bruscos de pH. Este poder amortiguador está relacionado con los coloides y aumenta con la CIC



PODER BUFFER DE LOS COLOIDES DEL SUELO



Clasificación de los suelos según el valor de pH

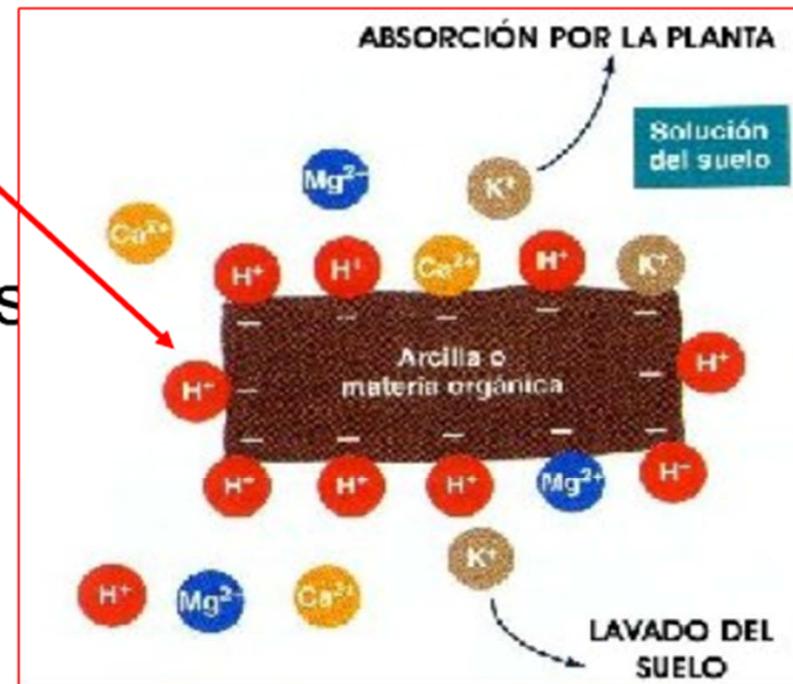
pH	Evaluación	Efectos
Menor de 4,5	Extremadamente ácido	Condiciones muy desfavorables
4,5 - 5	Muy fuertemente ácido	Posibles efectos de toxicidad
5,1 - 5,5	Fuertemente ácido	Deficiente asimilación de algunos elementos
5,6 - 6	Medianamente ácido	Adecuado para la mayoría de los cultivos
6,1 - 6,5	Ligeramente ácido	El más adecuado para la asimilación de nutrientes
6,6 - 7,3	Neutro	Efectos tóxicos mínimos
7,4 - 7,8	Medianamente básico	Existencia de carbonato cálcico
7,9 - 8,4	Básico	Deficiente asimilación de algunos nutrientes
8,5 - 9	Ligeramente alcalino	Problemas de clorosis
9,1 - 10	Alcalino	Presencia de carbonato sódico
> 10	Fuertemente alcalino	Poca asimilación de algunos nutrientes

CLASIFICACIÓN DE LA ACIDEZ

- Los suelos poseen una parte de su **acidez total** en forma activa. **Acidez total = acidez potencial + acidez activa.**
- Acidez activa:** H^+ de la solución del suelo proveniente de diferentes fuentes y se mide a través del pH.
- Acidez potencial:** suma de la acidez intercambiable y la no intercambiable
- Acidez intercambiable (titulable):** H^+ y Al^{+3} intercambiables retenidos en cargas negativas de arcillas del suelo. Es la cantidad de base fuerte requerida **para llevar el pH del suelo a un determinado valor (Ej. 7).**
- Acidez no intercambiable (ausencia de Al)=** corresponde a las cargas que se disocian **al aumentar el pH.** H^+ en enlaces covalentes en la superficie de arcillas de carga variable.

- **Acidez potencial:**

- Iones de H y Al retenidos y/o adsorbidos en las partículas del suelo.



ACIDEZ POTENCIAL:

- Al, Mn, Fe, H

- Cargas de la materia orgánica dependiente del pH

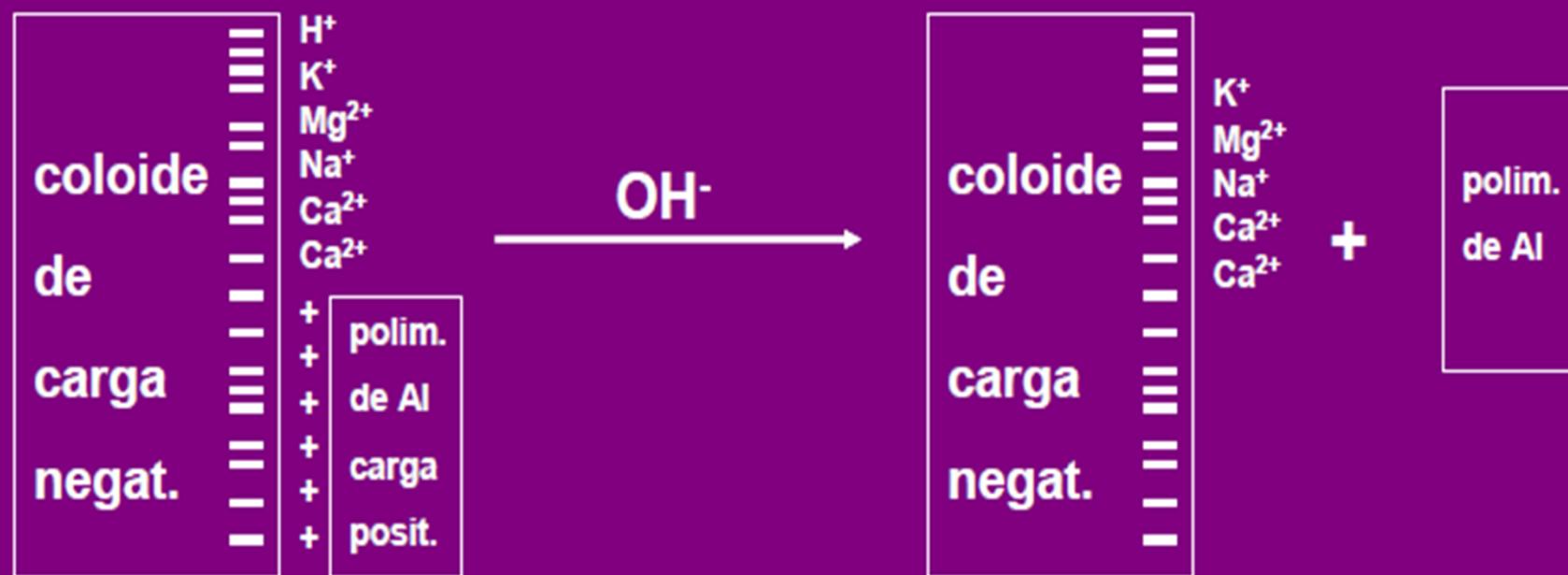
- arcillas

ACIDEZ ACTIVA: se mide a través del pH

- $[H^+]$ en la solución del suelo

- $[H^+]$ proveniente de la hidrólisis del Al y el Fe

Hidrólisis del aluminio



Estas reacciones se producen si existen fuentes de OH^- en el suelo que neutralicen los H^+ liberados.

- Al^{3+} predomina en suelos con $pH < 5$
- $Al(OH)^{2+}$ y $Al(OH)_2^+$ predominan en suelos con $pH 5 - 6$
- La forma $Al(OH)_4^-$ puede existir en suelos con $pH > 8$
- La hidrólisis del Fe es un proceso similar

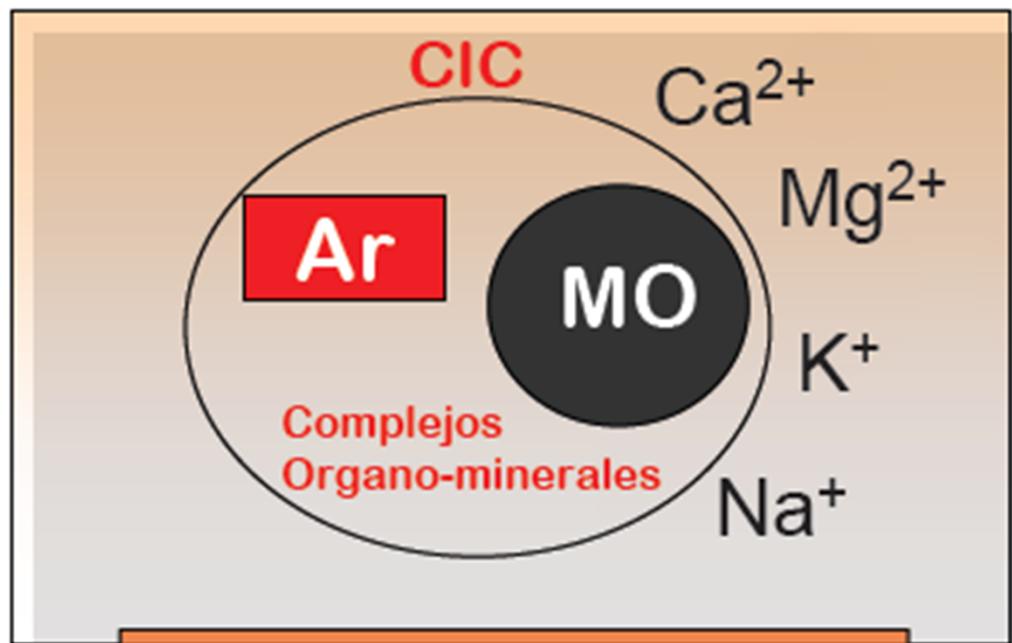
RETENCIÓN DE ANIONES

- Los polímeros de Fe y de Al cargados positivamente tienen la capacidad de retener aniones (HPO_4^{2-} ; H_2PO_4^- ; SO_4^{2-} ; MoO_4^{2-} ; Cl^- ; NO_3^-)
- Existe una mayor atracción por fosfatos y sulfato que por los aniones monovalentes
- Este efecto determina que en los suelos donde existe abundancia de polímeros de Fe y Al se produce una fuerte retención de P, el cual no se encuentra disponible para las plantas
- También el Al^{3+} es capaz de reaccionar con el fosfato formando fosfatos de Al, los cuales no están disponibles para las plantas

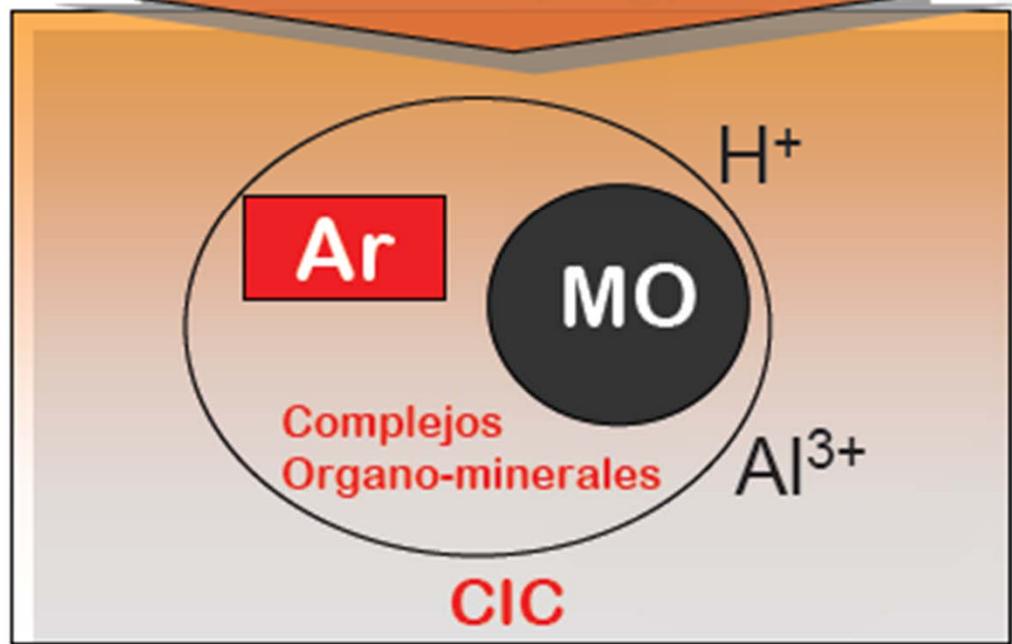
CAUSAS DE LA ACIDIFICACIÓN

NATURAL

- ☉ Por lixiviación de bases: elevadas precipitaciones (balance hídrico +). Intervienen clima, geomorfología, vegetación y la dinámica hídrica del perfil. Ultisoles, Oxisoles (Misiones y NE Corrientes)
- ☉ Por el tipo de vegetación en zonas de clima frío y templado-frío que generan una materia orgánica muy ácida que se descompone en medio húmedo (tipo Mor): Podzoles, Inceptisoles y Andisoles y suelos orgánicos como Histosoles (Región Patagónica e Isla Grande de Tierra del Fuego)
- ☉ Por formación de ácidos solubles (CO_3H_2), producto de la respiración de las raíces de las plantas y los microorganismos
- ☉ Liberación de H^+ por las raíces al absorber bases
- ☉ Disociación de H^+ por los coloides del suelo
- ☉ Hidrólisis del Al durante la meteorización de silicatos



Lavado Ca, Mg, Na, K



tiempo

Acidez y Encalado de los Suelos



Foto 19. Perfil típico de un Oxisol de muchas áreas tropicales de América Latina.



Foto 20. Perfil típico de un Ultisol de muchas áreas tropicales de América Latina.

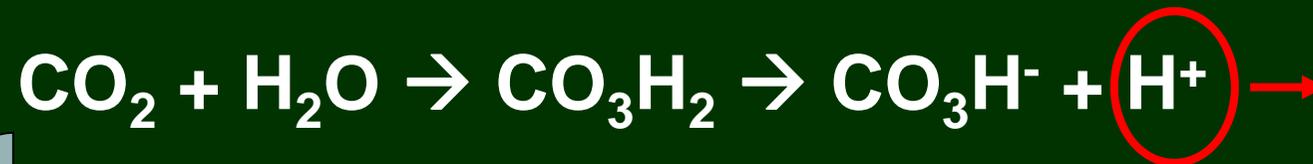


Foto 25. Paisaje típico de Andisoles de América Latina.



Foto 26. Perfil de un Andisol típico en Ecuador.

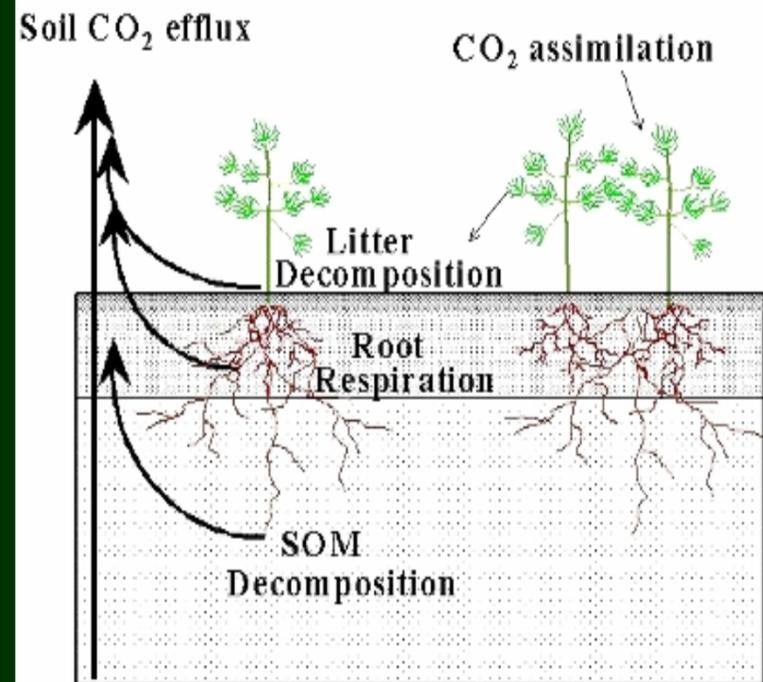
Por formación de ácidos solubles (CO_3H_2), producto de la respiración de las raíces de las plantas y los microorganismos



el ácido carbónico no disocia a $\text{pH} < 4,5$)

Desplaza a las bases en los sitios de intercambio

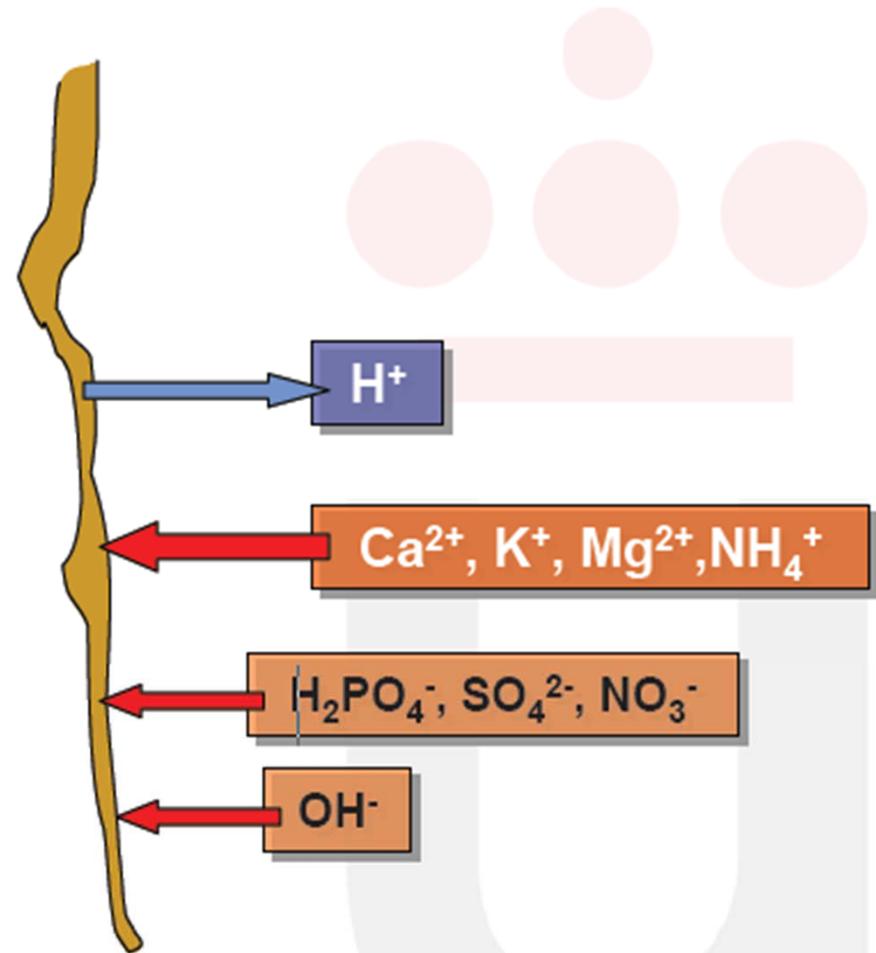
En presencia de Ca o Mg en la solución del suelo, parte del CO_2 es fijado en la formación de Carbonatos.



Liberación de H^+ por las raíces al absorber bases

Intercambio de bases por H^+ en las raíces de las plantas:

- En las raíces se produce la absorción de nutrientes (Ca, K, Mg) liberándose H^+ .
- La acidificación neta es igual a la suma de cationes menos aniones.
- El N puede ser tomado como catión o anión, por lo que es un factor fundamental la forma en que este sea absorbido por la planta.



CAUSAS DE LA ACIDIFICACIÓN

POR MANEJO ANTRÓPICO

☉ Por uso de fertilizantes: potásicos, azufrados y nitrogenados amoniacales: urea, nitrato de amonio, sulfato de amonio, amoníaco anhidro.



Las bacterias oxidan el NH_4^+ a NO_3^- liberando protones:



☉ Exportación de bases en los productos cosechados: cuando los nutrientes no se reponen. La extracción es mayor cuando se cosecha toda la parte aérea (alfalfa para heno) que cuando solo se cosechan los granos.

☉ Lluvia ácida: en lugares próximos a áreas industriales. Es una deposición líquida que contiene ácido sulfúrico o nítrico porque la lluvia se ha acidificado con contaminantes gaseosos como los óxidos de S y N. Se necesitan varias décadas de deposición para medir un descenso del pH del suelo y que este tenga baja capacidad buffer.

Acidez residual producida por fertilizantes nitrogenados (Tomado de Tisdale *et al.* 1993.)

Fuente	N (%)	Reacción de nitrificación	Índice de Acidez (kg CaCO ₃ 100 kg ⁻¹ fertilizante)
Urea	46	$(\text{NH}_2)_2\text{CO} + 4 \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{NO}_3^- + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	- 84
Nitrato de amonio	33.5	$\text{NH}_4\text{NO}_3 + 2\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$	- 63
Sulfato de amonio	21	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + 4\text{O}_2 \longrightarrow 4\text{H}^+ + 2\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$	- 112
Fosfato monoamónico	12	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}^+ + \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{H}_2\text{O}$	- 65
Fosfato diamónico	18	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 + \text{O}_2 \longrightarrow 3\text{H}^+ + 2\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{H}_2\text{O}$	- 74

- Nutrientes primarios: **P, K, N**
- Nutrientes secundarios: **S, Ca, Mg**
- Micronutrientes: **B**, metálicos (**Fe, Mn, Zn, Cu, Mo**)
- Enmiendas y correctores: **calizas (cales), yeso, perlita, ceolitas, vermiculita, otros.**



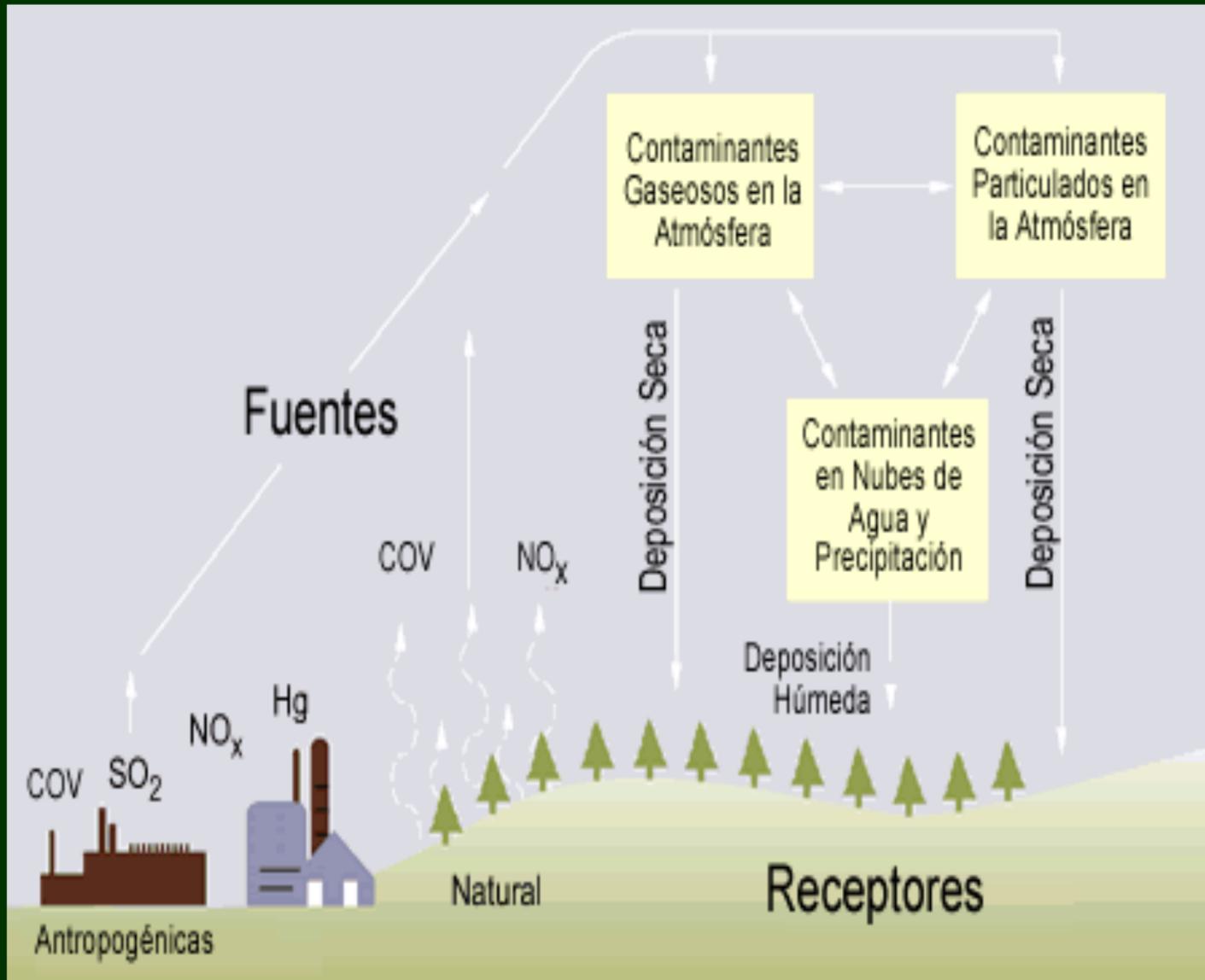
Extracción de nutrientes de los suelos cultivados en Tn



Cultivo	FÓSFORO	CALCIO	POTASIO	AZUFRE	BORO
Girasol	15.578	5.471	26.976	7.979	137
Maíz	45.747	3.089	60.309	26.624	88
Soja	191.790	96.196	586.193	141.288	241
Trigo	58.899	6.425	53.851	17.440	122
Sorgo	7.979	2.539	9.877	5.971	8
Totales	319.993	113.720	737.205	199.302	596

Tabla 1. Extracción de nutrientes en el ciclo agrícola 2001/2002. Cifras expresadas en toneladas. Datos y tabla de Cruzate y Casas (2003); fuente: INTA y SAGPyA (Estad. Agropecuarias).

Lluvia ácida



EFECTOS DE LA ACIDEZ SOBRE EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS

Por la toxicidad de Al, Mn e H

Al⁺⁺⁺: a pH < a 5 – 5.3

- Afecta la división celular en el ápice de la raíz (raíces cortas y deformes)
- Aumenta la rigidez de las membranas celulares
- Reduce la replicación del ADN
- Interfiere con la absorción y transporte de otros nutrientes

Mn⁺⁺: a pH < a 5 – 5.3

- No todos los suelos tienen suficiente Mn como para llegar a ser tóxico
- Influye la aireación del suelo ya que aumenta en ambientes reductores
- Afecta la actividad enzimática y la síntesis de hormonas
- Síntomas en la parte aérea: clorosis y necrosis en las hojas nuevas

H⁺:

- efectos de < magnitud que el Al y Mn. Sus efectos pueden ser confundidos ya que al descender el pH, aumentas las [] de Al y Mn

MECANISMOS DE ADAPTACIÓN DE LAS PLANTAS A SUELOS ÁCIDOS

Reducen al mínimo la absorción de Al^{+++}

¿Cómo?

- ✱ Aumentando el pH en la rizosfera y precipitando el Al^{+++}
- ✱ por exudación de compuestos (citrato y malato) que acomplejan el catión (QUELATOS), reducen su toxicidad y liberan P. El uso de abonos verdes en suelos ácidos tiene por base este proceso
- ✱ Asociación con micorrizas que aumentan la exploración y absorción de nutrientes (spp de pinos)
- ✱ Eficiencia en el uso de nutrientes

SOLUCIONES AL PROBLEMA DE LA ACIDEZ

USO DE ESPECIES O VARIETADES RESISTENTES

Rango óptimo de pH para algunas especies

PLANTA	pH	PLANTA	pH
Trigo	5.5-6.5	Zanahoria	5.5-7.0
Cebada	5.8-6.5	Coliflor	6.0-7.5
Raigrás	5.5-6.5	Lechuga	6.0-7.0
Avena	5.0-6.5	Papa	4.8-6.5
Trébol blanco	5.6-7.0	Tomate	5.5-7.5
Trébol rojo	6.0-7.5	Manzana	5.5-6.5
Alfalfa	6.0-7.8	Frutilla	5.0-6.5
Soja	5.0-6.5	Arándano	4.0-5.0
Lotus cornic.	5.5-6.5		
Maíz	5.5-6.5		

Estos valores son útiles para orientación, pero existen importantes diferencias entre variedades

AGREGADO DE LOS NUTRIENTES LIMITANTES: P

ENCALADO: la práctica más frecuente es añadir CO_3Ca al suelo. Este se disuelve y neutraliza a los cationes ácidos

DETERMINACIÓN DE LA DOSIS DE CALCÁREO

A CAMPO: se realizan ensayos agregando cantidades crecientes de material calcáreo y se determinan las variaciones de pH en función de las dosis

EN LABORATORIO:

- Incubación de suelos: con cantidades crecientes de calcáreo (igual que los ensayos a campo)
- Método del buffer simple (SMP) para suelos con altos requerimientos de encalado y altas [] de Al^{+++}
- Método del buffer doble: para suelos con baja necesidad de corrección, alto contenido de MO, suelos arenosos o con caolinita y óxidos de Al y Fe en la fracción arcillosa
- A partir de la acidez de cambio que se quiere corregir: se calcula el requerimiento de calcáreo

meq de H^+ a desplazar = Valor final de SB(%) - Valor inicial de SB(%)
en 100g de suelo

PARA LA ELECCIÓN DEL PRODUCTO

SE DEBE TENER EN CUENTA:

- ☀ análisis del suelo**
- ☀ análisis de la enmienda**
- ☀ resultados de las experiencias de ensayos a campo**

Tratamientos	Bavio	Pergamino	Lujan	Baradero	Azul	C. Casares	Etcheverry	Laboulaye
pH actual	5,5	5,8	5,7	6	5,4	6	5,1	5,1
pH potencial	4,4	4,8	5	5,1	4,9	5,8	4,7	4,4
Complejo de cambio (NH ₄ ⁺ Ac pH 7 1N)								
Cap.Int.Catiónica cmol _c /kg	15,2	17,7	16,1	15,1	20,6	19,1	13,5	11,5
Sat. de Ca ²⁺ %	59,8	68,5	67,4	67,2	73,6	65,3	72,4	64,3
Sat. de Mg ²⁺ %	25,6	18,9	18,4	19,3	18,4	16,9	16,2	20,4
Sat. de K ⁺ %	9,4	10,5	10,6	11,8	7,4	14,5	6,7	13,3
Sat. Básica (S) %	77,0	80,8	87,6	78,8	79,1	64,9	77,8	85,2
Ca ²⁺ / Mg ²⁺	2,33	3,63	3,65	3,48	4,0	3,86	4,47	3,15
(Ca ²⁺ + Mg ²⁺) / K ⁺	9,09	8,33	8,07	7,36	12,5	5,67	13,3	6,38
Mg ²⁺ / K ⁺	2,73	1,8	1,73	1,64	2,5	1,17	2,43	1,54
Al ³⁺ Interc. mg/kg	0,65	< 0,01	0,34	< 0,01	0,54	< 0,01	0,64	1,12
Taxonomía	Argiudol típico	Argiudol típico	Argiudol típico	Argiudol vértico	Argiudol típico	Hapludol típico	Argiudol típico	Hapludol éntico

ANÁLISIS DE SUELOS

Productos correctores

Calizas:

Calcita: 40% de Ca

Dolomita: 21,6% Ca y 13% Mg



- Cal viva (OCa)
- Cal apagada (OH)₂Ca
- Escorias
- Conchilla Marina

Valor neutralizante (Índice 100 para caliza)

- CO_3Ca 100
- CO_3Mg 119
- OCa 178
- OMg 250
- $(\text{OH})_2\text{Ca}$ 135
- $(\text{OH})_2\text{Mg}$ 172

Efectividad del Producto

- Composición química
- Presentación física (tamaño de partículas – finura)
- $E. \text{ química} = P \times (A \times 0,1) + (B \times 0,2) + C$

Donde:

P: Pureza del material

A: % de partículas > a 840 μ

B: % partículas entre 250 -840 μ

C: % partículas < 250 μ

Poder relativo de neutralización total: PRNT

$$\text{PRNT} = \frac{\text{equivalente en } \text{CO}_3\text{Ca} \times \text{reactividad}}{100} \quad (\text{Melgar, 1996})$$

Valor equivalente de neutralización para materiales correctores

CORRECTOR	VALOR EQUIVALENTE DE NEUTRALIZACIÓN
Carbonato de calcio	100
Calcáreo dolomítico	95-108
Cal calcítica	85-100
Cal viva (Oca)	150-175
Cal hidratada (CaOH)	120-135

Reactividad del material según tamaño de la partícula

Tamaño de la partícula (mm)	Reactividad (%)
1	Muy lenta 0
0,8	75
0,4	90
0,3	100
0,15	125

pH y contenido de calcio (Ca^{2+})

pH	Calcio activo	Estado cálcico	Necesidades de encalar
$\text{pH} \geq 6,5$	Cualquiera	Satisfactorio	No necesita encalar Control cada 2 o 3 años.
$5,5 < \text{pH} < 6,5$	$\geq 2\%$ ó 10 meq/100gr	Satisfactorio	Encalado de conservación
	$< 2\%$ ó 10 meq/100gr	No satisfactorio	Encalado de corrección
$\text{pH} \leq 5,5$	Cualquiera	No satisfactorio	Encalado de corrección

Aplicación

- Calizas aprox. 3-6 meses antes de sembrar
- Cal viva o apagada aprox. 1 mes o más antes de sembrar
- Época: otoño y primavera (suelo desnudo y sin cultivo)
- *Enterrar el producto con rastras*
- *No modificar mas de 1 unidad de pH en una aplicación (bloqueo e inmovilización de nutrientes vida microbiana)*
- *No mezclar con fertilizantes nitrogenados o estiércoles*
(NH_3) ↑

RECOMENDACIONES GENERALES QUE DEBEN SER CORROBORADAS MEDIANTE ENSAYOS LOCALES

ENCALADO DE CORRECCIÓN

La dosis necesaria para elevar 1 Ud de pH en distintas clases de suelo y para una profundidad de 15 cm. (si se quiere modificar 30 cm de suelo se multiplican estas cantidades por 2)

Caliza necesaria (Kg CaCO₃) para elevar el pH de:

	4,5 a 5,5	5,5 a 6,5
Suelos arenosos	1.500	2.250
Suelos francos	2.000	3.000
Suelos limosos	2.750	3.750
Suelos arcillosos	3.500	4.250

ENCALADO DE MANTENIMIENTO O DE CONSERVACIÓN

Una vez conseguido el pH deseado hay que hacer un encalado de mantenimiento

	Cal viva (CaO) Kg/ha año	Cal apagada (Ca(OH)₂) Kg/ha año	Cal molida Kg/ha año
Tierras ligeras	200 - 400	300 - 600	400 - 800
Tierras silíceo arcillosas	400 - 500	600 - 750	800 - 1.000
Tierras arcillosas	500 - 600	750 - 800	1.000 - 1.200