

ICIA-FC  
Q-Ambiental  
S 129  
C. L

**INFLUENCIA DE LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS EN  
PROPIEDADES QUÍMICAS DE SUELOS DE USO AGRÍCOLA  
DE LA REGIÓN METROPOLITANA**



Seminario de Título entregado a la  
Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile  
en cumplimiento parcial de los requisitos  
para optar al título de

**QUÍMICO AMBIENTAL**

**Priscilla Solange Sagredo Ordóñez**

Director Seminario de Título:

**M. Sc. M<sup>a</sup> Adriana Carrasco R.**

Profesor Patrocinante:

**M. Sc. Sylvia Copaja C.**

*Agosto, 2006*

FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

INFORME DE APROBACIÓN  
SEMINARIO DE TÍTULO

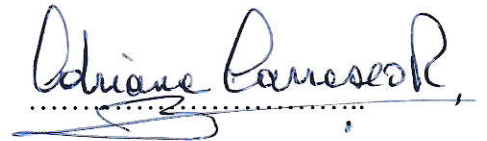
Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias de la  
Universidad de Chile que el Seminario de Título presentado por la alumna

**Priscilla Solange Sagredo Ordóñez**

ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación del Seminario de Título como requisito  
para optar al título de Químico Ambiental

**Director Seminario de Título:**

M. Sc. M<sup>a</sup> Adriana Carrasco R.



**Comisión de Evaluación Seminario de Título**

**Prof. Patrocinante:**

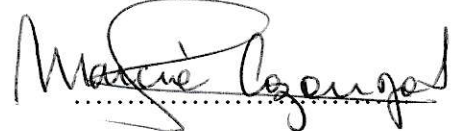
M. Sc. Sylvia Copaja C.



M. Sc. Inés Ahumada T.



Dra. Marcia Cazanga S.



“A mis Padres,  
por su incondicional amor y apoyo”

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Sra. María Adriana Carrasco, por brindarme el tema de Seminario de Título y a la Sra. Marysol Aravena por su apoyo y colaboración en el laboratorio de suelos y aguas de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Chile.

Agradezco a mi profesora patrocinante y jefa de carrera Sra. Sylvia Copaja y a todos los profesores que hicieron posible mi formación como Químico Ambiental; así como también a la comisión de Seminario de Título, Sra. Inés Ahumada y Sra. Marcia Cazanga.

Por último y de manera especial agradezco a mis padres Germán y Elisa por todo el amor y el apoyo que me entregan día a día y a Jaime, por su amor, compañía y sobre todo la confianza que me entregó durante el periodo de mi titulación.

## INDICE GENERAL

	<b>Página</b>	
<b>CAPITULO 1: INTRODUCCION</b>		
1.1	Antecedentes generales	1
1.2	Plantas de tratamiento de aguas servidas	3
	1.2.1 Etapas del tratamiento de aguas servidas	6
1.3	Principales vías de uso y disposición de lodos	12
1.4	Efectos de la aplicación de lodos en suelos de uso agrícola	15
1.5	Incubación de suelos con lodos	21
1.6	Hipótesis del trabajo	23
1.7	Objetivos	23
	1.7.1 Objetivo general	23
	1.7.2 Objetivos específicos	23
<b>CAPITULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS</b>		
2.1	Materiales	25
	2.1.1 Toma de muestras de lodos y suelos	25
2.2	Métodos	26
	2.2.1 Incubación	26
	2.2.1.1 Procedimiento de incubación	27
	2.2.1.2 Diseño experimental	30
	2.2.2 Análisis químicos de suelos, lodos y suelos incubados	32

## CAPITULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1	Caracterización de los lodos en estudio	38
3.1.1	Propiedades químicas	38
3.1.1.1	Reacción (pH)	39
3.1.1.2	Conductividad eléctrica	40
3.1.1.3	Materia orgánica	40
3.1.1.4	Macronutrientes	40
3.1.2	Metales pesados extraíbles con DTPA	42
3.1.3	Metales pesados totales	43
3.2	Caracterización de los suelos en estudio	44
3.2.1	Propiedades físicas y químicas	44
3.2.1.1	Reacción (pH)	45
3.2.1.2	Conductividad eléctrica	45
3.2.1.3	Materia orgánica	45
3.2.1.4	Macronutrientes	45
3.2.2	Metales pesados extraíbles con DTPA	48
3.2.3	Metales pesados totales	49
3.3	Caracterización de los suelos incubados con lodos	50
3.3.1	pH en agua	50
3.3.2	pH en KCl	53
3.3.3	Conductividad eléctrica	55
3.3.4	Nitrógeno disponible	57
3.3.5	Fósforo disponible	59
3.3.6	Metales pesados extraíbles con DTPA (MP-DTPA)	61
3.3.6.1	Hierro-DTPA	61
3.3.6.2	Cobre-DTPA	63
3.3.6.3	Manganeso-DTPA	65
3.3.6.4	Zinc-DTPA	67
3.3.6.5	Cadmio-DTPA	68

3.3.6.6 Cromo-DTPA	70
3.3.6.7 Plomo-DTPA	72
3.3.6.8 Níquel-DTPA	75
<b>CONCLUSIONES</b>	77
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	81
<b>APÉNDICES</b>	
<b>APÉNDICE I</b>	86
<b>APÉNDICE II</b>	88
<b>ANEXOS</b>	
<b>ANEXO I</b>	94
<b>ANEXOII</b>	100
<b>ANEXO III</b>	103

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
1	Producción de lodos secos generados en las plantas de tratamiento de aguas servidas de Santiago y su proyección en el periodo entre 2001 y 2027	5
2	Contenido total de metales pesados en lodos generados por algunas plantas de tratamiento de aguas servidas en Chile	19
3	Ubicación, clasificación y textura de las muestras de suelos agrícolas de la Región Metropolitana	26
4	Límites de detección de los metales pesados o ETM's analizados	36
5	Características químicas de lodos en estudio	38
6	Contenido de metales pesados extraíbles con DTPA en lodos	42
7	Contenido de metales pesados totales en lodos	43
8	Características físicas y químicas de los suelos en estudio	44
9	Contenido de metales pesados extraíbles con DTPA en los suelos antes de la incubación	48
10	Contenido de metales pesados totales en los suelos antes de la incubación	49



## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1	Planta de tratamiento de aguas servidas “El Trebal”	4
2	Ubicación de las plantas de tratamiento de aguas servidas de la Región Metropolitana planificadas para el año 2010	6
3	Secado al aire de lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas servidas “El Trebal”	10
4	Esquema del tratamiento y destino de las aguas servidas	11
5	Vías de usos y disposición de lodos	14
6	Rango de disponibilidad de algunos metales pesados	21
7	Incubación de suelos con lodos	22
8	Esquema de incubación para cada lodo	31
9	pH en agua en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca, a tiempo cero y sesenta días de incubación	51
10	pH en KCl en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca, a tiempo cero y sesenta días de incubación	53
11	Conductividad eléctrica en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca, a tiempo cero y sesenta días de incubación	56
12	Nitrógeno disponible en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca, a tiempo cero y sesenta días de incubación	58

13	Fósforo disponible en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca, a tiempo cero y sesenta días de incubación	59
14	Fe-DTPA en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca, a tiempo cero y sesenta días de incubación	62
15	Cu-DTPA en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca, a tiempo cero y sesenta días de incubación	64
16	Mn-DTPA en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca, a tiempo cero y sesenta días de incubación	65
17	Zn-DTPA en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca, a tiempo cero y sesenta días de incubación	67
18	Cd-DTPA en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca, a tiempo cero y sesenta días de incubación	69
19	Cr-DTPA en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca, a tiempo cero y sesenta días de incubación	71
20	Pb-DTPA en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca, a tiempo cero y sesenta días de incubación	73
21	Ni-DTPA en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca, a tiempo cero y sesenta días de incubación	76

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>Mg:</b>	Mega gramos
<b>ha:</b>	Hectáreas
<b>ETM's:</b>	Elementos trazas metálicos
<b>CB:</b>	Cuyuncaví Bajo
<b>EM:</b>	El Maitén
<b>M:</b>	Miraflores
<b>LP:</b>	La Paloma
<b>EAA:</b>	Espectrofotometría de absorción atómica
<b>LET 2004:</b>	Lodo “El Trebal” año 2004
<b>LET 2005:</b>	Lodo “El Trebal” año 2005

## RESUMEN

Una de las mayores inversiones ambientales en la historia de Chile es el plan de saneamiento hídrico de la cuenca de la Región Metropolitana, el cual considera tratar el 100% de las aguas servidas generadas por los habitantes de Santiago y de sus localidades periféricas en un plazo de 10 años.

Las plantas de tratamiento de aguas servidas, cuando operan con la tecnología de lodos activados, generan grandes masas de biosólidos o lodos estabilizados, en los cuales persiste una importante carga patógena residual, se concentran metales pesados y posiblemente, otros contaminantes ambientales.

En Chile, existe interés en fomentar la aplicación de biosólidos a suelos agrícolas, sin embargo, se cuenta con escasa información local al respecto. Una vía rápida para investigar las interacciones suelo/biosólido es recurrir a estudios de incubación o mineralización *in vitro*.

En este trabajo se investigan los efectos o cambios producidos en suelos agrícolas de la Región Metropolitana, al incubarlos por sesenta días con dosis creciente de biosólidos, muestreados en distintas épocas del año.

En suelos y lodos, se determinó pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica total y oxidable, capacidad de intercambio catiónico (CIC), cationes extraíbles, nitrógeno y fósforo disponible, nitrógeno, fósforo y potasio total, metales pesados extraíble con DTPA (ácido dietiléntriaminopentacético) y metales pesados totales.

Los resultados del estudio indican que los cambios observados en los suelos, por efecto de la incubación con biosólidos, dependen tanto del tipo y textura del suelo utilizado como de la dosis y época de muestreo del lodo.

La aplicación de lodos a los suelos generó una disminución en el pH-H<sub>2</sub>O y un aumento en la conductividad eléctrica. Este efecto se observó mayormente a través del tiempo de incubación. Sin embargo, el aumento en la concentración de sales no sería perjudicial para los cultivos, ya que la CE fue menor de 4 dS m<sup>-1</sup>, valor que indica el límite entre suelos no salinos y salinos.

Los macronutrientes nitrógeno y fósforo disponible, aumentaron su concentración a medida que se incrementó la dosis y el tiempo de incubación de lodos, lo que indicaría una transformación o mineralización del lodo.

Los metales pesados extraíbles con DTPA en los suelos acondicionados con ambos lodos muestran resultados crecientes al aumentar las dosis de lodos, sin embargo, al aumentar el tiempo de incubación se observan resultados variables en cuanto a su concentración, aumentando en Fe-DTPA y Ni-DTPA, disminuyendo en Mn-DTPA y Pb-DTPA, mientras que los metales Cu-DTPA y Zn-DTPA no presentan cambios a través del tiempo de incubación. Los metales pesados en menor concentración tanto en los suelos como en los lodos son el Cd-DTPA y el Cr-DTPA, debido a esto las concentraciones en los suelos incubados estuvieron bajo el límite de detección o cercano a éste, no observándose mayores cambios a través del tiempo de incubación.

En general los metales pesados extraíbles con DTPA no variaron mayormente en ambos tratamientos y con el tiempo de incubación, debido a la similitud en las concentraciones de metales pesados que contienen ambos lodos en estudio.

## SUMMARY

One of the biggest environmental investments in Chile's history is the Metropolitan Region river basin hydric cleaning plan, which considers treating 100% of the wastewater generated by the inhabitants of Santiago and peripheral localities in a term of 10 years.

When wastewater treatment plants operate with active sewage sludge technology, they generate huge masses of biosolids or stabilized sewage sludges, in which an important residual pathogenic charge, heavy metals concentrate and possibly, other environment pollutants persist.

In Chile there is an interest in fomenting the application of biosolids on agricultural soils, nevertheless, there is little information on the matter. A quick way to investigate soil/biosolid interactions is to resort to incubation or mineralization with in vitro studies. This work, studies the effects or changes produced in different agricultural soils of the Metropolitan Region by incubating them sixty days with increasing doses of biosolids, sampled at different times of the year.

In soils and sewage sludges, pH, electrical conductivity, total organic and oxidizable matter, cationic exchange capability, extractable cations, available nitrogen and phosphorus, total nitrogen, phosphorus and potassium, total heavy metals, and dietilentriaminopentacetic acid (DTPA) extractable heavy metals, were determined.

The results of the study indicate that the changes seen in soils, as an effect of biosolids incubation, depends on the kind and texture of the soil used as well as the sewage sludge doses and sample time.

The application of sewage sludge to soils generated a decrease on pH-H<sub>2</sub>O and an increase on electrical conductivity. This effect was increasing throughout incubation time. However, the increase in salt concentration would not be harmful to cultivations, since electrical conductivity was below 4 dS m<sup>-1</sup>, value that indicates the limit between saline and no saline soils.

Available nitrogen and phosphorus macronutrients, increased their concentration when both sewage sludge dose and incubation time increased, which indicates a transformation or sewage sludge mineralization.

DTPA extractable heavy metals present in both sewage sludge conditioned soils show increasing results when sewage sludge is augmented, however, when incubation time is increased, variable results are seen in terms of concentration, increasing in Fe-DTPA and Ni-DTPA, decreasing in Mn-DTPA and Pb-DTPA, while Cu-DTPA and Zn-DTPA metals show no changes throughout incubation time. Heavy metals in smaller concentration both in soils as well as in sewage sludges are Cd-DTPA and Cr-DTPA. Due to this, concentrations in incubated soils were below the detection limit or close to it, showing no major changes throughout incubation time.

In general, DTPA extractable heavy metals did not show major variations under both treatments, due to the similarity in heavy metal concentrations in both sewage sludges studied.

# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes generales

El suelo es la cubierta de la mayor parte de la superficie continental de la Tierra. Es un agregado de minerales no consolidados que resulta de la alteración meteorológica o de la disgregación física de las rocas y que, bajo la influencia de los seres vivos, evoluciona hasta formar un sistema complejo, de estructura estratificada y composición específica.

La composición química y la estructura física del suelo, están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, la cubierta vegetal, el tiempo en que ha actuado la meteorización, la topografía y los cambios resultantes de las actividades humanas, lo que generalmente conlleva a la degradación de los suelos (López y col., 2000).

Por degradación de los suelos se entiende el deterioro de propiedades físicas, químicas y biológicas aisladamente o en forma combinada, que impiden o limitan el buen desarrollo de cultivos y buenas cosechas, siendo un hecho sumamente preocupante, ya que incide negativamente en los ecosistemas y produce considerables pérdidas económicas.

En la agricultura se han desarrollado métodos para prevenir la degradación del suelo debido al cultivo excesivo y para enmendar o reconstruir suelos que ya han sido degradados en un grado importante.

Una de las soluciones para mejorar suelos de uso agrícolas es la utilización de biosólidos, también conocidos como lodos estabilizados, los cuales son compuestos



orgánicos sólidos, semisólidos o líquidos generados durante el proceso de tratamiento mecánico, biológico y/o químico de purificación de las aguas servidas.

Los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas, contienen hasta un 60% de materia orgánica, lo que al incorporarlos a los suelos, favorece sus propiedades físicas, químicas y biológicas, mejorando suelos degradados (Becerra, 2003).

Un factor importante que puede limitar la utilización agrícola de los lodos es la presencia de cantidades altas de metales pesados, entendiéndose por tales aquellos que presentan una densidad mayor de  $5,0 \text{ g cm}^{-3}$ . Diversos metales pesados son de carácter tóxico para las plantas y en general para organismos vivos, incluso a bajas concentraciones, por ejemplo Hg, As, Cr o Pb (Lenntech, 2003).

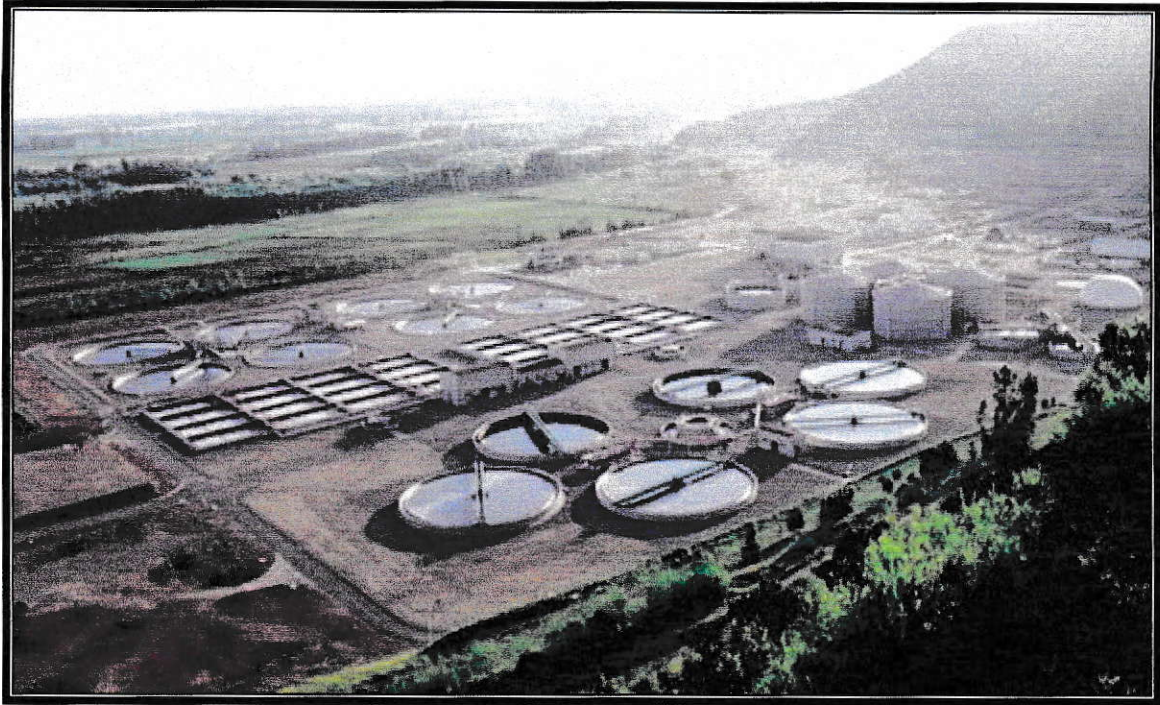
La disponibilidad de los metales pesados para las plantas depende de factores del suelo tales como: pH, clase textural, estructura, capacidad de intercambio catiónico, potencial redox (la solubilidad de algunos elementos químicos varía con la presencia o ausencia de agua dentro del perfil del suelo), presencia de carbonatos, sales solubles (producen el desplazamiento de metales de los sitios activos) y materia orgánica debido a la formación de complejos o quelatos con los metales pesados que los hacen menos disponibles a la absorción de las plantas y persistentes en los suelos. (García y Dorronsoro, 2000).

## **1.2 Plantas de tratamiento de aguas servidas**

En el año 2000, Aguas Andinas inició el Plan de Saneamiento Hídrico de la Cuenca de Santiago, iniciativa que constituye una de las mayores inversiones ambientales en la historia de Chile.

Este plan, tiene por objetivo tratar el 100% de las aguas servidas generadas por los habitantes de Santiago y las localidades periféricas, devolviéndolas a los cauces naturales, libres de contaminación y mejorando, considerablemente, la calidad de vida de los habitantes de la cuenca. El inicio del plan comenzó con la construcción de la planta de tratamiento de aguas servidas El Trebal (Figura 1) en el año 2000 y de los colectores interceptores Maipú y Maipo-San Bernardo.

El objetivo de esta planta es tratar las aguas servidas de una población estimada en 1.700.000 habitantes de la zona sur y sur poniente de Santiago, que se descargan al río Maipo y Zanjón de la Aguada. Dicha planta se encuentra ubicada a 35 kilómetros de la ciudad de Santiago, al norponiente de la comuna de Padre Hurtado, en la ribera norte del río Mapocho. Esta planta trata un caudal promedio de  $4,4 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$ , con lo que es posible descontaminar el 23% del total de las aguas servidas generadas por los habitantes de Santiago.



**Figura 1** Planta de tratamiento de aguas servidas “El Treal”  
(Aguas Andinas S.A., 2003)

El cronograma de obras continuó con la construcción de la planta de tratamiento de aguas servidas La Farfana, la que está en operación desde octubre del año 2003 y trata un caudal promedio de  $8,8 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$ . Ubicada en la comuna de Maipú, La Farfana es la planta más grande de América Latina y una de las cinco más grandes del mundo, descontaminando el 50% de las aguas servidas de la capital. El objetivo de esta planta es sanear las aguas de una población estimada en 3.294.000 habitantes, de las comunas de La Reina, Ñuñoa, Peñalolén, La Florida, La Cisterna, San Ramón, Pedro Aguirre Cerda, Santiago, Providencia, Macul, San Joaquín, Quinta Normal, Lo Espejo, Estación Central, Las Condes, Pudahuel y Lo Prado.

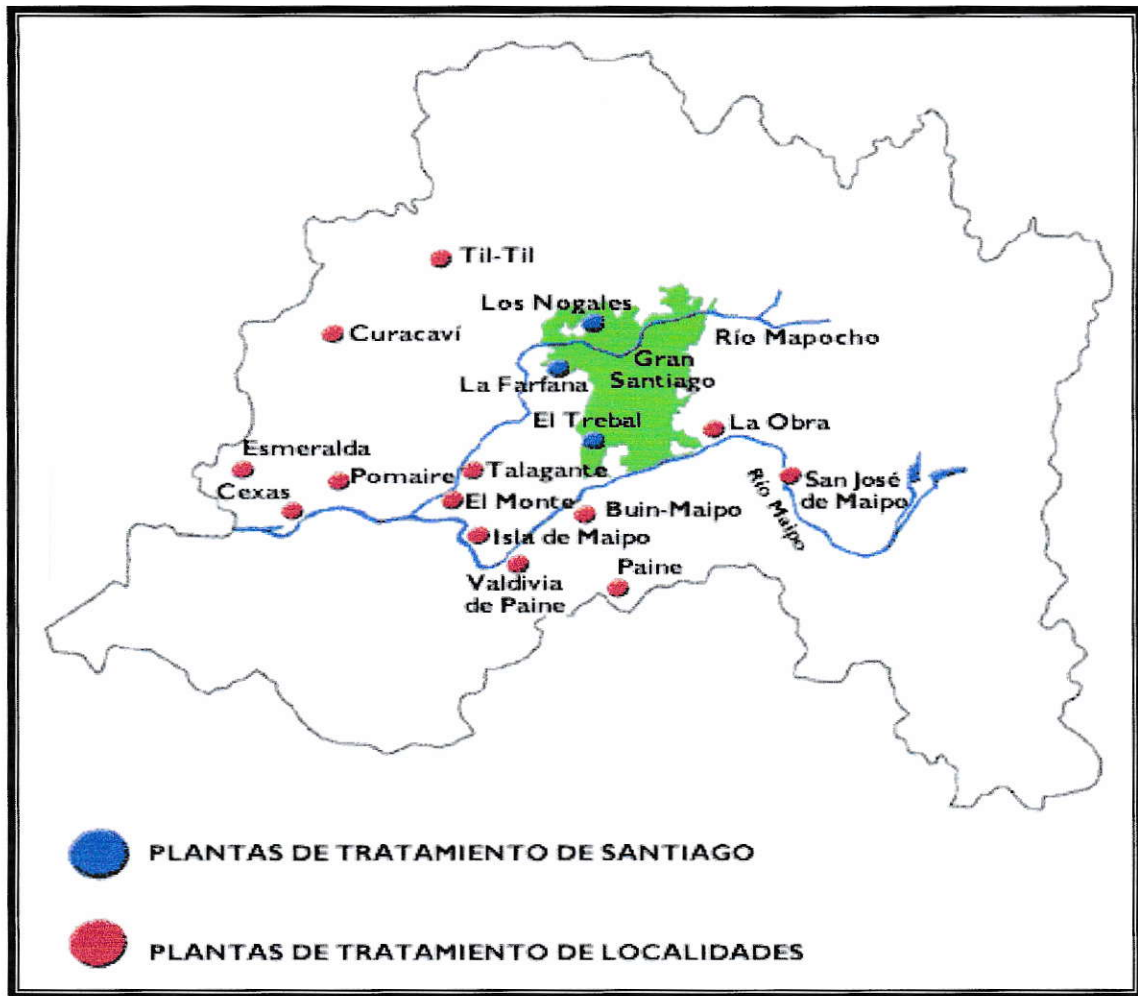
En tanto, para el año 2009 está programada la puesta en operación de la planta de tratamiento de aguas servidas Los Nogales, la que tendrá una capacidad promedio de tratamiento de  $6,6 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$ .

Respecto de las localidades periféricas, Aguas Andinas inició la construcción de 10 modernas plantas de tratamiento de aguas servidas que beneficiarán a los sectores de Til - Til, Curacaví, Melipilla, Pomaire, Peñaflores, El Monte, Isla de Maipo, Malloco, Talagante, Valdivia de Paine, Padre Hurtado, Calera de Tango, Buin, Maipo, Linderos, Paine, Alto Jahuel, El Canelo, Las Vertientes, El Manzano, Guayacán y San José de Maipo, entre otras, beneficiando a 610 mil habitantes (Aguas Andinas S.A., 2003).

En la Tabla 1 se muestra la producción de lodos que se ha generado y que se generará en las plantas de tratamiento de aguas servidas de Santiago en el periodo 2001-2027.

<b>Tabla 1</b> Producción de lodos secos generados en las plantas de tratamiento de aguas servidas de Santiago y su proyección en el periodo entre 2001 y 2027				
<b>Lodo base seca, Mg año<sup>-1</sup></b>				
<b>Planta</b>	<b>2001</b>	<b>2004</b>	<b>2009</b>	<b>2027</b>
El Trebal	21.535	24.090	27.740	39.420
La Farfana	-	51.465	54.385	62.780
Los Nogales	-	-	29.565	43.070
Total anual	21.535	75.555	111.690	145.270
Fuente: Aguas Andinas S.A., 2003				

En la Figura 2 se presenta la ubicación de las plantas de tratamiento de aguas servidas, tanto del sector periférico como de la Región Metropolitana.



**Figura 2** Ubicación de las plantas de tratamiento de aguas servidas de la Región Metropolitana planificadas para el año 2010 (Aguas Andinas S.A., 2003)

### 1.2.1 Etapas del tratamiento de aguas servidas

Los tratamientos de las aguas servidas se pueden agrupar, fundamentalmente, en procedimientos de depuración física, biológica y química. Las etapas fundamentales de estos procedimientos son tratamiento: preliminar, primario, secundario y terciario.

**Tratamiento preliminar:** antes de entrar al proceso de tratamiento propiamente tal, el agua pasa por una etapa previa en la cual se separan y retiran los residuos mayores de 40

mm que arrastra la corriente y pueden dañar la infraestructura de depuración. Para ello se cuenta con:

- Dos líneas de rejas para retener los desechos gruesos. En la primera, los barrotes tienen una separación de 40 mm., mientras que en la segunda esa distancia se reduce a 6 mm. Un sistema de limpieza automático va evacuando a un receptáculo los desechos que se van acumulando, los cuales luego se trasladan a un sitio de almacenamiento de residuos sólidos.
- Desarenadores, para eliminar la arena que puede tener efectos de abrasión y depositarse en los estanques. En esta fase las aguas se aquietan para que la materia mas pesada sedimente naturalmente.
- Desengrasadores, que evitan el paso de grasas que podrían colmatar las tuberías y los equipos. Para ello se utilizan bombas de emulsión de aire, emplazadas en los mismos desarenadores, que hacen flotar la grasa.
- Un puente que recorre los desarenadores de extremo a extremo, cuenta con una bomba que va extrayendo la arena desde el fondo y también con un mecanismo de barrido para las grasas en superficie.

Con esto, el agua está lista para entrar a los siguientes procesos (Induambiente, 2003).

**Tratamiento primario:** se remueven sólidos de tamaño entre 0,05 y 1,0 mm, por efecto de la gravedad.

**Tratamiento secundario:** también conocido como tratamiento biológico, permite la remoción de la materia orgánica que no se deposita con el tratamiento primario. Las

unidades de procesos biológicos son variadas, dentro de éstas se encuentran: estanques de lodos activados, lagunas de estabilización y zanjas de oxidación.

Dentro de los tratamientos tipo biológico, uno de los más usados es el de lodos activados. Este tratamiento convencional se basa en la oxidación de la materia orgánica contenida en las aguas servidas por una amplia gama de microorganismos, y consecuentemente, la formación de biomasa microbiana.

El proceso de lodos activados, generalmente es efectuado en un reactor aeróbico, donde las aguas servidas y los microorganismos permanecen en contacto durante varias horas para su espesamiento o agregación de las partículas orgánicas en flóculos, los cuales proporcionan la superficie para que ocurra la biodegradación. La mezcla resultante, fluye a un estanque de decantación o clarificador, donde los agregados microbianos en forma de coágulos, caen al fondo y el agua tratada se desagua. Los coágulos microbianos acumulados en el fondo del estanque decantador se extraen en forma de lodo. Parte de este lodo es recirculado al reactor aeróbico para la mantención del proceso, mientras que el resto de lodo va a los biodigestores para su estabilización, lo que conlleva a reducir el poder de fermentación de la materia orgánica.

**Tratamiento terciario:** se realiza cuando se quiere obtener aguas de mejor calidad. Este tratamiento consiste en la adición de reactivos químicos, que permiten, mediante la floculación o coagulación, la separación del material coloidal por decantación o por flotación. El tratamiento de las aguas servidas termina, generalmente, con una desinfección de las aguas previamente sometidas a los tratamientos ya mencionados.

En la desinfección el agua tratada entra en contacto con gas cloro que permite eliminar los microorganismos presentes. El proceso de desinfección es una fase que no conduce a generar lodos.

***Tratamiento de lodos:*** tras separarse del agua, el lodo inicia una línea de tratamiento en paralelo que tiene una duración total de unos 45 días en promedio, incluyendo el secado en cancha. Este proceso busca corregir la excesiva dilución y la presencia de materia fermentable y microorganismos en los lodos.

Una vez espesados los lodos, se someten al proceso de digestión anaeróbica, que es la etapa más importante en la línea de tratamientos, ya que logra estabilizar el lodo, al fermentar en condiciones controladas la materia orgánica fermentable. Esta fase se desarrolla en reactores completamente cerrados donde se mantiene el lodo durante 20 a 22 días, a temperatura controlada (35°C) y con una mezcla permanente de la materia residual.

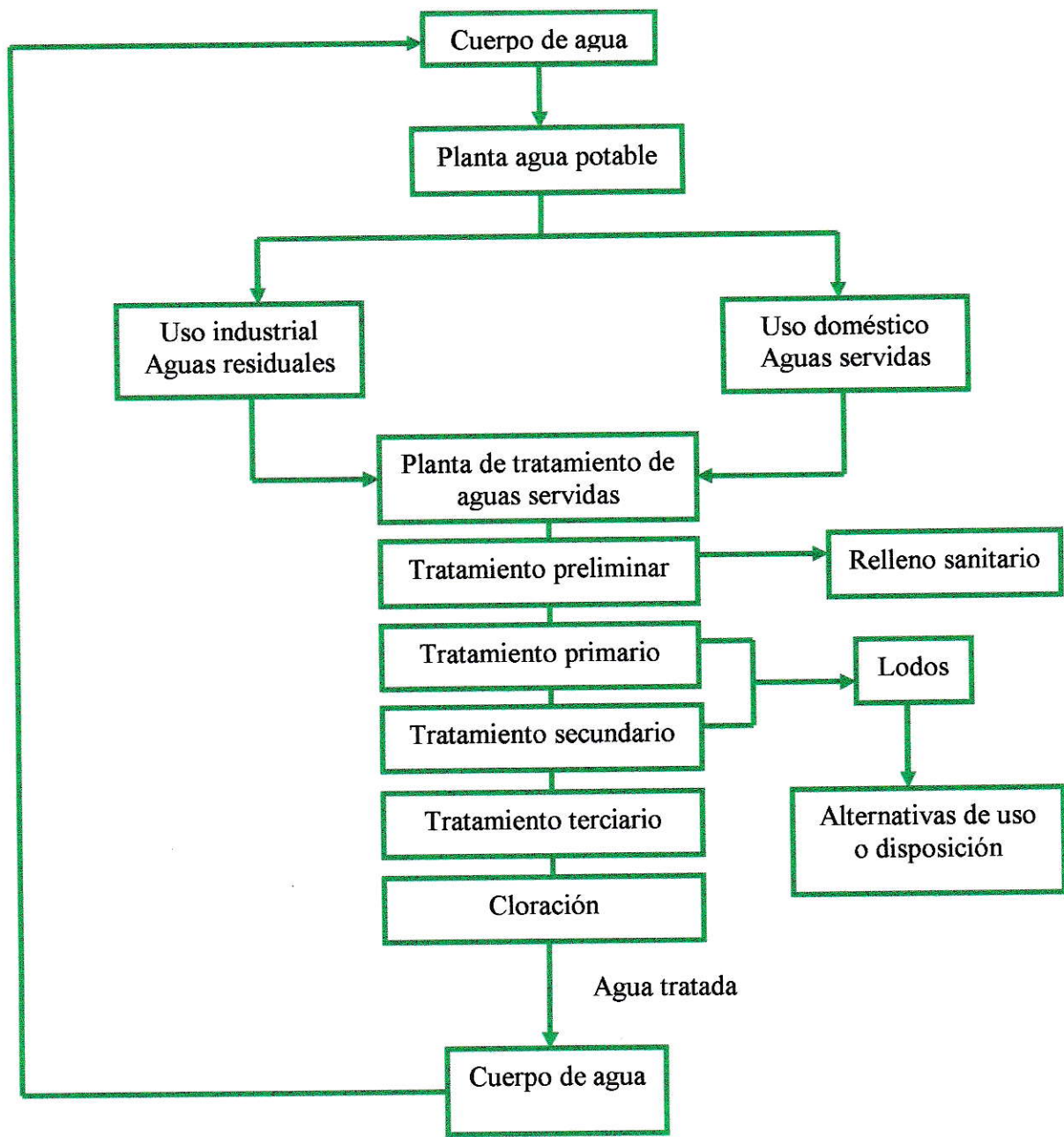
Los lodos salen del digestor con una concentración del orden de 40 g/L de sólidos y deben someterse a un proceso de secado. Para ello, se acondicionan con polímeros (agente floculante), se centrifugan y son transportados a una cancha de secado, donde se disponen en hileras que se van volteando mecánicamente para acelerar el secado al aire libre. La acción del aire y del sol, logra que en dos semanas el lodo pase de un 30% a un 70% de sequedad (Figura 3).





**Figura 3** Secado al aire de lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas servidas “El Trebal” (Aguas Andinas S.A., 2003)

Ya secos, los lodos se llevan a un sitio de disposición final (monorelleno) especialmente acondicionado (Induambiente, 2003). La Figura 4 muestra un esquema del tratamiento y destino de las aguas servidas.



**Figura 4** Esquema del tratamiento y destino de las aguas servidas

### **1.3 Principales vías de uso y disposición de lodos**

Los procedimientos más comunes aplicados mundialmente para el manejo de lodos son la incorporación directa al suelo; y la disposición en rellenos sanitarios autorizados (Renner, 2000). Otras técnicas de manejo incluyen la incineración. La incorporación de lodos en el suelo presenta cierto rechazo debido a los posibles problemas de contaminación, riesgos de enfermedades y molestias por malos olores, situación que ocurre cuando el lodo no ha sido tratado adecuadamente.

La aplicación de lodos al suelo es el método más antiguo y común de uso de lodos. Inicialmente este manejo consistía principalmente en su aplicación como relleno en el suelo, sin embargo, la tendencia actual es fomentar la aplicación de lodos compostados para reutilizar el producto como un mejorador de suelos (Acevedo y col., 2005).

Los lodos no sustituyen a los fertilizantes químicos, sólo los complementan aportando algunos nutrientes como nitrógeno, fósforo, calcio, magnesio y micronutrientes; estos últimos incluyen trazas de metales esenciales como cobre, zinc, molibdeno, boro, y manganeso (Stehouwer, 2003).

Además, los lodos tienen un alto contenido de materia orgánica que resulta beneficiosa para la producción de cultivos, jardines, bosques, etc.

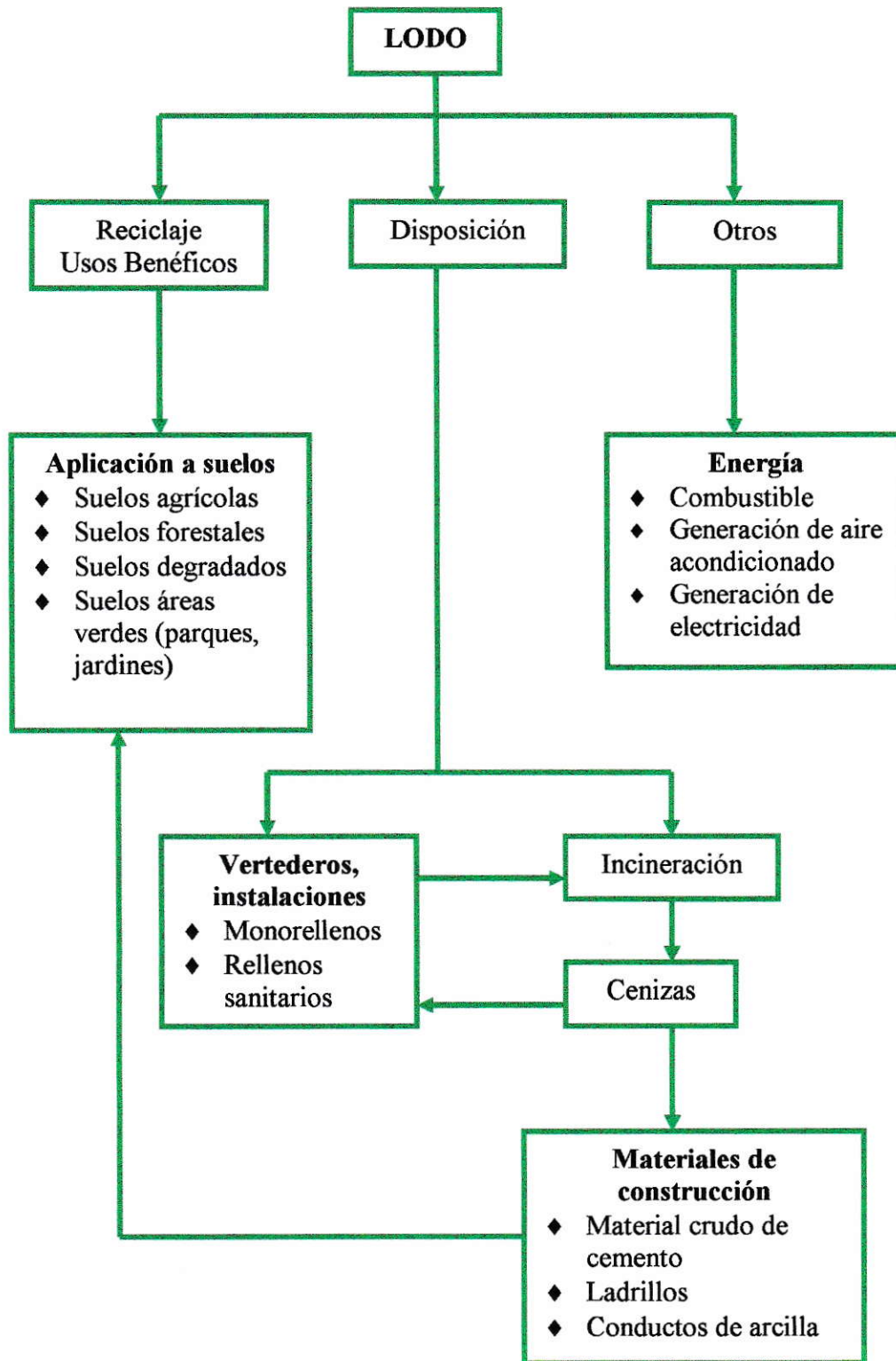
El aporte de materia orgánica (comúnmente 50%) a los suelos por aplicación de lodos puede causar cambios en las propiedades físicas, afectando la densidad, el estado de agregación del suelo, la porosidad, el tamaño de distribución de poros, la conductividad hidráulica y también, se ha encontrado que contribuye a la reducción de escorrentías y la erosión causada por las aguas (Yahüe y col., 1987; Clapp y col., 1986).

Los lodos contienen un menor contenido de nutrientes en comparación con los fertilizantes químicos, sin embargo, el uso de lodos reduce consecuentemente los impactos producidos en el ambiente por la contaminación con elementos químicos (Obbard y col., 1992).

En nuestro país con el desarrollo de los nuevos proyectos de saneamiento, y la aprobación de normas que regulan los niveles de contaminación de las descargas líquidas a cursos de aguas superficiales, el tema del manejo y utilización de lodos en suelos de uso agrícola está adquiriendo día a día una mayor importancia, por lo cual ya existe un anteproyecto de norma para el manejo de los lodos (CONAMA, 2001).

El Reglamento incluye la definición de pautas técnicas para optimizar el almacenamiento, recolección, transporte, reutilización, tratamiento y disposición final de este tipo de lodo, permitiendo su uso cuando sus condiciones físicas, químicas y biológicas sean técnicamente adecuadas para ello (Cortez E., 2003).

La Figura 5 muestra las diferentes vías de uso y disposición de lodos (USEPA, 1995). El uso en agricultura es considerado un método benéfico de reuso de lodos; por el contrario, métodos que no permiten aprovechar el contenido de los lodos, son la incineración y el vertido al mar. Otras alternativas del uso de los lodos, son su empleo como combustible y generación de energía.



**Figura 5** Vías de uso y disposición de lodos (USEPA, 1995)

#### **1.4 Efectos de la aplicación de lodos en suelos de uso agrícola**

La aplicación al suelo se perfila como la mejor alternativa para reciclar los lodos, toda vez que permite reutilizar un 80% del material de desecho, generando mejoras de productividad y recuperación de ecosistemas degradados, debido a que actúa como acondicionador del suelo al mejorar la porosidad, capacidad de retención de agua y estructura (CWMI, 1996). Lo anterior permite un mejor desarrollo y penetración de las raíces, lo cual favorece la asimilación de nutrientes y también reduce la escorrentía.

Sin embargo, los lodos se deben aplicar de manera controlada, teniendo en cuenta que se altera la composición química y biológica del suelo y por ello presentan algunas restricciones ambientales.

La aplicación de lodos en agricultura exige comprobar la ausencia de organismos patógenos, niveles tóxicos de ciertos compuestos y metales pesados; además, se deben controlar tanto las cantidades incorporadas como el efecto acumulativo de compuestos químicos en el largo plazo. Es importante hacer una dosificación adecuada de los lodos según el cultivo a realizar en el suelo tratado, para evitar que excesos de nutrientes como nitrógeno-nitrato pueda contaminar por lixiviación las aguas subterráneas, o por escorrentía las aguas superficiales como ocurriría con el fósforo (Clapp y col., 1986).

El menor impacto ambiental y los menores costos de disposición, en comparación con la incineración y los monorellenos son parte de las ventajas de las aplicaciones de lodos en cultivos agrícolas (Becerra, 2003).

Los lodos comúnmente presentan un valor de pH que fluctúa entre 6 y 8 (USEPA, 1995) y cuando éstos son aplicados al suelo pueden modificarlo. La producción y mantención

de los cultivos está estrechamente relacionada con el pH del suelo (Rocha y Shirota, 1999).

La disponibilidad de nutrientes, principalmente fitonutrientes puede sufrir alteraciones ante variaciones de pH cuando se aplican lodos al suelo. Bajos valores de pH en el suelo por la aplicación de lodos, inferiores a 6,5 promueven la lixiviación de metales; por su parte, valores elevados de pH, sobre 11, causan la muerte de bacterias y a su vez, inhiben el movimiento de metales a través del suelo. (Rechcigl, 1995).

Otra de las propiedades químicas de los suelos que se ve alterada con la aplicación de lodos es la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la que corresponde a la capacidad de adsorber o retener cationes en forma reversible. Esta propiedad es importante para la fertilidad de los suelos y nutrición de las plantas.

Los cambios de la CIC en el suelo por la aplicación de lodos dependen particularmente de su textura, del contenido de arena y óxidos de Al y Fe, de la CIC inicial, antes de la aplicación, y del tiempo transcurrido después de la aplicación. La CIC del suelo se incrementa por la alta CIC de los lodos atribuida a su alto contenido de materia orgánica, sin embargo, la CIC puede disminuir con el tiempo debido a la degradación de la materia orgánica del lodo (Acevedo y col., 2005).

Las aplicaciones sucesivas de lodos en los suelos pueden aumentar su salinidad debido al aporte de iones  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{+2}$ , entre otros. Los principales efectos debido al exceso de la salinidad de los lodos son la disminución de la capacidad de germinación de la semilla y del crecimiento de la planta (Yahüe y col., 1987).

Junto a los efectos de la aplicación de lodos en algunas propiedades químicas de los suelos, también se ven alteradas sus propiedades biológicas, ya que la aplicación de

lodos aporta materia orgánica la cual incrementa la actividad microbiana. Sin embargo, tasas altas de lodo y los elementos contenidos en los mismos pueden tener efectos adversos sobre la población microbiana (Martínez, 2005).

En los lodos, el nitrógeno se encuentra principalmente en formas orgánicas como aminoácidos, proteínas y humus, mientras que en menor cantidad se presenta en formas inorgánicas, tales como amonio y nitrato (Henry y col., 1999). Todas las formas inorgánicas de nitrógeno se encuentran inmediatamente disponibles para las plantas. Por el contrario, las formas orgánicas de nitrógeno que no se encuentran inmediatamente disponibles para las plantas, primero deben ser transformadas a formas inorgánicas, mediante descomposición de la materia orgánica. Este proceso es realizado por microorganismos presentes en el suelo y es conocido como mineralización (Yahüe y col., 1987; USEPA, 1995).

El fósforo en los lodos presenta una alta disponibilidad para las plantas, encontrándose en general que la cantidad de fósforo suministrada, es más que suficiente para satisfacer las necesidades de los cultivos cuando el lodo es dosificado como fuente de nitrógeno disponible para el cultivo (Wen y col., 1997). Sin embargo, se debe tener cuidado con su aplicación, ya que su disponibilidad en ciertas áreas puede ser excesiva, convirtiéndose en un riesgo para las aguas superficiales si por efecto del riego o de las lluvias ocurre escurrimiento del suelo superficial (Yahüe y col., 1987).

Los metales pesados se encuentran naturalmente en el suelo en distintas concentraciones, las que pueden aumentar por efecto de la fertilización química, abonos de origen animal, biosólidos, compost, enmiendas y pesticidas (EC, 2001).



Los metales pesados contenidos en biosólidos o lodos estabilizados se pueden distribuir en la fase líquida o fase sólida del suelo, la mayoría se puede ligar a compuestos minerales u orgánicos del mismo.

La distribución de los metales pesados en el suelo se puede ver afectada por algunas propiedades del suelo como pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), materia orgánica, temperatura y humedad.

La experiencia sobre el uso de lodos indica que los metales tienden a acumularse entre 0 y 15 cm y que la concentración tiende a disminuir con la profundidad (EC, 2001).

Los metales pesados tienden a aumentar su concentración con la tasa de aplicación en el suelo (USEPA, 1995), en el corto tiempo no son movilizables en forma significativa por las plantas ni dentro del suelo, por tanto, es posible esperar un aumento en el contenido de los mismos.

La absorción de metales pesados por las plantas cuando se aplican lodos a los suelos va a depender principalmente del tipo de cultivo, cantidad y tiempo de aplicación.

La Tabla 2 muestra concentraciones de metales pesados en los lodos provenientes de distintas plantas de tratamientos de aguas servidas del país. Se observa que los lodos de la planta de tratamiento de aguas servidas El Trebal presentan contenidos de As, Cr, Ni, Pb y Zn bastante más altos con respecto de las otras plantas; sin embargo, están bajo los límites definidos como contaminantes para el uso de los lodos en el suelo por la USEPA (1993).

**Tabla 2** Contenido total de metales pesados ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en lodos generados por algunas plantas de tratamiento de aguas servidas en Chile

Metal	Los Andes	La Ligua	San Felipe	Quillota	El Trebal	VI Región	VII Región	Concentración límite contaminante <sup>1</sup>
As	6,57	3,3	2,31	2,53	17,1	- <sup>2</sup>	-	41
Cd	1,32	1,12	1,17	0,70	4,74	6	5	39
Cu	1303	749	265	379	377	50-785	195-1006	1500
Cr	17,69	15,04	24,92	8,95	260	-	-	1200
Hg	0,45	0,58	0,54	0,4	1,5	-	-	17
Mo	4,34	4,41	4,55	3,89	-	-	-	18
Ni	14,28	8,1	14,7	5,5	130	22-43	25-43	420
Pb	27,85	22,98	25,77	25,14	67	26-111	-	300
Se	1,92	2,33	1,81	1,24	1	-	-	36
Zn	919	634	893	471	1214	62-915	475-1198	2800

Fuente: SAG (2005), USEPA (1993)

<sup>1</sup> Concentración límite contaminante en lodo: concentración bajo la cual el lodo puede ser aplicado en el suelo sin requerimientos restrictivos y prácticas de manejo.

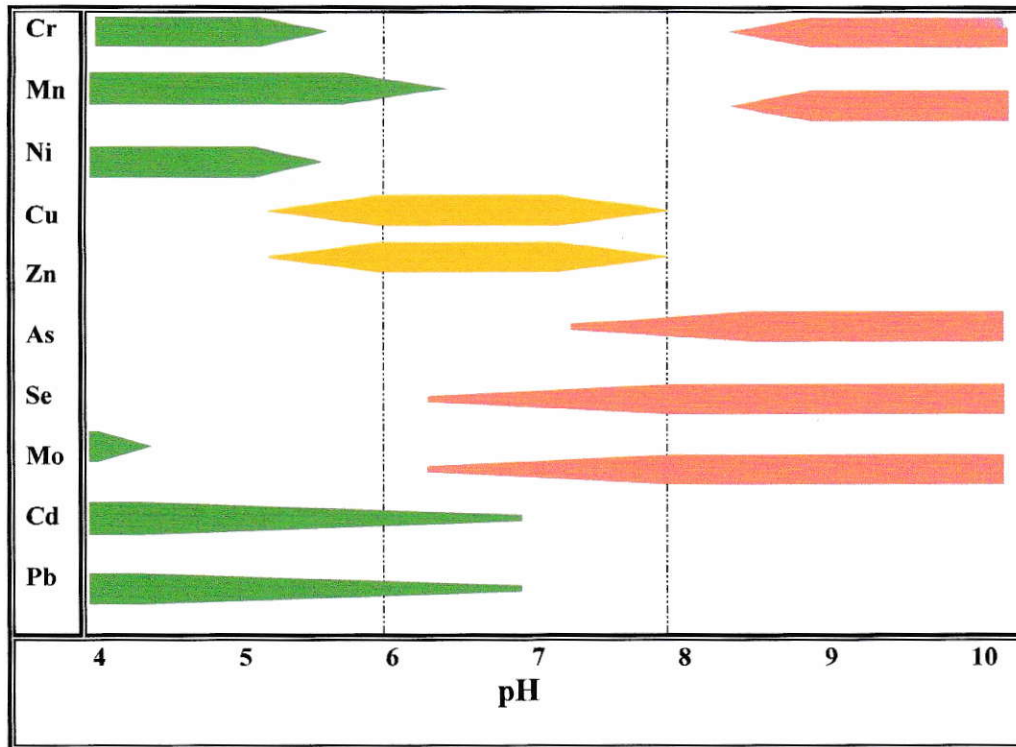
<sup>2</sup> Sin información

La biodisponibilidad es la fracción del metal pesado que está disponible para la absorción de las plantas, esta fracción está constituida por la parte soluble y adsorbida del metal. Puede ser medida por método químico utilizando agentes quelantes como el EDTA y el DTPA, los cuales quelan o captan todo ión metálico que se encuentre en la solución del suelo. (Kabata-Pendias, 2000).

La biodisponibilidad depende de la solubilidad y movilidad de los metales. Solo los metales que se encuentran en la solución suelo y aquellos adsorbidos en los sitios de intercambio de los constituyentes inorgánicos del suelo están disponibles para las plantas, por ello, la concentración total de los metales en el suelo no refleja necesariamente los niveles de metales biodisponibles (Lassat, 2001).

La interacción entre los distintos procesos que ocurren en el suelo, como intercambio catiónico, afectan la distribución de los metales entre la solución suelo y la fase sólida, siendo responsables de su movilidad y biodisponibilidad dentro del sistema planta-suelo (Basta, 2004).

La Figura 6 muestra el rango de variación de la disponibilidad de algunos elementos traza con el pH del suelo.



**Figura 6:** Rango de disponibilidad de algunos metales pesados (SAG, 2005)

### 1.5 Incubación de suelos con lodos

La incubación es un proceso de simulación en condiciones de laboratorio (*mineralización in vitro*) de los cambios que experimentarían en terreno algunas propiedades químicas de los suelos al aplicarles lodo (Figura 7).



**Figura 7** Incubación de suelos con lodos

La técnica consiste en mantener la mezcla de suelo/lodo a una temperatura constante y humedad controlada, durante un periodo de tiempo en el cual se debe mantener el estado granular del suelo (Álvarez, 2004).

## **1.6 Hipótesis de trabajo**

La aplicación de lodos a suelos agrícolas de la Región Metropolitana, modificaría algunas propiedades químicas de los suelos, como pH, CE, CIC, NPK disponible y metales extraíbles con DTPA, asociadas a la disponibilidad y a la absorción de nutrientes por el cultivo.

## **1.7 Objetivos**

### **1.7.1 Objetivo general**

Evaluar cambios en algunas propiedades químicas de suelos agrícolas de la Región Metropolitana incubados con dosis crecientes de lodos muestreados en dos épocas del año y con distinto tiempo de permanencia en el monorelleno de la planta de tratamiento de aguas servidas “El Trebal”.

### **1.7.2 Objetivos específicos**

- Hacer una caracterización química de lodos y suelos de la Región Metropolitana, mediante mediciones de pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), materia orgánica total y oxidable, cationes extraíbles, nitrógeno, fósforo y potasio disponibles y totales, metales pesados extraíbles con DTPA y metales pesados totales. Los metales a investigar son Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn.

- Determinar el efecto de los lodos sobre algunas propiedades químicas del suelo (pH, CE, nitrógeno y fósforo disponible y metales pesados extraíbles con DTPA) al incubar por sesenta días mezclas de suelo/lodo con dosis equivalentes a 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg de lodo seco por hectárea.
- Determinar si la época de toma de muestra y el tiempo de permanencia del lodo en el monorelleno afecta su composición y acción en el suelo.

El presente proyecto de Seminario de Título, forma parte del proyecto Fondecyt N° 1050288, titulado “Extractabilidad de contaminantes orgánicos y metales traza en suelos agrícolas enmendados con biosólidos y su relación con su ecotoxicidad”.

## **CAPITULO 2**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **2.1 Materiales**

##### **2.1.1 Toma de muestras de lodos y suelos**

###### **➤ Lodos**

Se tomaron dos muestras de lodo, una en septiembre de 2005, la cual tenía un año de permanencia en el monorelleno (LET 2004) y otra en marzo de 2005 (LET 2005), salida recientemente de la cancha de secado de la planta de tratamiento de aguas servidas “El Trebal”, de Aguas Andinas S.A., ubicada a 35 km. de la ciudad de Santiago, al norponiente de la comuna de Padre Hurtado, en la ribera norte del río Mapocho.

Los lodos se secaron al aire, se molieron y tamizaron a 2 mm.

###### **➤ Suelos**

Se seleccionaron cuatro suelos de la Región Metropolitana, correspondientes a Cuyuncaví Bajo (CB), El Maitén (EM), La Paloma (LP) y Miraflores (M), cuya ubicación, serie, orden y textura se indican en la Tabla 3.

Las muestras se tomaron a una profundidad de 0 – 20 cm, en ocho puntos escogidos al azar en cada sitio de muestreo, las cuales fueron mezcladas y homogenizadas para obtener una muestra compuesta representativa. Las muestras se secaron al aire y se tamizaron a 2 mm.



<b>Tabla 3</b> Ubicación, clasificación y textura de las muestras de suelos agrícolas de la Región Metropolitana					
<b>Suelo</b>	<b>Comuna</b>	<b>Ubicación coordenadas</b>	<b>Serie<sup>1</sup></b>	<b>Orden<sup>1</sup></b>	<b>Textura<sup>1</sup></b>
Cuyuncaví Bajo (CB)	Curacaví (Cuyuncaví Bajo)	Lat. S 33° 23' 158" Long. O 71° 07' 126"	Pomaire	Mollisol	Franco arenosa
El Maitén (EM)	Lampa, camino Lipangue	Lat. S 33° 19' 902" Long. O 70° 51' 873"	Lampa	Mollisol	Franco arenosa
La Paloma (LP)	Lampa, camino Lipangue	Lat. S 33° 19' 909" Long. O 70° 52' 367"	Lampa	Mollisol	Arenosa
Miraflores (M)	Curacaví Miraflores	Lat. S 33° 24' 418" Long. O 71° 04' 745"	Chorombo	Mollisol	Franco arcillosa arenosa

<sup>1</sup> Fuente: CIREN, (1984).

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Incubación

Los suelos se incubaron, en forma paralela, con aplicaciones equivalentes a 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg de lodo base seca por hectárea. La incubación se hizo a  $28 \pm 1$  °C, en bolsas plásticas cerradas con una banda elástica para permitir el ingreso de aire; la humedad se ajustó aproximadamente a un 60 a 70% del contenido de agua a capacidad de campo (33 kPa) para conservar el estado granular de las muestras y se mantuvo constante a través del control diario del peso.

### **2.2.1.1 Procedimiento de incubación**

Se incubaron 900 g de cada suelo distribuidos en tres bolsas con 300 g cada una para su acondicionamiento con lodo, en dosis equivalentes a 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg de lodo base seca por hectárea. Las bolsas se mantuvieron a temperatura y humedad constantes durante sesenta días.

Los análisis químicos se realizaron al inicio y al final de la incubación, tiempos cero y sesenta días, respectivamente.

La incubación de las mezclas suelos/lodo se realizó considerando lo siguiente:

- ***Determinación de la densidad aparente de los suelos (Apéndice I.1.)***

Se pesó una probeta plástica graduada de 100 mL y se llenó con suelo, golpeándolo ligeramente contra el mesón; luego se midió el volumen resultante. Los resultados se expresaron en  $\text{kg m}^{-3}$ .

- ***Determinación de lodo húmedo a utilizar, en función de la dosis de lodo a aplicar como enmienda (Apéndice I.2.)***

Una vez determinada la humedad del lodo a 105°C (Sadzawka y col., 2004), se calculó la cantidad de lodo sobre base húmeda a utilizar, en función de la dosis a aplicar en los suelos:

$$L = \frac{LH * DL}{LS}$$

Donde: L = masa de lodo húmedo a utilizar, en función de la dosis de lodo a aplicar como enmienda (kg)

LH = masa de lodo húmedo sobre la cual se determinó la humedad (kg)

LS = masa de lodo sobre base seca (kg)

DL = dosis de lodo a utilizar en la enmienda (i.e. 15.000 kg)

- ***Determinación de la humedad de los suelos a capacidad de campo***

En un vaso precipitado previamente tarado, se pesa una cierta cantidad de suelo (ms), a la cual se va agregando agua destilada, gota a gota, hasta conseguir una pasta húmeda, sin escurrimiento de agua visible, se pesa y se verifica el estado de humedad trabajando el suelo con los dedos para formar una masa la cual no debe liberar agua al ponerla sobre papel adsorbente. La cantidad de agua total agregada al suelo (ma), se obtiene por diferencia entre la masa del suelo original y la masa del suelo humectado.

- ***Determinación de la masa de suelo por hectárea de terreno***

Se puede calcular la masa de suelo existente en una hectárea, considerando su superficie (1 ha = 10.000 m<sup>2</sup>) y la profundidad de extracción de las muestras (20 cm = 0,2 m).

Luego:

$$MS_{ha} = 10.000 * 0,2 * Da$$

Donde: MS<sub>ha</sub> = masa de suelo por superficie de terreno (kg ha<sup>-1</sup>)

Da = densidad aparente (kg m<sup>-3</sup>)

- ***Determinación de la masa de lodo a utilizar, según la dosis a aplicar como enmienda (Apéndice I.3.-I.4.)***

Se considera que la masa de lodo húmedo a utilizar será aplicada a una determinada superficie de terreno, por lo que es expresada en unidades de masa por superficie, ( $\text{kg ha}^{-1}$ ). Por otra parte, se considera la masa del suelo a enmendar, y la masa de suelo por superficie de terreno.

De esta forma:

$$ML = \frac{L * MSI}{MS_{ha}}$$

Donde: ML = masa de lodo húmedo a utilizar en la enmienda ( $\text{kg ha}^{-1}$ )

L = masa de lodo húmedo a utilizar, en función de la dosis de lodo a aplicar como enmienda (kg)

MSI = masa de suelo a utilizar para la incubación (kg)

$MS_{ha}$  = masa de suelo por superficie de terreno ( $\text{kg ha}^{-1}$ )

- ***Determinación de la cantidad de agua necesaria para que el suelo en incubación alcance las condiciones de humedad de campo (Apéndice I.5.)***

Se considera la masa de suelo a enmendar, la masa de suelo utilizada para determinar la humedad de campo, y la cantidad de agua necesaria para que el suelo alcance la humedad de campo. Así:

$$A = \frac{MSI * ma}{ms}$$

Donde: A = masa de agua para que el suelo en incubación alcance las condiciones de humedad de campo (g)

MSI = masa de suelo a utilizar para la incubación (g)

ma = masa de agua utilizada para determinar la humedad de campo en los suelos (g)

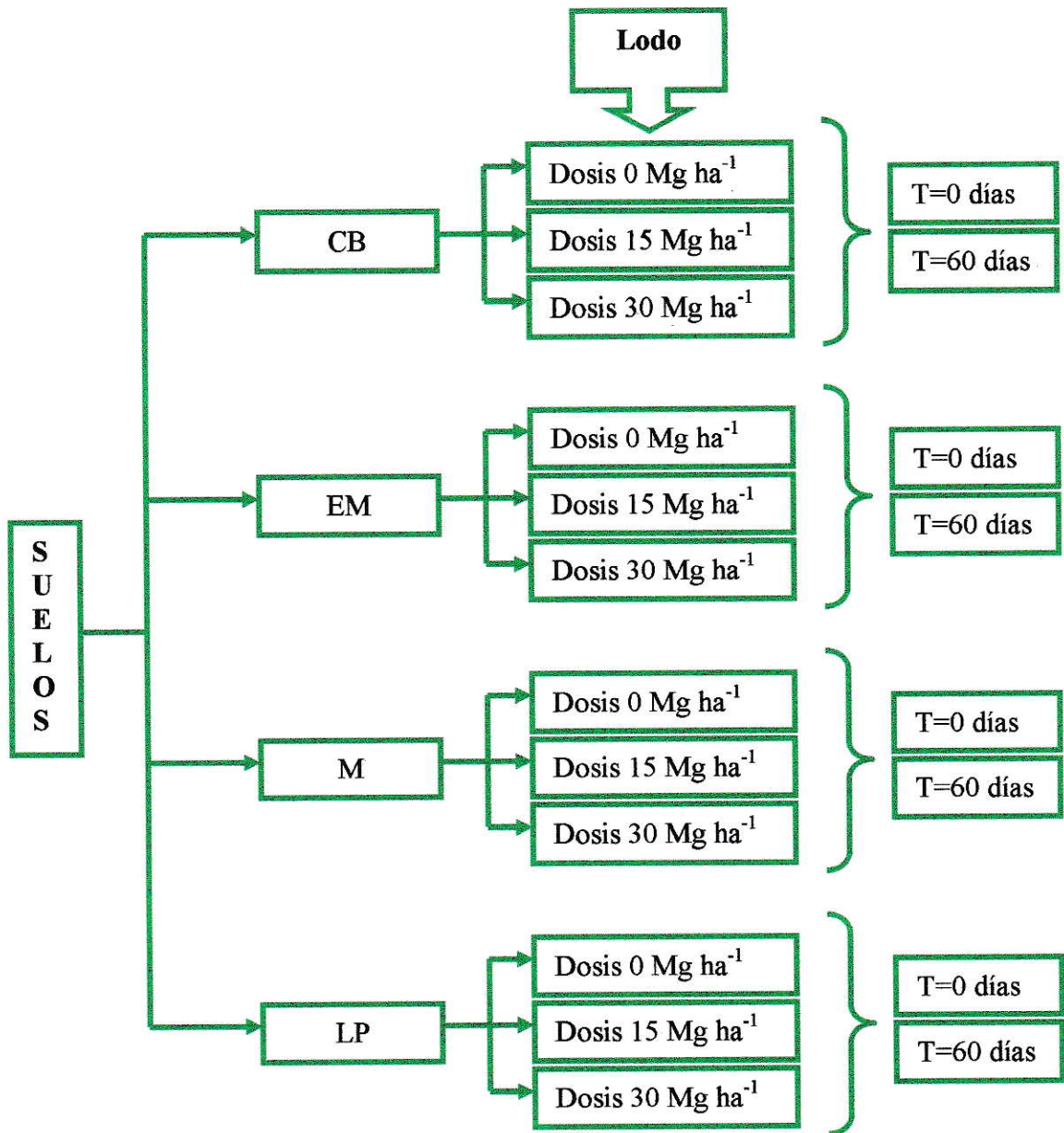
ms = masa de suelo utilizada en la determinación de humedad de campo (g)

### **2.2.1.2 Diseño experimental**

Se utilizó un diseño completamente aleatorio con arreglo cuatrifactorial (AxBxCxD) con dos repeticiones, donde el factor A representa los suelos, el factor B representa las dosis de lodo, el factor C representa el tiempo de incubación y el factor D representa la época de muestreo del lodo, originando 48 tratamientos, donde la unidad experimental es la bolsa.

En la Figura 8 se muestra un esquema del diseño para cada lodo.

Para evaluar la tendencia de los cambios en las propiedades estudiadas se hizo un análisis comparativo de los tratamientos mediante gráficos.



**Figura 8** Esquema de incubación para cada lodo

### **2.2.2 Análisis químicos de suelos, lodos y suelos incubados**

Se realizó una caracterización química de los suelos, lodos y mezclas suelo/lodo a tiempo cero y sesenta días. Los análisis se hicieron en el Laboratorio de Química de Suelos y Agua de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

Los métodos utilizados para los distintos análisis y que se describen a continuación, corresponden en su mayoría a los indicados en “Métodos de análisis recomendados para suelos chilenos” (Sadzawka y col., 2004).

- **Contenido de agua: por pérdida de masa a 105°C**

La muestra de suelo se seca a  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta masa constante. La diferencia en la masa del suelo antes y después del secado se usa para calcular el contenido de agua. El contenido de agua permite calcular el factor de humedad (Fh), el cual se usa para expresar los resultados de los análisis químicos sobre suelo a  $105^{\circ}\text{C}$ .

- **pH: por potenciometría en una suspensión suelo: solución de 1:2,5**

Se prepara una suspensión de suelo en agua y en KCl 1 mol/L, en una proporción 1:2,5 (peso/volumen), agitando manualmente durante una hora en forma intermitente. Posteriormente, en el sobrenadante se mide el pH utilizando un equipo Handylab 2 (SCHOTT), con electrodo de vidrio combinado.

- **Conductividad eléctrica: por conductivimetría en extracto de saturación y extracto 1:5 (suelo: solución)**

**Extracto pasta saturada.** Se prepara una pasta de suelo saturada con agua, se deja reposar 12 horas, se filtra al vacío y en el extracto se determina la conductividad eléctrica con un conductímetro. Este método proporciona la medida más representativa del total de sales solubles en el suelo debido a que se relaciona estrechamente con los contenidos de agua del suelo bajo condiciones de campo. Esta determinación se hizo solamente en la caracterización de los suelos y lodos.

**Extracto 1:5.** La muestra de suelo se extrae con agua a  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  en una relación suelo:agua de 1:5 para disolver los electrolitos. En el extracto se mide la conductividad eléctrica.

En ambas determinaciones se utilizó un equipo OAKTON, Conductivity /TDS/°C/°F meter

- **Materia orgánica total: por pérdida por calcinación**

La muestra de lodo y suelo se calcina a  $360^{\circ}\text{C}$  por 16 horas y se determina la pérdida de masa. Debido a que la calcinación puede volatilizar o descomponer otros componentes además de la materia orgánica, se informa como pérdida por calcinación.



- ***Materia orgánica oxidable: por oxidación húmeda y titulación con FeSO<sub>4</sub>, según método de Walkley-Black***

La materia orgánica del suelo se oxida con dicromato de potasio en un medio fuertemente ácido utilizando ácido sulfúrico y después de la reacción se titula el exceso de dicromato no reaccionado con sulfato ferroso.

- ***Capacidad de intercambio catiónico (CIC): por saturación con acetato de sodio a pH 8,2 y percolación (Dewis y col., 1970)***

La muestra se satura con acetato de sodio 1 mol/L a pH 8,2, se lava con etanol, hasta que la conductividad eléctrica no varíe en más de un 10%, se desplaza el sodio adsorbido con acetato de amonio 1 mol/L a pH 7,0 y se mide el sodio desplazado por espectrofotometría de emisión de llama.

- ***Cationes extraíbles (calcio, magnesio, sodio y potasio): extracción con solución de acetato de amonio 1 mol/L a pH 7,0 y determinación por espectrofotometría de absorción y emisión atómica***

La solución de acetato de amonio 1 mol/L a pH 7,0 extrae del suelo los cationes solubles, intercambiables y provenientes de calcita, dolomita y yeso. En el extracto se determina Ca y Mg por espectrofotometría de absorción atómica (EAA) con llama de aire-acetileno, y Na y K por fotometría de llama, con llama de aire-propano.

- ***Nitrógeno inorgánico o disponible:* extracción con KCl y determinación por destilación con vapor de agua (Sparks y col., 2001)**

El suelo se extrae con KCl 2 mol/L y el  $\text{N-NH}_4^+$ ,  $\text{N-NO}_3^-$  y  $\text{N-NO}_2^-$  se determinan por destilación con vapor de agua en presencia de MgO y aleación Devarda.

- ***Fósforo disponible:* por extracción con bicarbonato de sodio 0,5 mol/L a pH 8,5, según método de Olsen, y determinación colorimétrica del azul de molibdeno**

La muestra de suelo se extrae con una solución de bicarbonato de sodio 0,5 mol/L a pH 8,5 y el fósforo en el extracto se determina por colorimetría mediante el método del azul de molibdeno usando ácido ascórbico como reductor. Se utilizó un espectrofotómetro de rango visible Spectronic 20, y se leyó a una longitud de onda de 880 nm.

- ***Metales pesados:* extracción con ácido dietilentriaminopentaacético (DTPA)**

El suelo se extrae con una solución de DTPA 0,005 mol/L,  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol/L y TEA 0,1 mol/L, tamponada a pH 7,30. En el extracto se determinaron las concentraciones de Fe, Cu, Mn, Zn, Cr, Cd, Pb, Ni por espectrofotometría de absorción atómica (EAA) con llama aire-acetileno.

Los límites de detección de los metales pesados se presentan en la Tabla 4.

<b>Tabla 4</b> Límites de detección de los metales pesados o ETM's analizados	
<b>Metal pesado</b>	<b>Límite de detección (mg L<sup>-1</sup>)</b>
Cd	0,03
Cr	0,08
Cu	0,08
Fe	0,10
Mn	0,05
Ni	0,14
Pb	0,20
Zn	0,02

Las mediciones se realizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica PERKIN ELMER modelo 3110.

- **Nitrógeno, fósforo y potasio total: por digestión con ácido sulfúrico y agua oxigenada (Lachica y col., 1965)**

La solubilización simultánea de N, P y K total se hizo por digestión de la muestra con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado y tratamientos sucesivos con agua oxigenada al 30% hasta la destrucción total de la materia orgánica.

**Nitrógeno total.** Se determinó por destilación por arrastre de vapor de agua.

**Fósforo total.** Se determinó por colorimetría del azul de molibdeno después de ajustar el pH con hidróxido de amonio (NH<sub>4</sub>OH 4N) y ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5N). Se utilizó un espectrofotómetro Spectronic 20 y se leyó a una longitud de onda de 880 nm.

**Potasio total.** Por fotometría de llama directamente en la muestra diluida 10 veces en agua. Se utilizó un fotómetro de llama marca CORNING.

- **Metales pesados totales (Cu, Mn, Zn, Cd, Cr, Pb y Ni)**

La determinación de metales pesados totales se realizó mediante digestión ácida en horno microondas con una mezcla de  $\text{H}_2\text{O}_2$ - $\text{HNO}_3$ - $\text{HCl}$ . Los metales se determinaron mediante espectrofotometría de absorción atómica (EAA) con llama de aire acetileno.

## CAPITULO 3

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Caracterización de los lodos en estudio

##### 3.1.1 Propiedades químicas

Los resultados de los análisis realizados para la caracterización química de los lodos se presentan en la Tabla 5.

<b>Tabla 5</b> Características químicas de lodos en estudio			
<b>Análisis</b>	<b>Unidad</b>	<b>LET 2005</b>	<b>LET 2004</b>
pH-H <sub>2</sub> O	-	6,38	6,53
pH-KCl	-	6,11	6,39
CE (1:5)	dS/m	8,10	2,12
CE (extracto de saturación)	dS/m	24,2	6,79
MO total (360 °C)	%	43,8	43,4
MO oxidable	%	41,5	40,4
N disponible	mg/kg	5.899	1.051
P disponible	mg/kg	489	933
N total	g/kg	32,7	26,0
P total	g/kg	10,5	11,7
K total	g/kg	3,79	3,22
CIC-pH 7	cmol(+)/kg	49,9	47,2
Ca extraíble NH <sub>4</sub> OAc, pH 7	cmol(+)/kg	23,4	38,0
Mg extraíble NH <sub>4</sub> OAc, pH 7	cmol(+)/kg	7,6	8,2
Na extraíble NH <sub>4</sub> OAc, pH 7	cmol(+)/kg	2,5	0,96
K extraíble NH <sub>4</sub> OAc, pH 7	cmol(+)/kg	1,3	0,95

Los análisis químicos realizados a ambos lodos indican algunas características diferentes entre ellos (CE, N y P disponibles), debido a que las muestras se tomaron en distintas estaciones del año y tienen distinto tiempo de permanencia en el monorelleno.

### **3.1.1.1 Reacción (pH)**

El pH en ambos lodos presentó valores neutros (Tabla 5) medidos tanto en agua como en KCl (USDA, 1998). El pH en el lodo LET 2005 fue 0,28 unidades menor que el pH del lodo LET 2004, debido al incremento en la concentración de sales neutras, el cual genera un efecto salino en la suspensión de medición disminuyendo su valor, situación que también ocurre al medir el pH en suelos salinos.

El pH en muchos suelos experimenta variaciones estacionales, es más bajo durante las estaciones secas y calurosas y más alto durante las estaciones frías y lluviosas. Estas variaciones en el pH son moderadas y están asociadas con fluctuaciones en la cantidad de sales solubles, tales como sulfatos y nitratos, los cuales se acumulan y bajan el pH durante los periodos secos. Sin embargo, en las estaciones lluviosas, la lixiviación de las sales hace que los valores de pH presenten valores más alcalinos (Black, 1965).

Una situación similar estaría ocurriendo con los lodos ya que la muestra LET 2005, con un pH 6,38, fue tomada en verano y la muestra LET 2004, con un pH 6,53, fue tomada en invierno. Además, el lodo LET 2004 tiene un año de antigüedad y ha estado expuesto a lluvias durante el invierno, lo cual explicaría su valor ligeramente más alcalino (Tabla 5).

El menor pH medido en KCl (pH-KCl) se explicaría debido al efecto salino del KCl 1M.

### **3.1.1.2 Conductividad eléctrica**

La CE tanto en el extracto 1:5 como en la pasta de saturación (Tabla 5) indica que ambos lodos son fuertemente salinos, según la escala de salinidad para suelos (Quinteiro y col., 1998). La CE del lodo LET 2005 fue mucho más alta, indicando que tiene una mayor concentración de sales que el lodo LET 2004, corroborando que en este último las sales habrían sido lixiviadas por la lluvia.

### **3.1.1.3 Materia orgánica**

El contenido de materia orgánica (MO) total, expresado como pérdida por calcinación a 360 °C y la MO oxidable, no presentan mayores variaciones entre ambos lodos (Tabla 5) y presentan valores similares a los informados para otros lodos en la literatura (SAG, 2005). Según la escala propuesta por Rodríguez (1993), ambos lodos presentan un alto nivel de materia orgánica (Anexo III.I).

### **3.1.1.4 Macronutrientes**

**Nitrógeno disponible.** Presenta variaciones estacionales y la mayor concentración se observa en el lodo LET 2005 (Tabla 5) que es un lodo nuevo, muestreado en verano. Ello se debe a que el N mineralizado en el lodo LET 2004, con un año de antigüedad, ha sido lavado por las lluvias durante el invierno y la capacidad de mineralización del N orgánico del lodo iría disminuyendo con su antigüedad.

**Fósforo disponible.** Presenta valores altos en ambos lodos, siendo el lodo LET 2004 el que contiene mayor cantidad; ello se explica porque el fósforo tiende a acumularse, ya que no se lixivia por efecto de las lluvias favoreciéndose así su acumulación.

**Nitrógeno, fósforo y potasio total.** No muestran variaciones estacionales entre ambos lodos, presentándose las mayores concentraciones para nitrógeno total (Tabla 5).

**Capacidad de intercambio catiónico.** La CIC a pH 7 no presenta mayores variaciones estacionales entre ambos lodos, siendo el lodo LET 2005 el que presenta una mayor capacidad de intercambio catiónico. Sin embargo ambos lodos presentan una CIC alta (Anexo III.2.) (Cottenie, 1980).

**Ca, Mg, Na y K, extraíble con NH<sub>4</sub>OAc, a pH 7.** Los resultados para los cationes extraíbles, muestran que el Ca, Na y K presentan variaciones estacionales entre ambos lodos. Sin embargo, el Mg extraíble no presenta variaciones significativas entre ellos (Tabla 5).

La secuencia de los cationes extraíbles fue: Ca >> Mg >> Na > K.



### 3.1.2 Metales pesados extraíbles con DTPA

Los contenidos de metales pesados o ETM's extraíbles con DTPA en ambos lodos se presenta en la Tabla 6, donde se observa que los metales Fe, Cu, Mn, Zn y Ni son los elementos que se encuentran en mayor concentración.

Ambos lodos presentaron contenidos similares de los distintos metales, no presentado variaciones por antigüedad del lodo y época de muestreo.

El Zn es el metal pesado más abundante y el principal elemento restrictor del uso del lodo como fertilizante, debido a que podría acumularse en los suelos por aplicaciones sucesivas en el tiempo (Barra, 2004).

Lodo	Fe	Cu	Mn	Zn	Cd	Cr	Pb	Ni
LET 2005	194	35,3	31,9	449	1,6	1,9	1,6	16,9
LET 2004	198	47,1	40,6	410	2,8	0,8	2,2	11,7

El segundo elemento más abundante en los lodos fue el Fe, seguido por Cu, Mn y Ni.

Los metales pesados como Cd, Cr y Pb presentaron contenidos extraíbles con DTPA, menores de  $3 \text{ mg kg}^{-1}$ .

### 3.1.3 Metales pesados totales

Los metales pesados totales o ETM's en ambos lodos se presentan en la Tabla 7.

<b>Lodo</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Pb</b>	<b>Ni</b>
LET 2005	859	722	1.546	4,36	145	66,7	71,3
LET 2004	762	794	1.724	4,22	54,3	97,9	350

El contenido total de metales pesados indica que ambos lodos estudiados podrían ser aplicados benéficamente a suelos de uso agrícola, ya que se encuentran dentro de los límites propuestos por la normativa chilena para metales presentes en lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas (CONAMA, 2001), a excepción de Ni, en el lodo LET 2004, que no cumple con el límite máximo establecido por la norma de  $80 \text{ mg kg}^{-1}$ , por lo que la aplicación benéfica de este lodo, sería mas recomendado para suelos erosionados. El Fe en los lodos no fue analizado.

Las diferencias en los metales pesados totales entre ambos lodos se deben a que si bien, fueron obtenidos de la misma planta de tratamiento de aguas servidas, son lodos muestreados en épocas distintas del año, además de la diferencia en el tiempo transcurrido entre la disposición de los lodos en el monorelleno, ya que el lodo LET 2004 lleva un mayor tiempo de estabilización que el lodo LET 2005, al llevar casi un año en el monorelleno.

### 3.2 Caracterización de los suelos en estudio

#### 3.2.1 Propiedades físicas y químicas

La granulometría y algunas propiedades químicas de los cuatro suelos, asociados a la estrata arable antes de la incubación con lodos se presentan en la Tabla 8.

Según los datos de granulometría, los suelo CB y EM presentan características similares, con una textura franco arenosa, el suelo M es de textura franco arcillosa arenosa, y el suelo LP es de textura arenosa, con un contenido de arcilla muy bajo (Tabla 3).

<b>Tabla 8</b> Características físicas y químicas de los suelos en estudio					
<b>Análisis</b>	<b>Unidad</b>	<b>CB</b>	<b>EM</b>	<b>M</b>	<b>LP</b>
Arcilla	%	16	17	21	7,8
Limo	%	13	21	16	4,0
Arena	%	71	62	63	88
pH H <sub>2</sub> O	-	7,18	7,91	6,42	6,69
pH KCl	-	6,52	7,68	6,09	6,38
CE 25°C (1:5)	dS/m	0,087	0,322	0,202	0,085
CE 25°C (extracto de saturación)	dS/m	1,26	3,35	2,39	1,12
MO oxidable	%	3,9	4,7	3,8	1,2
MO total	%	4,6	7,5	5,0	2,1
N disponible	mg/kg	16	102	54	18
P disponible	mg/kg	31	37	54	33
N total	g/kg	10,0	12,5	10,0	3,8
P total	g/kg	5,64	7,33	7,04	6,02
K total	g/kg	7,70	2,14	8,15	2,73
CIC-pH 7	cmol+/kg	11	23	14	5
Ca extraíble NH <sub>4</sub> OAc, pH 7	cmol+/kg	9,6	29,6	12,9	5,8
Mg extraíble NH <sub>4</sub> OAc, pH 7	cmol+/kg	2,7	5,9	1,8	1,5
Na extraíble NH <sub>4</sub> OAc, pH 7	cmol+/kg	0,28	0,22	0,44	0,10
K extraíble NH <sub>4</sub> OAc, pH 7	cmol+/kg	0,72	0,74	0,85	0,59

Las propiedades químicas (Tabla 8) muestran que existen algunas diferencias entre los suelos.

#### **3.2.1.1 Reacción (pH)**

El pH, medido tanto en agua como en KCl, según la escala dada por USDA (1998), presenta un valor neutro en los suelos CB y LP, y en los suelos EM y M presenta valores moderadamente alcalino y ligeramente ácido respectivamente.

#### **3.2.1.2 Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica medida tanto en la relación 1:5 como en el extracto de saturación, presentó valores bajos en los cuatro suelos, menores de  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , indicando que son suelos no salinos y aptos para el crecimiento de los cultivos en general.

#### **3.2.1.3 Materia orgánica**

La materia orgánica oxidable de los suelos presenta grandes variaciones, fluctúa de 1,2 % (LP) a 4,7 % (EM) y la materia orgánica total presenta una tendencia similar fluctuando entre 2,1 % (LP) a 7,5 % (EM).

#### **3.2.1.4 Macronutrientes**

**Nitrógeno disponible.** Varía notoriamente en los cuatro suelos (Tabla 8), el suelo EM presenta un valor muy alto; el suelo M presenta un valor medio, y los suelos CB y LP, presentan un valor bajo, según estándares propuestos por Rodríguez (1993) (Anexo III.1.).

**Fósforo disponible.** Todos los suelos presentaron valores altos en la concentración de fósforo disponible, según estándares propuestos por Rodríguez (1993) (Anexo III.1.).

**Nitrógeno, fósforo y potasio total.** El nitrógeno total fluctuó entre 10,0 y 12,5 g/kg en los suelos CB, EM y M, mientras que en el suelo LP presentó un valor más bajo, 3,8 g/kg (Tabla 8).

El fósforo total fluctuó entre 5,60 y 7,33%, encontrándose la concentración menor en el suelo CB y la más alta en el suelo EM.

El potasio total presentó variaciones importantes en los suelos, donde la mayor concentración la presentaron los suelos CB y M fluctuando entre 7,70 y 8,50 g/kg respectivamente. La menor concentración de potasio total la presentaron los suelos EM y LP, con valores de 2,14 y 2,73 g/kg respectivamente.

**Capacidad de intercambio catiónico.** La CIC a pH 7, según los estándares de Cottenie (1980) (Anexo III.2.), fue baja en los suelos CB y LP, media en el suelo M y alta en el suelo EM.

**Ca, Mg, Na y K extraíble con NH<sub>4</sub>OAc a pH 7.** Los resultados de estos cationes se interpretaron según los estándares de Rodríguez (1993) (AnexoIII.1.):

- Calcio extraíble presentó valores altos en los suelos CB, EM y M, y un valor medio en el suelo LP; el alto valor encontrado en el suelo EM (Tabla 8) se explica por la presencia de carbonato de calcio.

- Magnesio extraíble presentó valores altos en todos los suelos, siendo el suelo EM el que presenta la mayor concentración (Tabla 8), debido probablemente a la presencia de carbonato de calcio y magnesio.
- Sodio extraíble presentó valores bajos en los suelos CB, EM y M y un valor muy bajo en el suelo LP (Tabla 8).
- Potasio extraíble presentó valores altos en los cuatro suelos arrojando valores similares entre ellos (Tabla 8).

### 3.2.2 Metales pesados extraíbles con DTPA

Los resultados de las determinaciones de metales pesados o ETM's extraíbles con DTPA en los suelos antes de la incubación se presentan en la Tabla 9, ordenados según rango de concentración debido a que Fe, Cu, Mn, y Zn son los metales que presentan una mayor concentración en los cuatro suelos estudiados.

Suelo	Fe	Cu	Mn	Zn	Cd	Cr	Pb	Ni
CB	11,7	1,7	13,5	1,3	< LD	< LD	0,67	0,17
EM	4,3	3,4	8,3	0,9	0,07	< LD	0,97	0,20
M	15,3	19,0	19,8	4,1	0,13	0,08	0,30	0,57
LP	10,9	2,3	16,9	3,9	0,04	0,08	0,29	< LD

< LD: Bajo límite de detección

El metal extraíble con DTPA que se encontró en mayor concentración fue el Mn, el cual no ha sido considerado como un metal contaminante de los suelos, debido a que no alcanza niveles dañinos para las plantas (Barra, 2004).

Los metales pesados como Cd, Cr, Pb y Ni, se encontraron en concentraciones menores de  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  e incluso en algunos suelos estaban bajo el límite de detección, lo cual sería favorable ya que son los elementos que conllevan el mayor riesgo de transformarse en fitotóxicos o desplazarse a través de la cadenas trófica a seres humanos, si se cumple el requisito básico de una acumulación progresiva en los suelos.

### 3.2.3 Metales pesados totales

En la Tabla 10 se observa que los contenidos de metales pesados totales en los suelos estudiados presentan el siguiente orden:  $Mn > Cu > Zn > Cr > Pb \sim Ni > Cd$ . El Cd se encontró en muy baja concentración en los cuatro suelos, alcanzando niveles cercanos al límite de detección. El Fe total en los cuatro suelos no fue analizado.

Suelo	Cu	Mn	Zn	Cd	Cr	Pb	Ni
CB	65,9	780	60,9	0,21	23,9	10,2	9,7
EM	95,2	552	67,4	0,20	19,7	8,4	6,6
M	162	908	108	0,47	59,8	20,9	20,9
LP	62,6	371	50,1	0,12	29,8	6,8	6,2

El suelo M presentó un mayor contenido total de metales pesados, debido a que si bien es un suelo con fines de uso agrícola, ha sido regado con aguas servidas, lo que implica una continua aplicación y acumulación de metales pesados.

Todos los metales pesados en los cuatro suelos se encuentran dentro de los límites propuestos por la normativa chilena para la concentración máxima de metales pesados en el suelo previo a la aplicación de lodos (CONAMA, 2001), con excepción del suelo M, el cual alcanza una concentración de Cu de  $162\ mg\ kg^{-1}$ , sobrepasando los límites establecidos (Anexo I.2.).



### **3.3 Caracterización de los suelos incubados con lodos**

A continuación se presentan los resultados de los análisis realizados a los suelos incubados, con ambos lodos, a tiempo cero y sesenta días.

#### **3.3.1 pH en agua**

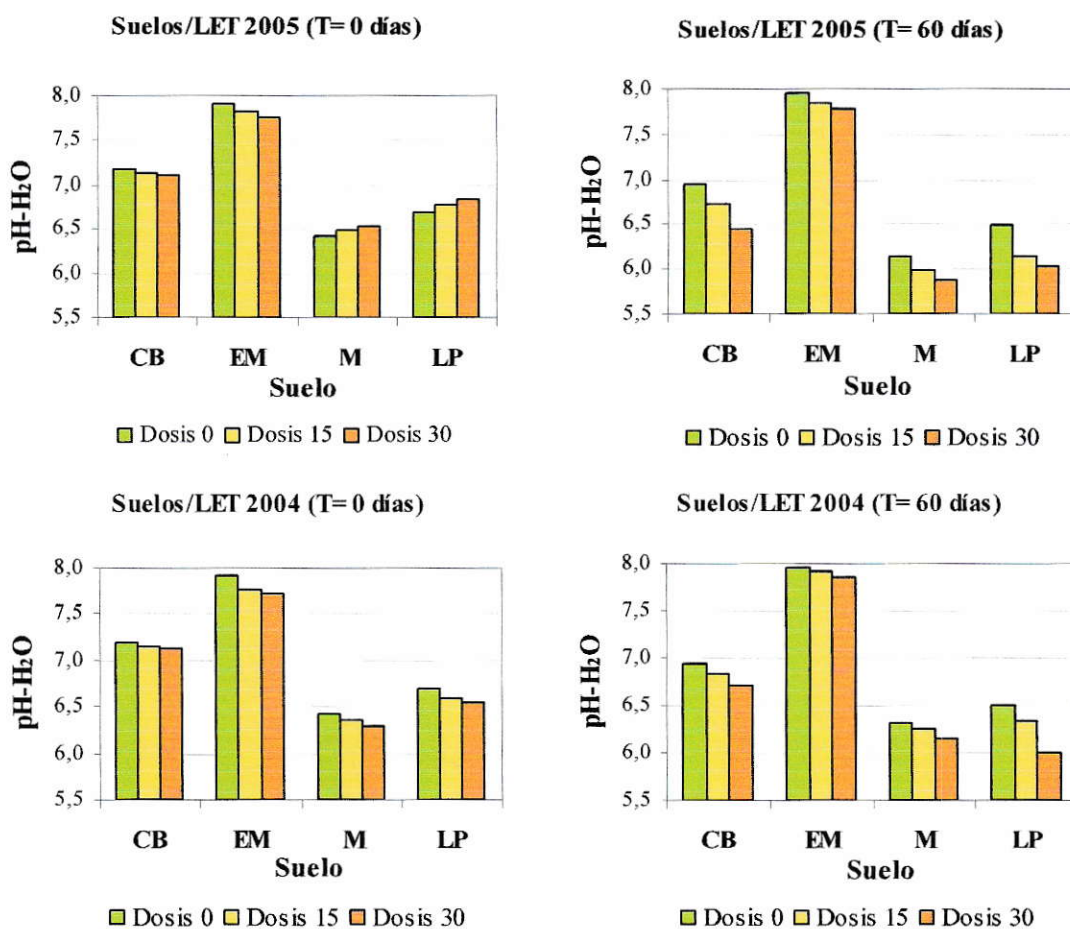
El pH es un parámetro muy importante ya que influye en la actividad química y biológica tanto en los suelos como en los lodos, la concentración de iones hidrógeno modifica la disponibilidad de nutrientes, por lo que el contenido de metales trazas disponible en los suelos se encuentra relacionado con el factor pH de la solución suelo.

La Figura 9 muestra el pH en agua (pH-H<sub>2</sub>O) de los suelos acondicionados con distintas dosis de lodos a tiempo cero y sesenta días de incubación.

Ambos lodos modificaron el pH de los suelos y la interacción suelo/lodo dependió del tipo de suelo y de las características del lodo.

El lodo LET 2005 produjo variaciones en el pH de los suelos a medida que aumentaba la dosis de éste. En el tiempo cero días de incubación, los suelos M y LP, con pHs menores de 7, aumentaron el pH a mayor dosis de lodo, tendencia que se revirtió a los sesenta días de incubación, al observarse una disminución del pH en todos los tratamientos, lo cual se atribuye a una mayor actividad biológica.

En los suelos CB y EM, con un pH igual a 7,18 y 7,91, respectivamente, la adición de lodo con pH ácido (Tabla 5), tendió a disminuir el pH inicial de los suelos; esta disminución muy leve en el suelo CB se acentuó a lo largo de la incubación, observándose un pH más ácido al aumentar la dosis de lodo.



**Figura 9** pH en agua en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodo base seca a tiempo cero y sesenta días de incubación

El lodo LET 2004, en el tiempo cero días de incubación disminuyó levemente el pH-H<sub>2</sub>O de los cuatro suelos al aumentar su dosis, debido a que este lodo presenta un pH

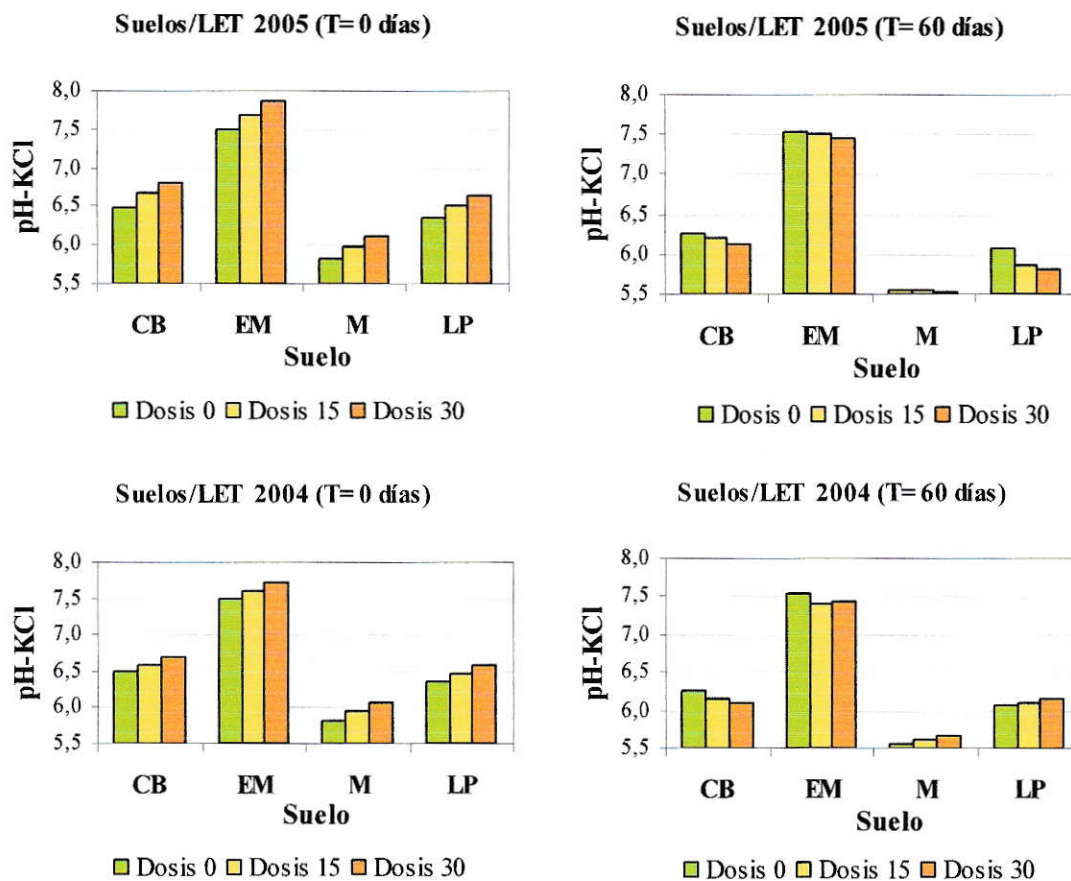
más alto con respecto al lodo LET 2005 y una menor salinidad (Tabla 5); el pH tiende a subir al disminuir el efecto salino. Después de los sesenta días de incubación, el suelo EM, con el pH más básico fue el único que presentó un aumento muy leve en el pH (0,02 a 0,04 unidades de pH); en los otros suelos el pH disminuyó. (Figura 9, Apéndice I.1)

Al comienzo de la incubación los lodos cambian el pH de los suelos, por la salinidad que aportan, la cual hace bajar el pH de la mezcla suelo/lodo en la mayoría de los suelos, debido al efecto salino sobre el pH en agua.

Durante la incubación de los suelos al aumentar la dosis de lodo aumenta el aporte de materia orgánica y se favorece la actividad biológica del suelo generándose una mayor liberación de CO<sub>2</sub>, la cual al acidificar la solución del suelo baja su pH, situación que se observó al aumentar las dosis de lodo (Figura 9).

### 3.3.2 pH en KCl

La Figura 10 muestra el pH en KCl (pH-KCl) de los suelos acondicionados con distintas dosis de lodos a tiempo cero y sesenta días de incubación.



**Figura 10** pH en KCl en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca a tiempo cero y sesenta días de incubación

El pH-KCl fue más bajo que el pH-H<sub>2</sub>O al inicio de la incubación con ambos lodos, en los cuatro suelos tratados, y se observa un aumento en el pH-KCl a medida que se incrementan las dosis de lodo; además, las variaciones fueron mayores que las encontradas para el pH-H<sub>2</sub>O.

Los valores de pH-KCl en los lodos LET 2005 y LET 2004 varían en relación al pH medido en agua en 0,27 y 0,14 unidades de pH, respectivamente (Tabla 5), lo cual indica claramente el efecto de las propiedades del lodo sobre el pH.

A tiempo cero días de incubación, ambos lodos produjeron un aumento en los valores de pH a medida que se incrementaban las dosis del lodo en los suelos. Sin embargo, con el lodo LET 2005 esta situación se revirtió a través del tiempo de incubación, ya que en el tiempo sesenta días el pH en los suelos bajó, especialmente en el suelo M.

El lodo LET 2004, en el tiempo sesenta días de incubación, si bien disminuyó el pH en la dosis 0 Mg ha<sup>-1</sup>, en los suelos M y LP se observa un aumento en el pH a partir del incremento en las dosis del lodo al contrario de lo sucedido en los suelos CB y EM, los cuales disminuyeron su pH.

### 3.3.3 Conductividad eléctrica

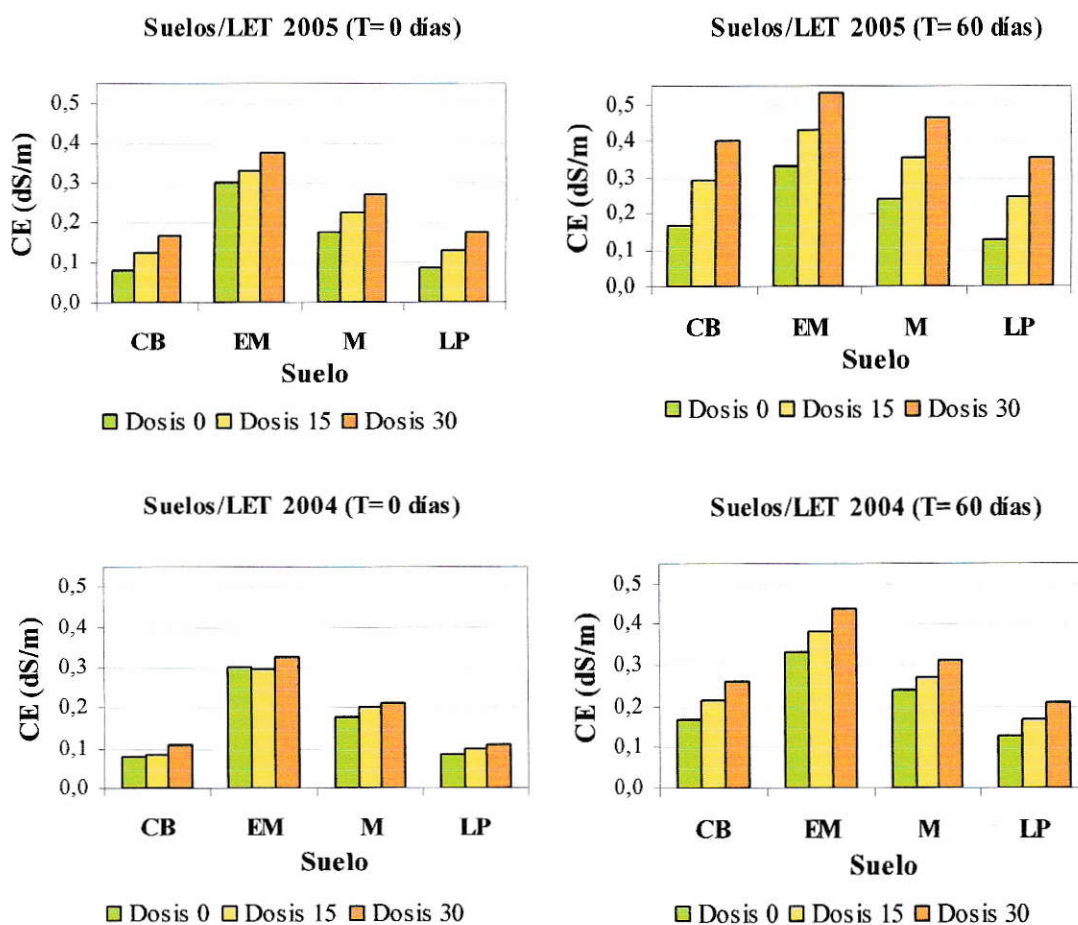
La conductividad eléctrica (CE), mide la corriente eléctrica que puede pasar a través de la solución suelo debido a la presencia de iones, los cuales están asociados a la cantidad de sales solubles que hay en el suelo y, por lo tanto, a su salinidad.

La Figura 11 muestra la conductividad eléctrica de los suelos acondicionados con distintas dosis de lodos a tiempo cero y sesenta días de incubación.

Se observa que los suelos, inicialmente no salinos (Tabla 8), aún cuando su CE aumenta por efecto de las dosis de lodo aplicadas, no llegan a ser salinos.

Las sales solubles presentes en ambos lodos aplicados a los suelos, aumentaron su conductividad eléctrica y podrían afectar el crecimiento de cultivos; tal efecto depende tanto de la conductividad eléctrica de los lodos como de los suelos, de la tasa de aplicación de los lodos y de la resistencia del cultivo (Abd El-Hay y Angle, 1994; Clapp *y col.*, 1986).

Para distinguir suelos salinos de los no salinos, se han sugerido varios límites arbitrarios de salinidad basados en la tolerancia de los cultivos. Se acepta que las plantas empiezan a ser afectadas de manera adversa cuando el contenido en sales excede del 1%. La clasificación americana de suelos, Soil Taxonomy, adopta el valor de  $4 \text{ dS m}^{-1}$  como límite para el carácter salino a nivel de gran grupo y subgrupo, pues considera que a partir de ese valor las propiedades morfológicas y fisicoquímicas del perfil quedan fuertemente influenciadas por el carácter salino (Honorato, 2000).



**Figura 11** Conductividad eléctrica en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca a tiempo cero y sesenta días de incubación

La conductividad eléctrica del lodo LET 2005 medida en relación sueloagua 1:5 es cuatro veces mayor que la del lodo LET 2004, lo que indicaría que el primer lodo aporta una mayor cantidad de sales a los suelos, sin embargo, incluso al aplicarles la mayor dosis de lodo (30 Mg ha<sup>-1</sup> base seca), los suelos siguen siendo no salinos, por lo que no afectaría a los cultivos que se desarrollen bajo los tratamientos aplicados.

La CE a los 60 días de incubación aumentó en los cuatro suelos en los tratamientos con ambos lodos con respecto de la CE al inicio de la incubación. Se observa que dicho aumento es casi proporcional a la dosis de lodo aplicada, lo cual corrobora la mayor actividad biológica postulada para explicar las disminuciones de pH observadas después de la incubación. Como resultado de esta mayor actividad biológica el lodo se va mineralizando y liberando sales que aumentan la conductividad eléctrica de las mezclas de suelo/lodos.

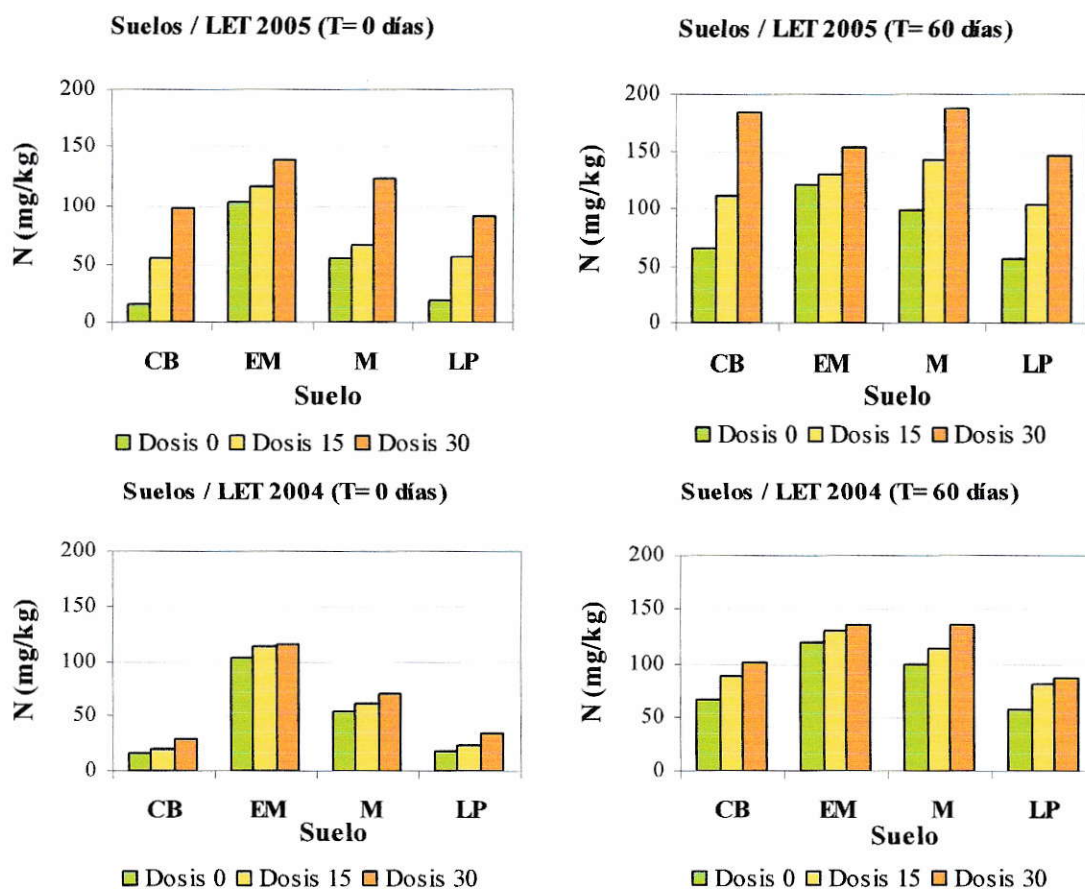
### **3.3.4 Nitrógeno disponible**

La Figura 12 muestra el nitrógeno disponible de los suelos acondicionados con distintas dosis de lodos a tiempo cero y sesenta días de incubación.

La concentración de nitrógeno aumenta en los cuatro suelos con la adición de ambos lodos, presentándose un mayor aumento en el contenido de nitrógeno en los suelos incubados con el lodo LET 2005, debido a que éste presenta una mayor concentración de nitrógeno disponible con respecto al lodo LET 2004 (Tabla 5).

En ambos tiempos de incubación los suelos que se ven más influenciados por el aporte de nitrógeno inorgánico del lodo LET 2005, con  $5.899 \text{ mg N kg}^{-1}$ , son los suelos CB y LP, ya que presentan bajos niveles de nitrógeno disponible (Tabla 8). El lodo LET 2004 no tuvo el mismo efecto por tener sólo  $1.051 \text{ mg N kg}^{-1}$ .

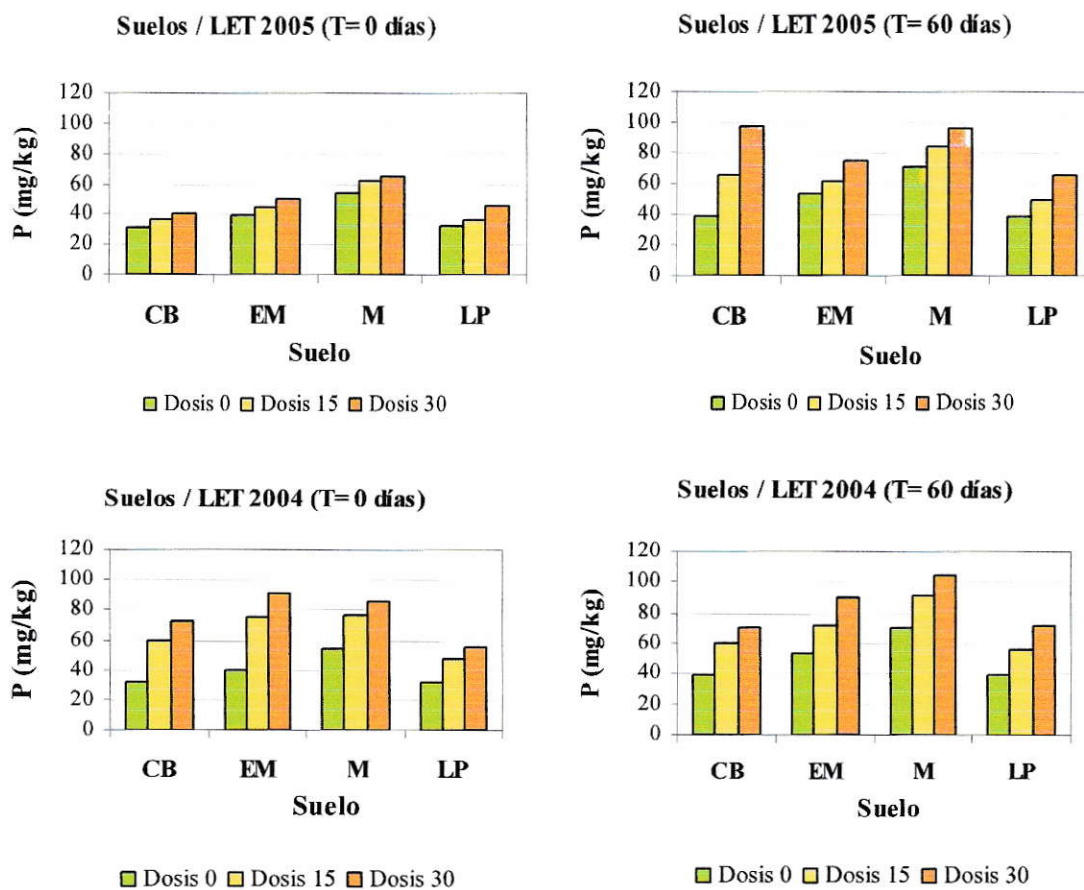




**Figura 12** Nitrógeno disponible en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca a tiempo cero y sesenta días de incubación

### 3.3.5 Fósforo disponible

La Figura 13 muestra el fósforo disponible de los suelos acondicionados con distintas dosis de lodos a tiempo cero y sesenta días de incubación.



**Figura 13** Fósforo disponible en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca a tiempo cero y sesenta días de incubación

La aplicación en dosis crecientes de lodos a tiempo cero días produjo un aumento en el contenido de fósforo disponible en los cuatro suelos, sin embargo, dicho aumento fue mayor en los tratamientos con el lodo LET 2004, debido a su mayor contenido de fósforo disponible, prácticamente el doble del contenido del lodo LET 2005 (Tabla 5).

A los 60 días de incubación se observan aumentos más notorios en los contenidos de fósforo disponible en los suelos tratados con el lodo LET 2005, especialmente en el suelo CB. Ello debido a que el lodo LET 2005 estaría menos mineralizado que el lodo LET 2004, cuyo mayor contenido de fósforo disponible corroboraría que este último lodo ha experimentado una mayor mineralización del fósforo orgánico, acumulando fósforo disponible, el cual no es fácilmente lixiviable. Por otro lado, también podría postularse que su tasa de mineralización después de un año de permanencia en el monorelleno ha disminuido.

### **3.3.6 Metales pesados extraíbles con DTPA (MP-DTPA)**

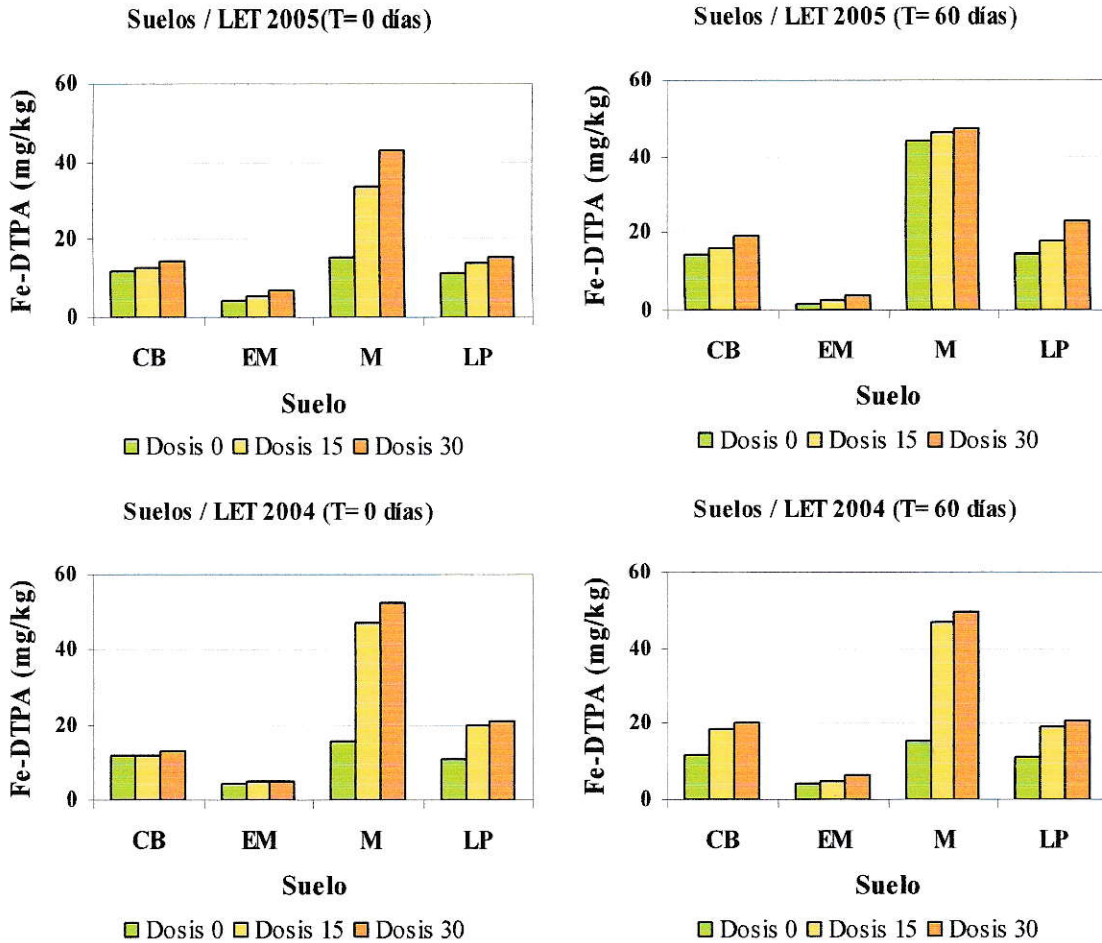
La extracción de los metales pesados con ácido dietilentriaminopentaacético (DTPA) simularía la acción de las raíces en la absorción de metales, por lo que se asume que corresponde al metal disponible para las plantas (Kabata-Pendias, 2000).

#### **3.3.6.1 Hierro-DTPA**

La Figura 14 muestra los cambios del Fe-DTPA en los suelos acondicionados con distintas dosis de lodos a tiempo cero y sesenta días de incubación.

Los cambios observados en el Fe-DTPA dependen claramente de los suelos utilizados debido a los distintos pHs que presentan. De esta forma, en la interacción suelo/lodo, para ambos lodos y tiempos de incubación, el suelo M presentó los mayores valores de Fe-DTPA y el suelo EM, los valores menores. Este comportamiento coincide con los valores extremos de pH de los suelos, 6,42 en el suelo M y 7,91 en el suelo EM, esto estaría indicando que el Fe-DTPA es dependiente del pH inicial de los suelos.

El comportamiento del Fe-DTPA en el suelo se debe a su gran dependencia del pH, que junto con las condiciones de oxidación, controlan la disponibilidad de Fe en los suelos; además, el contenido de Fe-DTPA es extremadamente bajo en comparación con el contenido de Fe total de los suelos (Kabata-Pendias, 2000). Según Opazo (1997), las deficiencias de Fe son comunes en suelos alcalinos y con altos contenidos de carbonatos, lo que explicaría el bajo contenido de Fe-DTPA del suelo EM.



**Figura 14** Contenido de Fe-DTPA en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca a tiempo cero y sesenta días de incubación

La incubación de suelos/lodo LET 2005, al tiempo sesenta días, generó cambios en el Fe-DTPA en todos los suelos, observándose que en CB y LP aumenta levemente su concentración, en cambio, en el suelo M se observan aumentos importantes en la concentración, especialmente con la dosis 0 Mg ha<sup>-1</sup>. En el suelo EM la concentración de Fe-DTPA disminuyó en todos los tratamientos.

La incubación de suelos/lodo LET 2004 (Figura 14), generó cambios a los sesenta días de incubación sólo en el suelo CB, en el cual el contenido de Fe-DTPA aumenta al incrementar la dosis de lodo; esto se asociaría a una disminución simultánea del pH-H<sub>2</sub>O que se observó a los sesenta días de incubación (Figura 9), dejando establecido que el contenido de Fe-DTPA en los suelos depende del pH.

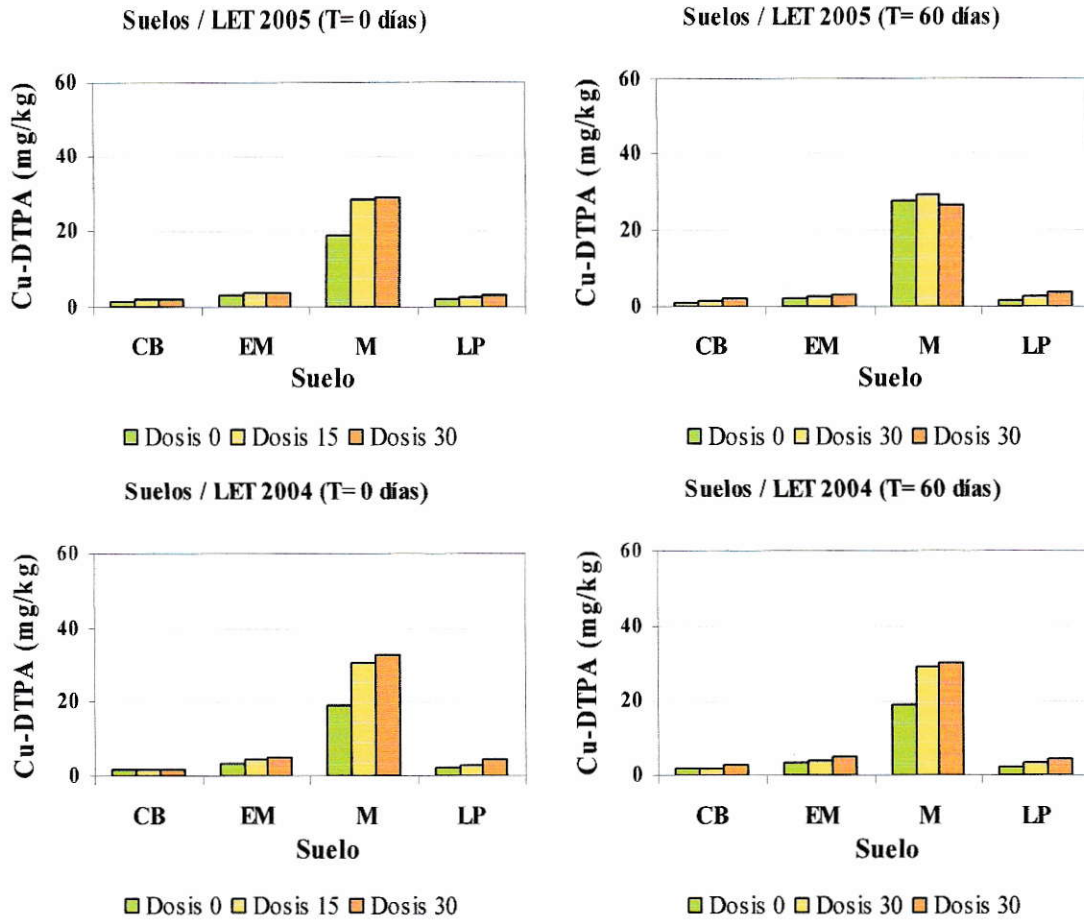
### **3.3.6.2 Cobre-DTPA**

La Figura 15 muestra el Cu-DTPA en los suelos acondicionados con distintas dosis de lodos a tiempo cero y sesenta días de incubación.

El Cu es un micronutriente poco móvil en el suelo y su reacción es muy similar a la de varios metales, a pH ácido se incrementa su solubilidad y disponibilidad para las plantas (Kabata-Pendias, 2000).

Los suelos no presentan mayores variaciones al incrementar las dosis de lodo, con excepción del suelo M, el cual presenta una concentración de Cu-DTPA bastante más alta, antes y después de la incubación. El suelo M es el que tiene el pH más ácido y mayor contenido de arcilla (Tabla 8), factores que favorecerían la disponibilidad de Cu.

El suelo LP, también con un pH ácido, presenta contenidos de Cu-DTPA mucho más bajos que el suelo M lo cual se atribuiría a su bajo contenido de arcilla (7,8 %, Tabla 8).

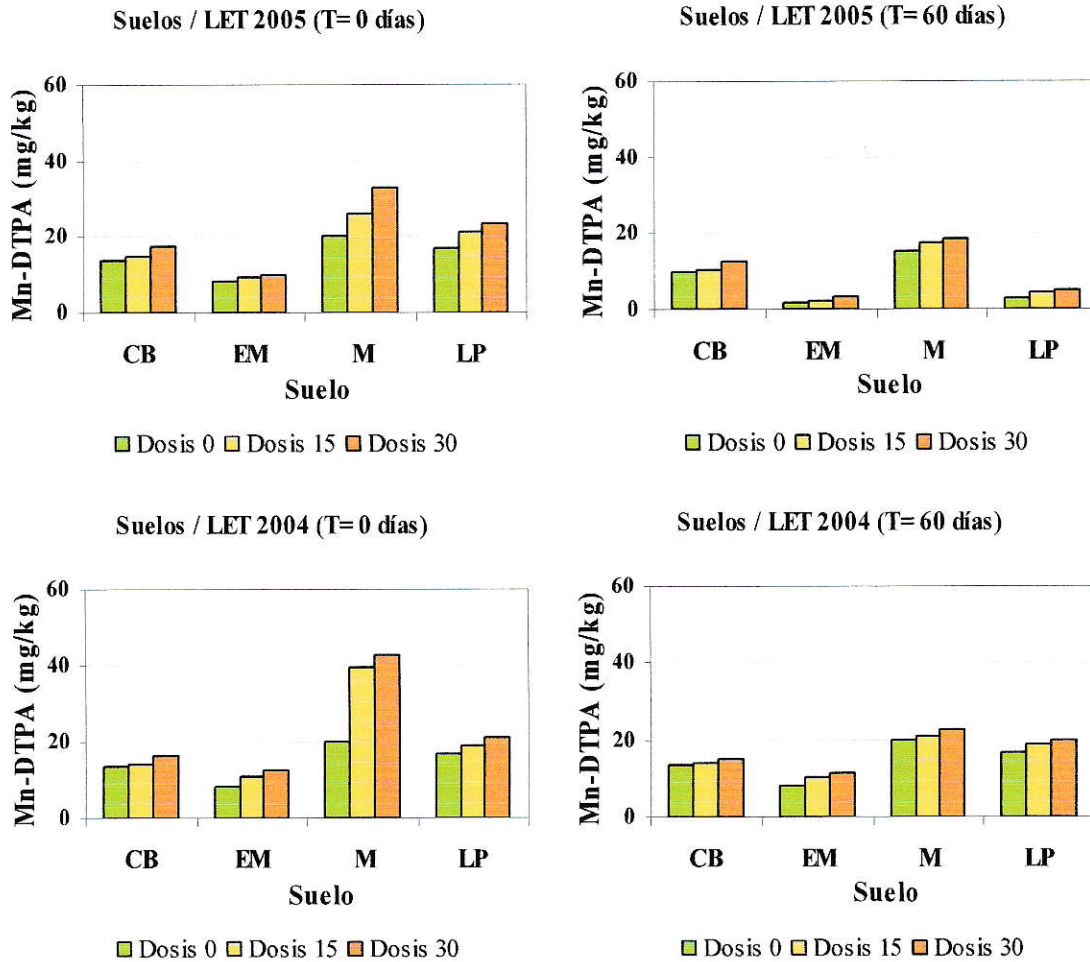


**Figura 15** Contenido de Cu-DTPA en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca a tiempo cero y sesenta días de incubación

En el tiempo de incubación de sesenta días no se observan mayores cambios en el contenido de Cu-DTPA en los suelos, lo que indicaría que el Cu aportado por ambos lodos no afectaría la disponibilidad del metal en los suelos.

### 3.3.6.3 Manganeso-DTPA

La Figura 16 muestra el Mn-DTPA en los suelos acondicionados con distintas dosis de lodos a tiempo cero y sesenta días de incubación.



**Figura 16** Contenido de Mn-DTPA en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca a tiempo cero y sesenta días de incubación



En los tratamientos a cero días de incubación, los cuatro suelos aumentan la concentración de Mn-DTPA al aplicar dosis crecientes de ambos lodos; las concentraciones encontradas se relacionan directamente con el pH, así el suelo M con pH 6,42 presenta los valores más altos, mientras que el suelo EM con pH 7,91 (Tabla 8) presenta los valores más bajos. Esto indicaría que la concentración del Mn-DTPA en los suelos es altamente dependiente del pH.

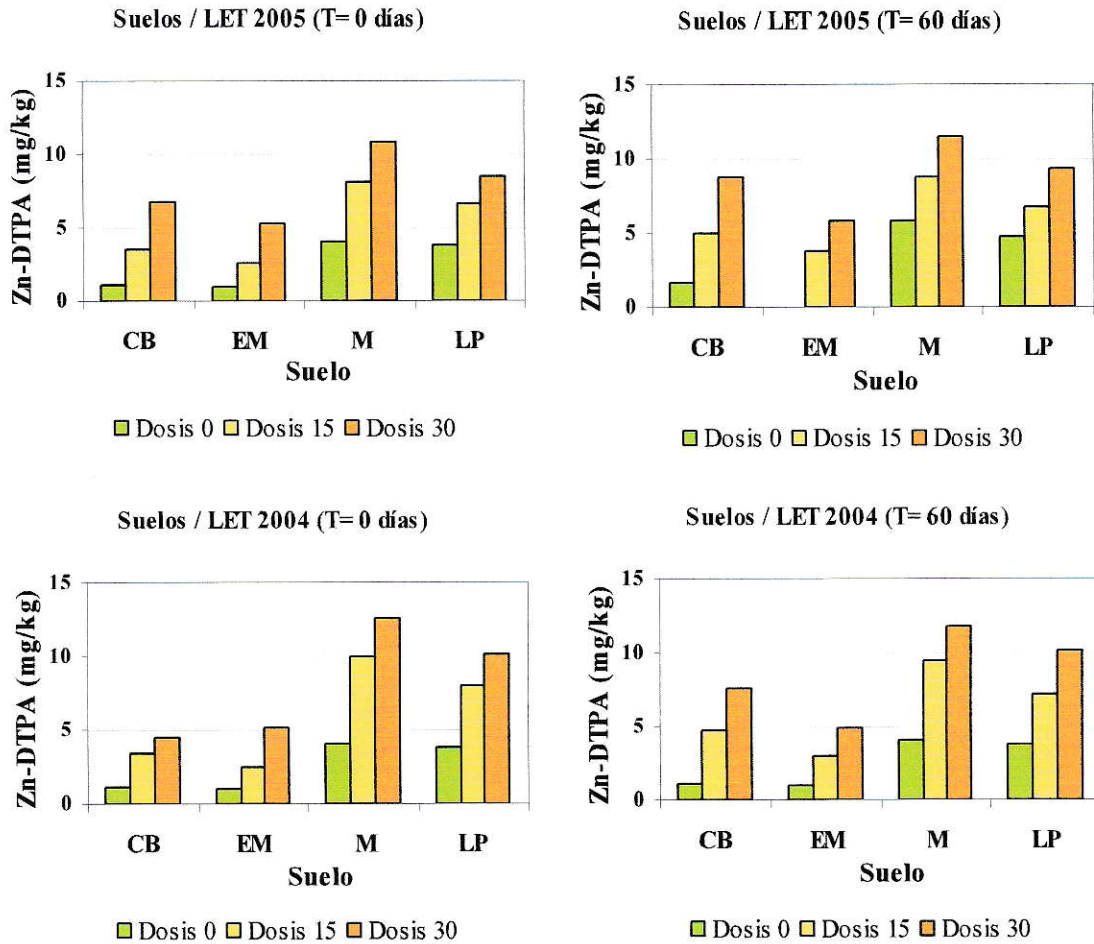
El Mn no ha sido considerado como un metal contaminante de los suelos, ya que en ensayos con aplicación de lodos se han observado aumentos en los contenidos del metal, pero sin ser dañino a las plantas (Kabata-Pendias, 2000).

La incubación suelos/lodo LET 2005 a tiempo sesenta días, produjo en los cuatro suelos una disminución notoria en la concentración de Mn-DTPA. La incubación suelos/lodo LET 2004 también generó una disminución pero menos marcada, debido a que este lodo presentaba una mayor concentración de Mn-DTPA (Tabla 6). Sólo el suelo M, presentó una marcada disminución en los tratamientos con lodo LET 2004.

El comportamiento del Mn-DTPA observado en los cuatro suelos a los sesenta días de incubación estaría indicando que la concentración de Mn-DTPA durante la incubación es dependiente de las características del lodo.

### 3.3.6.4 Zinc-DTPA

La Figura 17 muestra el Zn-DTPA de los suelos acondicionados con distintas dosis de lodos a tiempo cero y sesenta días de incubación.



**Figura 17** Contenido de Zn-DTPA en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca a tiempo cero y sesenta días de incubación

Se observa que al aumentar la dosis de lodo en los suelos, existe un aumento en la concentración de Zn-DTPA, debido a que ambos lodos presentan una concentración de Zn-DTPA alta, del orden de  $400 \text{ mg kg}^{-1}$  (Tabla 6), indicando que el Zn-DTPA aportado por los lodos no se inmovilizaría al interactuar con los suelos.

Las concentraciones de Zn-DTPA prácticamente no cambian como resultado de la incubación de los suelos con lodo con excepción del suelo CB el cual presenta un aumento según la dosis de lodo. Esto podría relacionarse con la disminución en el pH de los suelos durante la incubación (Figura 8), ya que la movilidad y disponibilidad del Zn-DTPA aumenta al disminuir el pH del suelo (Cogger y coL., 2001).

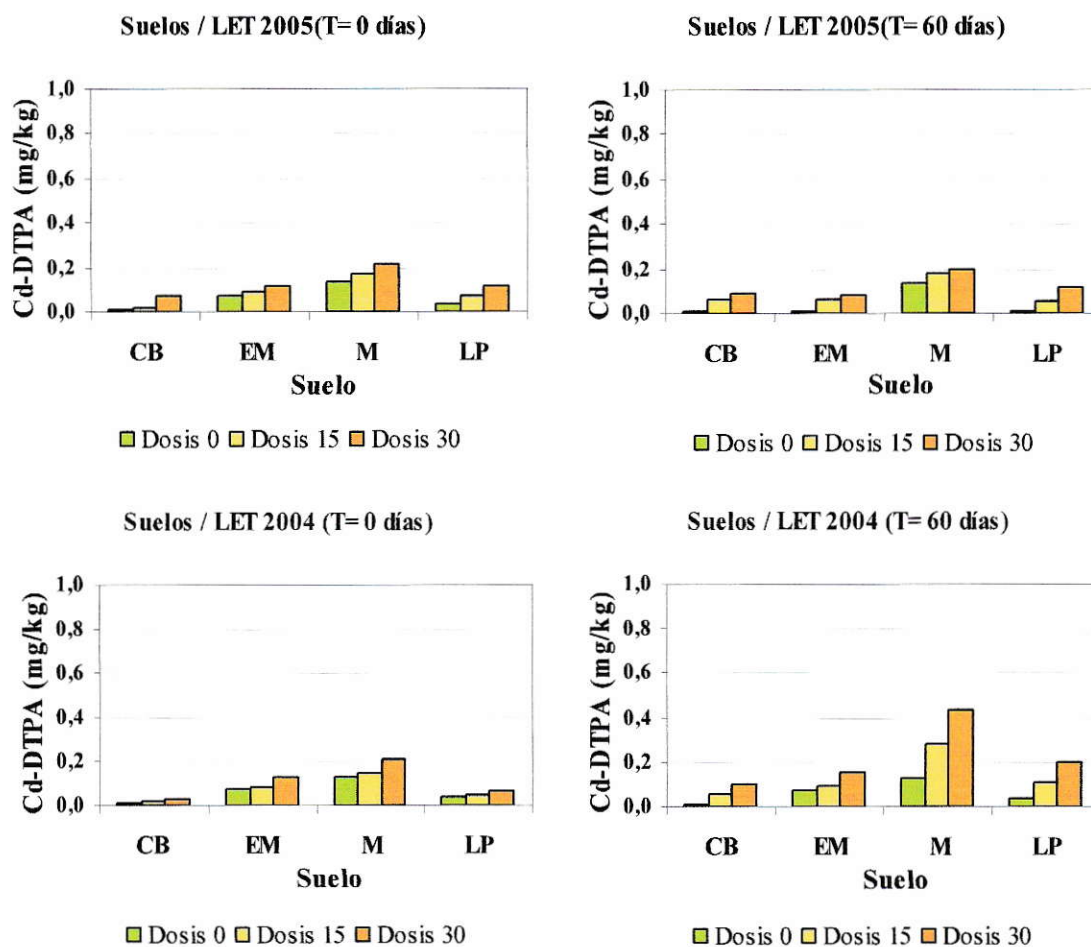
#### **3.3.6.5 Cadmio-DTPA**

La Figura 18 muestra el Cd-DTPA de los suelos acondicionados con distintas dosis de lodos a tiempo cero y sesenta días de incubación.

El suelo CB presenta valores bajo el límite de detección con todas las dosis de ambos lodos al inicio de la incubación (Apéndice I.4., I.6.). Al final de la incubación, este suelo aumenta la concentración del metal con la dosis 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodo, indicando que durante la mineralización del lodo se libera cadmio.

El Cd-DTPA presentó una concentración muy baja, tanto en los suelos (Tabla 9) como en los lodos (Tabla 6), lo cual sería favorable, debido a que el cadmio es uno de los metales pesados más tóxicos y con mayor potencial de peligro cuando el lodo es

aplicado a los suelos. Además, su solubilidad y disponibilidad depende en gran medida del pH y del potencial de oxidación del suelo (Kabata-Pendias, 2000).



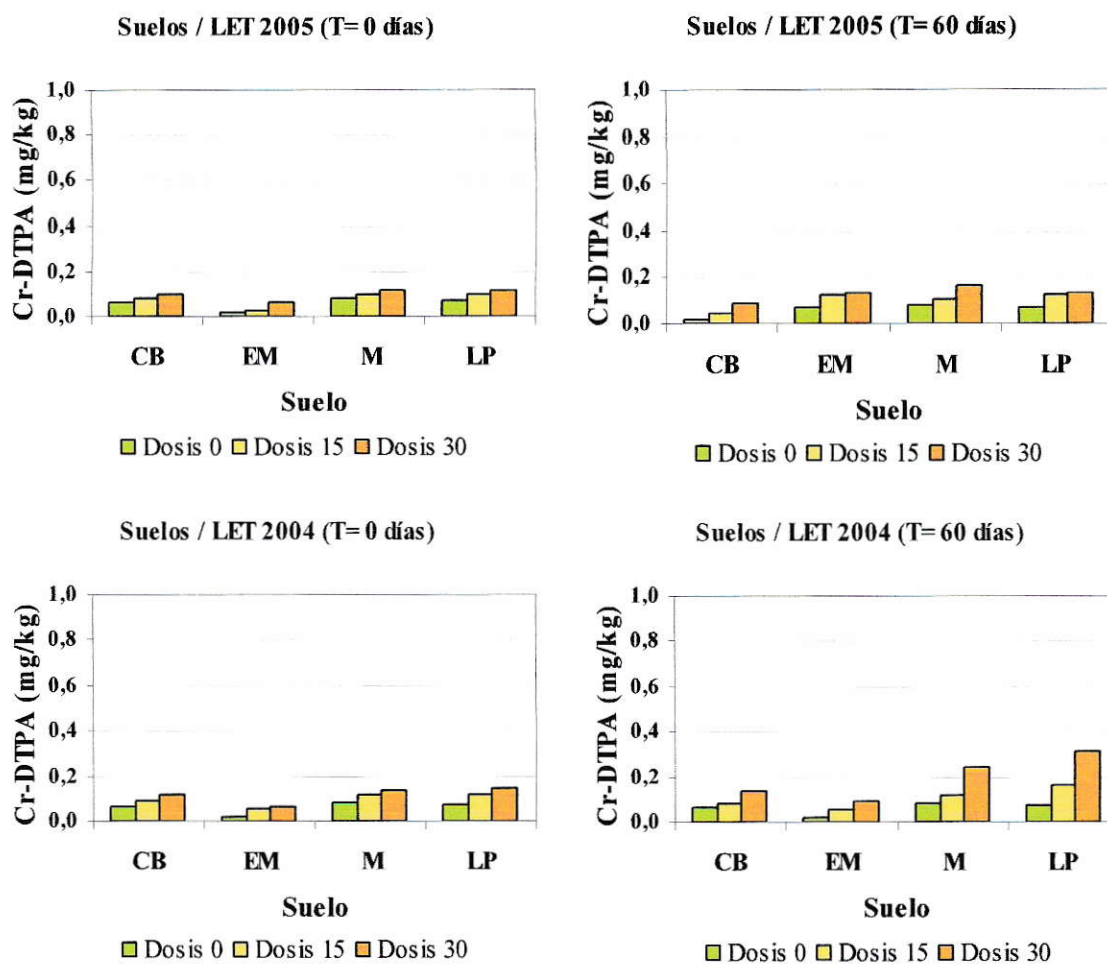
**Figura 18** Contenido de Cd-DTPA en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca a tiempo cero y sesenta días de incubación

A los sesenta días de incubación se observa que los suelos se comportan en forma distinta según el lodo, en la incubación suelos/lodo LET 2005 no se observan mayores cambios con respecto de las dosis, sin embargo, en la incubación de los suelos/lodo LET 2004 se observa que los suelos M y LP presentan un aumento en la concentración de Cd-DTPA al incrementarse la dosis del lodo; tal aumento podría asociarse al pH ligeramente ácido que presentan estos suelos a los sesenta días de incubación.

#### **3.3.6.6 Cromo-DTPA**

La Figura 19 muestra el Cr-DTPA de los suelos acondicionados con distintas dosis de lodos a tiempo cero y sesenta días de incubación.

Las concentraciones de Cr-DTPA en todos los suelos y en los suelos tratados con ambos lodos fueron muy bajas, incluso en algunos casos estuvieron bajo el límite de detección (Tabla 9, Apéndices I.4., I.7.). Tal fue el caso de los suelos CB y EM, en los tratamientos con ambos lodos, donde a pesar que se incrementan las dosis de ambos lodos, la concentración de Cr-DTPA sigue siendo muy baja, debido a la baja concentración de Cr-DTPA en los lodos (Tabla 6).



**Figura 19** Contenido de Cr-DTPA en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca a tiempo cero y sesenta días de incubación

El cromo se presenta en el suelo en las formas  $\text{Cr}^{+3}$  y  $\text{Cr}^{+6}$ . El último es reducido rápidamente a  $\text{Cr}^{+3}$ . Esta reducción ocurre en forma más rápida en suelos ácidos, por reacciones de la materia orgánica, donde el cromo es fuertemente adsorbido y quelado por el suelo.

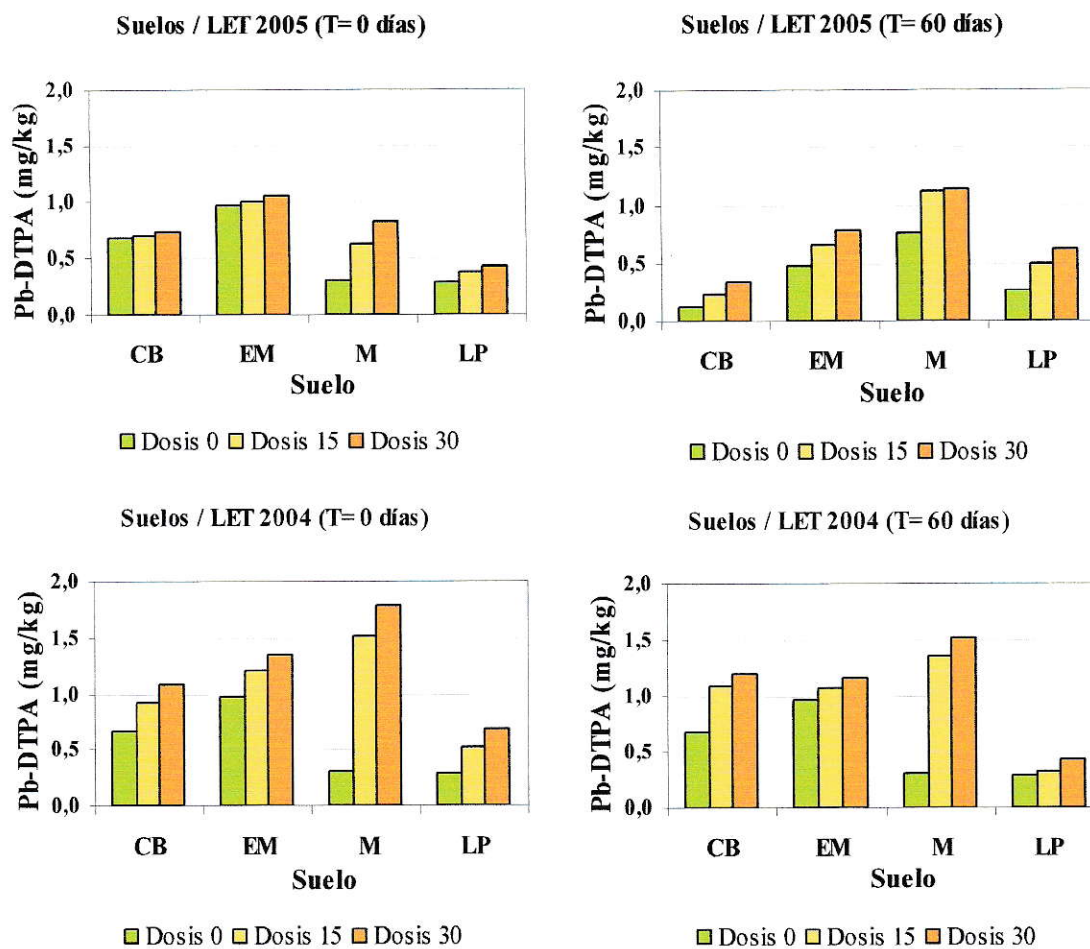
Debido al cambio de las formas en las que se presenta el Cr, de  $\text{Cr}^{+6}$ , el cual es soluble y tóxico a  $\text{Cr}^{+3}$ , el cual es insoluble, reduce la presencia de cromo en el suelo, por lo que la disponibilidad de este metal se ve reducida para las plantas (Kabata-Pendias, 2000).

En las incubaciones suelos/lodo LET 2004 se generó un aumento en la concentración de Cr-DTPA sólo en los suelos M y LP, con la dosis de lodo de  $30 \text{ Mg ha}^{-1}$ . El resto de los suelos no presenta mayores cambios a través del tiempo de incubación.

### **3.3.6.7 Plomo-DTPA**

La Figura 20 muestra el Pb-DTPA de los suelos acondicionados con distintas dosis de lodos a tiempo cero y sesenta días de incubación.

El Pb es uno de los metales pesados de menor movilidad en los suelos, debido a esto se encuentra en bajas concentraciones en los cuatro suelos estudiados (Tabla 9). Su solubilidad depende del pH, aumentando en suelos ácidos. Es un elemento poco disponible para las plantas, a pesar de ello puede ser adsorbido, pero quedando generalmente en las raíces con lo que la cadena alimenticia se protege de los excesos de este metal (Epstein, 2003).



**Figura 20** Contenido de Pb-DTPA en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca a tiempo cero y sesenta días de incubación

Se observó que al inicio de la incubación el efecto de la aplicación de lodos depende del tipo de éstos, generándose mayores aumentos en la concentración de Pb-DTPA cuando se aplica lodo LET 2004, debido a que posee una mayor concentración de Pb-DTPA que el lodo LET 2005.



En las incubaciones suelos/lodo LET 2005, si bien las concentraciones de Pb-DTPA disminuyeron en los suelos CB y EM, en todos, con excepción del suelo M, se observa una gradiente en su concentración asociada directamente con la dosis de lodos aplicada.

A los sesenta días de incubación los suelos M y LP, con pHs más ácidos, presentaron un aumento en la concentración de Pb-DTPA al incrementar las dosis del lodo; sin embargo, los suelos con pHs más básicos, CB y EM, presentaron una disminución en la concentración de Pb-DTPA, lo cual indicaría que a pH alcalino la disponibilidad de Pb-DTPA tiende a disminuir.

En las incubaciones suelos/lodo LET 2004, a tiempo cero días, la concentración de Pb-DTPA aumentó al incrementarse las dosis del lodo, aumento que fue mucho mayor en el suelo M. A los sesenta días de incubación se observa una disminución en la concentración de Pb-DTPA la cual indicaría que el Pb tiende a inmovilizarse como resultado de la incubación.

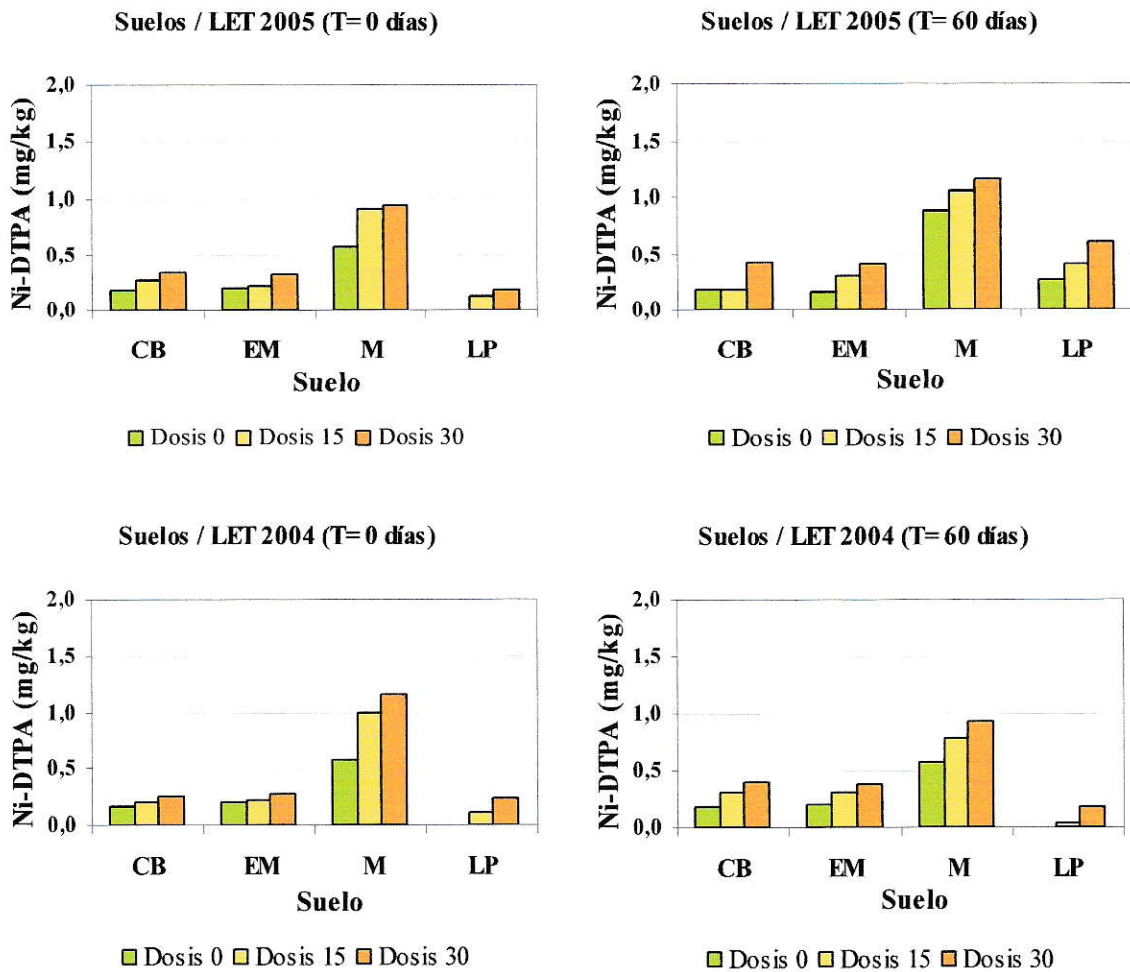
Los contenidos de Pb-DTPA (Figura 20) indican que su comportamiento depende del pH del suelo y del tipo de lodo aplicado.

### 3.3.6.8 Níquel-DTPA

La Figura 21 muestra el Ni-DTPA de los suelos acondicionados con distintas dosis de lodos a tiempo cero y sesenta días de incubación.

Las incubaciones suelos/lodo LET 2005 presentaron aumentos en la concentración de Ni-DTPA a medida que se incrementaban las dosis del lodo, sin embargo el suelo LP presentó una concentración bajo el límite de detección con la dosis  $0 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Al final de la incubación todos los suelos en estudio aumentaron la concentración del metal, especialmente los suelos M y LP.

Las incubaciones suelos/lodo LET 2004 presentaron un comportamiento similar al primer lodo, sin embargo, los valores observados al final de la incubación fueron menores en los suelos M y LP.



**Figura 21** Contenido de Ni-DTPA en los suelos acondicionados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg por hectárea de lodos base seca a tiempo cero y sesenta días de incubación

## CONCLUSIONES

En el presente estudio se incubaron suelos agrícolas con dosis crecientes de lodos, los cuales fueron muestreados en diferentes épocas del año y con distintos tiempos de permanencia en el monorelleno de una planta de tratamiento de aguas servidas. La evaluación de los cambios en las propiedades químicas de dichos suelos, permite concluir que:

- Las propiedades químicas de ambos lodos dependen de la época de toma de muestra y del tiempo de permanencia del lodo en el monorelleno.
- Los cambios observados en los suelos incubados con ambos lodos dependen del tipo de suelo, del tipo de lodo y del tiempo transcurrido después de la aplicación del lodo.
- Ambos lodos modificaron el pH de los suelos y la interacción suelo/lodo dependió del tipo de suelo y de las características y dosis del lodo, observándose después de la incubación una baja en el pH de los suelos a medida que se incrementaban las dosis de ambos lodos.
- La conductividad eléctrica de los suelos aumentó al incrementarse las dosis del lodo y el tiempo de incubación. Ello debido al contenido salino y a la mineralización de los lodos durante la incubación.

- Los macronutrientes esenciales para los cultivos como el nitrógeno y fósforo disponible aumentaron a medida que se incrementaron las dosis del lodo aplicado y por efecto de la mineralización que ocurre durante la incubación. Tales aumentos dependieron del elemento, de su concentración inicial y del tiempo de incubación.
- Se observan niveles similares de metales pesados extraíbles con DTPA en ambos lodos, por lo que los cambios que existen en las interacciones suelo/lodo dependen netamente del tipo de suelo utilizado en el estudio, ya que es en éstos donde los metales cambian su concentración.
- El contenido de metales pesados extraíbles con DTPA en ambos lodos presentó la secuencia: Zn >> Fe >> Cu ~ Mn > Ni > Cd ~ Pb ~ Cr.
- El contenido de metales pesados extraíbles con DTPA en los suelos depende tanto del elemento como del suelo, lo que se puede observar en el cuadro siguiente:

<b>Metales pesados</b>	<b>Secuencia suelos</b>
Mn, Zn y Cr	M > LP > CB > EM
Cu y Cd	M > EM > LP > CB
Fe	M > CB > LP > EM
Pb	EM > CB > M > LP
Ni	M > EM > CB > LP

- Los altos contenidos de metales pesados extraíbles con DTPA observados en el suelo M se atribuyen a que aún cuando es un suelo para fines agrícolas, es regado con aguas servidas lo cual implica una continua aplicación y acumulación de metales pesados.
- Los metales pesados extraíbles con DTPA en los suelos acondicionados con ambos lodos presentan resultados crecientes al aumentar las dosis de lodos, sin embargo, al aumentar el tiempo de incubación se observan tendencias variables en cuanto a su concentración, aumentando en Fe-DTPA y Ni-DTPA, disminuyendo en Mn-DTPA y Pb-DTPA, mientras que los metales Cu-DTPA y Zn-DTPA no presentan cambios a través del tiempo de incubación.
- La baja concentración de Cd-DTPA y Cr-DTPA encontrada tanto en los lodos como en los suelos, explica que el efecto de estos metales contaminantes sea mínimo en los suelos incubados.
- El Zn-DTPA es el elemento más abundante en ambos lodos, por lo que se observan aumentos importantes al ser adicionados a los suelos. La concentración de Zn disponible debiera ser controlada debido a su alta movilidad y asimilabilidad por las plantas.

- Los cambios en las concentraciones de Fe-DTPA y Mn-DTPA, generados por la aplicación de lodos dependen netamente del pH de los suelos estudiados, incrementando los valores de ambos metales en suelos con pHs más ácidos.
- El contenido de todos los metales pesados totales estudiados, tanto en suelos como en lodos, se encontraron bajo los límites de concentración de la norma establecida por la CONAMA, con excepción del cobre en el suelo M y níquel en el lodo LET 2004, los que superan la norma establecida. A pesar de esto sería factible utilizar los lodos de la planta de tratamiento de aguas servidas “El Trebal” como mejorador de suelos agrícolas.
- La aplicación de lodos generó cambios en algunas propiedades químicas de los suelos, los cuales mejorarían su capacidad productiva al incrementarse los macronutrientes esenciales para el crecimiento de los cultivos. Sin embargo, se debería poner especial énfasis al seguimiento de la acumulación de metales pesados en los suelos y cultivos.
- Los resultados de la presente investigación, permiten concluir que la técnica de incubación de suelos con lodos (*mineralización in vitro*), permite estudiar las interacciones suelo/lodo y de esta forma observar los posibles cambios en las propiedades químicas que en el tiempo se producirán en el suelo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abd El-Hay, G. y Angle, J., 1994. Sludge-borne salt effects on soybean growth. 185-186. *In*: Clapp, C., Linden, D., Larson, W., and Dowdy, R. (Ed). Sewage sludge: Land utilization and the environment SSSA Misc. Publication American Society of Agronomy. 258 p.
- Acevedo, E., Carrasco, M.A, León, O., Martínez, E., Silva, P., Castillo, G., Ahumada, I., Borie, G., González, S., 2005. Criterios de calidad de suelo agrícola. 217 p.
- Aguas Andinas, 2003. Plan de saneamiento de la planta El Trebal y la Farfana. En línea, Pág. Web: [http://www.aguasandinas.cl/minisitio\\_andina/trebal.htm](http://www.aguasandinas.cl/minisitio_andina/trebal.htm)
- Álvarez, L., 2004. Mineralización *in vitro* de nitrógeno, fósforo y contenido de metales pesados en suelos acondicionados con lodo provenientes de una planta de tratamiento de aguas servidas. Seminario de título. Escuela de Agronomía, Universidad de Chile.
- Barra, C., 2004. Acumulación de elementos trazas metálicos en suelos agrícolas, por aplicación de lodos de plantas de tratamientos de aguas residuales urbanas generados en la Región Metropolitana, Seminario de título Químico Ambiental, Universidad de Chile.
- Basta, N.T., 2004. Heavy metal and trace element chemistry in residual-Treated soil: Implications on metal bioavailability and sustainable land application. *In*: Sustainable land application Conference, January, 4-8, Florida; University of Florida.
- Becerra, J.P., 2003. Experiencia mundial sobre la gestión en agricultura de lodos procedentes de plantas de tratamiento de aguas servidas y evaluación de fototoxicidad de lodos generados en la Región Metropolitana (Chile), mediante pruebas de germinación, Seminario de título Químico Ambiental, Universidad de Chile.
- Black, C.A., 1965. Methods of soil analysis, part 2. Chemical and Microbiological Properties. 792 p.
- CIREN, Corfo. 1984. Centro de información de recursos naturales. Descripción de suelos, Proyecto Maipo. Santiago, Chile. 102 p.
- Clapp, C.E.; Stark, S.A.; Clay, D.E and Larson, W.E. 1986. Sewage sludge organic matter and soil properties. *In*: E Chen, Y. and Avnimelech (eds.). The



role of organic matter in modern agriculture. Martines Nijhoff Publishers. Chap. 10. Pp 209-253.

- Cogger, C.; Bary, A.; Fransen, S. and Sullivan, D. 2001. Seven years of biosolids versus inorganic nitrogen applications to tall fescue. *Journal of Environmental Quality*. 30: 2188-2194.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), 2001. Anteproyecto de reglamento para el manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas. República de Chile.
- Cottenie, A., 1980. Análisis de suelos y plantas como base para formular recomendaciones sobre fertilizantes. Roma, Italia. FAO. Boletín de suelos. 38/2. 116 p.
- Cortez, E., 2003. Fundamentos de ingeniería para el tratamiento de los biosólidos generados por la depuración de aguas servidas de la Región Metropolitana. Universidad de Chile.
- CWMI, Cornell Waste Management Institute, 1996. The beneficial uses of biosolids/sludge. Fact Sheet. En línea, Pág. Web: <http://cwmi.css.cornell.edu/Sludge/Production.pdf>.
- Dewis, J. y Freitas, F., 1970. Métodos físicos y químicos de análisis de suelo y agua. Roma Italia, FAO. Boletín de suelos N° 10, 252 p.
- European Communities (EC). 2001. Disposal and Recycling Routes for Sewage Sludge. Part 1-2-3-4. En línea, Pág web: <http://europa.eu.int>.
- Epstein, E. 2003. Land application of sewage sludge and biosolids. Ed. CRC Press LLC. Boca Raton, Florida, USA.
- Garcia, I., y Dorronsoro, C., 2000. Tema 15. Contaminación por metales pesados. 5 factores del suelo que afectan su acumulación y disponibilidad. En línea: Pág Web <http://edafologia.urg.es/conta/tema15/fact.htm>.
- Henry, C. and Cole, W., 1999. Biosolids utilization in forest lands. 89-94. *In*: Clapp, C., Linden, D., Larson, W., and Dowdy, R. (Ed). *Sewage sludge: Land utilization and the environment*. SSSA Misc. Publication American Society of Agronomy. 258 p.
- Honorato, R. 2000. Manual de edafología. Ed. Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

- Induambiente, 2003. Revista de descontaminación industrial, recursos energéticos y ecología, año 11 – N° 65.
- INN, 2004. Instituto Nacional de normalización. Lodos – Requisitos y condiciones para un plan de aplicación en suelos. Proyecto de norma en consulta pública NCh 2952.c2004.
- Kabata-Pendias, 2000. Trace elements in soils and plants. Ed. CRC Press LLC. Boca Raton, Florida, USA. 413 p.
- Lachica, M.; Recalde, L.; Esteban, E., 1965. Análisis foliar. Métodos analíticos utilizados en estación experimental de Zaidín. Anales de Edafología y Agrobiología. 24:589-610.
- Lassat, M., 2001. The uses of plants for removal of toxic metal from contaminated soil. US-EPA.
- Lenntech, 2003. Metales pesados. En línea, Pág Web: <http://www.lenntech.com/espanol/metales%20pesados.htm>.
- López, J.; Navarro, M. y González, S., 2000. Tratamiento de descontaminación de materia orgánica residual: límites alcanzados en metales pesados. Rev. Edafología. 7: 151-157.
- Martínez, C., 2005. Evaluación biológica y absorción de nutrientes y metales en trébol subterráneo cultivado en suelos del secano interior (VI región) acondicionados con biosólidos. Seminario de título. Escuela de Agronomía, Universidad de Chile.
- Obbard, J.P.; Jones, K.C and Smith S.R., 1992. Microbial effects of heavy metals in sewage sludge amended soil – effects on symbiotic nitrogen fixation. Report No. FR0308, Medmenham, Foundation for Water Research. pp. 140.
- Opazo, J.D. 1997. Micronutrientes en los suelos, Publicación Docente N° 9. Departamento de Ingeniería y Suelos. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.
- Quinteiro, M.P.; Andrade, M.L.; De Blas, E., 1998. Efecto de la adición de un lodo residual sobre las propiedades del suelo: Experiencias de campo. Departamento de Biología Vegetal y Ciencia del Suelo. Facultad de Ciencias. Universidad de Vigo. Apartado 874. Vigo-36200. España.
- Renner, R., 2000. Sewage Sludge, Pros & Cons. Environ. Scienc. & Technol. 34: 430-435.

- Rechcigl, J. E., 1995. Sewage Sludge. *In: Soil amendments and environmental quality. Agronomía, Agricultura and Environment Series, Lewis Publishers. Chap. 6. pp 199-247.*
- Rocha, M.T. y Shirota, M. 1999. Disposición final de lodo de Esgoto. *Revista de Estudios Ambientales. Vol. 1. N°3. 25 p.*
- Rodríguez, J. 1993. Manual de fertilización. Colección en Agricultura. Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 362 p.
- Sadzawka, A.; Carrasco M.A.; Grez R.; Mora M., 2004. Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos. Comisión de Normalización y Acreditación. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo.
- Servicio Agrícola Ganadero (SAG), 2005. en línea, Pág Web: <http://www.sag.cl>
- Sparks, 2001. Methods of soil analysis. Parts 3, Chemical methods. N° 5 in the Soil Sci. Soc. of America Book Series, Amer. Soc. Agr. and Soil Sci. of Amer., Madison, WI, USA.
- Stehouwer, R., 2003. Land application of sewage sludge in Pennsylvania. Effects of biosolids on soil and crop quality. *Journal of Environmental Quality. 29: 1686-1695.*
- USDA, 1998. Soil quality information sheet. Soil quality indicators: pH. <http://www.soils.usda.gov/sqi/files/indicate.pdf>.
- USEPA, 1993. Guidance for writing permits for the use or disposal of sewage sludge. Working Draft.
- USEPA, 1995. Process design manual, Land application of sewage sludge and domestic Septage. En línea, Pág. Web: [http://oaspub.epa.gov/webi/meta\\_first\\_new2.try\\_these\\_first](http://oaspub.epa.gov/webi/meta_first_new2.try_these_first).
- Wen, G.; Bates, T.E.; Voroney, R.P.; Winter, J.P. and Schellenbert, M.P., 1997. Comparison of phosphorus availability with application of sewage sludge, sludge compost, and manure compost. *Comm. Soil. Sci. Plant. Anal. 28 (17 & 18):1481-1497.*
- Yagüe, F.C; Hernández M.T y Moreno, J.I., 1987. Utilización agrícola de lodos de depuradora. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España. 122 p.

# **Apéndices**

## APÉNDICE I

### ENSAYOS DE INCUBACIÓN

El procedimiento de incubación (2.2.1.1) de las mezclas suelos/lodo se realizó considerando lo siguiente:

<b>Apéndice I.1.</b> Determinación de densidad aparente de los suelos en estudio						
Suelos	Peso probeta [g]	Peso probeta + suelo [g]	Peso suelo [g]	Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
CB	120,47	174,89	54,42	40,00	1,36	1360
EM	220,73	309,57	88,84	70,00	1,27	1269
M	61,81	101,89	40,08	30,00	1,34	1336
LP	120,46	181,74	61,28	39,00	1,57	1571

<b>Apéndice I.2.</b> Determinación de la masa de lodo húmedo a utilizar					
Lodo	Humedad (%)	(LH) (kg)	(LS) (kg)	(DL) (kg)	(L) (kg)
Lodo LET 2005	7,70	100	92,30	15.000	16.251
				30.000	32.502
Lodo LET 2004	3,89	100	96,11	15.000	15.607
				30.000	31.214

<b>Apéndice I.3.</b> Determinación de la masa de lodo húmedo a utilizar lodo LET 2005						
Suelo	MSI (kg)	MS <sub>ha</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )	Dosis 15 Mg ha <sup>-1</sup>		Dosis 30 Mg ha <sup>-1</sup>	
			ML (kg ha <sup>-1</sup> )	ML (g ha <sup>-1</sup> )	ML (kg ha <sup>-1</sup> )	ML (g ha <sup>-1</sup> )
CB	0,300	2.721.000	0,00179	1,79	0,00358	3,58
EM	0,300	2.538.280	0,00192	1,92	0,00384	3,84
M	0,300	2.672.000	0,00182	1,82	0,00365	3,65
LP	0,300	3.142.560	0,00155	1,55	0,00310	3,10

<b>Apéndice I.4. Determinación de la masa de lodo húmedo a utilizar lodo LET 2004</b>						
<b>Suelo</b>	<b>MSI (kg)</b>	<b>MS<sub>ha</sub> (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Dosis 15 Mg ha<sup>-1</sup></b>		<b>Dosis 30 Mg ha<sup>-1</sup></b>	
			<b>ML (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>ML (g ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>ML (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>ML (g ha<sup>-1</sup>)</b>
CB	0,300	2.721.000	0,00172	1,72	0,00344	3,44
EM	0,300	2.538.280	0,00184	1,84	0,00369	3,69
M	0,300	2.672.000	0,00175	1,75	0,00350	3,50
LP	0,300	3.142.560	0,00149	1,49	0,00298	2,98

<b>Apéndice I.5. Determinación de la cantidad de agua necesaria para que el suelo en incubación alcance las condiciones de humedad de campo</b>				
<b>Suelo</b>	<b>ma (g)</b>	<b>ms (g)</b>	<b>MSI (g)</b>	<b>A</b>
CB	0,35	3,04	300	34,54
EM	0,38	3,06	300	37,25
M	0,43	3,08	300	41,88
LP	0,26	3,05	300	25,57

## APÉNDICE II

### RESUMEN ANÁLISIS QUÍMICOS

#### 1.1 Análisis químicos de suelos y lodos al inicio

Apéndice II.1. Análisis químicos en suelos y lodos en estudio													
Suelo	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	CE extracto de saturación (dS/m)	CE 1:5 (dS/m)	MO total (%)	MO oxidable (%)	CIC (cmol+/kg)	Ca (cmol+/kg)	Mg (cmol+/kg)	Na (cmol+/kg)	K (cmol+/kg)	N (mg/kg)	P (mg/kg)
CB	7,18	6,52	1,26	0,087	4,6	3,9	11	9,6	2,7	0,28	0,72	16	31
EM	7,91	7,68	3,35	0,322	7,5	4,7	23	29,6	5,9	0,22	0,74	102	37
M	6,42	6,09	2,39	0,202	5,0	3,8	14	12,9	1,8	0,44	0,85	54	54
LP	6,69	6,38	1,12	0,085	2,1	1,2	5	5,8	1,5	0,10	0,59	18	33
LET 2005	6,38	6,11	24,2	8,10	43,8	41,5	49,9	23,4	7,6	2,50	1,30	5.899	489
LET 2004	6,53	6,39	6,79	2,12	43,4	40,4	47,2	38,0	8,2	0,96	0,95	1.051	933

1.2 Análisis en incubaciones

<b>Apéndice II.2.</b> Análisis químicos de suelos incubados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg de lodos en base seca por hectárea												
<b>Suelo</b>	<b>pH H<sub>2</sub>O LET 2005 T = 0</b>	<b>pH H<sub>2</sub>O LET 2005 T = 60</b>	<b>pH H<sub>2</sub>O LET 2004 T = 0</b>	<b>pH H<sub>2</sub>O LET 2004 T = 60</b>	<b>pH KCl LET 2005 T = 0</b>	<b>pH KCl LET 2005 T = 60</b>	<b>pH KCl LET 2004 T = 0</b>	<b>pH KCl LET 2004 T = 60</b>	<b>CE LET 2005 T = 0 (dS/m)</b>	<b>CE LET 2005 T = 60 (dS/m)</b>	<b>CE LET 2004 T = 0 (dS/m)</b>	<b>CE LET 2004 T = 60 (dS/m)</b>
CB D0	7,18	6,94	7,18	6,94	6,49	6,25	6,49	6,25	0,078	0,169	0,078	0,169
CB D15	7,13	6,72	7,15	6,84	6,59	6,21	6,66	6,16	0,125	0,291	0,083	0,215
CB D30	7,11	6,44	7,13	6,70	6,70	6,13	6,81	6,11	0,167	0,403	0,109	0,260
EM D0	7,91	7,95	7,91	7,95	7,50	7,53	7,50	7,53	0,299	0,332	0,299	0,332
EM D15	7,82	7,84	7,77	7,92	7,67	7,50	7,67	7,39	0,332	0,429	0,295	0,382
EM D30	7,75	7,78	7,73	7,85	7,86	7,46	7,86	7,42	0,375	0,532	0,324	0,438
M D0	6,42	6,14	6,42	6,32	5,82	5,56	5,82	5,56	0,177	0,240	0,177	0,240
M D15	6,48	5,99	6,35	6,24	5,98	5,55	5,98	5,62	0,227	0,354	0,201	0,272
M D30	6,53	5,88	6,30	6,14	6,12	5,53	6,12	5,65	0,269	0,462	0,212	0,309
LP D0	6,69	6,49	6,69	6,49	6,34	6,06	6,34	6,06	0,083	0,126	0,083	0,126
LP D15	6,77	6,14	6,58	6,34	6,51	5,87	6,51	6,11	0,131	0,248	0,098	0,169
LP D30	6,83	6,03	6,54	6,00	6,64	5,80	6,64	6,14	0,174	0,353	0,107	0,207



**Apéndice II.3.** Análisis químicos de suelos incubados con dosis 0 Mg, 15 Mg y 30 Mg de lodos en base seca por hectárea

<b>Suelo</b>	<b>N LET 2005 T = 0</b>	<b>N LET 2005 T = 60</b>	<b>N LET 2004 T = 0</b>	<b>N LET 2004 T = 60</b>	<b>P LET 2005 T = 0</b>	<b>P LET 2005 T = 60</b>	<b>P LET 2004 T = 0</b>	<b>P LET 2004 T = 60</b>
CBD0	17	66	16	66	31	39	31	39
CBD15	57	111	20	88	36	65	60	60
CBD30	103	184	28	100	40	97	72	71
EMD0	108	120	102	120	39	54	39	54
EMD15	122	130	113	130	44	61	75	72
EMD30	145	152	116	135	50	75	91	90
MD0	57	98	54	99	54	71	54	71
MD15	70	141	62	114	62	84	76	91
MD30	130	187	70	135	65	96	86	105
LPD0	19	56	18	56	32	39	32	39
LPD15	59	104	24	81	36	50	48	56
LPD30	95	145	35	87	46	65	55	72

### 1.3 Metales pesados en suelos incubados con lodos

<b>Apéndice II.4.</b> Metales pesados extraíbles con DTPA, lodo LET 2005 T = 0								
<b>Suelo</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Pb</b>	<b>Ni</b>
CB DO	11,68	1,68	13,49	1,11	<LD	<LD	0,67	0,17
CB D15	12,92	1,97	14,33	3,48	<LD	<LD	0,70	0,27
CB D30	14,43	2,19	17,52	6,81	<LD	<LD	0,73	0,33
EM DO	4,30	3,43	8,30	0,93	0,07	<LD	0,97	0,20
EM D15	5,29	3,59	9,14	2,61	0,09	<LD	1,00	0,22
EM D30	6,73	3,90	9,92	5,25	0,12	<LD	1,06	0,32
M DO	15,31	19,00	19,84	4,05	0,13	0,08	0,30	0,57
M D15	33,23	28,46	26,08	8,13	0,17	0,10	0,62	0,90
M D30	42,77	29,03	32,81	10,80	0,21	0,12	0,83	0,94
LP DO	10,98	2,31	16,85	3,85	0,04	<LD	0,29	<LD
LP D15	14,04	2,58	21,12	6,64	0,07	0,10	0,37	<LD
LP D30	15,34	3,08	23,50	8,50	0,12	0,12	0,42	0,17

<LD: Bajo límite de detección

<b>Apéndice II.5.</b> Metales pesados extraíbles con DTPA, lodo LET 2005 T = 60								
<b>Suelo</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Pb</b>	<b>Ni</b>
CB DO	14,17	1,29	9,58	1,67	<LD	<LD	<LD	0,18
CB D15	15,93	1,64	10,25	4,99	0,06	<LD	0,23	0,18
CB D30	19,36	2,08	12,58	8,85	0,09	0,09	0,34	0,42
EM DO	1,60	2,39	1,45	<LD	<LD	<LD	0,48	0,15
EM 15	2,62	2,62	2,04	3,78	0,06	0,12	0,65	0,30
EM 30	3,79	3,05	3,06	5,82	0,08	0,13	0,77	0,41
M DO	44,18	27,75	15,05	5,80	0,13	0,08	0,76	0,88
M D15	46,22	29,23	17,12	8,77	0,18	0,11	1,11	1,05
M D30	47,36	26,33	18,11	11,42	0,20	0,17	1,14	1,15
LP DO	14,56	1,84	2,89	4,72	<LD	<LD	0,26	0,26
LP D15	17,34	2,76	4,34	6,70	0,05	0,12	0,50	0,41
LP D30	22,60	3,68	5,12	9,30	0,12	0,13	0,62	0,59

<LD: Bajo límite de detección

<b>Apéndice II.6. Metales pesados extraíbles con DTPA, lodo LET 2004 T = 0</b>								
<b>Suelo</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Pb</b>	<b>Ni</b>
CB DO	11,68	1,68	13,49	1,11	<LD	<LD	0,67	0,17
CB D15	11,92	1,73	14,01	3,33	<LD	<LD	0,91	0,19
CB D30	12,80	1,82	16,00	4,45	<LD	<LD	1,08	0,26
EM DO	4,30	3,43	8,30	0,93	0,07	<LD	0,97	0,20
EM 15	4,62	4,31	10,92	2,48	0,08	<LD	1,21	0,22
EM 30	5,03	4,74	12,51	5,09	0,13	<LD	1,35	0,27
M DO	15,31	19,00	19,84	4,05	0,13	0,08	0,30	0,57
M D15	47,28	30,64	39,54	9,96	0,15	0,12	1,51	0,99
M D30	52,50	32,78	42,63	12,62	0,21	0,13	1,78	1,16
LP DO	10,98	2,31	16,85	3,85	0,04	<LD	0,29	<LD
LP D15	19,81	2,77	19,00	7,97	0,05	0,12	0,52	<LD
LP D30	21,01	4,10	21,24	10,09	0,06	0,14	0,69	0,23

<LD: Bajo límite de detección

<b>Apéndice II.7. Metales pesados extraíbles con DTPA, lodo LET 2004 T = 60</b>								
<b>Suelo</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Pb</b>	<b>Ni</b>
CB DO	11,66	1,68	13,49	1,11	<LD	<LD	0,67	0,17
CB D15	18,37	1,87	13,98	4,72	0,05	0,08	1,09	0,30
CB D30	20,10	2,62	15,14	7,57	0,10	0,13	1,19	0,39
EM DO	4,28	3,43	8,30	0,93	0,07	<LD	0,97	0,20
EM 15	4,86	3,57	10,14	3,00	0,09	<LD	1,07	0,30
EM 30	6,33	4,74	11,36	4,89	0,15	0,09	1,16	0,38
M DO	15,31	19,00	19,84	4,05	0,13	0,08	0,30	0,57
M D15	46,60	28,94	20,73	9,46	0,28	0,12	1,36	0,79
M D30	49,23	30,18	22,39	11,82	0,43	0,24	1,51	0,93
LP DO	10,98	2,31	16,85	3,85	0,04	<LD	0,29	<LD
LP D15	19,19	3,04	18,66	7,15	0,11	0,16	0,33	<LD
LP D30	20,63	4,10	19,96	10,18	0,20	0,31	0,43	0,18

<LD: Bajo límite de detección

# **Anexos**

## ANEXO I

### NORMATIVA CHILENA PARA LA UTILIZACIÓN DE LODOS EN LA AGRICULTURA

El reglamento para el manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas está siendo desarrollado por la Comisión Nacional del Medio Ambiente, CONAMA, teniendo como objetivo regular el manejo sanitario de lodos no peligrosos provenientes de plantas de tratamiento de aguas. Con ello se protege la salud de la población y previene el deterioro de los recursos naturales, aire, agua, flora, fauna y suelo. Asimismo, está orientado a regular el uso y manejo de lodos no peligrosos en la agricultura, cuando sus condiciones físicas, químicas y biológicas lo permitan. Con lo cual estos se transforman en un producto útil, para la recuperación de suelos degradados así como para sustituir el uso de insumos tradicionales en la agricultura (CONAMA, 2001).

El reglamento se refiere a lodos no peligrosos generados por plantas de tratamiento de agua potable, de aguas servidas, incluyendo fosas sépticas, así como por plantas de tratamiento de residuos industriales líquidos.

Se considerarán lodos no peligrosos aquellos que no presentan ninguna característica de toxicidad, toxicidad por lixiviación, reactividad, inflamabilidad o corrosividad.

El reglamento establece las condiciones técnicas de operación, monitoreo y seguimiento de lodos destinados a uso agrícola, con el fin de evitar efectos nocivos a la salud de la población, flora, fauna y suelo, en consideración a:

- Características de los sitios de aplicación: comprende las clases de suelo, características de los mismos y contenido de metales pesados.
- Criterios para la aplicación: criterio de precaución, criterios sanitarios, contenido de metales pesados y contenido de nutrientes.

#### 1.1 Características de Lodos Aptos para Uso Agrícola

Sólo podrán utilizarse en la agricultura lodos estabilizados e higienizados, provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas, incluyendo fosas sépticas o de plantas de tratamiento de residuos industriales líquidos.

Para ser aplicados en suelos de uso agrícola, forestal, jardinería o en la recuperación de suelos degradados, los lodos deberán cumplir lo siguiente:

- Criterios sanitarios, especialmente de reducción del contenido de patógenos y del potencial de atracción de vectores sanitarios.
- Contenidos totales de metales pesados.
- Evaluación ecotoxicológica.

Según el contenido de patógenos se distinguen dos tipos de lodos: lodos Clase A y lodos Clase B.

**Lodos Clase A:** Son lodos aptos para uso agrícola, sin restricciones por razones sanitarias. Estos lodos deberán cumplir exactamente con requisitos como:

- Tener una densidad de coliformes fecales menor a 1000 NMP (número más probable) por gramo de lodo, en base seca.
- Tener una densidad de Salmonella sp. menor a 3 NMP en 4 gramos de lodo, en base seca.

**Lodos Clase B:** Son lodos aptos para uso agrícola, con restricciones de aplicación según tipo y localización de los suelos y cultivos. Estos lodos deberán cumplir con el siguiente requisito:

- La media geométrica de la densidad de coliformes fecales, producto de análisis de un número de muestras no inferior a siete, tomadas al momento de uso, debe ser menor que 2 millones NMP por gramo de lodo en base seca.

## **1.2 Concentración Máxima de Metales Pesados en Lodos de Uso Agrícola**

El artículo 13 del reglamento para el manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas, señala que queda prohibida la aplicación de lodos en suelos de uso agrícola, forestal o en jardines, cuando los análisis indiquen que los contenidos de metales pesados sobrepasan cualquiera de las concentraciones máximas señaladas en el anexo I.1:

<b>Anexo I.1. Concentraciones máximas de metales pesados permitidos en lodos de uso agrícola <sup>1</sup></b>		
<b>Metal pesado</b>	<b>Concentración máxima en mg kg<sup>-1</sup> de lodo (base seca)</b>	
	<b>Aplicación en suelos con severas limitaciones para su aptitud frutal natural y/o en suelos forestales</b>	<b>Aplicación en suelos degradados</b>
Arsénico	20	40
Cadmio	8	40
Cobre	1000	1200
Mercurio	10	20
Níquel	80	420
Plomo	300	400
Selenio	50	100
Zinc	2000	2800

<sup>1</sup> Concentraciones expresadas como contenidos totales  
Fuente: CONAMA, 2001.

### 1.3 Características de los Sitos de Aplicación

Para la aplicación de lodos se considerarán los siguientes tipos de uso de suelo:

- Suelos de uso agrícola y/o forestal, incluyendo suelos erosionados con potencial de uso agrícola inmediato.
- Suelos dedicados a áreas verdes, recreacionales, parques, jardines, cementerios.
- Suelos degradados sin potencial de uso agrícola inmediato.

Se prohíbe la aplicación de lodos a:

- Suelos de uso agrícola, forestal o jardines, cuyo pH sea inferior o igual a 5.
- Suelos de textura arenosa, esto es, suelos cuyo porcentaje de partículas con diámetros entre 0,050 y 2 mm sea igual o superior a 30 y el porcentaje de arcilla o partículas menores a 0,002 mm de diámetro sea inferior a 10.
- Suelos saturados con agua durante algún período del año, a manera de ejemplo: vegas, bofedales, ñadis.
- Suelos cuya napa freática se encuentre a menos de 1 metro de profundidad y en aquellos suelos en los cuales se genere un efecto de napa colgante.
- Áreas cubiertas con nieve.

- Zonas de protección de fuentes de captación de agua potable, esto es, 300 metros aguas arriba para el caso de aguas superficiales y en un radio de 300 metros tratándose de fuentes de aguas subterráneas.
- Franjas de protección de ríos y lagos, esto es, a menos de 15 metros de sus riberas.
- Suelos con riesgo de inundación.
- Suelos con pendientes superiores al 15 %. Para pendientes mayores del 2%, se exigirá un acanalado paralelo al contorno de la pendiente para evitar la erosión.

Para los efectos del Reglamento para el manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas, en especial para la gestión de la carga metálica de los lodos, el país se entenderá dividido en dos macro regiones:

- 1) Zona centro-Norte: que se extiende desde la línea de la Concordia (Primera Región) por el norte hasta el límite norte de la VI Región por el sur.
- 2) Zona Sur: que se extiende desde el límite norte de la VI Región por el norte hasta el Cabo de Hornos (Duodécima Región) por el sur.

El impacto de la aplicación de lodos depende del tipo de suelo, de la relación suelo/lodo, la frecuencia de aplicación, el tipo de contaminante, y las propiedades físicas y químicas tanto del lodo como del suelo. Por esta razón es importante conocer la concentración máxima de metales pesados en los suelos, previo a la aplicación de lodos. El artículo 18 del Reglamento para el manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas, señala que en caso alguno, se aceptará que los suelos susceptibles de recibir aplicaciones de lodos excedan los contenidos totales para metales contenidos en el anexo I.2.



**Anexo I.2.** Concentración máxima de metales pesados permitidos en suelos, previo a la aplicación de lodos

Metal pesado	Concentración máxima en mg kg <sup>-1</sup> de suelo (base materia seca) <sup>1</sup>		
	Macrozona norte		Macrozona sur
	pH > 6,5	pH ≤ 6,5	pH > 5
Arsénico	20	12,5	10
Cadmio	2	1,25	2
Cobre	150	100	75
Mercurio	1,5	1	1
Níquel	112	50	30
Plomo	75	50	50
Selenio	4	3	4
Zinc	175	120	175

<sup>1</sup>Concentraciones expresadas como contenidos totales  
Fuente: CONAMA, 2001.

**1. 4 Criterios para la Aplicación de Lodos en Agricultura**

La aplicación de lodos, su forma, tasa y oportunidad, debe orientarse por criterios sanitarios, agronómicos (contenido de nutrientes requeridos por los cultivos, principalmente medidos como nitrógeno, fósforo y potasio disponibles) y por el contenido de metales pesados, tanto en los lodos como en el suelo receptor.

En el anexo I.3 se observan las tasas máximas permitidas de aplicación de lodos a distintos suelos.

<b>Anexo I.3. Tasas máximas de aplicación de lodos</b>	
<b>Tipos de usos</b>	<b>Tasa máxima Mg ha<sup>-1</sup> año (base seca)</b>
Césped, jardines y áreas verdes	2
Suelos agrícolas y forestales, incluyendo suelos erosionados con potencial de uso agrícola inmediato	15
Suelos degradados sin potencial de uso agrícola inmediato (recuperación de cárcavas para generar capa vegetal o para estabilizar estructuras riesgosas)	30
Fuente: CONAMA, 2001	

### **1.5.5 Manejo Sanitario de Lodos**

Las unidades de tratamiento y disposición final de lodos deberán diseñarse de manera que impidan la infiltración de líquidos hacia aguas subterráneas y el escurrimiento de aguas contaminadas hacia cursos o masas de aguas superficiales.

El transporte de lodos que no cumpla con los criterios para lodos Clase B, así como de lodos que presenten contenidos de humedad superior a 70%, deberá realizarse en contenedores herméticos.

El tratamiento de lodos no peligrosos deberá realizarse en instalaciones especialmente diseñadas al efecto, las que deberán contar con autorización de la autoridad competente.

Las instalaciones de tratamiento deberán evitar la infiltración de los líquidos hacia las aguas subterráneas y el escurrimiento de aguas contaminadas hacia cursos o masas de aguas superficiales.

## ANEXO II

### DESCRIPCIÓN DE SUELOS UTILIZADOS

(CIREN, Proyecto Maipo, 1984)

#### 1.1 SERIE CHOROMBO, franca

Símbolo Cartográfico: CHB

##### **Caracterización general**

La serie Chorombo es un miembro de la familia franca gruesa, mixta, térmica de los Ultic Haploxerolls (Mollisol).

Suelos de origen aluvial, estratificados, que se presentan ocupando las terrazas bajas del estero Puangue en las proximidades de María Pinto; son suelo de color pardo rojizo oscuro en el matiz 5YR en el horizonte A; textura franca a franco arcillo limosa; estructura de bloques angulares finos y medios, moderados. El horizonte B es también de color pardo rojizo; textura franca y estructura de bloques angulares finos, moderados a débiles. Las estratas C corresponden a arenas graníticas, generalmente de colores pardo grisáceos oscuros en el matiz 10YR, estratificados, que presentan manchas y moteados ligeros, gruesos, de color 5 YR 4/4; incluidos en la arena se encuentran grandes nódulos de arcilla de 3 a 5 cm, redondeados, de color 5YR 3/2. Los depósitos que han dado origen al suelo corresponden a materiales de la Serie San Diego que descansa sobre arenas estratificadas de la Serie Piangue. Todos los materiales son de origen granítico.

##### **Ubicación**

Esta Serie se describió en la ortofoto N° 20116, María Pinto, a 6.295,7 km de Lat. UTM y a 306,25 km de long. UTM.

##### **Posición**

El suelo ocupa las terrazas bajas de Estero Puangue. La topografía es plana con pendientes inferiores a 1%. La temperatura media anual del suelo se estima que varía entre 15 y 16 °C. La profundidad efectiva del suelo varía entre 90 y 100 cm.

## **1.2 SERIE LAMPA, franco arenosa muy fina**

Símbolo cartográfico: LMP

### **Caracterización general**

La Serie Lampa es un miembro de la Familia franca gruesa, mixta, térmica de los Tepic Haploxerolls (Mollisol).

Suelo sedimentado, estratificado, de origen aluvio coluvial, derivado de materiales graníticos, en posición ligeramente inclinada con pendientes de 1 a 2%. Suelo de textura superficial franco arenosa muy fina, de color pardo muy oscuro en el matiz 10 YR; de textura franco arenosa muy fina a franco arcillosa limosa, de color pardo grisáceo muy oscuro en el matiz 10 YR en profundidad. Descansa sobre un substrato de arenas graníticas. Suelo de permeabilidad moderadamente rápida y de buen drenaje.

### **Ubicación**

La Serie se describió en la ortofoto N° 19828, Estero Lampa, a 6.311,7 km Lat. UTM y a 329,2 km Long. UTM.

### **Posición**

La Serie Lampa ocurre en una posición ligeramente inclinada (piedmont) con pendientes dominantes de 1 a 2%. La temperatura media anual del suelo se estima que varía entre 15 y 16 °C. La profundidad efectiva del suelo fluctúa entre 32 y 115 cm.

### **1.3 SERIE POMAIRE, franca**

Símbolo Cartográfico: PMR

#### **Caracterización general**

La Serie Pomaire es un miembro de la Familia franca fina, mixta, térmica de los Ultic Haploxerolls (Mollisol).

Suelos de origen coluvial, profundos, en posición de plano inclinado (piedmont) que descansan sobre un substrato aluvial de arcillas, gravas y piedras por debajo de los 150 cm. El horizonte A<sub>1</sub> es de color pardo grisáceo oscuro en el matiz 10 YR; textura franca; estructura de bloques subangulares medios, moderados.

El Horizonte B<sub>1</sub> es predominantemente pardo rojizo oscuro en el matiz 5YR, con gris muy oscuro en el matiz 10 YR como color secundario; textura franco arcillosa y estructura de bloques subangulares medios y gruesos, moderados; nódulos ferromangánicos blandos de 2 a 4 mm de diámetro y color 5 YR 3/3 escasos a comunes. Los horizontes B<sub>2</sub> son de color pardo oscuro en el matiz 7.5 YR; textura franco arcillosa con un contenido de gravilla variable que aumenta en profundidad; estructura maciza; cerocidades delgadas, aisladas, cubriendo parcialmente algunos poros, gravas finas aisladas. El horizonte B<sub>3</sub> es de color pardo oscuro en el matiz 10 YR; textura franco arcillosa arenosa; estructura maciza; serosidades de arcilla aisladas, delgadas.

#### **Ubicación**

La Serie de describió en la ortofoto N° 20142, Laguna Las Vacas, a 6.292,6 km Lat. UTM y a 296,9 km Long. UTM.

#### **Posición**

La Serie Pomaire es un suelo que ocurre en una posición de plano inclinado (piedmont) con pendientes dominantes de 1 a 3%. La profundidad efectiva del suelo varía entre 95 y 115 cm. La temperatura media anual del suelo se estima que varía entre 15 y 16 °C.

### ANEXO III

#### ESTÁNDARES DE LOS ANÁLISIS DE SUELO

<b>Anexo III.1. Estándares para los análisis de suelos</b>					
<b>Análisis</b>	<b>Nivel</b>	<b>Categoría</b>	<b>Análisis</b>	<b>Nivel</b>	<b>Categoría</b>
pH	<5	Muy bajo	Ret. de P Al extraíble (mg kg <sup>-1</sup> )	<400	Muy bajo
	5,0-6,0	Bajo		400-800	Bajo
	6,1-7,0	Medio		800-1000	Medio
	>7,1	Alto		>1000	Alto
Salinidad suspensión (dS m <sup>-1</sup> )	<0,1	Muy bajo	Potasio Extractable (mg kg <sup>-1</sup> )	<50	Muy bajo
	0,1-0,3	Bajo		50-100	Bajo
	0,3-0,6	Medio		101-150	Medio
	>0,6	Alto		>150	Alto
Materia orgánica (%)	<2,0	Muy bajo	Reserva de Potasio (mg kg <sup>-1</sup> )	<250	Muy bajo
	2,0-3,0	Bajo		150-500	Bajo
	3,1-8,0	Medio		501-750	Medio
	>8,0	Alto		>750	Alto
Calcio intercambio (cmol kg <sup>-1</sup> )	<2,0	Muy bajo	Azufre Extractable (mg kg <sup>-1</sup> )	<4,0	Muy bajo
	2,0-4,0	Bajo		4,0-8,0	Bajo
	4,1-8,0	Medio		8,1-12,0	Medio
	>8,0	Alto		>12	Alto
Magnesio intercambio (cmol kg <sup>-1</sup> )	<0,2	Muy bajo	Hierro disponible (mg kg <sup>-1</sup> )	<1,0	Muy bajo
	0,2-0,4	Bajo		1,1-2,5	Bajo
	0,5-0,8	Medio		2,5-4,5	Medio
	>0,8	Alto		>4,5	Alto
Potasio intercambio (cmol kg <sup>-1</sup> )	<0,13	Muy bajo	Manganeso disponible (mg kg <sup>-1</sup> )	<0,2	Muy bajo
	0,13-0,26	Bajo		0,2-0,5	Bajo
	0,26-0,38	Medio		0,6-1,0	Medio
	>0,38	Alto		>1,0	Alto
Sodio intercambio (cmol kg <sup>-1</sup> )	<0,2	Muy bajo	Zinc disponible (mg kg <sup>-1</sup> )	<0,25	Muy bajo
	0,2-0,5	Bajo		0,25-0,50	Bajo
	0,5-1,0	Medio		0,51-1,00	Medio
	>1,0	Alto		>1,00	Alto
Suma de bases (meq 100g <sup>-1</sup> )	<2,5	Muy bajo	Cobre disponible (mg kg <sup>-1</sup> )	<0,1	Muy bajo
	2,5-5,0	Bajo		0,1-0,2	Bajo
	5,1-7,5	Medio		0,3-0,5	Medio
	>7,5	Alto		>0,5	Alto
Porcentaje saturación de aluminio	<2,5	Muy bajo	boro disponible (mg kg <sup>-1</sup> )	<0,2	Muy bajo
	2,5-5,0	Bajo		<0,2-0,5	Bajo
	5,1-10,0	Medio		0,6-1,0	Medio
	>10,0	Alto		>1,0	Alto
Fósforo disponible mg kg <sup>-1</sup>	<2,5	Muy bajo	Molibdeno disponible (mg kg <sup>-1</sup> )	<0,50	Muy bajo
	5-10	Bajo		0,50-0,10	Bajo
	11-15	Medio		0,11-0,20	Medio
	>15	Alto		>0,20	Alto

Fuente: Rodríguez (1993)

<b>Anexo III.2. Niveles de K, Mg y Ca intercambiables</b>					
<b>Textura</b>	<b>CIC (cmol(+) kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Categoría</b>	<b>K (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Mg (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Ca (mg kg<sup>-1</sup>)</b>
CIC baja	±5	Muy alta	>100	>60	>800
		Alta	60-100	25-60	500-800
		Media	30-60	10-25	200-500
		Baja	15-30	5-10	100-200
		Muy baja	<15	<5	<100
CIC media	±15	Muy alta	>300	>180	>2400
		Alta	175-300	80-180	1600-2400
		Media	100-175	40-80	1000-1600
		Baja	50-100	20-40	500-1000
		Muy baja	<50	<20	<500
CIC alta	±25	Muy alta	>500	>300	>4000
		Alta	300-500	120-300	3000-4000
		Media	150-300	60-120	2000-3000
		Baja	75-150	30-60	1000-2000
		Muy baja	<75	<30	< 1000

Fuente: Cottenie, (1980)