



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
AGROPECUARIAS
INIA

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS

ACIDEZ DE LOS SUELOS Y EFECTOS DEL ENCALADO

RENÉ BERNIER V.
Ing. Agr. M.Sc.
MARTA ALFARO V.
Ing. Agr. Ph. D.





GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
AGROPECUARIAS
INIA

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS

ACIDEZ DE LOS SUELOS Y EFECTOS DEL ENCALADO

RENÉ BERNIER V.
Ingeniero Agrónomo, M.Sc.

MARTA ALFARO V.
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

Osorno, Chile 2006

Editores:

René Bernier V.
Ingeniero Agrónomo, M.Sc.

Marta Alfaro V.
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.
INIA Remehue

Director Responsable:

Julio Kalazich B.
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.
Director Regional INIA Remehue

Boletín INIA N° 151

Este Boletín fue editado por la Dirección Nacional
del Instituto de Investigaciones Agropecuarias
del Ministerio de Agricultura

Permitida su reproducción total o parcial, citando la fuente y el autor

Cita bibliográfica correcta:

Bernier, R. y Alfaro, M., 2006. Acidez de los Suelos y Efectos del Encalado.
Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA.
Osorno, Chile.
Boletín INIA N° 151, 46 p.

INIA-Remehue. Ruta 5, 8 km al norte de Osorno, X Región. Teléfono (64) 233515

E-mail: inforemehue@inia.cl
Casilla Postal 24-O, Osorno-

ISSN 0717-4829

Diseño, Diagramación e Impresión:

Imprenta América Osorno
Cantidad de ejemplares: 1.000

Osorno, Chile 2006

INDICE

INTRODUCCIÓN	5
I. ACIDEZ DE LOS SUELOS	7
1. Aspectos Generales	
1.1 Causas de la acidificación de los suelos	9
1.1.1 Alta caída pluviométrica	9
1.1.2 Altos contenidos de materia orgánica y laboreo de suelo	10
1.1.3 Uso de fertilizantes nitrogenados de reacción ácida	11
2. Efecto de los fertilizantes amoniacales sobre la reacción del suelo	13
3. Aluminio intercambiable	14
4. Clasificación de la acidez del suelo	15
5. Relación del pH en agua y el porcentaje de saturación de Al en suelos Trumaos	15
6. Toxicidad de aluminio	16
II. EFECTO DE LA ACIDEZ DEL SUELO EN EL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS Y PRADERAS	17
1. Acidez de suelo tolerable por los cultivos	17
2. Efecto de la acidez del suelo en el rendimiento de los cultivos y praderas	19
2.1 Cultivos	19
2.2 Praderas	19
2.2.1 Rendimiento	19

2.2.2	Efecto de la acidez del suelo sobre la calidad nutritiva de las praderas	20
2.2.3	Efecto de la acidez del suelo en la producción animal	24
2.2.3.1	Efectos directos	25
2.2.3.2	Efectos indirectos	26
III.	ENCALADO	28
1.	Enmiendas calcáreas	28
2.	Calidad de las enmiendas calcáreas	30
2.1	Pureza de las enmiendas	30
2.2	Tamaño de las partículas	31
2.3	Poder relativo de neutralización total (PRNT) o valor agrónomico (VA)	33
3.	Reacciones de la cal en el suelo	36
4.	Determinación de los requerimientos de cal	38
4.1	Cálculo de la dosis de cal según el pH (agua)	38
4.2	Cálculo de la dosis de cal según el porcentaje de saturación de Al	39
5.	Efectos de la aplicación de cal	43
5.1	Toxicidad de aluminio	43
5.2	Disponibilidad de fósforo	43
5.3	Fijación de nitrógeno	43
5.4	Física de suelos	44
IV.	LITERATURA CONSULTADA	45

INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico experimentado por el país en los últimos años se ha basado principalmente en la explotación de sus recursos naturales, dentro de los cuales el sector agropecuario ha tenido un rol fundamental a través del aumento continuo de sus rendimientos y una fuerte alza en las exportaciones a nivel nacional.

Las particulares condiciones agroclimáticas del país han permitido la definición de diferentes zonas de producción a lo largo del territorio nacional, caracterizándose la Novena y la Décima Regiones por su producción pecuaria. La producción ganadera de esta área se basa en praderas, desarrolladas sobre suelos de origen volcánico. Estos suelos son considerados como los de mayor potencial productivo para ambas regiones.

Los suelos volcánicos se caracterizan por una generalizada deficiencia de fósforo y una acentuada acidez, producto de las condiciones climáticas naturales y del manejo productivo al que han sido sometidos.

Con el fin de contribuir al desarrollo y competitividad del sector ganadero del país, el Ministerio de Agricultura ha creado un Sistema de Incentivos para la Recuperación de Suelos Degradados (SIRSD), con énfasis en corregir la deficiencia de fósforo y favorecer la neutralización de la acidez de los suelos.

A la fecha han existido esfuerzos parciales en ambas regiones por suplir la falta de información existente en estos temas, sin que haya existido hasta ahora un documento que recopile aspectos básicos y prácticos de la temática, de manera simple y accesible a estudiantes, productores y profesionales del ámbito.

Es en este marco que se ha hecho necesaria la recopilación de información actualizada en estas materias con el fin de uniformar el conocimiento básico disponible y su aplicabilidad desde el punto de vista práctico de terreno.

En este texto se entregan antecedentes básicos sobre los procesos naturales y antropogénicos que dan origen a la acidez de los suelos y su impacto en el rendimiento y calidad de cultivos y praderas. Se entrega, además, información relacionada con los diferentes tipos de materiales encalantes, formas de evaluación y recomendaciones para un adecuado uso de éstos.

I. ACIDEZ DE LOS SUELOS

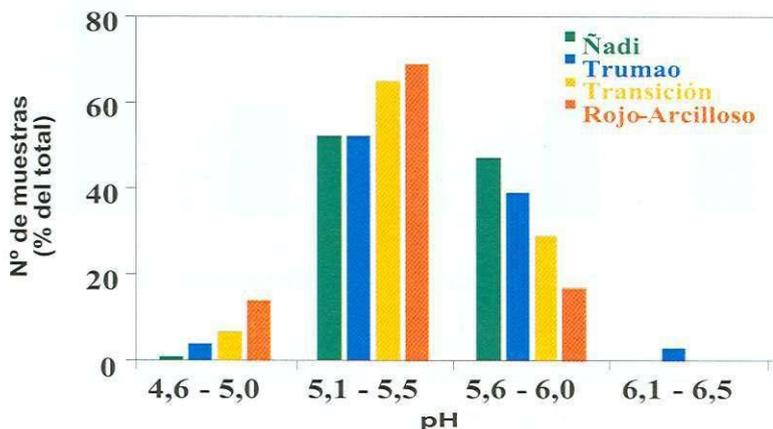
1. ASPECTOS GENERALES

La productividad de los suelos volcánicos de la Décima Región se ve afectada principalmente por condiciones de baja fertilidad, especialmente severa deficiencia de fósforo y acentuada acidez. Este último factor se manifiesta como toxicidad de aluminio, afectando el crecimiento de las raíces de plantas sensibles y consecuentemente, disminuyendo sus rendimientos.

La acidez de los suelos es un problema que afecta a amplias zonas de Chile, lo que se ve acentuado desde la Octava a la Décima Regiones.

En la Décima Región, debido a las características climáticas como la precipitación, el alto contenido de materia orgánica del suelo y a su material original (cenizas y vidrios volcánicos), los suelos agrícolas presentan variadas condiciones de acidez, expresadas en términos de pH (Figura 1).

Figura 1. Distribución de frecuencia de valores de pH (agua) de diferentes agrupaciones de suelos agrícolas de la Décima Región.



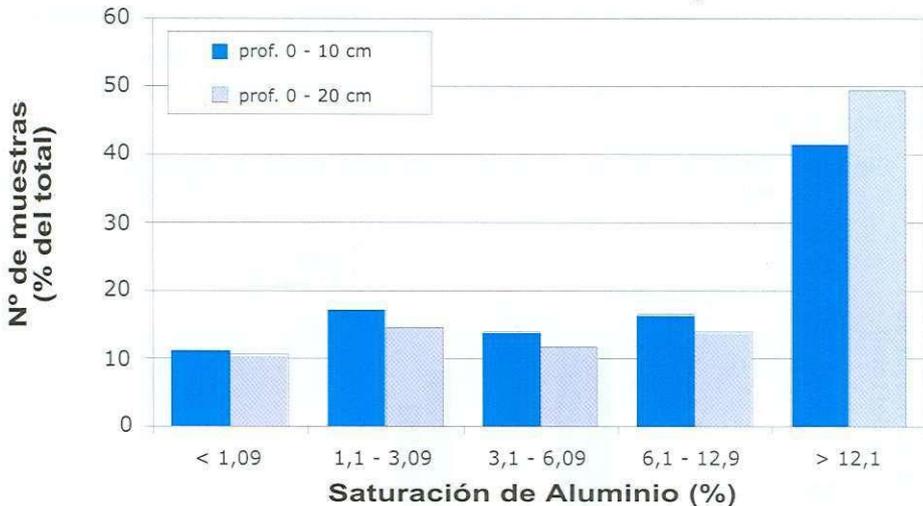
Fuente: Laboratorio de suelos de INIA Remehue (1980).

Como se aprecia en la Figura 1, los valores de pH (agua) más frecuentes en suelos de la X Región se ubican entre 5,1 y 6,0 es decir desde fuertemente ácidos a moderadamente ácidos.

Si bien la expresión del pH es una medida universalmente aceptada del grado de acidez, para los suelos de la IX y X Regiones, aparece de mayor relevancia agronómica la expresión del porcentaje de saturación de aluminio (Al) y de la Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva (CICE) del suelo (ver sección 5.0).

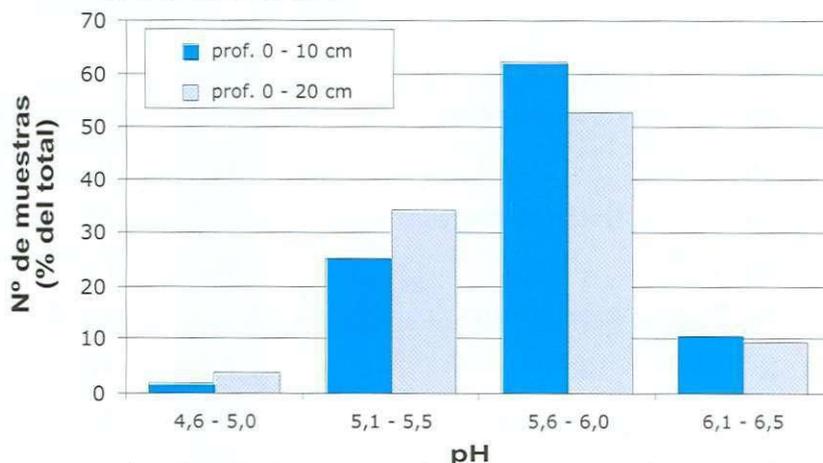
Al estudiar los resultados de porcentaje de saturación de aluminio obtenidos por el Laboratorio de Suelos de INIA Remehue, de 11.596 muestras provenientes de suelos de diferentes sectores de la región y analizadas los años 2003 y 2004, se aprecia que aproximadamente el 50% de ellas presentan más de 12% de saturación (Figura 2), valor que se considera elevado y limitante para una apreciable cantidad de cultivos sensibles.

Figura 2. Distribución de frecuencia del porcentaje de saturación de aluminio en muestras de suelos analizadas los años 2003 y 2004.



De estas muestras, más del 50%, presentan un valor de pH en agua entre 5,6 y 6,0 correspondiendo a la categoría moderadamente ácidos (Figura 3).

Figura 3. Distribución de frecuencia del pH (agua) en muestras de suelos analizadas los años 2003 y 2004.



Al comparar las Figuras 1 y 3 se puede apreciar que en la primera (año 1980) se estableció un número importante de muestras con valores de pH en el rango 5,1 a 5,5 en circunstancias de que en el año 2003 - 2004 (Figura 3), en ese rango se ubicó sólo un 30% de las muestras analizadas. Esta diferencia se podría atribuir a la aplicación de enmiendas calcáreas, lo que habría hecho elevar los valores del pH.

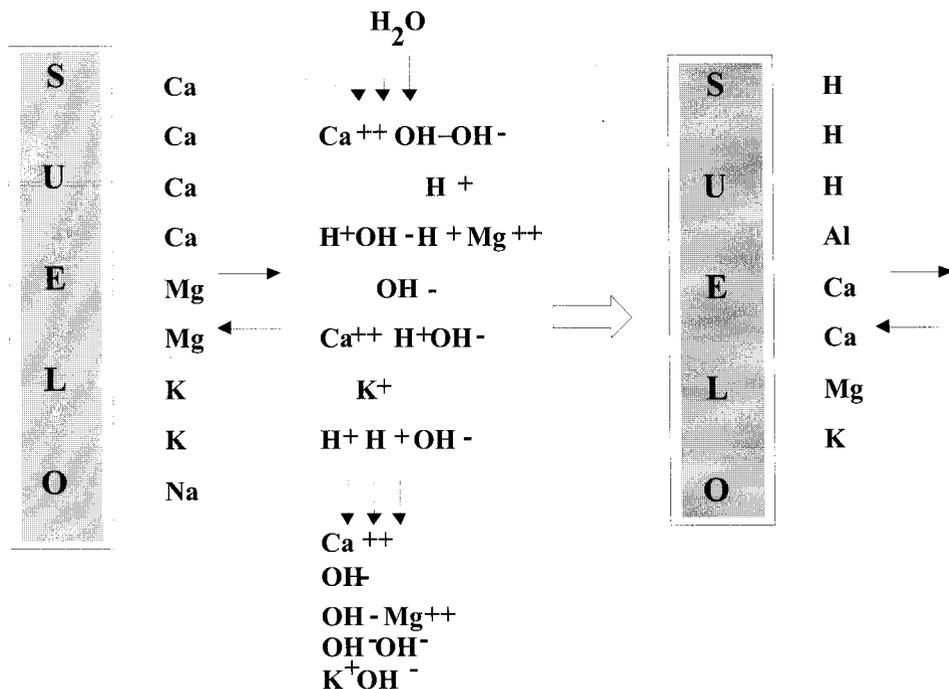
1.1 Causas de la acidificación de los suelos

La acidez de los suelos tiene diferentes y variadas causas. Unas son de origen natural y otras provocadas por el hombre, a través del manejo.

Entre las de origen natural están la alta caída pluviométrica característica de esta zona y los elevados contenidos de materia orgánica que se encuentran normalmente en los suelos del sur del país.

1.1.1 Alta caída pluviométrica

En la X Región se registran precipitaciones que fluctúan entre 1.200 a 3.200 mm anuales, con una marcada concentración en otoño e invierno. Estas altas precipitaciones provocan la lixiviación o lavado de cationes intercambiables (calcio, magnesio, potasio y sodio) desde el suelo (Figura 4).

Figura 4. Esquema de la lixiviación de los cationes de intercambio.

El agua que pasa a través de los poros del suelo arrastra a los cationes de intercambio, especialmente los que se encuentran menos fuertemente ligados a la arcilla (potasio y sodio), dejando lugar a cationes de mayor fuerza iónica como aluminio (Al) e hidrógeno (H).

El movimiento de cationes a capas inferiores del suelo (lixiviación) contribuye a la acidificación debido a que por la presencia de aniones (iones de carga negativa) se forman pares iónicos, arrastrando los cationes con el movimiento del agua.

1.1.2 Altos contenidos de materia orgánica y laboreo de suelo

La materia orgánica del suelo se descompone con la ayuda de microorganismos produciendo constantemente anhídrido carbónico (CO_2), que fácilmente se transforma en bicarbonato (HCO_3^-), de acuerdo a la siguiente reacción:



Esta reacción aporta H^+ que disminuye el pH del suelo, incrementando su acidez.

La estructura química de la materia orgánica de los suelos es muy variada, y depende de los materiales residuales (vegetales o animales) desde donde se origina. En general, en condiciones favorables de temperatura y humedad en el suelo, los residuos orgánicos son atacados (oxidados) por la flora microbiana y transformados en productos minerales (mineralización), generando reacciones que liberan H^+ que son agentes ácidos.

1.1.3 Uso de fertilizantes nitrogenados de reacción ácida

Actualmente el mercado de los fertilizantes ofrece variados productos que aportan nitrógeno (N) a cultivos y praderas.

El N que se encuentra en los fertilizantes puede estar como nitrato (NO_3^-), como amonio (NH_4^+) o como amida (NH_2), en el caso de la urea.

Las plantas absorben el N preferentemente como nitrato, aunque también absorben amonio. Cuando las plantas absorben N en la forma de amonio no se produce la reacción de nitrificación que libera H^+ .

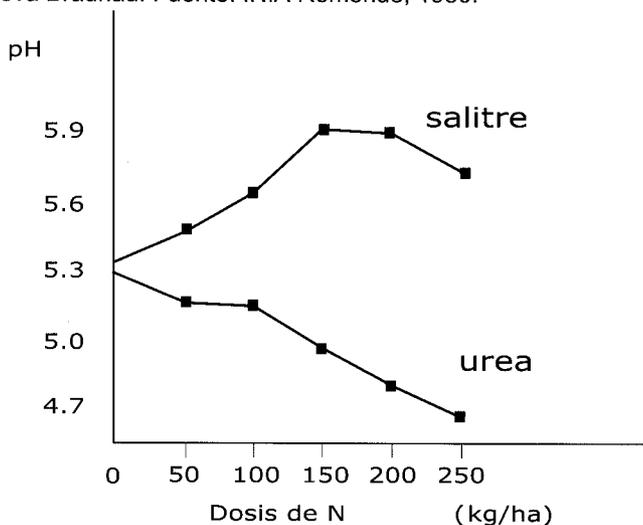
En el Cuadro 1 se indican las alternativas de fertilizantes nitrogenados disponibles en el mercado y su respectivo índice de acidez. Los nitratos producen una reacción alcalina en el suelo (aumentan el pH), resultando equivalente a una aplicación de carbonato de calcio. En cambio, los fertilizantes amoniacales o la urea producen una reacción ácida, la que debería ser neutralizada por una cantidad determinada de carbonato de calcio.

Cuadro 1. Alternativas para la fertilización nitrogenada en suelos con riesgo de acidificación.

Productos	Concentración N	CaCO ₃ equivalente en exceso (E) o déficit (D)	
		kg CaCO ₃ /kg N	kg CaCO ₃ /100 kg Fertilizante
Salitre Na	16%	1,80 (E)	28,80 (E)
Nitrocal	15,5% N	1,57 (E)	24,30 (E)
Supernitro Mg	25% N	0,17 (E)	4,20 (E)
Nitroplus	22% N	0 (neutro)	0 (neutro)
Supernitro	25% N	0,14 (D)	3,50 (D)
Nitromag	27% N	0,87 (D)	23,60 (D)
Urea	46% N	1,80 (D)	82,80 (D)
Urea + Cal	3,6 kg CaCO ₃ /kg N	1,80 (E)	82,80 (E)
Urea + Cal	1,8 kg CaCO ₃ /kg N	0 (neutro)	0 (neutro)

Fuente: Adaptado de Suárez (1996).

En la Figura 5 se muestra el efecto de la aplicación de salitre (nitrato) y de urea (amida) sobre la reacción de un suelo Nueva Braunau, de la provincia de Llanquihue.

Figura 5. Efecto de la aplicación de salitre y urea en el pH (agua) de un suelo de la serie Nueva Braunau. Fuente: INIA Remehue, 1980.

La aplicación de 250 kg de N como nitrato sódico (salitre) produce un aumento en el pH del suelo, desde 5,3 a 5,9. En cambio, la aplicación de la misma dosis de N a la forma de urea provoca la caída del pH desde 5,3 a 4,7.

Si bien se puede determinar la magnitud de la acidificación provocada por la acción de la oxidación del N orgánico o amoniacal a nitrato y por tanto se podría calcular la cantidad necesaria de enmienda para neutralizar dicho efecto, lo más recomendable es neutralizar los factores ácidos del suelo (Al^{3+} y H^+) a niveles adecuados de tal forma que la aplicación de los fertilizantes de reacción ácida no provoquen problemas al desarrollo de los cultivos o praderas.

Además de los factores citados, también provocan acidez del suelo la extracción de elementos básicos a través de las cosechas y la fijación biológica de nitrógeno mediante la simbiosis leguminosa - rizobio.

2. EFECTO DE LOS FERTILIZANTES AMONIACALES SOBRE LA REACCIÓN DEL SUELO

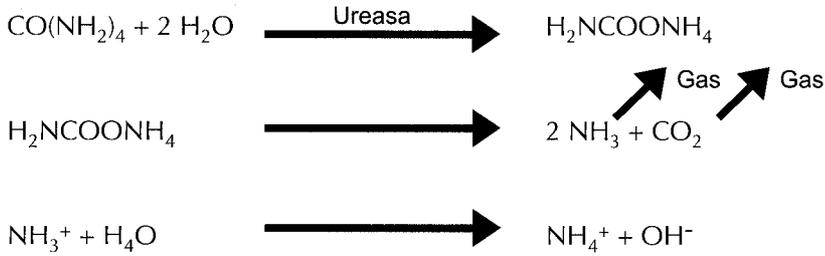
La acidificación que provocan los fertilizantes amoniacales y la urea en el suelo se expresa como el peso de carbonato de calcio (CaCO_3) que neutraliza la acidez del fertilizante.

Las reacciones que se producen por oxidación del amonio se muestran a continuación:



La oxidación biológica del ión amonio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-) libera H^+ aumentando la concentración de éstos en la solución del suelo (baja el pH).

En el caso de la urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, ésta debe hidrolizarse en la presencia de un catalizador o enzima llamada ureasa. La primera reacción forma carbamato de amonio que es un compuesto muy inestable. Esta reacción eleva el pH en las inmediaciones del gránulo de urea a valores superiores a 8,0. En este ambiente alcalino el carbamato de amonio se descompone rápidamente en amoníaco (NH_3) y CO_2 .

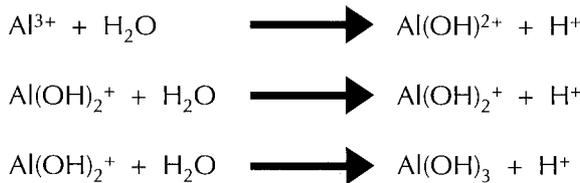


El NH_3 en contacto con el agua se transforma en amonio (NH_4^+). La transformación de amonio a nitrato, o de amida a amonio libera protones o agentes acidificantes, provocando la acidificación de la solución del suelo.

La magnitud del cambio de acidez por causa de la aplicación de fertilizantes nitrogenados acidificantes depende principalmente de la dosis de N aplicada y de la fuente utilizada.

3. ALUMINIO INTERCAMBIABLE

El aluminio intercambiable (Al^{3+}) presente en la solución del suelo es reconocido como uno de los principales factores en el desarrollo de la acidez del suelo. Los iones Al^{3+} desplazados desde las arcillas por otros cationes se hidrolizan (reaccionan con una molécula de agua) para formar complejos hidroxialumínicos. La hidrólisis de las formas monoméricas de Al se ilustran en las siguientes reacciones:



Cada una de las reacciones libera H^+ contribuyendo a la acidificación del suelo.

4. CLASIFICACIÓN DE LA ACIDEZ DEL SUELO

La acidez del suelo generada por los procesos mencionados anteriormente se puede clasificar de la siguiente forma:

- **Acidez activa:** hidrógeno (H^+) disociado en la solución del suelo y proveniente de diferentes fuentes.
- **Acidez intercambiable:** hidrógeno y aluminio intercambiables (H^+ y Al^{3+}) retenidos en los coloides del suelo por fuerzas electrostáticas.
- **Acidez no intercambiable:** hidrógeno en enlace covalente en la superficie de las arcillas de carga variable.
- **Acidez potencial:** acidez intercambiable + acidez no intercambiable.

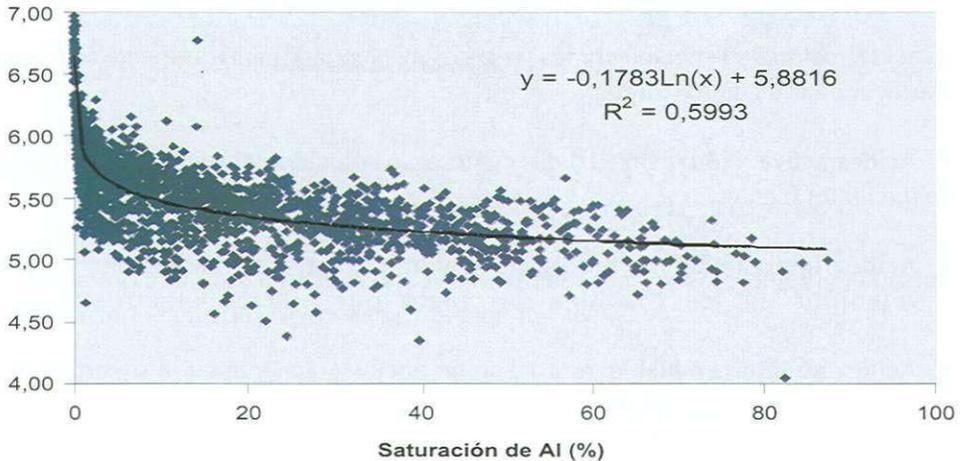
La acidez de un medio o solución está determinada por la actividad de los iones hidrógeno (H^+) y se expresa con un parámetro denominado potencial hidrógeno (pH). Debido a que la concentración de iones hidrógeno en las soluciones es muy baja, el pH se define en forma logarítmica. De ahí que el pH se defina como el valor inverso del logaritmo de la actividad de iones H^+ , de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$pH = \log \frac{1}{(H^+)}$$

La escala del pH cubre un rango que va de 0 a 14. El pH 7.0 es neutro, mientras que los valores superiores son alcalinos y los inferiores son ácidos.

5. RELACIÓN DEL pH EN AGUA Y EL PORCENTAJE DE SATURACIÓN DE Al EN SUELOS TRUMAOS

En los suelos trumaos de la X Región que contienen altos niveles de Al^{3+} , el porcentaje de saturación de aluminio (% saturación Al) de la CICE representa mejor la acidez (agronómica) de los suelos que el pH en agua o cualquier otro electrolito. En cambio en suelos con contenidos de Al^{3+} inferiores a los trumaos existe una relación directa entre ambos indicadores (Figura 6).

Figura 6. Relación entre pH (agua) y saturación de Al (%).

En la Figura 6, se comparan ambos indicadores en base a los resultados de aproximadamente 11.000 muestras de suelos trumaos analizadas en el Laboratorio de Suelos de INIA (años 2003 y 2004). Se observa que aún con pH superiores a 5,5 se pueden encontrar porcentajes de saturación de aluminio superiores a 40 ó 60%. También se puede apreciar que con valores de pH cercanos a 6,0 los porcentajes de saturación serían muy inferiores a 10%.

En los suelos rojo arcillosos la relación pH en agua y saturación de aluminio presenta características similares a las determinadas en trumaos.

6. TOXICIDAD DE ALUMINIO

En condiciones de acidez, iones como Al^{3+} y Mn^{2+} se encuentran en la solución del suelo. Estos elementos aunque estén en bajas concentraciones, son tóxicos para la mayoría de los cultivos.

El término "toxicidad" en el caso del aluminio se refiere a varios aspectos que afectan el normal desarrollo de las plantas sensibles a la acidez, lo que reduce su crecimiento y desarrollo.

La presencia de altas concentraciones de Al en la solución del suelo inhiben también la absorción de calcio (Ca) y magnesio (Mg) por las plantas.

II. EFECTO DE LA ACIDEZ DEL SUELO EN EL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS Y PRADERAS

1. ACIDEZ DE SUELO TOLERABLE POR LOS CULTIVOS

Las plantas tienen un rango de pH de suelo que es óptimo para su crecimiento (Cuadro 2), de manera que si éste baja a rangos distintos del óptimo, la planta no puede desarrollar su sistema radicular normalmente (Foto 1), reduciéndose la absorción de agua y nutrientes y por tanto, el crecimiento y el rendimiento del cultivo o la pradera.

Cuadro 2. Rango de pH deseable para el cultivo de diferentes especies de interés agrícola.

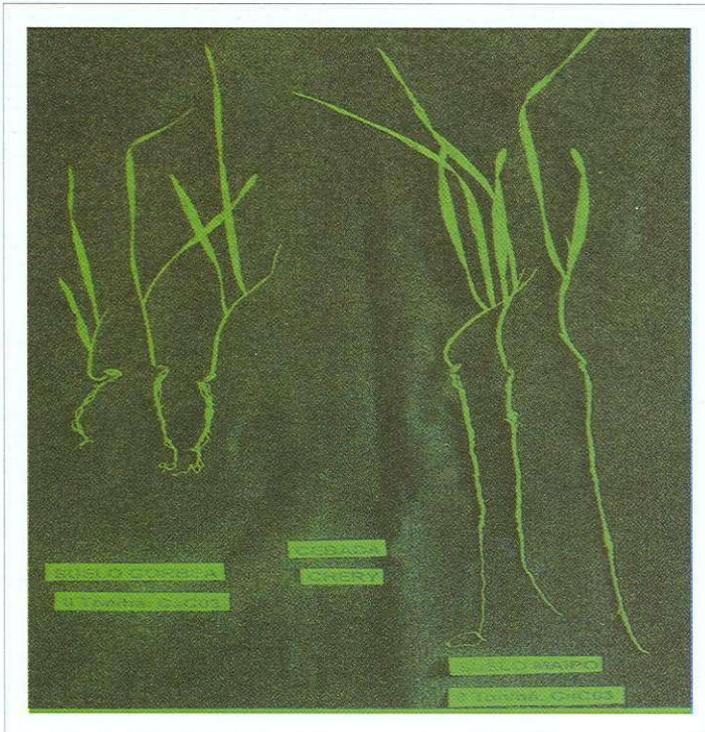
pH	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
CULTIVOS Y FORRAJERAS								
Alfalfa							_____	_____
Remolacha						_____	_____	_____
Cebada						_____	_____	_____
Trébol Rosado						_____	_____	_____
Pasto Ovillo						_____	_____	_____
Trébol Blanco						_____	_____	_____
Arveja						_____	_____	_____
Trigo					_____	_____	_____	_____
Maíz					_____	_____	_____	_____
Avena					_____	_____	_____	_____
Centeno					_____	_____	_____	_____
Papas					_____	_____	_____	_____
Festuca					_____	_____	_____	_____
HORTALIZAS								
Espárrago							_____	_____
Lechuga							_____	_____
Apio							_____	_____
Cebolla							_____	_____
Coliflor							_____	_____
Repollo							_____	_____
Pepino							_____	_____
Zanahoria							_____	_____
Tomate							_____	_____
FRUTALES								
Peral							_____	_____
Manzano							_____	_____
Vid							_____	_____
Duraznero							_____	_____
Frambueso							_____	_____
Frutilla							_____	_____
Arándano							_____	_____

Adaptado de Venegas (1993)

Es interesante notar que para algunas especies (i.e. festuca, arándano) niveles medianamente ácidos o ácidos del suelo son adecuados para el crecimiento, por lo que el nivel de acidez a alcanzar óptimo dependerá del cultivo del que se trate. La acidez desde un punto de vista agronómico no es un problema de los suelos, sino de los cultivos.

Plantas cuyo nivel óptimo de pH es cercano a neutro o alcalino (pH 7 o mayor) son en general más susceptibles a una reducción del pH del suelo o incrementos de la acidez del mismo. Por ejemplo, se sabe que la cebada es el cereal más susceptible a la acidez de suelo, no tolerando más allá de un 5% de saturación de Al (Foto 1). Le sigue en esta escala el trigo (5-10%), luego el triticale (10-20%), la avena (15-25%) y finalmente el centeno (20-30%).

Foto 1. Efecto de la acidez de suelo en el crecimiento y desarrollo de plántulas de cebada. A la izquierda, una plántula creciendo en un suelo con 21% de saturación de aluminio. A la derecha, una plántula creciendo en un suelo con 0% de saturación de aluminio. Se observa el efecto de la acidez en el menor desarrollo radical y por ende, de la plántula en su conjunto. Fuente: Gallardo et al. (1995).



2. EFECTO DE LA ACIDEZ DEL SUELO EN EL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS Y PRADERAS

La acidez del suelo disminuye el rendimiento de los cultivos y praderas, porque reduce el crecimiento radicular, limitando la absorción de agua y nutrientes.

2.1 Cultivos

La magnitud en la disminución del rendimiento dependerá de la especie e incluso del cultivar dentro de un mismo cultivo. En el caso de trigos invernales, la respuesta en rendimiento a la corrección de la acidez del suelo puede variar entre un 8 y 31% (Cuadro 3), por lo que especies y cultivares susceptibles a la acidez del suelo no deben sembrarse en suelos ácidos o en conjunto con fuentes fertilizantes amoniacales, sin que previamente se haya corregido dicho problema.

Cuadro 3. Efecto de la corrección de la acidez del suelo por adición de 1 ton cal/ha sobre el rendimiento de cultivares de trigo (qqm/ha). Promedio de tres localidades en la IX Región. Temporada 1994/95, sistema de labranza convencional. Adaptado de Gallardo et al. (1995).

Cultivar	Sin Cal	Con Cal	Incremento (%)
1	51,3	56,1	9
2	43,3	51,5	19
3	52,1	56,2	8
4	37,4	44,0	18
5	58,5	66,2	13
6	44,9	58,6	31
Promedio	47,9	55,4	16

Las tres localidades incluyen distintas zonas geográficas

2.2 Praderas

2.2.1 Rendimiento

Así como la acidez del suelo afecta el rendimiento de los cultivos de manera diferenciada, también afecta el rendimiento y calidad de las praderas de distinta manera, dependiendo del tipo de forrajera y del cultivar del que se trate (gramínea o leguminosa, perenne o anual). En este ámbito, la acidez del suelo no sólo afecta el rendimiento de las forrajeras sino que también su persistencia y calidad nutritiva.

En términos generales, las leguminosas son más susceptibles a la acidez de suelo

que las gramíneas. También, entre más productiva sea la especie, mayor es su susceptibilidad a la acidez y mayor será su respuesta a la aplicación de una enmienda calcárea (Cuadro 4).

Las especies que mejor toleran la acidez de los suelos son aquellas especies nativas o naturalizadas, adaptadas a tales condiciones, que han desarrollado mecanismos que les permiten sobrevivir bajo esas condiciones.

Dentro de los mecanismos conocidos destacan la capacidad de excluir el Al durante el proceso de absorción de nutrientes y agua, y la capacidad de neutralizar el Al al interior de la raíz formando compuestos insolubles. Ejemplos de estas especies son el pasto miel (*Holcus lanatus*), la chéptica (*Agrostis capillaris*) y la lotera (*Lotus uliginosus*). Lamentablemente desde un punto de vista productivo, el potencial de crecimiento y la calidad de estas especies puede llegar a limitar la producción animal de áreas acidificadas.

Cuadro 4. Efecto de la incorporación de cal sobre el rendimiento total (kg MS/ha/año) y contribución de la especie pura (% base peso seco) de distintas plantas forrajeras.

Especie forrajera	Rendimiento total		Especie pura (% bps)	
	Sin Cal	Con Cal	Sin Cal	Con Cal
Trébol blanco	6464	7127	25	32
Trébol rosado	10498	12272	53	69
Trébol rosado ¹	5230	5750	nd	nd
Alfalfa ¹	2470	3890	nd	nd
Lotus	8202	9451	41	31
Ballica bianual (Tetrone)	9785	12890	46	65
Ballica bianual (Concord) ²	9110	10560	nd	nd
Ballica perenne (Nui)	8721	11183	58	71
Pasto miel chilote	7831	9497	41	57

nd: No disponible

Adaptado de Alfaro et al. (1998), suelo trumao (Chiloé), promedio de tres años (1994-1997). Saturación de Al del suelo (0-15 cm) al inicio del ensayo: 36,3%; pH al agua 5,0. Con cal: 3 ton cal/ha al establecimiento.

¹ Adaptado de Mora y Demanet (1995), suelo trumao (Panguipulli), saturación de Al del suelo (0-20 cm) al inicio del ensayo: 11%; pH al agua 5,0. Con cal: 4 ton cal/ha al establecimiento.

² Adaptado de Mora y Demanet (1995), suelo trumao (Hualpín), saturación de Al del suelo (0-20 cm) al inicio del ensayo: 22%; pH al agua 5,0. Con cal: 4 ton cal/ha al establecimiento.

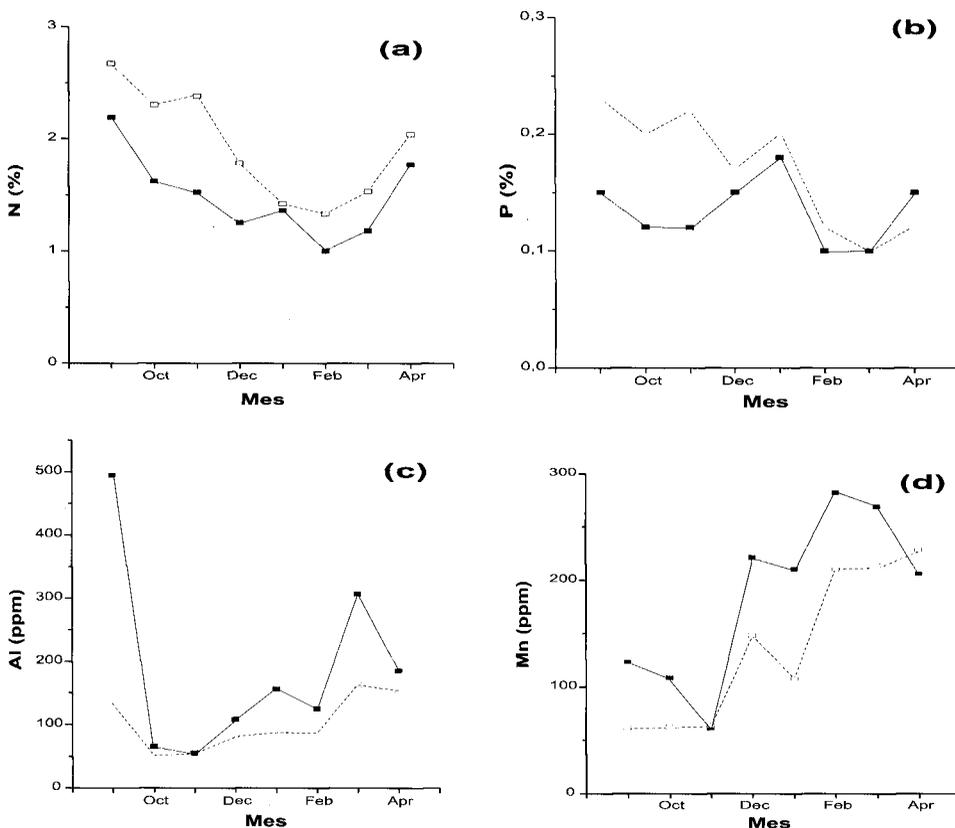
2.2.2 Efecto de la acidez del suelo sobre la calidad nutritiva de las praderas

Debido a que la acidez de los suelos reduce la producción y persistencia de las especies sembradas y afecta el desarrollo de especies nobles en praderas naturalizadas,

la calidad nutricional de las praderas que crecen en suelos ácidos es menor que aquella de las desarrolladas en sectores sin esta limitación o donde la acidez ha sido neutralizada.

La menor calidad nutritiva se refleja en una menor concentración de N, y por tanto de proteína, menor digestibilidad y menor concentración de fósforo, calcio y magnesio en el forraje. La concentración promedio de N en las plantas desarrolladas en suelos ácidos puede reducirse hasta en un 30% en relación a plantas de gramíneas forrajeras creciendo en sectores sin limitación (Figura 7).

Figura 7. Variación estacional del contenido de nitrógeno (a), fósforo (b), aluminio (c) y manganeso (d) en una pradera de ballica de rotación cv. Concord sembrada en un suelo trumao con 10% (□) y 30% (■) de saturación de Al. Se observa una disminución de la concentración foliar de los dos primeros nutrientes y un incremento de la concentración foliar de los metales por efecto de la saturación de aluminio. Fuente: Mora et al. (2004).



La concentración de N y cationes en el forraje disminuye, porque al reducirse el sistema radicular por el efecto tóxico del Al, se reduce el volumen de suelo que la planta puede explorar para absorber nutrientes, en especial en el periodo invernal cuando éstos se encuentran en menor cantidad en el suelo debido a las altas precipitaciones, y a la mayor abundancia relativa de cationes H^+ y Al^{3+} que compiten con ellos por los sitios de intercambio disponibles en las arcillas.

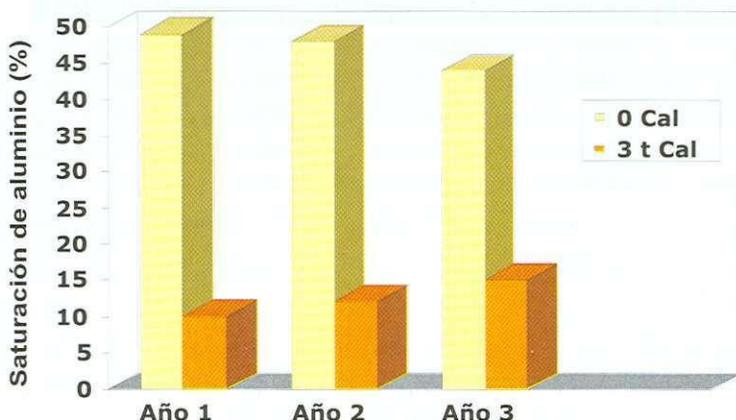
En el periodo de primavera, la reducción de la concentración de los cationes también se ve potenciada por el efecto de dilución que resulta del crecimiento explosivo en materia seca en respuesta al aumento de temperatura. Esto hace que el periodo de mayor deficiencia de estos nutrientes sean el invierno y la primavera, cuando la concentración de Al y manganeso (Mn) en el forraje puede aumentar a niveles críticos para la producción animal.

En especies o cultivares altamente susceptibles a la acidez del suelo, los efectos sobre la acumulación de elementos tóxicos en las plantas es aún mayor. Demanet y Mora (1993) encontraron que en ballica Concord establecida en suelos con 32% de saturación de aluminio, la concentración foliar de Al alcanzó a 3.400 ppm, mientras que en plantas creciendo en suelos con 1% de saturación de Al, este valor alcanzó solamente a 250 ppm.

En praderas que se desarrollan en suelos ácidos, también es posible encontrar mayor concentración de Al y Mn en el forraje (Figura 7), debido a que estos cationes se vuelven más solubles en la medida que un suelo se acidifica. Estos efectos se acentúan al inicio de primavera, debido al crecimiento explosivo de la pradera, que demanda una alta cantidad de nutrientes en un corto periodo de tiempo, pudiendo absorber elementos tóxicos. Estos elementos son absorbidos además en reemplazo de otros cationes tales como Ca y Mg, menos abundantes en el complejo de intercambio del suelo bajo condiciones de acidez.

Al corregirse el problema de acidez del suelo por incorporación de cal, se produce la neutralización del Al (disminución de la saturación de Al del suelo) (Figura 8). Esto incrementa la disponibilidad de P y bases de intercambio, lo que se traduce en un mayor crecimiento de la pradera e incremento de las concentraciones foliares de P, Ca y/o Mg en las plantas, según el tipo de cal utilizada (calcítica o dolomítica).

Figura 8. Efecto de la aplicación de cal (3 ton/ha) sobre la saturación de aluminio de un suelo trumao con 36% de saturación de aluminio inicial, promedio de 3 años, 0-10 cm. Adaptado de Alfaro et al. (1998).



Como se observa en la Figura 8, el efecto neutralizante de la aplicación de cal no es permanente en el tiempo, tendiendo el suelo a volver a su condición original de acidez. Esto puede producirse por el uso de fertilizantes acidificantes y por el proceso natural de acidificación y pérdida de bases del suelo, causado por la alta precipitación de la zona sur. Esto exige que la corrección de la acidez del suelo se realice periódicamente, debiéndose monitorear los niveles de saturación de aluminio a través de un análisis químico de suelo.

La disponibilidad de P en las plantas se reduce porque en suelos ácidos el Al^{3+} actúa directamente sobre el anión fosfato, fijándolo y reduciendo así su disponibilidad para las plantas. Por esta razón, siempre debe corregirse primero el problema de acidez, antes de intentar incrementar la concentración de P en el suelo. El Cuadro 5, ejemplifica el incremento de la eficiencia de la fertilización fosfata, esto es, de la mayor disponibilidad de P en el suelo para el crecimiento de la ballica cv. Concord bajo distintos niveles de corrección de la acidez de un suelo trumao con 22% de saturación de Al. Se observa que al corregir el problema de acidez, la cantidad requerida de P como fertilizante para la obtención de un mismo nivel productivo se reduce hasta en un 50%. Al corregir el problema de acidez, también se incrementa el potencial productivo de la especie utilizada.

Cuadro 5. Efecto de la dosis de cal y fósforo en el rendimiento de ballica de rotación corta cv. Concord (kg MS/ha) en un suelo trumao con 22% de saturación de aluminio.

P ₂ O ₅ (kg/ha)	Cal aplicada (ton/ha)			Promedio	%
	0	2	4		
0	4400	6790	7200	6130	
140	7500	8120	9450	8357	36
200	8800	9700	10170	9557	56
280	9110	10490	10560	10053	64
Promedio	7450	8780	9350		
%		18	26		

Cal aplicada como carbonato de calcio.

Fuente: Mora y Demanet (1995).

Las características de deficiencia nutricional de la pradera o de toxicidad por exceso de Al y Mn en las plantas se mantienen en el forraje conservado como ensilaje, por lo que una pradera de mala calidad o con alta concentración foliar de Al y Mn mantendrá esta condición al final del proceso de fermentación (Mora et al. 2006), con implicancias para la alimentación animal (Cuadro 6).

Cuadro 6. Características nutricionales del ensilaje de praderas de ballica perenne y trébol blanco desarrolladas en sectores acidificados o donde la acidez del suelo se corrigió por adición de cal (cosecha 20 de diciembre 1994). Adaptado de Mora et al. (2006).

Parámetros	Suelo ácido	Suelo corregido
Materia seca (%)	23	17
Proteína (%)	10,0	12,9
Fibra cruda (%)	38	34
Energía metabolizable (Mcal/kg)	1,8	1,9
pH	4,3	3,8
N-NH ₃ (%)	11,3	8,0
Fósforo (g/kg)	2	2
Calcio (g/kg)	2	3
Potasio (g/kg)	15	18
Aluminio (g/kg)	140	39

2.2.3 Efecto de la acidez del suelo en la producción animal

La sumatoria de los desbalances nutricionales generados en la pradera por la acidez del suelo puede afectar directa o indirectamente la producción animal.

2.2.3.1 Efectos directos

Como efectos directos se cuentan la toxicidad causada por el Al ingerido en el forraje sobre el metabolismo y la producción animal y la hipomagnesemia. Se estima que concentraciones superiores a 2.000 ppm de Al en el forraje pueden generar efectos adversos sobre el metabolismo animal bovino (Allen et al., 1986), en especial sobre la absorción de fósforo, calcio y magnesio y la actividad hepática. En animales pequeños (ovejas, terneros) se estima que concentraciones superiores a 1.000 ppm de Al en el forraje pueden ser tóxicas (Allen y Fontenot, 1984). La hipomagnesemia es una enfermedad característica en vacas parturientas y se produce como consecuencia de la insuficiencia de Mg en el torrente sanguíneo de los animales.

En el sur de Chile, la alimentación directa de 2.000 ppm de Al a terneros Holstein Friesian (260 ± 10 kg de peso vivo inicial) por 60 días, mezclado con ensilaje, redujo la ganancia de peso diaria en un 20%, debido a un incremento de la concentración sanguínea de aluminio y a la alteración de la actividad hepática en los animales alimentados con Al, detectada a través del incremento de la enzima aspartato aminotransferasa (Cuadro 7).

Cuadro 7. Efecto de la ingesta de 2.000 ppm de Al durante 60 días sobre la ganancia de peso diaria de terneros Holstein Friesian y su concentración sanguínea de Al. ± error estándar de la media. Adaptado de Mora et al. (2006).

Parámetros	+Al	-Al
Ganancia diaria de peso (kg/animal/día)	0,8 ± 0,22 b	1,0 ± 0,23 a
Ingesta de Al (g/animal/día)	7,0	1,4
Al en el plasma sanguíneo (µmol/L)		
Día 0	22 ± 3,5 a	18 ± 3,2 a
Día 60	79 ± 5,8 a	21 ± 3,8 b
Aspartato aminotransferasa (U/L)		
Día 0	91 ± 7,6 a	91 ± 9,4 a
Día 60	129 ± 9,6 a	104 ± 11,4 b

Letras distintas en columnas diferentes indican diferencias significativas (P≤0,05)

Estudios de Mora et al. (2004) indican que aún bajo condiciones de extrema acidez del suelo, las concentraciones de Al en las praderas naturalizadas del sur de Chile no alcanzarían a 2.000 ppm, debido a que en estos sectores se desarrollan y predominan especies tolerantes a la acidez del suelo, que no presentan altas concentraciones de Al en el forraje. Sin embargo, en invierno en praderas sembradas el Al fácilmente alcanza concentraciones del orden de 1.200 ppm en el forraje, por

lo que debe evitarse el pastoreo en estas áreas con ovinos o bovinos jóvenes durante este periodos.

Otra forma de ingesta directa de Al por los animales es el consumo de suelo en el periodo invernal. Estudios neozelandeses indican que el consumo de tierra en esta época puede constituir la vía más importante de ingreso de Al al animal, en desmedro del forraje (Allen et al. 1986). Debido a que los suelos del sur del país poseen concentraciones altas de aluminio naturalmente, mantener animales en sectores sobrepastoreados y en potreros de sacrificio por una excesiva cantidad de tiempo puede generar alteraciones metabólicas.

El mayor efecto de la acidificación de los suelos en la zona sur es por tanto indirecto, esto es, a través de la reducción de la productividad y calidad de las praderas, por lo que se genera una menor producción animal por hectárea.

2.2.3.2 Efectos indirectos

Estudios neozelandeses indican que sólo una vez que la corrección de la acidez del suelo se traduce en incrementos de la producción de materia seca de la pradera, se observa una mayor producción de carne de ovinos por unidad de superficie.

En la zona sur de Chile, cuando la carga animal bovina se ajusta a la producción de forraje de una pradera sembrada, la producción animal por hectárea puede ser un 125% más alta en aquellos sectores en donde la acidez de suelo se corrigió a través de la aplicación de cal, en comparación con sectores no corregidos (Cuadro 8). Estos resultados son explicados por la menor producción total de la pradera, menor persistencia y producción de las especies sembradas y por la menor calidad del forraje en el sector acidificado, con relación a los sectores donde la acidez del suelo se ha corregido.

La producción individual por animal no se vería afectada mientras la concentración foliar de Al no supere los límites máximos ya señalados. En el caso del estudio presentado en el Cuadro 8, las concentraciones foliares de Al no superaron las 1.000 ppm.

Cuadro 8. Rendimiento (kg MS/ha) y calidad de una pradera de ballica perenne y trébol blanco desarrollada en un suelo trumao ácido (24% sat. Al) y en un suelo corregido (2% sat. Al) por adición de una enmienda calcárea y su efecto en la producción animal. Resultados de la temporada 1997/98. n=4, ± error estándar de la media. Adaptado de Mora et al. (2006).

	Suelo ácido	Suelo corregido
Rendimiento (kg MS/ha)	10.692 ± 321,9 b	15.020 ± 483,2 a
Rendimiento especie pura (ballica más trébol) (kg MS/ha)	710 ± 21,3 b	12.400 ± 387,5 a
Rendimiento trébol (kg MS/ha)	420 ± 14,0 b	1.210 ± 53,9 a
Proteína (%)	10,7 ± 1,61 b	16,1 ± 2,15 a
Energía (Mcal/kg)	2,3 ± 0,03 a	2,4 ± 0,06 a
Calcio (%)	3 ± 0,2 b	4 ± 0,2 a
Aluminio (ppm)	961 ± 384,6 a	426 ± 75,9 b
Producción animal		
Ganancia diaria (kg/anim/día)	1,0 ± 0,08 a	1,0 ± 0,08 a
Ingesta de Al (g/anim/día)	1,15 a	0,51 b
Ganancia total (kg/ha)	255 ± 22,1 b	574 ± 20,5 a

Letras distintas en columnas diferentes indican diferencias significativas (P≤0,05)

Esto indica que la corrección de la acidez favorece la producción animal al incrementar la producción de forraje y la cantidad de proteína y energía generada por unidad de superficie. Por tanto se concluye que en el sur del país la corrección de la acidez del suelo potencia la actividad agropecuaria.

III. ENCALADO

El encalado consiste en la aplicación de materiales básicos al suelo (enmiendas calcáreas) que neutralizan la acidez. Los materiales que se utilizan son principalmente carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio y/o magnesio (Foto 2). Debido a su diferente naturaleza química los productos encalantes presentan una capacidad variable de neutralización.

1. ENMIENDAS CALCÁREAS

Los materiales encalantes más comunes se enumeran a continuación.

Foto 2. Descargando mineral caliza.



a. Óxido de calcio: el óxido de calcio (CaO), se conoce como cal viva o cal quemada. Es un polvo blanco difícil de manejar por su efecto cáustico. Se fabrica calcinando caliza, produciéndose la siguiente reacción:



Este material es de rápida reacción cuando se aplica a un suelo ácido, similar al hidróxido de calcio, por lo que es recomendable cuando se requieren efectos rápidos. Al estado puro contiene un 71% de calcio.

b. Hidróxido de calcio: se conoce como cal apagada o cal hidratada [Ca(OH)₂]. Se obtiene a partir de la reacción del óxido de calcio con agua, produciéndose lo siguiente:



Es un producto de color blanco difícil de manejar. Reacciona rápidamente con el agua del suelo, recomendándose su rápida incorporación. En forma pura contiene un 56% de Ca.

Tanto el óxido como el hidróxido de calcio son recomendables para su aplicación en cobertera para praderas permanentes por su acción rápida. Su difícil manejo y elevado costo serían limitantes a considerar.

c. Cal agrícola o calcita: es el material más utilizado para la neutralización de la acidez de los suelos. Contiene preferentemente carbonato de calcio (CaCO₃). Se obtiene a partir de piedra caliza que se muele y se tamiza. Como se trata de un mineral, contiene impurezas que reducen el contenido de carbonato. La calcita pura contiene un 40% de Ca.

d. Dolomita: Es un carbonato doble de calcio y magnesio (CaCO₃*MgCO₃). Cuando el material es puro contiene aproximadamente un 22% de Ca y un 13% de Mg. La dolomita reacciona más lentamente que la calcita en el suelo.

e. Óxido de magnesio: este material (MgO) contiene sólo magnesio en una concentración de 60%. Tiene una gran capacidad de neutralización, superior a los otros materiales encalantes, pero tiene baja solubilidad en agua.

f. Magnesita: Es un mineral en base a carbonato de magnesio ($MgCO_3$), que en su forma pura contiene aproximadamente un 28% de Mg.

g. Conchas molidas: están compuestas principalmente por carbonato de calcio, pero se encuentran contaminadas con arena y material orgánico. Usualmente son demasiado gruesas para ser efectivas en el suelo.

2. CALIDAD DE LAS ENMIENDAS CALCÁREAS

Los materiales que se ofrecen para ser utilizados como neutralizadores de la acidez del suelo presentan diferentes características y calidad lo que hace variar su eficiencia agronómica.

La calidad de estos materiales se establece principalmente en base a pureza del material, formas químicas, tamaño de las partículas, poder relativo de neutralización total (PRNT) (o Valor Agronómico) y contenido de humedad.

2.1. Pureza de las enmiendas

La pureza da cuenta de la composición química de los materiales y de la presencia de contaminantes presentes (arcilla, materia orgánica y otros minerales). De la pureza del material y de su composición química depende la capacidad neutralizadora de la acidez.

Generalmente la pureza de la enmienda se expresa como equivalente químico (EQ) o valor neutralizante (VN), que es una medida del poder de neutralización de una cal en particular.

Por lo tanto, el EQ o VN se define como la capacidad de la enmienda para neutralizar la acidez del suelo comparado con el poder de neutralización del $CaCO_3$ químicamente puro.

En el Cuadro 9 se presentan los valores de poder de neutralización de varios materiales encalantes en su forma pura.

Cuadro 9. Equivalentes químicos o valor neutralizante de diferentes materiales puros utilizados como enmiendas. Adaptado de Campillo y Sadzawka (1999).

Material	Equivalente Químico (EQ) (%)	Fórmula Química
Carbonato de calcio	100	CaCO ₃
Dolomita	109	CaCO ₃ * MgCO ₃
Óxido de calcio	179	CaO
Hidróxido de calcio	138	Ca(OH) ₂
Hidróxido de magnesio	172	Mg(OH) ₂
Carbonato de magnesio	119	MgCO ₃
Óxido de magnesio	248	MgO
Silicato de calcio	86	CaSiO ₃
Silicato de magnesio	100	MgSiO ₃

Como se aprecia en el Cuadro 9, los óxidos y los hidróxidos tienen mayor capacidad de neutralización que el carbonato de calcio, que se utiliza de referencia. Además, las enmiendas que contienen Mg son más efectivas que las que contienen calcio, debido a que el Mg tiene menor peso molecular que el Ca.

El equivalente químico (EQ) de una enmienda calcárea se puede calcular utilizando las siguientes fórmulas:

$$EQ \text{ CaCO}_3 = \text{CaO} (\%) * 1,79 + \text{MgO} (\%) * 2,48$$

$$EQ \text{ CaCO}_3 = \text{CaCO}_3 (\%) * 1 + \text{MgCO}_3 (\%) * 1,19$$

Los factores 1,79; 2,48; 1 y 1,19 se obtienen del Cuadro 9.

2.2. Tamaño de las partículas

El tamaño de las partículas o finura del material encalante determina su velocidad de reacción. A menor tamaño de partícula hay mayor superficie de contacto con el suelo. Esto se denomina superficie específica. Mientras más superficie específica presente una enmienda, con mayor rapidez reacciona al contacto con el suelo.

La finura o eficiencia granulométrica (EG) de una enmienda se determina utilizando cribas o tamices de diferentes tamaños o mallas (mesh). Generalmente se usan tamices de 8, 20, 40, 60 y 80 mesh.

Cada tamaño de partícula tiene su propia eficiencia específica como se señala en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Eficiencia relativa de la enmienda según tamaño de partículas determinado en base a mallas.

Número de mallas Mesh*	Tamaño de los orificios (mm)	Eficiencia relativa (%)
< 8	> 2,36	0
8 - 20	2,36 - 0,85	20
20 - 40	0,85 - 0,42	40
40 - 60	0,42 - 0,25	60
> 60	< 0,25	100

* Número de orificios por pulgada cuadrada

Los materiales que son retenidos en una malla de 8 mesh o menos no son efectivos. Los que pasan por 8 y no por 20 mesh tienen una eficiencia relativa de 20%. Los que pasan por 20 y no por 40 mesh son 40% efectivos. Finalmente, todos los materiales que pasan los 40 mesh tienen una efectividad relativa del 100%.

En algunos países se han establecido normas en relación al mallaje de las enmiendas calcáreas. Así por ejemplo, en Brasil, país que utiliza el encalado como una práctica habitual e ineludible, se exige que el material cumpla con los siguientes requisitos: que el 95% de la cal pase por una malla 10, que el 70% debe pasar por malla 20 y que, al menos, el 50% pase por una malla 40.

2.3. Poder relativo de neutralización total (PRNT) o valor agronómico (VA)

Este parámetro se utiliza para evaluar las enmiendas calcáreas considerando en forma conjunta su pureza química, la finura del material y su contenido de humedad. También se denomina Valor Agronómico de la cal (VA) y se puede calcular por la siguiente fórmula:

$$VA (\%) = (ER * VN) / 100 * (100 - \%H) / 100$$

en donde

VA: valor agronómico en %

ER: eficiencia relativa granulométrica en %

VN: valor neutralizante o equivalente químico en %

H: contenido de humedad del material en %.

En resumen, para la adecuada evaluación de las enmiendas se deben considerar los siguientes parámetros:

Valor neutralizante:

- contenido de carbonato de calcio
- contenido de carbonato de magnesio
- contenido de óxido de calcio
- contenido de óxido de magnesio

Eficiencia relativa, Grado de molienda o finura.

- pasa por 60 mesh 100% de eficiencia
- pasa por 20 y no por 60 mesh 60% de eficiencia
- pasa por 8 y no por 20 mesh 20% de eficiencia
- no pasa por 8 mesh 0% de eficiencia

Contenido de humedad, % de humedad

Factor humedad: $(100 - \%H) / 100$

Cálculo del Valor Agronómico,

$$VA = \frac{(ER \times VN)}{100} \times \frac{(100 - \%H)}{100}$$

Ejemplo de cálculo

Análisis de una cal

Contenido de humedad:	0,82%
Contenido de CaO:	44,4%
Contenido de MgO:	0,65%
Granulometría	
20 mesh:	5,5%
40 mesh:	0,7%
60 mesh:	1,6%
80 mesh:	16,4%
100 mesh:	3,2%
sobre 100 mesh:	72,6%

Resumen de la granulometría:

> 60 mesh (100%)	$16,4 + 3,2 + 72,6 = 92,20\%$
60 a 20 mesh (60%)	$2,3 * 0,6 = 1,38\%$
< 20 mesh (20%)	$5,5 * 0,2 = 1,10\%$

Total ER 94,68%

Valor neutralizante VN:

CaO (179%) * 44,4%	=	79,48%
MgO (250%) * 0,65%	=	1,62%
Total VN:		81,10%

$$\text{Valor agronómico VA: } \frac{(94,68 \times 81,10)}{100} \times \frac{(100 - 0,82)}{100} = 76,16 \%$$

Un valor agronómico (VA) de 76,16% significa que el material analizado tiene una eficiencia equivalente a ese valor. Si la dosis calculada de enmienda es 2.000 kg de CaCO₃ puro, la cantidad de material comercial que se deberá aplicar será de **2.000/0,7616 = 2.626 kg**.

La Foto 3 ilustra la aplicación de cal en cobertera sobre una pradera permanente.

La Foto 4 muestra la aplicación de cal sobre un suelo preparado para ser incorporada posteriormente en la última labor antes de la siembra.

Foto 3. Aplicación de cal en cobertera sobre una pradera permanente.

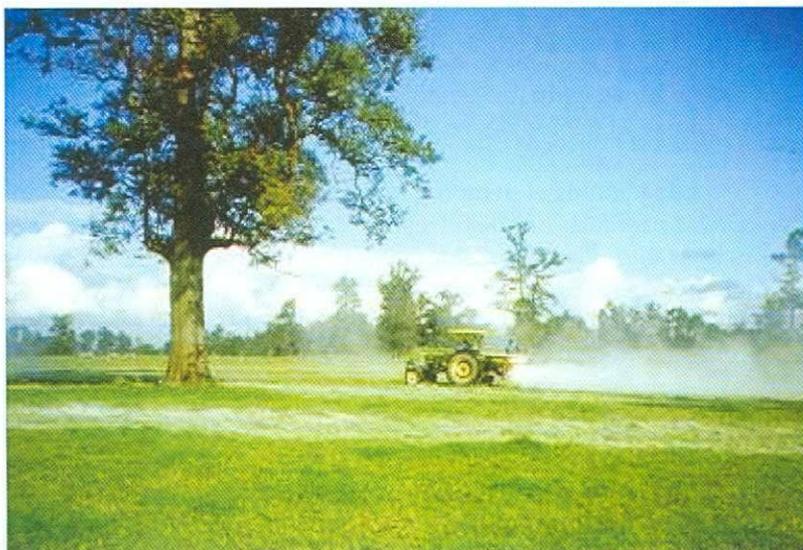
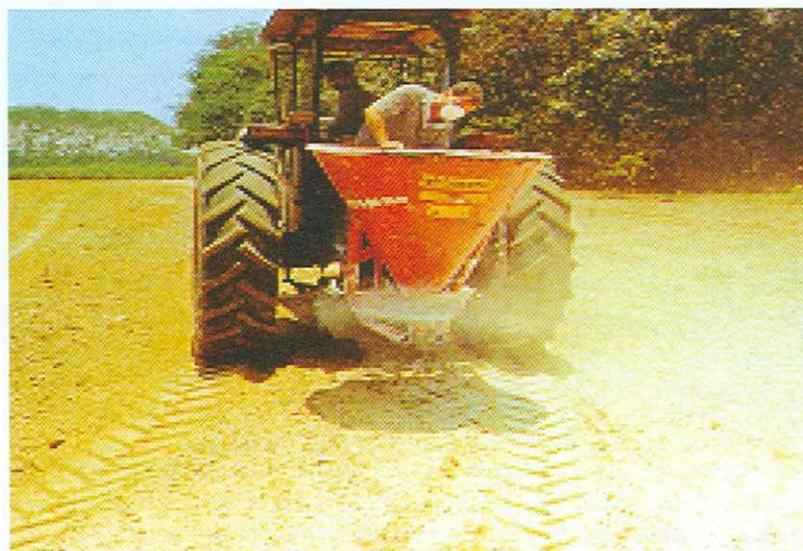


Foto 4. Aplicación de cal con tolva para ser incorporada al suelo.



3. REACCIONES DE LA CAL EN EL SUELO

Por lo general, las enmiendas calcáreas tienen muy baja solubilidad y deben ser finamente molidas para facilitar su hidrólisis. El uso eficiente de la cal requiere la observación de algunas normas o tecnologías de aplicación, dentro de las cuales el más importante es el tiempo de incubación.

El tiempo de incubación es el tiempo que debe transcurrir para que la enmienda reaccione con las partículas de suelo y ejerza su acción neutralizante. La velocidad de reacción, por tanto, depende del tamaño de las partículas de la enmienda, de la temperatura del suelo y de su humedad.

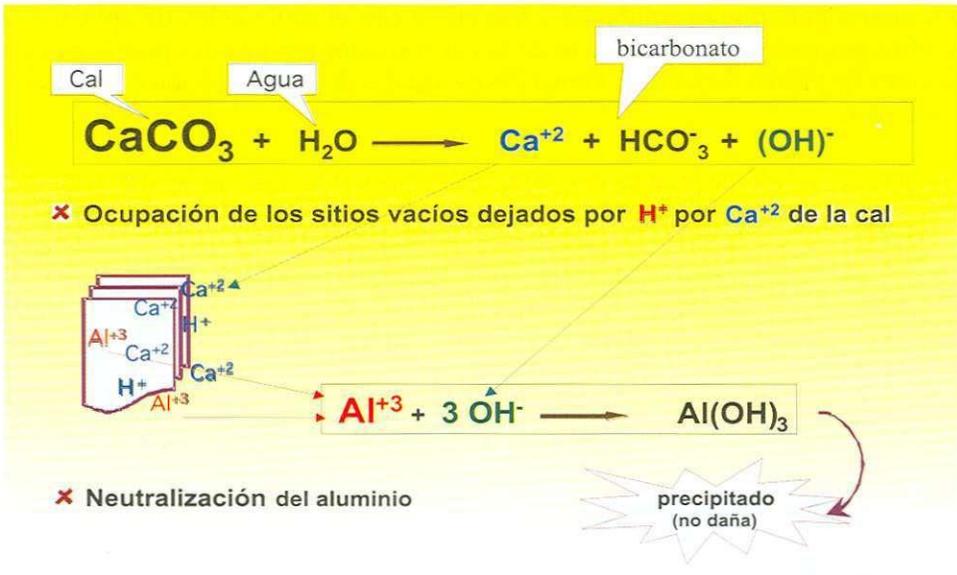
En los suelos de la X Región el tiempo mínimo de incubación son 30 días. Es decir, la aplicación e incorporación se debe realizar 30 días antes de la siembra del cultivo, como en el caso de la Foto 5, en donde se muestra la incorporación de cal aplicada sobre un suelo mediante arado tirado por bueyes.

Foto 5. Incorporación de cal con arado a bueyes.



En el caso de praderas permanentes la aplicación se debe realizar en cobertera, sobre la vegetación. La acción neutralizante, en este caso, es más lenta debido a que no existe contacto íntimo entre las partículas de la enmienda y las partículas del suelo.

Figura 10. Reacción química de neutralización del aluminio en el suelo.



4. DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE CAL

Los andisoles (suelos derivados de cenizas volcánicas) son suelos de carga variable lo que sumado a su alta capacidad tampón (resistencia al cambio de pH) y a su moderada capacidad de intercambio catiónico (CIC) hacen muy complejo determinar un método común para el cálculo de los requerimientos de cal.

4.1 Cálculo de la dosis de cal según el pH (agua)

Dependiendo principalmente de su contenido de materia orgánica, los suelos difieren en su capacidad tampón. El poder tampón se refiere a la "resistencia" que opone el suelo a cambiar su nivel de pH. A mayor contenido de materia orgánica, el suelo presenta un mayor poder tampón. Es decir, se requerirá una mayor cantidad de enmienda para producir un determinado cambio en el pH de un suelo que contenga menos materia orgánica.

Para calcular la dosis de cal necesaria para producir un determinado cambio en el pH del suelo se puede recurrir a la siguiente fórmula:

$$\text{Dosis de CaCO}_3 \text{ (kg/ha)} = \frac{(\text{pH a alcanzar} - \text{pH actual})}{\text{Poder tampón}} \times 1.000$$

En el Cuadro 11 se presentan los valores correspondientes al poder tampón de diferentes suelos de la X Región. Por ejemplo, un poder tampón de 0,11 para un trumao significa que una tonelada de carbonato de calcio puro produce un cambio de 0,11 unidades de pH (agua).

Cuadro 11. Poder tampón de diferentes suelos de la X Región y cantidades de CaCO₃ puro para incrementar el pH en 0,1 unidades.

	Poder tampón	kg/ha (20 cm)	kg/ha (10 cm)
Trumao	0,11	909	518
Rojo - arcilloso	0,15	667	380
Transición	0,12	833	475
Ñadi	0,096	1042	594

Para incrementar el valor del pH en agua de un suelo rojo - arcilloso en 0,1 unidades en la estrata de 0 a 10 cm se requiere aplicar 380 kg de carbonato de calcio puro.

4.2 Cálculo de la dosis de cal según el porcentaje de saturación de Al

La respuesta de los suelos volcánicos a la aplicación de cal es de característica exponencial cuando se trata de neutralizar el porcentaje de saturación de Al.

Para calcular la dosis de cal en base al porcentaje de saturación de Al se puede recurrir a la siguiente fórmula:

$$\text{Dosis CaCO}_3 \text{ (kg/ha)} = \frac{\ln(\text{sat Al final/sat Al inicial})}{- \text{Cte}} * \frac{[1]}{\text{Dap}} * \text{Prof (dm)}$$

En donde:

In: logaritmo natural

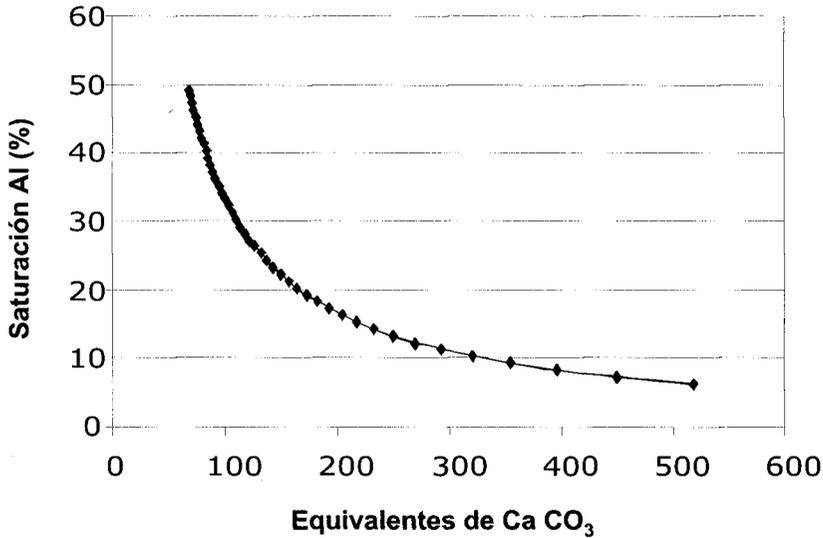
Cte.: constante

Dap: densidad aparente

Prof: profundidad en dm.

En la Figura 11 se presenta el modelo de respuesta de un suelo trumao a la aplicación de cal utilizando el porcentaje de saturación de Al como indicador.

Figura 11. Cantidad de CaCO_3 para neutralizar el porcentaje de saturación de Al en suelos trumaos. Fuente: Laboratorio de Suelos INIA.



En la Figura 11 se aprecia que con la aplicación de las primeras dosis de cal se produce un fuerte descenso de la saturación de Al en el suelo y que a medida que ésta se reduce será necesario aplicar una mayor proporción de la enmienda para provocar un cambio equivalente.

Mediante el modelo descrito se elabora una tabla de dosis de CaCO_3 para aplicar sobre una pradera permanente (estrata de 0 a 10 cm; Cuadro 12).

Cuadro 12. Dosis de carbonato de calcio a aplicar para reducir la saturación de Al (0-10 cm de profundidad) en tres tipos de suelo, por aplicación en cobertera.

Saturación de Al	Trumao	Rojo + arcilloso kg de CaCO ₃ /ha	Transición
50	4.319	2.980	3.311
49	4.281	2.954	3.282
48	4.242	2.927	3.252
47	4.203	2.900	3.222
46	4.162	2.872	3.191
45	4.121	2.843	3.159
44	4.079	2.814	3.127
43	4.036	2.785	3.094
42	3.992	2.754	3.060
41	3.946	2.723	3.026
40	3.900	2.691	2.990
39	3.853	2.658	2.954
38	3.804	2.625	2.916
37	3.754	2.590	2.878
36	3.702	2.555	2.839
35	3.650	2.518	2.798
34	3.595	2.481	2.756
33	3.539	2.442	2.713
32	3.482	2.402	2.669
31	3.422	2.361	2.624
30	3.361	2.319	2.576
29	3.297	2.275	2.528
28	3.231	2.229	2.477
27	3.163	2.182	2.425
26	3.092	2.134	2.371
25	3.019	2.083	2.314
24	2.942	2.030	2.256
23	2.862	1.975	2.194
22	2.779	1.917	2.130
21	2.692	1.857	2.064
20	2.600	1.794	1.993
19	2.504	1.728	1.920
18	2.402	1.658	1.842
17	2.295	1.584	1.760
16	2.182	1.505	1.673
15	2.060	1.422	1.580
14	1.931	1.332	1.480
13	1.792	1.237	1.374
12	1.642	1.133	1.259
11	1.479	1.020	1.134
10	1.300	89	997
9	1.102	761	845
8	882	608	676
7	631	435	484
6	342	236	262

Fuente: Laboratorio de Suelos INIA.

En el Cuadro 12 se señala que para disminuir la saturación de Al de 50% a 5% en un suelo trumao, en cobertera, se requiere aplicar 4.319 kg de carbonato de calcio puro. Del mismo modo, en un suelo rojo - arcilloso, para disminuir la saturación de Al desde 30% a 20% se requiere aplicar $2.319 - 1.794 = 525$ kg de carbonato.

En la Figura 12 se presentan los efectos de la aplicación e incorporación de carbonato de calcio a un suelo trumao de Chiloé. Se aprecia que el pH (agua) se incrementa en forma lineal a las dosis de cal aplicadas. En cambio, la saturación de Al disminuye drásticamente con la primera tonelada aplicada, bajando de 33% a 16% de saturación de Al. Por el contrario, para disminuir de 33 a 2% de saturación de Al se requiere aplicar 4 toneladas de cal.

Figura 12. Efecto de la aplicación de cal incorporada a un suelo trumao de Chiloé sobre el pH y la saturación de Al. Fuente: Pablo Undurraga, INIA Quilamapu, comunicación personal.



5. EFECTOS DE LA APLICACIÓN DE CAL

El encalado de los suelos ácidos produce efectos beneficiosos tanto en aspectos químicos como físicos.

5.1 Toxicidad de aluminio

El mayor efecto beneficioso del encalado es la reducción en la solubilidad del Al y del Mn, los que son tóxicos para la mayoría de los cultivos.

5.2 Disponibilidad de fósforo

La aplicación de cal no produce liberación de fósforo de formas retenidas o fijadas en el suelo, o de formas insolubles. Sin embargo, favorece la disponibilidad del fósforo aplicado después del encalado. La cal bloquea algunos sitios reactivos del complejo coloidal, impidiendo que éstos atraigan los iones fosfato que están en la solución del suelo y los retengan o fijen. De este modo queda más fósforo disponible para ser absorbido por las plantas.

5.3 Fijación de nitrógeno

Por lo general, la acidez restringe la actividad de la mayoría de los microorganismos del suelo. Por el encalado se mejoran las condiciones para un adecuado desarrollo de la actividad microbiana.

La fijación biológica de N es uno de los procesos que se ven favorecidos por el encalado.

En forma paralela, al mejorar las condiciones de acidez del suelo se favorece toda la actividad de las bacterias responsables de la mineralización de la materia orgánica favoreciendo la nitrificación del N orgánico y la mineralización de formas orgánicas de azufre, a formas minerales capaces de ser absorbidas por las raíces de las plantas.

5.4 Física de suelos

El encalado también tiene un efecto benéfico sobre algunas propiedades físicas del suelo, en especial en su estructura, debido al efecto floculante de la cal y de los óxidos e hidróxidos de hierro (Fe) y Al.

Un efecto indirecto del encalado en las propiedades físicas del suelo es a través de favorecer el incremento de la población, tamaño y actividad de las lombrices del suelo. El incremento de la actividad de las lombrices afecta la estructura del suelo aumentando la presencia de macroporos.

En general, el encalado mejora la respuesta de los cultivos y praderas a la aplicación de fertilizantes debido a las adecuadas condiciones físicas y químicas que promueven el desarrollo radicular, favoreciendo la absorción de agua y de nutrientes.

IV. LITERATURA CONSULTADA

- ALFARO, M.A.; TEUBER, N.; DUMONT, J.C. Y MEDONE, F. 1998. Efecto del carbonato de calcio en el establecimiento y producción de gramíneas y leguminosas forrajeras en Chiloé. *Agricultura Técnica* 58 (3): 173-180.
- ALLEN, V. AND FONTENOT, J.P. 1984. Influence of aluminium as sulphate, chloride and citrate on magnesium and calcium metabolism in sheep. *Journal of Animal Science* 59: 798-805.
- ALLEN, V.; HORN, F.P. AND FONTENOT, J.P. 1986. Influence of ingestion of aluminium, citric acid and soil on mineral metabolism of lactating beef cows. *Journal of Animal Science* 62: 1396-1403.
- BERNIER, R. 2000. ACIDEZ DE SUELO. En: Bernier, R. (ed). *Curso de Capacitación para Operadores del Programa de Recuperación de Suelos Degradados, INDAP, Décima Región. Serie Actas N° 2. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. pp: 47-55.*
- CAMPILLO, R. 1994. Diagnóstico de la fertilidad de los suelos de la Décima Región. En: Campillo y Bortolameo (ed). *Corrección de la fertilidad y uso de enmiendas en praderas y cultivos forrajeros. Serie Remehue N°53. INIA Remehue. 135 p.*
- CAMPILLO, R. 1996. Encalado de suelos ácidos para producción de alfalfa. *Tierra Adentro* 8: 41-44.
- CAMPILLO, R. Y SADSAWKA, A. 1999. Las enmiendas calcáreas. Un insumo tecnológico vital para los suelos acidificados del sur de Chile. En: Alfaro, M. (ed). *Curso de capacitación para operadores del Programa de Suelos Degradados Zona Sur (Regiones IX y X). Serie Remehue n°71. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. pp: 104-115.*
- DEMANET, R. 1994. Praderas y acidificación. *Boletín N° 1 FONDEF 2-88. Instituto de Agroindustrias, Universidad de la Frontera. pp: 23-43.*
- ESPINOSA, J. Y MOLINA, E. 1999. *Acidez y encalado de los suelos. Primera edición. Instituto de la Potasa y el Fósforo. INPOFOS. Quito, Ecuador. 42 pp.*

-
- GALLARDO, F.; RIQUELME, C.; BORIE, F. Y SANTANDER, J. 1995. Selecciones de especies y cultivares tolerantes a aluminio. *Frontera Agrícola* 3(1): 4-12.
- INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS. Laboratorio de Diagnóstico Nutricional de Suelos y Plantas. INIA Centro Sur. Informe Técnico 2003 - 2004. INIA Remehue.
- KAMPATH, E. J. 1990. Crop response to lime in soils of the tropics. En: F. Adams (ed.). *Soil acidity and liming. Agronomy Series N° 12. American Society of Agronomy.*
- MORA, M. Y DEMANET, R. 1995. Efecto de las relaciones Ca/P y Ca/K en el establecimiento de pasturas en suelos acidificados. *Frontera Agrícola* 3(1): 28-35.
- MORA, M.; ALFARO, M.; WILLIAMS, P.H.; STEHR, W. AND DEMANET, R. 2004. Effect of fertilizer input on soil acidification in relation to growth and chemical composition of a pasture and animal production. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 4(1): 29-40.
- MORA, M.; ALFARO, M.; JARVIS, S.C.; DEMANET, R. AND CARTES, P. 2006. Soil aluminum availability in Andisols of southern Chile and its effect on forage production and animal metabolism. *Soil Use and Management* 22: 95-101.
- SADZAWKA, A. Y CAMPILLO, R. 1999. Acidificación de los suelos y los procesos involucrados. En: Alfaro, M. (ed). *Curso de Capacitación para operadores del Programa de Recuperación de Suelos Degradados Zona Sur (Regiones IX y X). Serie Remehue N° 71, Centro Regional de Investigación Remehue (INIA). pp: 93-103.*
- SUAREZ, D. 1991. Diagnóstico de las necesidades de encalado. En: *Acidez y encalado de suelos en la Región de los Lagos. Serie Remehue N° 15. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Estación Experimental Remehue. pp: 77-94.*
- SUAREZ, D. 1994. Uso de cales y fertilizantes en praderas de la zona sur. En: Latrille, L. (ed). *Producción Animal. Serie B-18. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Instituto de Producción Animal. pp: 39-65.*
- SUAREZ, D. 1996. Acidificación de suelos y uso de fertilizantes nitrogenados. En: Latrille, L. (ed). *Producción Animal. Serie B-20. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Instituto de Producción Animal. pp: 145-160.*
- VENEGAS, C. 1993. Tolerancia de los cultivos a la acidez del suelo. *Frontera Agrícola* 1(1): 23-33.