

UCH-FC  
Q. Ambiental  
B 389  
C. 1

**EXPERIENCIA MUNDIAL SOBRE LA GESTIÓN EN  
AGRICULTURA DE LODOS PROCEDENTES DE PLANTAS DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS Y EVALUACIÓN DE  
FITOTOXICIDAD DE LODOS GENERADOS EN LA REGIÓN  
METROPOLITANA (CHILE), MEDIANTE  
PRUEBAS DE GERMINACIÓN**



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**

**Juan Pablo Becerra Muñoz**

Director del Seminario de Título: **Sr. Sergio González Martineaux**  
**Ing. Agr. M.Sc.**

Profesor Patrocinante: **Dra. Marcia Cazanga Solar**

**Mayo, 2003**

**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 el  
alumno

**Juan Pablo Becerra Muñoz**

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

**Comisión**

**Prof. Patrocinante: Dra. Marcia Cazanga**

**Dra. Inés Ahumada**

**Ing. Civ. Ind. Sra. Paola Arata**

*A mis padres...*

## **Agradecimientos**

En primer lugar agradezco al Sr. Sergio González M. por el tema del Seminario de Titulación, por su apoyo en el Centro Regional de Investigaciones Agropecuarias, INIA-CRI La Platina lugar donde se realizó este trabajo bajo su dirección, como asimismo a la Empresa Aguas Andinas S.A.

A Scarlette L. por su apoyo durante mi estadía; agradezco en forma especial al personal del Laboratorio de Suelos, especialmente a Ximena G., Roxana M., Francisco C., Luis R., Regina I. y Luis M., y al personal del Laboratorio de Germoplasma del INIA-CRI a Rosita y Marcela por su colaboración.

Deseo manifestar en forma especial mi gratitud a la Sra. Paola Arata (Aguas Andinas S.A) por sus sugerencias respecto de mi trabajo de Seminario.

Mis más profundos agradecimientos y sentimientos de alegría a mi familia: padres, hermana, y abuelos por el amor y apoyo que en forma incondicional he recibido durante todo este periodo de formación, el cual culmina con mi titulación.

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Página</b>
<b>CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes Generales	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1 Objetivos Generales	4
1.2.2. Objetivos Específicos	4
<b>CAPITULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1. Antecedentes Generales Sobre Aguas Servidas y Lodos	5
2.1.2. Origen y Composición de las Aguas Servidas	5
2.1.3. Tratamiento de Aguas Servidas y Origen de los Lodos	8
2.1.4. Tratamiento y Composición de Lodos	14
. Tratamientos	14
. Composición	15
2.1.5. Chile: Región Metropolitana	19
. Planta de Tratamientos de Aguas Servidas El Trebal	21
2.2. Posibles Destinos Finales de Lodos	23
2.2.1. Principales Vías de Uso y Disposición de Lodos	23
2.2.2. Destinos de Lodos en Europa y Estados Unidos de América	24
2.3. Normativas sobre Uso de Lodos en la Agricultura	28
2.3.1. Normativa Europea	28
2.3.2. Normativa en Estados Unidos de América	32
2.3.3. Normativas: Canadá, México, Brasil y Chile	33
. Canadá	33
. México	35
. Brasil	35

. Chile	35
2.4. Utilización de Lodos en la Agricultura	48
2.4.1. Aspectos Generales	48
2.4.2. Efectos sobre las Propiedades del Suelo	49
. Propiedades Físicas	49
. Propiedades Químicas	51
. Propiedades Biológicas	54
2.4.3. Lodos como Fuente de Nutrientes	56
2.4.4. Calculo de Tasa de Aplicación de Lodos	59
2.4.5. Época, Forma y Cuidados de la Aplicación de Lodos	66
2.4.6. Experiencias del Empleo de Lodos en la Agricultura	69
2.4.7. Ventajas y Desventajas en la Agricultura del Uso de Lodos	74
2.5. Impactos Ambientales y Sociales por Uso de Lodos en la Agricultura	76
2.5.1. Impactos Ambientales	76
. Suelo	76
. Agua	84
. Aire	85
2.5.2. Impactos Sociales	85
2.6. Proyecciones del Uso Benéfico de Lodos	89
2.6.1. Europa y Estado Unidos de América	89
2.6.2. Perspectivas para el Uso Agrícola de Lodos en Chile (Región Metropolitana)	92
2.7. Conclusiones Revisión Bibliográfica	94
 <b>CAPITULO 3: EVALUACIÓN DE FITOTOXICIDAD DE     Lodos PRODUCIDOS EN LA REGIÓN     METROPOLITANA (CHILE), MEDIANTE     PRUEBAS DE GERMINACIÓN</b>	 96

3.1. Aspectos Generales	96
3.2. Parte Experimental	97
3.2.1. Etapa de Muestreo	97
3.2.2. Etapa de Calibración	97
3.2.3. Etapa de Elección del Material	98
3.2.4. Montaje del Ensayo	99
3.2.5. Evaluaciones y Mediciones	101
. Evaluaciones diarias	101
. Evaluaciones finales	102
- Determinación de % Humedad y Densidad Aparente	104
- Determinación de pH	105
- Determinación de Conductividad Eléctrica	105
- Análisis Estadísticos	105
3.3. Resultados	106
3.3.1. % Humedad y Densidad Aparente	106
3.3.2. IVE	106
3.3.3. Germinación de Semillas (%)	108
3.3.4. Desarrollo de Biomasa	109
3.3.5. pH y CE	112
3.3.6. Resumen de Resultados Estadísticos	113
3.4. Discusión Ensayo de Germinación	114
3.4.1. (%) Humedad y Densidad Aparente	114
3.4.2. IVE	114
3.4.3. Germinación de Semillas	115
3.4.4. Desarrollo de Biomasa	118
3.4.5. pH y CE	117
3.5. Conclusiones Ensayo de Germinación	118
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>120</b>

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>123</b>
<b>ANEXO A</b>	<b>131</b>
<b>ANEXO B</b>	<b>136</b>
<b>ANEXO C</b>	<b>139</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
2-1. Composición de excretas y orina humana	5
2-2. Composición típica de un agua servida	7
2-3. Composición química típica y propiedades de lodos digeridos y sin tratar	13
2-4. Macroelementos en lodos	17
2-5. Utilización industrial y contenido de metales en lodos	18
2-6. Contenido de patógenos en distintos tipos de lodos	19
2-7. Alternativas de uso y disposición lodos en Europa y en Estados Unidos de América	26
2-8. Concentración máxima de metales pesados en lodos para aplicación en la agricultura	38
2-9. Máximo permisible para la concentración de metales pesados en suelos	39
2-10. Límites máximos anuales y acumulativos en el tiempo para metales pesados en suelos cuando los lodos son aplicados en la agricultura	40
2-11. Comparación de tratamientos que reducen la carga patógena de los lodos	41
2-12. Límite para concentración de patógenos en lodos	42
2-13. Superficies en que el uso de lodo se encuentra prohibido	43-44
2-14. Restricciones asociada a la protección de la salud y los patógenos tras la aplicación de lodos en Canadá	45
2-15. Cantidad máxima de lodo para ser aplicada en suelos	46
2-16. Regulaciones de compuestos orgánicos en países europeos	47

2-17.	Efecto de los lodos sobre el pH del suelo	52
2-18.	Contenido de N-P-K (%) ms en lodos, guanos de animales y fertilizantes tradicionales	58
2-19.	Contenido de metales en lodos, abono y fertilizantes sintéticos	59
2-20.	Contenido de metales en plantas tras aplicaciones de lodos	66
2-21.	Sistemas de distribución utilizables en función del estado del lodo	69
2-22.	Equivalencia de fertilización con nitrógeno para lodos en estudios de campo con cultivos perennes	71
2-23.	Proteína cruda en cultivo forrajero en Estados Unidos de América	72
2-24.	Concentración de Cu, Mo y Zn en cultivos forrajeros tras aplicaciones de lodos	73
2-25.	Características típicas de practicas de aplicación de lodos en Estados Unidos de América	74
2-26.	Patógenos y efectos sobre la salud humana	77
2-27.	Tiempo de sobrevivencia de patógenos en suelos y plantas	78
2-28.	Origen de PCBs y HAPs en áreas rural y urbana	79
2-29.	Propiedades, ocurrencia y transferencia de grupos orgánicos encontrados en lodos y suelos tratados con lodos	80
2-30.	Efectos de metales en plantas, animales y humanos	83
2-31.	Alternativas de uso o disposición de lodos en Chile	93
3-1.	Propiedades físicas y químicas de los suelos Maipo, Los Morros y Chada	99
3-2.	Tratamientos y número de semillas empleadas en los tres ciclos en el ensayo	100

<b>3-3.</b>	Criterios cuantitativos utilizados en la asignación de normalidad en la germinación de semillas	104
<b>3-4.</b>	(%) Humedad y densidad aparente de los sustratos	106
<b>3-5.</b>	Valores promedio IVE por especie	107
<b>3-6.</b>	Tasa de variación para el IVE en sustratos suelos puros	107
<b>3-7.</b>	Porcentaje geminación normal por especie	108
<b>3-8.</b>	Tasa de variación para germinación normal en sustratos suelos puros	109
<b>3-9.</b>	Evaluaciones finales para tomate	109
<b>3-10.</b>	Evaluaciones finales para trigo	110
<b>3-11.</b>	Evaluaciones finales para el maíz	110
<b>3-12.</b>	Evaluaciones finales para la alfalfa	111
<b>3-13.</b>	Evaluaciones finales para el fréjol	111
<b>3-14.</b>	pH promedio de los sustratos utilizados en el ensayo	112
<b>3-15.</b>	CE promedio de los sustratos utilizados en el ensayo	112
<b>3-16.</b>	Resultados estadísticos de los parámetros considerados en los tratamientos	113
<b>3-17.</b>	Resultados estadísticos pH y CE de los distintos tratamientos	113

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
2-1.	Principales constituyentes de las aguas servidas	6
2-2.	Ciclo de las aguas servidas	8
2-3.	Producción de lodos durante el tratamiento de las aguas servidas; proceso de lodos activados	10
2-4.	Estimación del Tratamiento de las Aguas Servidas contemplado en el Plan de Saneamiento Hídrico de la Cuenca de Santiago	20
2-5.	Plantas de Tratamiento de la Región Metropolitana para el año 2010	21
2-6.	Métodos de uso y disposición de lodo	24
2-7.	Porcentaje de la producción de lodos empleados en la agricultura en el año 1997 en países de Europa	25
2-8.	Aportes de elementos y materia orgánica contenidos en lodos	57
2-9.	Proyecciones de uso benéfico de lodos en países de Europa para el año 2005	90
2-10.	Proyecciones de uso benéfico de lodos en Estados Unidos de América para el año 2010	91
2-11.	Producción de lodos de la tres principales Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas para el Gran Santiago	92

## RESUMEN

A nivel mundial, la experiencia acumulada por lo menos durante los últimos 30 años indica que existen efectos positivos cuando los lodos se emplean como fertilizante y acondicionador del suelo debido a su alto contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y otros elementos necesarios para el crecimiento de las plantas. Dentro de los principales efectos se encuentran el aporte de macro y micronutrientes para las plantas, los efectos físicos y químicos sobre las propiedades del suelo, y los efectos en la producción de cultivos.

El establecimiento de regulaciones para el empleo de lodo cuando se utilizan en la agricultura ha permitido proteger la salud de las personas y evitar efectos nocivos sobre el medio ambiente. A nivel mundial dos importantes Directivas han servido de referencias, la Directiva 86/278/EEC (*Council Directive 86/278/EEC*) de la Comunidad Europea y la Regulación 503 de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América (40 CFRD Part 503; U.S. EPA, 1993). Algunos de los principales apartados de estas normativas, fundamentalmente aquellos que dicen relación con límites para contenido de microorganismos patógenos, metales en lodo y suelo, y restricciones para la aplicación del lodo, se presentan. Además, junto con éstas, se hace mención a las normativas en Ontario-Canadá, Brasil, México y Chile.

La experiencia mundial expuesta en este trabajo muestra que en Europa y Estados Unidos de América una de las vías más factibles para dar un uso benéfico a los lodos, es su empleo en agricultura. En estos países, concientes de la necesidad de fertilizantes baratos y dar un uso a los lodos, existe gran interés por incentivar el reciclaje de los lodos vía uso benéfico en la agricultura.

En Chile, específicamente en la Región Metropolitana, el tratamiento de las aguas servidas recién está comenzando, con la creación de las Plantas de

Tratamiento de Aguas Servidas El Trebal, La Farfana y Los Nogales de Aguas Andinas S.A. para el año 2009 se estima que estas tres plantas en conjunto producirían del orden de las 100.000 tons ms al año. Una de las principales alternativas y la orientación del Reglamento sobre Manejo de lodos no peligrosos de la CONAMA, es el uso agrícola de lodos. La disponibilidad de suelos agrícolas, la necesidad de reducir los costos de fertilizantes, y ser una alternativa sustentable en el mediano y largo plazo -sustentada por la experiencia de países desarrollados- son algunos de los factores que favorecerían su empleo en la agricultura.

Junto con la revisión bibliográfica se realizó en el marco del proyecto llevado a cabo entre Aguas Andinas S.A. e INIA-CRI La Platina “Valorización Agrícola de Lodos Provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas de Aguas Andinas S.A. como Fertilizante”, ensayos de germinación de 5 especies vegetales de carácter comercial (trigo, maíz, tomate, alfalfa y fréjol) en sustratos que incluyeron suelos de la Región Metropolitana (Suelos Maipo, Los Morros y Chada). Los ensayos contemplaron el empleo de 4 mezclas de sustrato y lodo en relación peso/peso, identificadas como tratamientos: 0% (sin lodo), 25%, 50% y 100%.

Los resultados del ensayo de germinación de semillas indican que existen efectos positivos de la aplicación de lodos. Parámetros como el índice de velocidad de emergencia (IVE) y la germinación de semillas (%) se ven favorecidos cuando los sustratos han sido mezclados con lodo, una de las especies que presentó buenos resultados fue la alfalfa (IVE>3, (%) germinación normal  $\geq$  60%). No obstante, estos efectos dependerían de la especie, dosis de lodo y del tipo de suelo.

## ABSTRACT

The accumulated world wide experience during the last three decades has showed positives effects in the application of the sewage sludge as fertilizer and soil conditioning material due to high content of organic matter, nitrogen, phosphorus and another the necessary elements to growing the plants. The main effects are related to the macro and micronutrients aport to the plants, effects on physical and chemical soil properties, and effects in the crops production.

The regulation establishment for the use of sewage sludge in the agricultural has permitted human health and animal protection, and prevents harmful effects on environmental. A world wide, two main directives has been as important background, the Council Directive 86/278/ECC the European Community and the Code Federal Regulation Title 40 Parts 257, 403 and 503 referred as Regulation 503 ( 40 CFRD, Reg 503) the US Environmetal Agency (U.S. EPA, 1993). Some of the main normatives is presented, limits for pathogen, metals in soil and sewage sludge, and restrictions for application of sewage sludge to agricultural land. Also, the normatives the Canadian-Ontario, Brasilian, Mexican and Chilean review was done.

The world experience showed in this works has indicated the agricultural application as major way for benefics use to sewage sludge in Europe and United Stated of America. Also, the expectatives for sewage sludge is its recycling.

In Metropolitan Region, Chilean, The Trebal, Farfana and Nogal from the Aguas Andinas S.A. are the first wastewater treatment plants. It has been estimated a generation of around 100.000 dry tons of the sewage sludge by 2009. CONAMA regulation aims on the harmfules management the sewage sludge is the benefics use of it. The disponibility the agricultural soils, the fertilizer need, and alternative sustainable

in the median and long period are some of beneficial factors of the sewage sludge agricultural application.

In addition to the bibliographic review a several germinations test had been done in the framework to the Project "Sewage Sludge Agricultural Valorization from the Wastewater Treatment Plant the Aguas Andinas S.A. as Fertilizer". The germination test considered the following species: wheat, corn, alfalfa, tomato and kidney bean. Those were cultivated on substrates which included Metropolitan Region soils (Maipo, Morros, and Chada soils). The tests included the use of 4 w/w ration soils/sewage sludge mixtures, they were identified as: 0% (untreated soil), 25%, 50% and 100%.

The results of the tests indicate positive effects from the sewage sludge additions. The parameter such as germination velocity and yield crop is better in treated soils. The alfalfa was the species with better result (IVE>3, (%) germination  $\geq 60\%$ ). However these effects would depend with sewage sludge load, soils and crop species.

# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes Generales

El agua dulce es un recurso *escaso*; hoy en día, en el ámbito mundial existe gran preocupación por la gestión de este recurso. No obstante su importancia, su valorización económica, social y ambiental recién está comenzando. El consumo de grandes cantidades de agua fresca y el impacto sobre el medio ambiente producto del vertido de aguas servidas<sup>1</sup> y residuales industriales ha causado la necesidad de tratarlas antes de su descarga en cuerpos de agua.

Cuando se tratan las aguas residuales de origen doméstico e industriales, se obtiene por un lado, el *agua tratada* y, por otro, un subproducto o residuo líquido, semisólido o sólido conocido con el nombre de “*lodo*” (U.S. EPA, 1995). El agua tratada, vuelve a cuerpos receptores o bien, puede ser empleada como agua para riego u otros fines. Sin embargo, el tratamiento de las aguas servidas trae consigo un nuevo desafío que consiste en dar una salida a estos a través de alternativas socioeconómicas y ambientales sustentables.

En los países desarrollados como Estados Unidos, Canadá, Alemania, Francia y España, el porcentaje de tratamiento de las aguas servidas es alto, con una experiencia acumulada de por lo menos 30 años. La experiencia de estos países en tratamientos de aguas servidas, nos permite contar hoy en día con información que facilita su gestión. En Europa y Estados Unidos de América los lodos cuando se encuentran estabilizados y su composición lo permite, pueden ser aprovechados a través de su utilización en la

---

<sup>1</sup> También se denominan aguas residuales domésticas

agricultura o bien, son incinerados o dispuestos en vertederos (U.S. EPA, 1995; EC, 2001).

Por su variado contenido de elementos, los lodos pueden convertirse en una fuente importante de elementos fertilizantes para la agricultura, aportando con materia orgánica y fitonutrientes a suelos y plantas, entre otros. No obstante, los lodos pueden presentar patógenos, metales pesados y compuestos orgánicos.

Para una adecuada gestión y valorización agrícola de lodos de plantas de tratamientos de aguas servidas es importante considerar entre otros aspectos, el origen y composición de los lodos, normativas vigentes que regulan su uso, alternativas diferentes al agrícola y, los impactos sociales y ambientales de su empleo.

En Chile, Aguas Andina S.A. ha iniciado la construcción y puesta en marcha de modernas Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS<sup>2</sup>) en el Gran Santiago (El Trebal, La Farfana, Los Nogales) y periferia en la Región Metropolitana. Con estas, pretende tratar la totalidad de las aguas servidas en el año 2010. Sin embargo, el lodo generado aun no tiene un reuso definido.

Por lo cual, Aguas Andinas S.A. a través del proyecto “Valorización Agrícola de Lodos Provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas de Aguas Andinas S.A. como Fertilizante” esta evaluando las alternativas más viables para el reuso de los lodos, probando la efectividad de lodos como fertilizante, aprovechando sus nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, para el crecimiento de las plantas.

Consecuentemente, es importante que la gestión de lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas en Chile, aproveche la experiencia adquirida en los países desarrollados. Es relevante, entonces, la revisión de la experiencia y estado actual mundial de este tema.

---

<sup>2</sup> También se emplea la sigla PTAR aludiendo a una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

El presente trabajo de titulación consiste en la revisión de las diferentes alternativas existentes sobre manejo y uso de lodos; regulaciones extranjeras y nacionales e impactos de lodos en la agricultura.

Este seminario de titulación, además, considera un estudio preliminar de pruebas de germinación de semillas, que forma parte del Proyecto “Valorización Agrícola de Lodos Provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas de Aguas Andinas S.A. como Fertilizante”, con el objeto de determinar la posible fitotoxicidad de lodos actualmente producidos en Región Metropolitana.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivos Generales**

- Generar una base de información, sobre el uso de lodos en países desarrollados, específicamente sobre la gestión agrícola de lodos procedentes de plantas de tratamientos de aguas servidas, y evaluar la posible fitotoxicidad de lodos producidos en la Región Metropolitana, mediante pruebas de germinación con especies anuales: trigo, maíz, tomate, alfalfa y fréjol, para su empleo como sustrato.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Revisión bibliográfica, sobre la experiencia de uso de lodos en los siguientes países: Estados Unidos de América, el Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte, el Reino de España, Francia, la Confederación Suiza, Alemania, Brasil y México.
- Recopilar información sobre disposiciones legales que regulan el uso de lodos cloacales en la agricultura.
- Revisión bibliográfica, sobre la experiencia de uso de lodos en los siguientes rubros: frutales mayores (vides, carozos, prunus), hortalizas, cereales, praderas, otros.
- Generación de un indicador rápido de fitotóxicidad de sustrato; determinación del índice de velocidad de emergencia (IVE) y porcentaje de germinación normal de semillas.

## CAPITULO 2

### REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

#### 2.1. Antecedentes Generales sobre Aguas Servidas y Lodos

##### 2.1.2. Origen y composición

Las aguas servidas o residuales de origen domiciliario, son una mezcla de excretas humana y animales, aguas negras resultantes del lavado y cocina (sustancias que componen productos de aseo y limpieza, restos vegetales y animales), y las aguas de lluvia e infiltraciones (Bitton, 1994; U.S. EPA, 1995).

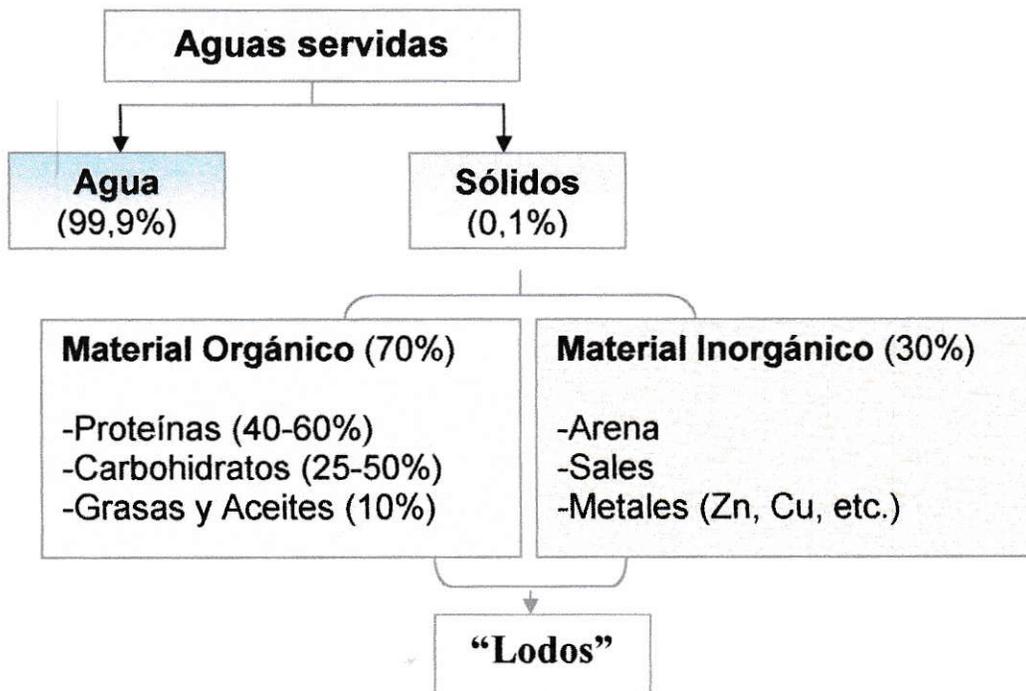
Todo alimento digerido, habitualmente, contribuye al contenido de sustancias de las aguas servidas a través de las excretas y orinas. La producción de excretas per capita por día puede variar entre 100-500 gramos en masa húmeda y entre 1-1,3 litros de orina (Bitton, 1994). Algunas características de estos residuos humanos se muestran en la **Tabla 2-1**.

**Tabla 2-1.** Composición de excretas y orina humana (Bitton, 1994)

Componente	Excretas	Orina
Cantidad (sólido seco) por persona por día	30-60 g	50-70 g
Contenido de Humedad	70-85%	93-96 %
Composición aproximada (% masa seca) de materia orgánica	88-97	65-85
Nitrógeno (N)	5,0-7,0	15-19
Fósforo (como P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	3,0-5,4	2,5-5,0
Potasio (como K <sub>2</sub> O)	1,0-2,5	3,0-4,5
Carbono (C)	44-55	11-17
Calcio (como CaO)	4,5	4,5-6,0
Relación C/N	6-10	1
Contenido DBO <sub>5</sub> por persona por día (g)	15-20 g	10 g

La composición de las aguas servidas esta determinada por el tamaño de la comunidad, el clima, las costumbres y el nivel de progreso (economías domésticas y desarrollo industrial). Las industrias metalúrgicas, de alimentos o aquellas que producen colorantes, que vierten sus aguas residuales al alcantarillado sin tratamiento previo, aportan con constituyentes que pueden ser de difícil biodegradación y tóxicos, como metales pesados y compuestos orgánicos.

En la **Figura 2-1** se muestran los principales constituyentes de las aguas servidas. Otros constituyentes menos abundantes son los compuestos orgánicos y los microorganismos. Parte de la fracción sólida de las aguas servidas tiene como destino conformar el lodo. La **Tabla 2-2** muestra la composición típica de un agua servida.



**Figura 2-1.** Principales constituyentes de las aguas servidas

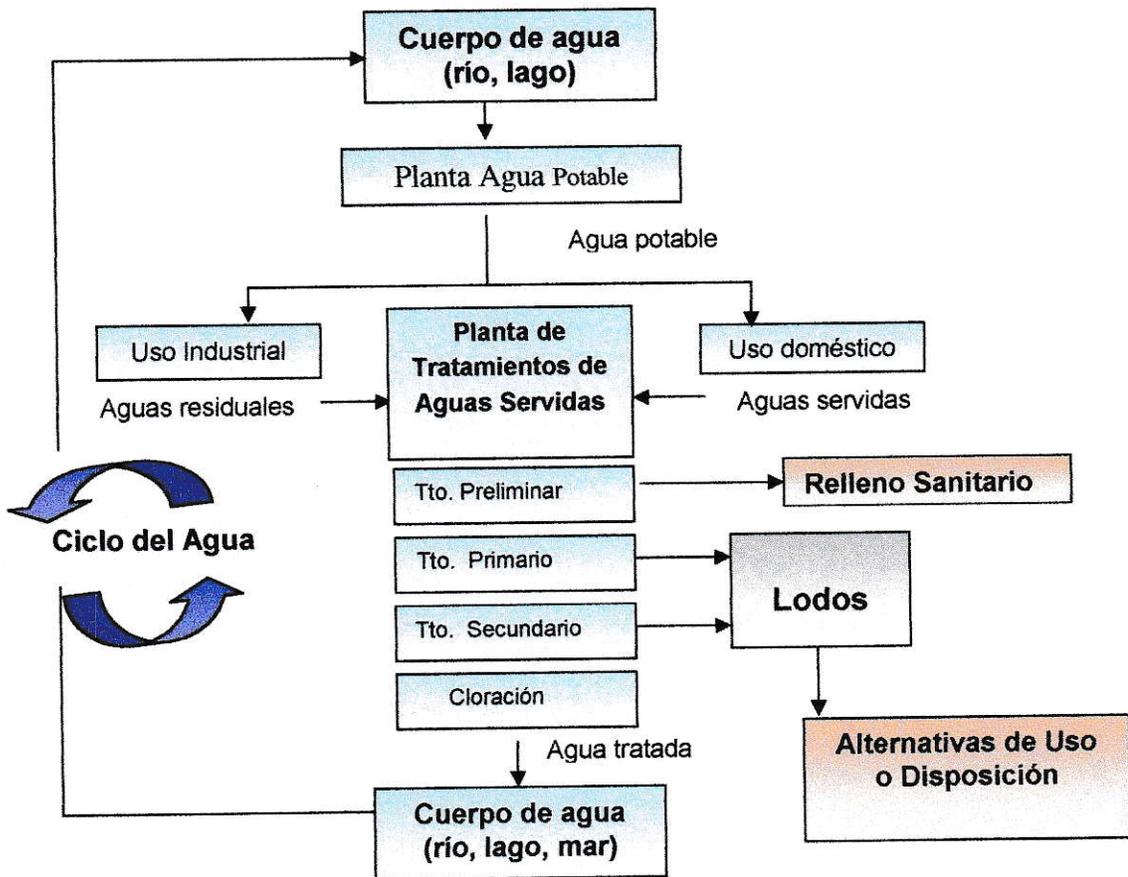
**Tabla 2-2.** Composición típica de un agua servida (Araya, 1999)

Constituyente	Concentración (mg/L)		
	Fuerte	Media	Débil
Sólidos, en total	1200	700	350
Disueltos, en total	850	500	250
Fijos	525	300	145
Volátiles	325	200	105
Suspendidos, en total	350	200	100
Fijos	75	50	30
Volátiles	275	150	70
Sólidos sedimentables (ml)	20	10	5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), 5 días a 20°C	300	200	100
Carbono Orgánico Total (COT)	300	200	100
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	1000	500	250
Nitrógeno (total como N)	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoníaco libre	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo (total como P)	20	10	6
Orgánico	5	3	2
Inorgánico	15	7	4
Cloruros	100	50	30
Alcalinidad (como CaCO <sub>3</sub> )	200	100	50
Grasa	150	100	50

Para mantener la calidad de los cuerpos receptores de aguas servidas, resulta necesario antes de su vertido tratarlas. Ello permitirá reducir el impacto sobre su composición, mantener niveles adecuados de calidad de las aguas para la mantención de vida, consumo y recreación.

### 2.1.3. Tratamiento de Aguas Servidas y Origen de los Lodos

El tratamiento de las aguas servidas es llevado a cabo en Estaciones o Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas. El objetivo estas, es remover constituyentes de las aguas servidas manteniendo la calidad del efluente requerida para ser descargado en cuerpos de agua naturales o bien para otros usos, como el riego (U.S. EPA, 1995). La **Figura 2-2** muestra el tratamiento y destino de las aguas servidas.



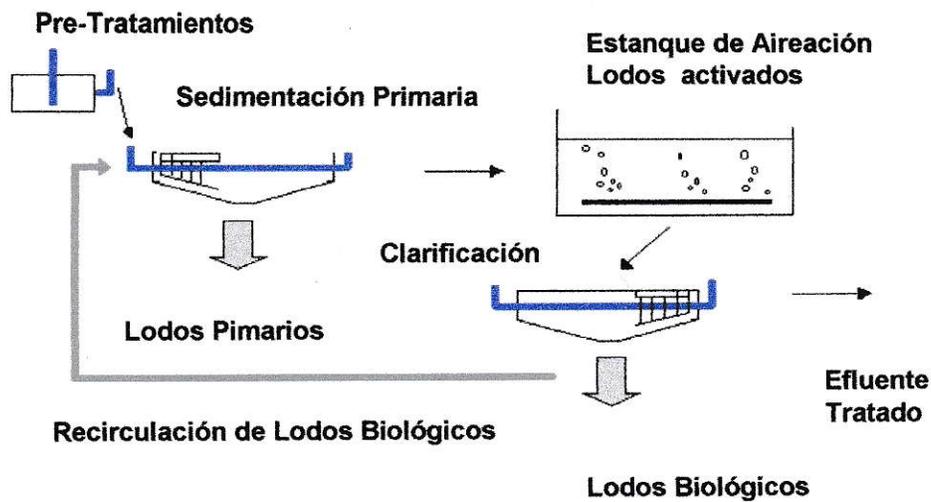
**Figura 2-2.** Ciclo de las aguas servida

Cuando se determina tratar las aguas servidas de una localidad cualquiera, la caracterización del efluente es fundamental. Las características físicas, químicas y biológicas del agua servida, así como, el posterior uso al agua tratada, permiten determinar el tipo de tratamiento a adoptar.

Los tratamientos de las aguas servidas se pueden agrupar, fundamentalmente, en procedimientos de **depuración biológica y fisicoquímicos** (U.S. EPA, 1999a; EC, 2001; NAP, 1996). Las etapas fundamentales de estos procedimientos son: preliminar, primario, secundario y terciario.

El **tratamiento preliminar** consiste en la eliminación de las aguas residuales de todo el material grueso, como restos orgánicos, de árboles, plásticos y materiales de construcción. Esto se logra comúnmente, por medio de la instalación de rejillas y tamices al ingreso de las aguas servidas a la planta de tratamiento. Luego, en forma complementaria, estanques desarenadores permiten -por efecto de la gravedad- la remoción de arena y arcilla (U.S. EPA, 1999a; Araya, 1999). En el **tratamiento primario**, se remueven sólidos de tamaño entre 0,05 y 1,0 mm, por efecto de la gravedad. El tratamiento siguiente, **secundario** o también conocido como **tratamiento biológico**, permite la remoción de la materia orgánica que no se deposita con el tratamiento primario. Pueden emplearse tecnologías ya sea de carácter físico, químico o biológico. Frecuentemente, cuando se tratan las aguas servidas se utilizan tratamiento biológicos (Yagüe et al., 1987; U.S. EPA, 1999a; Bitton, 1994). Las unidades de procesos biológicos son variadas, dentro de estas se encuentran: estanques de lodos activados, lagunas de estabilización y zanjas de oxidación.

Dentro de los tratamientos tipo biológico, uno de los más utilizados es el de los lodos activados (ver **Figura 2-3**). 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.



**Figura 2-3.** Producción de lodos biológicos durante el tratamiento de las aguas servidas; proceso de lodos activados (Bossche, 2002)

El proceso de lodos activados, generalmente es llevado a cabo en un reactor aeróbico, donde las aguas servidas y los microorganismos permanecen en contacto durante varias horas. La agregación de sólidos suspendidos en las aguas servidas, permite la formación de flóculos que proporcionan la superficie para la acción de 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 (masa de microorganismos), mientras que, el excedente debe ser eliminado (Bitton, 1994).

La eficiencia en remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en los procesos de lodos activados convencionales oscila entre 75 y 95 %, en sólidos suspendidos entre 85-95 % y en coliformes fecales entre 90-99% (Ortega, 1985).

Otros procesos biológicos de depuración basados en Ortega (1985), son los siguientes:

*Lagunas de estabilización:* son estructuras de tierras con o sin impermeabilización, expuestas al sol y aire. En las lagunas, la estabilización de las aguas servidas se realiza vía procesos de autodepuración que involucran simbiosis de algas y bacterias bajo condiciones favorables de luz solar. Dependiendo del proceso biológico que ocurre en las lagunas estabilización, estas pueden ser aeróbicas, anaeróbicas y facultativas.

- Laguna aeróbicas: son aquellas que trabajan en presencia de oxígeno en todo el volumen de la laguna. Su profundidad varía entre 20 y 30 cm, con un periodo de retención de 2 a 6 días. La remoción de DBO obtenida en este tipo de laguna varía entre 80-95%.
- Lagunas anaeróbicas: operan en ausencia de oxígeno. Su profundidad varía entre 2,4-3,0 m con un periodo de retención de 30 a 50 días. La remoción de DBO varía entre 50-70%.
- Lagunas facultativas: son aquellas que presentan condiciones aeróbicas en la superficie y anaeróbicas en el fondo. La profundidad de estas lagunas varía entre 0,6 y 1,5 m, con periodos de retención entre 7-30 días. La DBO removida varía entre 75-80%.

*Zanjas de oxidación:* constituye una variante de los sistemas de lodos activados. El periodo de aireación es comúnmente mayor que en los lodos activados convencionales, la nitrificación se aproxima a estabilización total. Los lodos alcanzan una alta estabilización, no necesitando más tratamiento que el secado natural.

Además, de las aguas tratadas y lodos en el tratamiento biológico, la degradación de sustancias orgánicas genera gases como CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en el tratamiento tipo

aeróbico, y mayoritariamente  $\text{CH}_4$  cuando se trata de tratamiento anaeróbico (Bitton, 1994; Araya, 1999).

Cuando se quiere obtener aguas de mejor calidad, se realiza un **tratamiento terciario**, que 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. Esta desinfección corresponde a una cloración y es una fase que no conduce a generar lodos.

Los diferentes procesos involucrados al tratar las aguas servidas, tienden a remover diferentes rangos de tamaños de partículas y constituyentes afectando significativamente la naturaleza del lodo producido. Los elementos que no se transforman en las etapas del tratamiento de las aguas servidas, principalmente los de tipo inorgánico como metales y limo tienden a acumularse en los lodos.

Por lo general, el grado de tratamiento de las aguas servidas afecta el volumen del lodo generado. Un alto nivel de tratamiento puede incrementar la concentración de ciertas sustancias que pueden ser contaminantes en los lodos. También, en los procesos de tratamiento de aguas servidas la adición de químicos para la precipitación de sólidos, como cloruro férrico, hidróxidos de aluminio o polímeros, puede incrementar la concentración de estos químicos en los lodos (U.S. EPA, 1999a). En el tratamiento de las aguas servidas se generan los siguientes tipos de lodos:

- Lodos primarios: lodos producidos por el tratamiento primario usualmente contienen de un 3 a un 7% de sólidos; se caracterizan por presentar un color gris, aspecto grasiento y naturaleza fibrosa y burda (U.S. EPA, 1999a).

- Lodos secundarios: los lodos generados por este tratamiento usualmente tienen un bajo contenido de sólidos (0,5 a 2%), se caracterizan por apariencia oscura, café o negro dependiendo del tratamiento (U.S. EPA, 1999a; Araya, 1999).
- Mezcla de lodos, se obtienen partir de los dos tipos de lodos anteriores, primarios y secundarios.

Además, existe el lodo terciario, pero este menos habitual; se genera cuando las aguas servidas son tratadas para eliminar nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. La **Tabla 2-3** muestra algunos los constituyentes encontradas habitualmente en lodos crudos, sin tratamiento.

**Tabla 2-3.** Composición química típica y propiedades de lodos digeridos y sin tratar (Araya, 1999; Ortega, 1985)

Composición	Lodo primario sin tratamiento		Lodo primario digerido		Lodos activados
	Rango	Valor Típico	Rango	Valor Típico	Rango
Sólidos totales (ST), %	2,0-8,0	5,0	6,0-12,0	10,0	0,83-1,16
Sólidos Volátiles (% de ST)	60-80	65	30-60	40	59-88
Aceites y grasas (% de ST)	6-3	-	5-20	18	-
Proteínas (% de ST)	20-30	25	15-20	18	32-41
Nitrógeno(N,% de ST)	1,5-4	2,5	1,0-6,0	3,0	2,4-5,0
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , % de ST)	0,8-2,8	1,6	1,5-4,0	2,5	2,8-11,0
Potasio (K <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , % de ST)	0-1	0,4	0,0-3,0	1,0	0,5-0,7
Celulosa (% de ST)	8,0-15,0	10,0	8,0-15,0	10,0	-
Hierro (no como sulfuro)	2,0-4,0	2,5	3,0-8,0	4,0	-
Silica (SiO <sub>2</sub> , % de ST)	15,0-20,0	-	10,0-20,0	-	-
pH	5,0-8,0	6,0	6,5-7,5	7,0	6,5-8,0
Alcalinidad (mg/L como CaCO <sub>3</sub> )	500-1.500	600	2.500-3.500	3.000	580-1.100
Contenido de Energía Kcal/kg)	3.792-5.568	4.224 (a)	1.512-3.792	2.160(b)	4.445-5.556

(a) Basado en el 65% de la materia volátil

(b) Basado en el 40% de la materia volátil

## • **Composición**

La composición de los lodos esta determinada por el origen de las aguas servidas domiciliarias (economías domésticas) y el tipo de tratamiento al que es sometido (U.S. EPA, 1999a; EC, 2001; Yagüe et al., 1987).

Cada tratamiento incide en la composición final de lodos, la gran variedad de compuestos encontrados en los lodos tratados pueden ser agrupados en orden de mayor a menor abundancia en compuestos orgánicos, compuestos inorgánicos, y microorganismos (U.S. EPA, 1995; Henry et al., 1999; EC, 2001).

Algunos de los principales constituyentes de los lodos dados a conocer en reportes y guías de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América (U.S. EPA, 1995), de Canadá (CHHIA, 1999; WEAO, 2001) y de La Comunidad Europea (EC, 2001), entre otros, son los siguientes:

### **a. Compuestos Orgánicos**

Los compuestos orgánicos pueden ser divididos en no tóxicos o tóxicos. Los primeros son los más abundantes en el lodo, comprenden materiales de origen vegetal y animal, como proteínas, aminoácidos, aceites y grasas. Estos, se encuentran en la materia fecal, también en residuos de las industrias de aves (pollos) y alimentos. Estos compuestos pasan a conformar la materia orgánica de los lodos, el tipo de tratamiento incide directamente en la composición de materia orgánica. El contenido de materia orgánica por ejemplo para el lodo doméstico urbano tratado aeróbicamente varia entre un 60-70% ms, mientras que para el lodo de digestión anaeróbica es de 40-50% ms.

Los compuestos orgánicos tóxicos que se pueden encontrar en el lodo son muy diversos, estos incluyen: hidrocarburos aromáticos policiclicos (HAPs, comúnmente entre 1-10 mg/kg ms), pesticidas, compuestos alifáticos halogenados, compuestos

bifenilos policlorinados (PCBs, 1-20 mg/kg ms), clorobenzenos (comúnmente <0,1-50 mg/kg ms), compuestos orgánicos volátiles (VOCs), fenoles (0-5 mg/kg ms), dioxinas (policlorinados *para*-dibenzodioxinas, PCDD) y furanos ( muy bajo < pocos ug/kg ms).

Compuestos como ftalatos, surfactantes<sup>3</sup>, clorobenzenos y algunos HAPs se encuentran presentes en lodos estabilizados en concentraciones sobre 10 mg/kg. Los ftalatos son usados comúnmente adhesivos y lubricantes, se han encontrado en altas concentraciones.

### **b. Compuestos Inorgánicos**

Los compuestos más comunes de esta categoría en orden decreciente (en cuanto a abundancia) son el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y metales pesados. El contenido de nitrógeno en el lodo antes de su estabilización se encuentra mayoritariamente en formas orgánicas como proteínas y aminoácidos; sin embargo, después de la estabilización prevalecen las formas inorgánicas como nitrato, nitrito (estabilización aeróbica) y amonio (estabilización anaeróbica). Comúnmente el contenido de nitrógeno en los lodos varía entre 1 a 6 % ms ( NAP, 1996; Benckiser and Simarmata, 1994). El fósforo en los lodos se encuentra principalmente en las formas inorgánicas, estas prevalecen en el lodo crudo y estabilizado; el contenido típico en lodos se encuentra entre 0,8 y 6,1% ms (NAP, 1996; Benckiser and Simarmata, 1994).

La abundancia del potasio, calcio y magnesio es inferior al 1% ms en el lodo. Sin embargo, cuando el lodo ha sido estabilizado con limo, la concentración de calcio puede alcanzar el 25% ms en el lodo. En la **Tabla 2-4** muestra el contenido de macroelementos encontrados en lodos.

---

<sup>3</sup> Sustancia que modifica la tensión superficial del agua

**Tabla 2-4. Macroelementos en lodos**

Elementos	Rocha y Shirota (1999)(a) (% ms)	Sullivan (1998)(b) Rango (% ms)	
		Bajo	Alto
Nitrógeno	4,5-6,5	3	8
Fósforo	2,0-4,0	1,5	3,0
Potasio	0,3-0,4	0,1	0,6
Calcio	4,0-5,0	1,0	4,0
Magnesio	0,2-0,5	0,4	0,8
Azufre	-	0,6	1,3

(a) Brasil

(b) Estados Unidos de América

El contenido de metales pesados en los lodos es variable (ver **Tabla 2-5**), por lo general su presencia en los lodos se debe mayoritariamente al aporte de metales contenidos en efluentes industriales que son vertidos a las alcantarillas. Existe evidencia sobre como el pretratamiento de las aguas residuales industriales permite reducir la carga de metales trazas y, por tanto, la disminución del contenido de metales encontrados en los lodos.

**Tabla 2-5.** Utilización industrial y contenido de metales en lodos

<b>Elementos</b>	<b>Utilización Industrial (a)</b>	<b>Concentración Promedio (mg/kg ms)(b)</b>
<b>As</b>	Vidrios, cerámicas, barnices, pesticidas, fertilizantes.	9,9
<b>Cd</b>	Revestimientos metálicos, baterías, pesticidas, productos contaminantes a base de Zn, colorantes.	6,94
<b>Cr</b>	Revestimientos metálicos, colorantes, industrias procesadoras de cemento, curtiduría, material fotográfico.	119
<b>Cu</b>	Plomería (tubería de cobre), fertilizantes, pesticidas.	741
<b>Hg</b>	Barnices, medicinas.	5,2
<b>Mo</b>	Lubricantes, cerámicas.	9,2
<b>Ni</b>	Revestimientos metálicos, tejidos sintéticos, conservas, pinturas.	42,7
<b>Pb</b>	Gasolina con plomo, fertilizantes fosfatados y pinturas.	134,4
<b>Se</b>	Material fotográfico, gomas, pesticidas.	5,2
<b>Zn</b>	Revestimientos metálicos, eléctricas, gomas, tejidos sintéticos, medicinas.	1.202

(a) Cervantes y Sánchez (1999)

(b) U.S. EPA (1995)

### **c. Microorganismos**

Los lodos se caracterizan por una gran variedad de microorganismos. Gran parte de estos microorganismos se encuentran presentes en el ser humano en concentraciones tolerantes para la vida; otros, son aportados por residuos orgánicos de origen vegetal y animal. Mayoritariamente, los organismos que se pueden encontrar en los lodos son:

- Parásitos: gran variedad de los parásitos que se pueden encontrar en el lodo está bajo la forma de huevos, estos incluyen helmintos como *Ascaris ssp.* y *Tenia ssp.*

- Virus: el lodo crudo puede contener 1.000 virus/g; la estabilización puede reducirlos en un factor de 10. Entre muchos, se encuentran Enterovirus, virus Hepatitis A y Rotavirus.
- Bacterias: el genero de bacterias contenidas en los lodos es variada; dos de los generos que habitualmente se encuentran son el entérico, las más comunes son las Coliformes, y el genero Streptococcus, como Micobacterias y Listeria. El número de bacterias es variable, en general las coliformes fecales se encuentran entre  $10^6$ - $10^7$  g /g masa seca; la Salmonella spp. varía entre  $10^2$ - $10^3$ /g masa seca. En la **Tabla 2-6** se muestra el contenido de microorganismos en distinto tipos de lodo.

**Tabla 2-6.** Contenido de patógenos en distintos tipos de lodos\*

Microorganismos	Primario	Secundario	Digerido Anaeróbicamente	Digerido Aeróbicamente
Coliforme fecal NMP/g ST	$1,2 \times 10^7 - 6,1 \times 10^7$	$2,0 \times 10^6 - 1,6 \times 10^7$	$1,0 \times 10^4 - 8,0 \times 10^5$	$5,0 \times 10^4 - 3,8 \times 10^6$
Estreptococos fecales	$2,6 \times 10^6 - 4,0 \times 10^7$	$7,2 \times 10^5 - 5,5 \times 10^6$	$2,0 \times 10^4 - 4,3 \times 10^5$	$3,0 \times 10^4 - 2,2 \times 10^6$
Salmonella sp. NMP/g ST	17 - 1.000	200 - 750	4 - 208**	80 - 3.804**

\* Araya (1999)

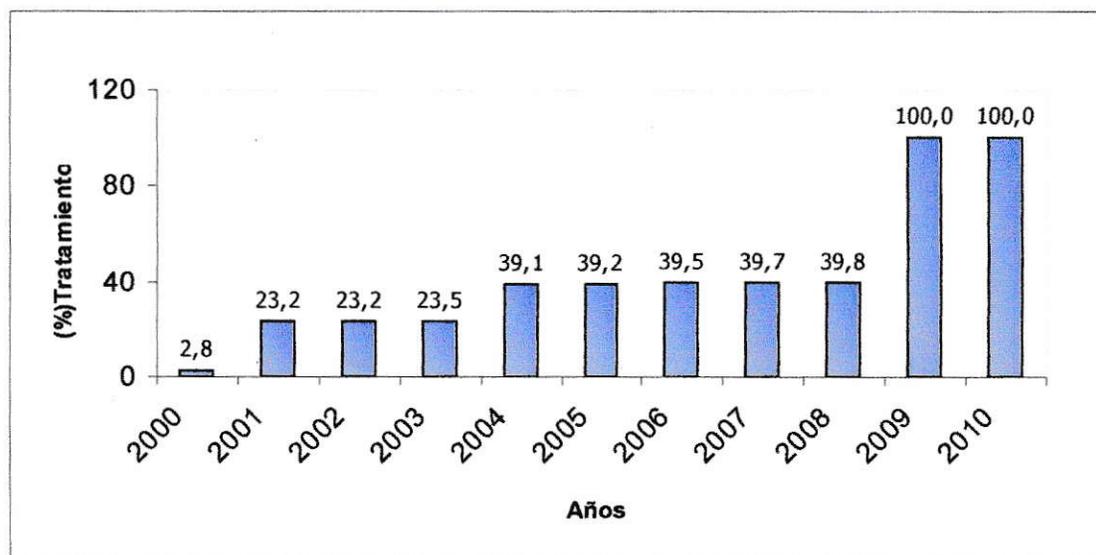
\*\* Resultados expresados en NMP/ 4g ST (ST: sólidos totales)

### 2.1.5. Chile: Región Metropolitana

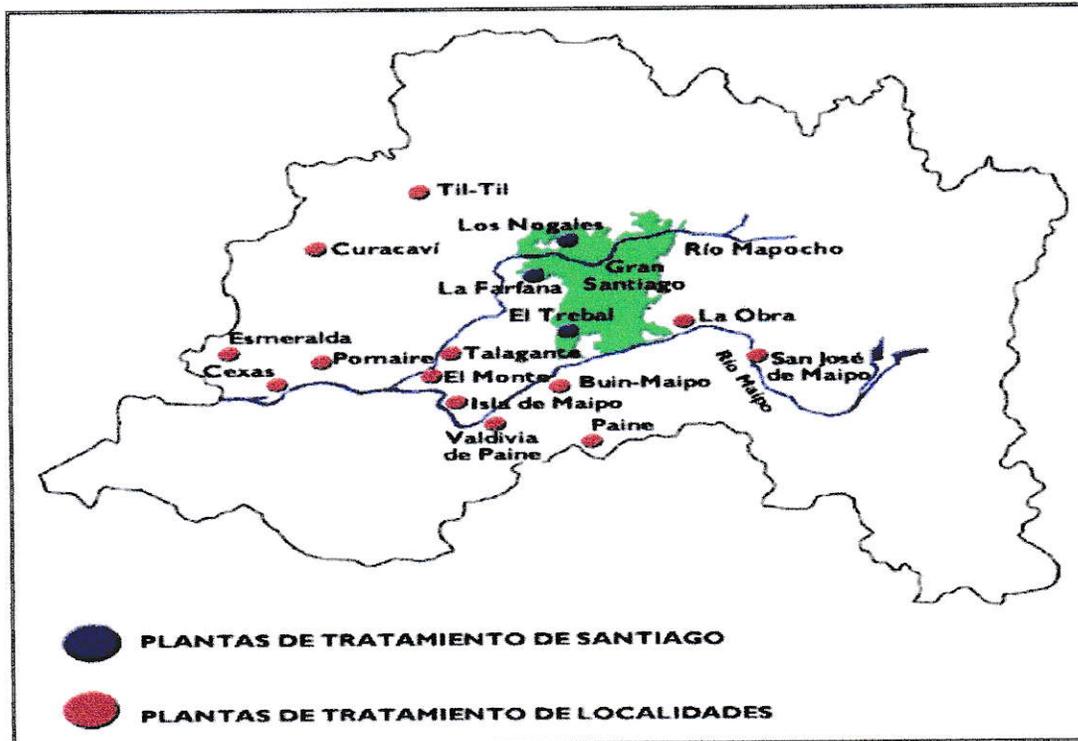
En la Región Metropolitana que concentra parte importante de la población de nuestro país y que vierte casi la totalidad de sus aguas servidas a cauces de agua (principalmente Zanjón de la Aguada y río Mapocho, que reciben entre más del 60% y 35% respectivamente), se pretende mejorar el porcentaje del tratamiento de las aguas servidas dentro de los próximos 10 años.

Consecuentemente, autoridades de nuestro país han puesto en marcha al Plan de Saneamiento Hídrico de la Cuenca de Santiago, que permitirá sanear la totalidad (100%) de las aguas servidas de la Región Metropolitana. Para ello, ya esta en funcionamiento una de las tres plantas en el Gran Santiago, La PTAS **El Trebal** con una capacidad de tratamiento de 4,4 m<sup>3</sup>/s, sumándose próximamente la PTAS **La Farfana**, en tanto, que comenzó a construirse en el año 2001, esta planta tratará 8,8 m<sup>3</sup>/s y estará operando en enero del año 2004. Será la más grande de América Latina y una de las más grandes del mundo. Luego en enero del año 2009, iniciará sus actividades la PTAS **Los Nogales**, esta tendrá una capacidad de 6,6 m<sup>3</sup>/s (Aguas Andinas S.A., 2002; CONAMA, RM).

Una vez que se encuentren en funcionamiento estas tres plantas, se podrá tratar el 100% de aguas residuales de origen doméstico del Gran Santiago. La **Figura 2-4** muestra la estimación del Tratamiento de las Aguas Servidas contemplado en el Plan de Saneamiento Hídrico de la Cuenca de Santiago y la **Figura 2-5** las plantas para el Gran Santiago (3) y del sector periférico (13) en la Región Metropolitana.



**Figura 2-4.** Estimación del Tratamiento de las Aguas Servidas contemplado en el Plan de Saneamiento Hídrico de la Cuenca de Santiago ( Aguas andinas S.A., 2002)



**Figura 2-5.** Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas de la Región Metropolitana para el año 2010 (Aguas Andinas S.A., 2002)

A continuación se describe el funcionamiento de la nueva Planta de Tratamiento de Aguas Servidas El Trebal, que ha entrado en operación en Noviembre del año 2001 en la Región Metropolitana.

▪ **Planta de Tratamientos de Aguas Servidas El Trebal**

Ubicada en la localidad de Padre Hurtado de la Región Metropolitana se encuentra la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas El Trebal que cuenta con tecnología de lodos activados convencionales y digestión mesofílica de lodos.

A 3 km de la planta, en la cámara de descarga confluyen los colectores de Maipú y Maipo-San Bernardo. A partir de este punto, un emisario canaliza el agua hasta las rejas de entrada.

El caudal promedio de la planta es de 4,4 m<sup>3</sup>/s, con una capacidad hidráulica de 7,5 m<sup>3</sup>/s. En la etapa preliminar al tratamiento, las rejas de la entrada permiten la separación mecánica de objetos y materiales que pueda llevar el caudal. En el tratamiento primario, el agua llega gravitacionalmente hasta los decantadores, 6 en total, donde más del 50 % de los sólidos contenidos en el agua se deposita y acumula en el fondo, aquí se generan los primeros lodos del proceso los que serán bombeados hasta los espesadores.

Las aguas decantadas confluyen a una cámara de distribución, para ser conducidas a estanques de aireación, ocho en total, donde es llevado a cabo, el tratamiento biológico, del tipo **lodos activados**. Posteriormente, el agua es dirigida y distribuida en seis decantadores secundarios, donde se produce la separación del agua tratada del lodo biológico. El agua tratada en esta etapa tiene un contenido de coliformes fecales de 100.000 NMP por mililitro. Los lodos, captados en los clarificadores secundarios son en parte, recirculados a los estanques de aireación, mientras que el excedente es conducido a mesas espesadoras.

En la etapa final del proceso, el agua tratada con contenido de sólidos de 35 miligramos por litros, pasa a un estanque de cloración, donde por un periodo medio de 30 minutos, el agua es desinfectada con cloro gaseoso, antes de ser vertida al río Mapocho. El contenido de coliformes fecales del efluente de la planta es inferior a 1.000 NMP por mililitro, que es la cifra máxima establecida por la norma chilena sobre agua apta para riego.

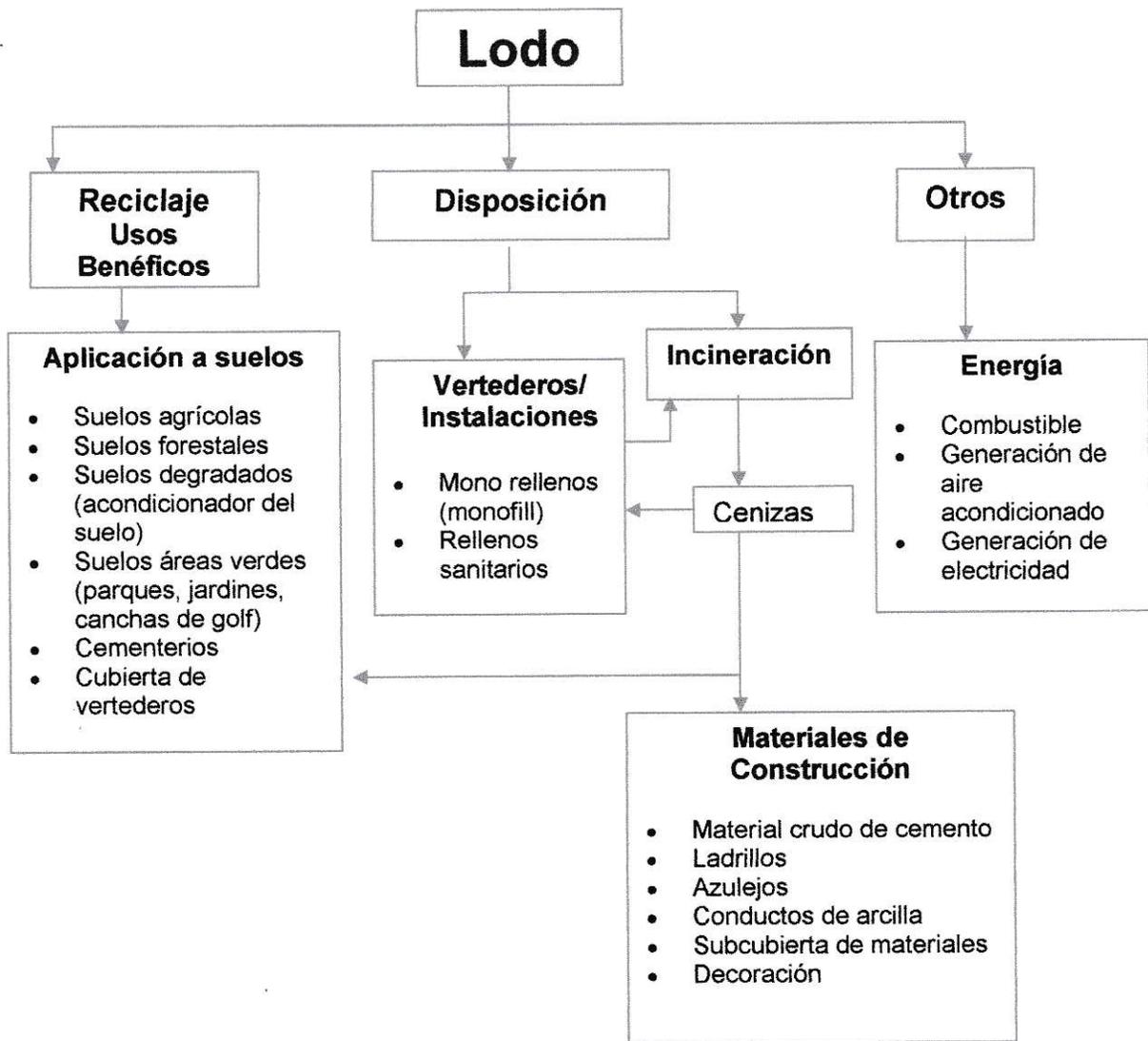
## **2.2. Posibles Destinos Finales de Lodos**

### **2.2.1. Principales Vías de Uso y Disposición de Lodos**

Existen formas de eliminación de lodos que permiten o no obtener beneficios; las primeras son calificadas como métodos de uso (reuso) o reciclaje, por el contrario, los métodos de disposición de lodos son aquellos que tienen por finalidad evitar o minimizar cualquier daño ambiental que se pueda producir, renunciando al aprovechamiento parcial o total de los lodos (U.S. EPA, 1995; EEA, 1997; CONAMA, 2001a).

Dentro de los métodos de uso de lodo tradicionales en Europa y Estados Unidos de América se encuentra la utilización en la agricultura, silvicultura, restauración de suelos degradados, aplicación en áreas verdes y como cubierta en vertederos; por su parte, los métodos de disposición incluyen los vertederos, la incineración y el vertido al mar (U.S EPA, 1999a; Renne, 2000; EC, 2001). Esta última práctica, ha sido prohibida a nivel mundial a partir del año 2000 producto del daño que genera al ambiente acuático - flora y fauna- y al ser humano.

La **Figura 2-6** muestra las diferentes vías de uso y disposición lodos. 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. Otras alternativas del uso de los lodos, son su empleo como combustibles y en la generación de energía.

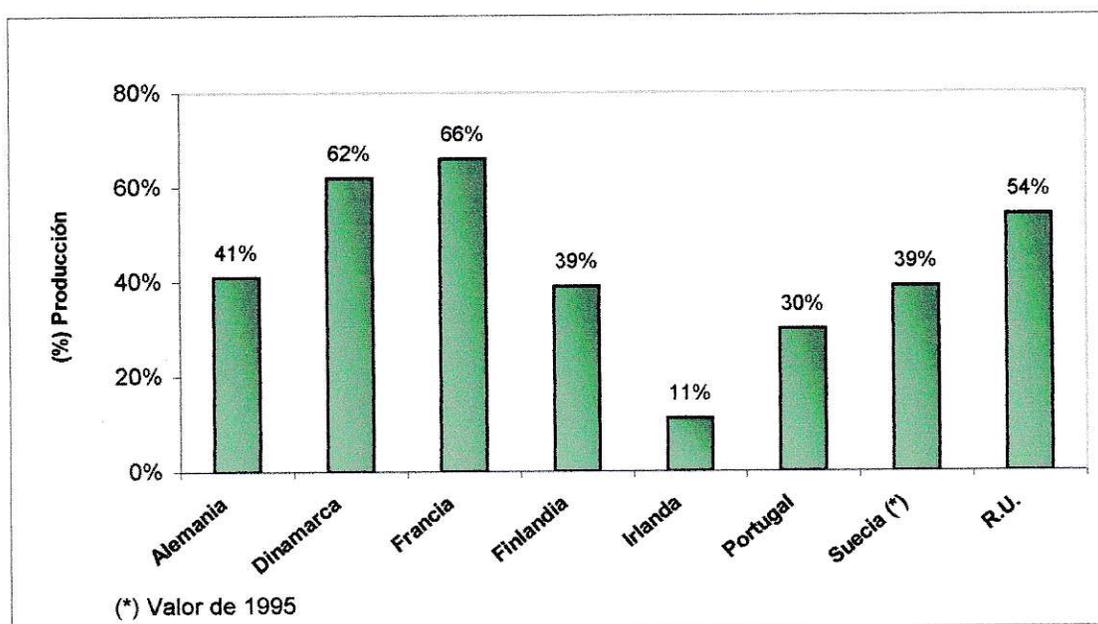


**Figura 2-6.** Métodos de uso y disposición de lodos (basado en Lue-Hing et al., 1992; U.S. EPA, 1995; EEA, 1997; EC, 2001)

### 2.2.2. Destinos de Lodos en Europa y Estados Unidos de América

Desde el año 1997 hasta el año 2000 la producción de lodos ha aumentado, por las exigencias sobre tratamiento de aguas y el incremento de la población (U.S. EPA,

1999a; EC, 2001). La **Figura 2-7** muestra el porcentaje de la producción de lodos destinado a uso agrícola en países de Europa en el año 1997. Entre aquellos que destinaron en el año 1997 gran parte de su producción de lodos a uso agrícola, superior al 50% ms, se encuentran Francia, Dinamarca y el Reino Unido (R.U); en cambio, países con un bajo porcentaje de los lodos producidos destinados a este uso, inferiores a 30% ms, fueron Irlanda y Portugal. En Estados Unidos de América estimaciones sobre usos y disposición de lodos, indican que de 6,9 millones de toneladas generadas en el año 1998 el 60% fueron usadas principalmente a través de la aplicación a suelos y como cubierta de vertederos; mientras que el 40% fue dispuesto (U.S. EPA, 1999a).



**Figura 2-7.** Porcentaje de la producción de lodos empleados en la agricultura en el año 1997 en países de Europa (adaptado en CEC, 2000)

En la **Tabla 2-7** se muestran la cantidad de lodo generado en varios países en el año 2000 y sus principales destinos. En Europa, el primer productor de lodos fue Alemania, seguido por el Reino Unido, Francia y España. Estos cuatro países más Italia generaron más de 500.000 ton ms al año, alcanzando casi el 75% de la producción de

lodos en Europa (EC, 2001). En Estados Unidos de América la producción de lodos se estima sobre los siete millones de toneladas (U.S. EPA, 1999a).

**Tabla 2-7.** Alternativas de uso y disposición de lodos en Europa y en Estados Unidos de América (basado en EEA, 2002)

País	Año	Producción		Cantidad Total (1.000 tons ms)			
		Total (1.000 tons ms)	Producción (kg per capita)	Reciclaje	Incineración	Vertedero	Otros
<b>Austria</b>	2000	196	24,4	68	66	58	4
<b>Bélgica</b>	2000	131	12,9	40	11	43	37
<b>Dinamarca</b>	2000	200	38,3	125	50	25	
<b>Finlandia</b>	2000	150	29,4	90		60	
<b>Francia</b>	2000	980	16,9	740	269	71	
<b>Alemania</b>	2000	2.736	33,5	1.334	732	608	62
<b>Grecia</b>	2000	96	9,2	6		90	
<b>Irlanda</b>	2000	100	28,2	65		35	
<b>Luxemburgo</b>	2000	13	31,5	9	3	1	
<b>Países bajos</b>	2000	401	25,9	110	200	68	23
<b>Portugal</b>	2000	348	35,5	104		209	35
<b>España (a)</b>	2000	1.069	27	578	74	360	57
<b>Suecia</b>	1995	236	26,9	120		106	11
<b>Noruega</b>	1998	93	21,4	62		13	17
<b>Reino Unido</b>	2000	1.407	24,2	952	262	63	130
<b>Estados Unidos de América (b)</b>	2000	7.100	-	4.500	1.600	1.000	100

-: no se encontró información

(a) España en el año 2000 eliminó aproximadamente 57.000 tons/ms de lodo mediante el vertido al mar

(b) Proyección realizada por la U.S. EPA (1999a)

\* Otros países; para Italia no se encontró información; Suiza, se estima que distribuye los millones de toneladas de lodos entre aplicación a suelos (50%), vertederos (30%) e incineración (20%) (Renner, 2000); Canadá, destina su producción de lodo para uso agrícola (Lue-Hing et al., 1992; Espindola y Madariaga 2000).

En reportes de la Agencia Ambiental Europea del año 2002 (EEA, 2002), de la Comunidad Europea año 2001 (EC, 2001) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América del año 1999 (U.S. EPA, 1999a) sobre uso y disposición de lodos, el reciclaje de lodos aparece como la ruta más importante, otras rutas que le siguen son la disposición vía incineración y los vertederos.

Dentro de algunos países de Europa en el año 2000 que reciclaron parte importante su producción de lodos, se encuentran Alemania con 1.334.000 tons ms correspondiente a un 49% ms de su producción total, Francia (76% ms), el Reino Unido (68% ms) y España (54% ms). Irlanda a partir del año 1995, cuando dejó de eliminar sus lodos vertiéndolos al mar, incrementó el uso benéfico sobre el 900% en el año 2000. En Estados Unidos de América se estima que recicló más de un 60% ms del total del lodo generado. Este país es el mayor productor de lodos y también el que utiliza más toneladas de lodos benéficamente.

En el año 2000 en Europa la disposición de lodos en vertederos fue la segunda ruta más usada. Dentro de los países que dispusieron una importante cantidad del total de los lodos producidos se encuentran Grecia (94% ms) y Portugal (60% ms). Otros países, donde esta alternativa fue menos importante son Alemania, con un 22% ms de su producción total, Luxemburgo (8% ms) y Francia (7% ms). En Estados Unidos de América este método de disposición ocupó la tercera posición.

Debido al impacto sobre el medio ambiente, la incineración de lodos es una de las rutas tradicionales menos preferida. En Europa, la incineración ocupa el tercer lugar. Entre los países que se incineraron parte importante de su producción en el año 2000 se encuentran Francia y Alemania con un 27% ms. En Estados Unidos de América se estima que destina a la incineración de lodos, aproximadamente el 20% de la producción anual. En este país la incineración ocupó el segundo lugar.

## 2.3. Normativas sobre Uso de Lodos en la Agricultura

### 2.3.1. Normativa Europea

Las ciudades europeas presentan una largo historial sobre utilización de efluentes de aguas servidas y lodos en la agricultura. Estos ya se empleaban en la década de los cuarenta. En sus comienzos estas prácticas eran a escala local; luego con la creación de la Comunidad Europea como consecuencia del incremento de intercambio de productos, se reconoció la necesidad de acordar regulaciones y guías para su aplicación a suelos agrícolas con la finalidad de obtener productos de calidad (WEAO, 2001).

En la década de los 70, la Comunidad Europea inicia un programa sobre aplicación de lodos a suelos que seria continuado por aproximadamente 10 años. El objetivo principal de este programa fue desarrollar una Directiva. Esta Directiva es la 86/278/EEC (*Council Directive 86/278/EEC*) promulgada en el año 1986 y tiene por objeto regular la utilización de lodos de depuradora en la agricultura para evitar efectos nocivos en suelos, la vegetación, los animales y el ser humano, fomentando al mismo tiempo su correcta reutilización (WEAO, 2001).

En particular esta directiva proporciona:

- Definiciones de lodo; considera por lodos *Artículo 2 a*:
  - los lodos residuales salidos de estaciones de depuración que traten aguas residuales domésticas o urbanas y de otras estaciones de depuración que traten aguas residuales de composición similar a la de las aguas residuales domésticas y urbanas;
  - los lodos residuales de fosas sépticas y de otras instalaciones similares para el tratamiento de aguas residuales;

- los lodos residuales salidos de estaciones de depuración distintas de las contempladas en los puntos anteriores.
- Concentración de metales pesados que no pueden ser excedidas; valores para concentraciones de metales pesados en suelos y lodos, y cantidades máximas anuales de metales pesados que pueden ser introducidas al suelo (*Artículo 4*) (ver **Tablas 2-8, 2-9 y 2-10**).
- Uso de lodo sobre la base de las necesidades de los cultivos; la utilización de lodos se realizará teniendo en cuenta las siguientes normas, *Artículo 8*:
  - la utilización deberá tener en cuenta las necesidades de nutrición de las plantas y no podrá perjudicar la calidad del suelo y de las aguas superficiales y subterráneas,
  - si se utilizaran lodos en suelos cuyo pH fuera inferior a 6, los Estados miembros tendrán en cuenta el aumento de la movilidad de los metales pesados y de su absorción por las plantas y disminuirán, llegado el caso, los valores límite que hayan fijado ( **Tabla 2-8**).
- Métodos de análisis de suelos y lodos.
- Obligaciones a los estados miembros para el registro de la producción de lodos, cantidades usadas en la agricultura, ubicación de parcelas y otra información.
- Requerimientos de reportes; el *Artículo 17* establece que los Estados miembros deben presentar cada cuatro años, y por primera vez cinco años después de la notificación de la presente Directiva, un informe de síntesis sobre la utilización de los lodos en la agricultura, precisando las cantidades de lodos utilizados, los criterios seguidos y las dificultades encontradas y lo transmitirán a la Comisión, que publicará las informaciones contenidas en dicho informe. A la luz del mismo, la Comisión

presentará, en su caso, propuestas adecuadas con miras a garantizar una mayor protección de los suelos y del medio ambiente.

La mayoría de las regulaciones que existen en países europeos sobre utilización de lodos en la agricultura han sido transpuestas de la Directiva 86/278/EEC. Las principales modificaciones incorporadas en regulaciones nacionales de cada país se encuentran respecto a los contenidos de metales en suelos y lodos, y prohibiciones de su aplicación. A continuación se presentan algunas diferencias entre la Directiva y regulaciones nacionales de países de Europa.

- La Directiva sólo establece que los lodos deben ser tratados para ser empleados en la agricultura, no establece tipos de tratamientos y tampoco límites para contenidos de patógenos. La mayoría de los países se guía por la Directiva, sin embargo, existen ciertas regulaciones en algunos países como Francia, que restringen en forma adicional el contenido de patógenos, determinante en la calidad del lodo. Otros países, en vez de fijar límites para el contenido de patógenos proporcionan métodos alternativos para el tratamiento de los lodos y así, reducir potenciales riesgos sobre la salud, como en el Reino Unido, donde se emplea la digestión, compostaje, tratamiento con cal, tratamiento con calor o irradiación para la reducción de patógenos (WEAO, 2001). Austria, establece las siguientes condiciones para aplicación de lodos en pasturas y suelos arables: no más de 1000 enterobacterias por 1 gramo de lodo; ausencia de Salmonella por 1 gramo de lodo; ausencia de larvas de gusanos que presenten un riesgo para la salud humana y animal (EC, 2001). La **Tabla 2-12** muestra límites actuales para patógenos establecidos en algunos países de Europa que restringen la utilización de lodos en la agricultura. La **Tabla 2-13** contiene prohibiciones de la utilización de lodos.
- La Directiva respecto a límites para aplicación de lodos establece que se pueden realizar en base a las necesidades de los cultivos (principalmente nitrógeno) y/o en base a los límites establecidos para metales en lodos (EC, 2001; WEAO, 2001). En

Portugal, se pueden aplicar 6 toneladas por hectaria por año en un principio, sin embargo si el contenido de metales disminuye, esta cantidad puede aumentar. Otros países, como Finlandia, Francia, Suecia y el Reino Unido se rigen por el Artículo 5 de la Directiva 86/278/EEC para fijar la carga máxima anual de metales sobre un promedio de 10 años, para Suecia son 7 años (EC, 2001). La **Tabla 2-15** muestra las cantidades máximas de lodo aplicables a suelo de algunos países de Europa.

- La Directiva no proporciona ningún valor límite para compuestos orgánicos contenidos en lodo. Sin embargo Dinamarca, Francia, y Alemania han incluido regulaciones para el contenido de compuestos orgánicos en lodos cuando estos son utilizados (EC, 2001). En la **Tabla 2-16** se muestran los límites existentes para compuestos orgánicos en países europeos.

De acuerdo a los requerimientos establecidos para la utilización de lodos en la agricultura por la Directiva y el grado de aceptación de esta, la clasificación informada por la Comunidad Europea (EC; 2001) respecto a su cumplimiento, es la siguiente:

- Exigencias mucho estrictas que la Directiva: Dinamarca, Finlandia, Suecia y Países Bajos.
- Exigencias más estrictas que la Directiva: Austria, Bélgica, Francia y Alemania.
- Exigencias similares: Grecia, Italia, Luxemburgo, Portugal, España y Reino Unido.

Actualmente, se encuentra en borrador la propuesta de la Directiva 2000 (*Draft EC Council Directive 2000*). En este borrador se entregan definiciones, límites para metales en lodo y suelo, obligaciones para el tratamiento de los lodos según el uso, límites para compuestos orgánicos (ver **Tablas 2-11 y 2-16**), responsabilidades análisis y frecuencias de análisis, entre otros (CEC, 2000). Consecuentemente, la Comunidad Europea, presenta tres tipos de tratamientos de lodos, tratamiento tipo A, tipo B y tipo C; los tratamiento tipo A y C se aproximan a los lodos clase A y clase B de la U.S. EPA (1993), respectivamente.

Regulaciones para uso de lodos en silvicultura y bosques naturales en países de Europa se encuentran en el **Anexo A**.

### **2.3.2. Normativa en Estados Unidos de América**

En Estados Unidos de América, una de las primeras revisiones sobre el destino y los efectos de los metales pesados contenidos en lodos aplicados a suelos resultó de la conferencia realizada en el año 1972 sobre reciclaje de efluentes y lodos en suelos patrocinado por el Departamento de Agricultura y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, entre otros organismos (WEAO, 2001).

Seguido a ello, se sucede una serie de investigaciones sobre los efectos de elementos traza (principalmente metales) contenidos en lodos sobre cultivos y suelo. Estos estudios generaron el interés sobre los efectos que puedan causar sobre la salud. Por tal motivo, surgió la necesidad de realizar investigaciones que sustentaran buenas practicas de manejo y controles regulatorios para proteger la fertilidad del suelo, los alimentos y el ambiente de los contaminantes contenidos en lodos y efluentes (WEAO, 2001).

Consecuentemente, en febrero del año 1993 la U.S. EPA promulga los “Estándares para Uso o Disposición de Lodo de Agua Residual”, Código de la Regulación Federal Titulo 40, Parte 257, 403 y 503, referido mas tarde como Reglamento 503 (*Code of Federal Regulation Title 40, Parts 257, , 403, and 503, Regulation 503*). El desarrollo de esta Directiva contemplo la utilización de aproximaciones sobre evaluaciones de riesgos<sup>1</sup>, definiendo buenas practicas de manejo y estableciendo valores numéricos para patógenos y metales pesados en lodos para su aplicación suelos (U.S. EPA, 1995; WEAO, 2001).

---

<sup>1</sup> Esta evaluación de riesgos involucra un proceso de modelamiento matemático que considera características biológicas, químicas y físicas de los contaminantes (WEAO, 2001)

Esta normativa considera por lodos a residuo sólido, semisólido o líquido generado durante el tratamiento de las aguas domesticas en sus diferentes etapas, incluye lodos de fosas sépticas, pero no incluye desechos del tratamiento preliminar.

Para metales, se consideraron límites en lodos: As, Cd, Cu, Pb, Hg, Mo, Ni, Se y Zn (ver **Tabla 2-8** y **2-9**). Estados Unidos de América, no tiene definido la concentración máxima de metales pesados en suelos antes de la aplicación y restricciones para lodos con contenido de PCBs inferior a 10 ppm.

El Reglamento 503 establece dos tipos de lodos A y B basados en criterios sanitarios; considera por lodo de clase A aquel que ha sido tratado esencialmente para eliminar patógenos y lodo clase B, a aquel que se ha reducido su carga patógena. Este ultimo presenta restricciones para su aplicación. La **Tabla 2-11** muestra las alternativas de tratamiento para reducir la carga patógena, y la **Tabla 2-12** el límite para concentración de patógenos en lodos.

La aplicación de lodos de acuerdo al Reg. 503 continua a la fecha; sin embargo, las investigaciones no se han detenido, de manera de obtener con el tiempo prácticas seguras en el empleo de lodos.

### **2.3.3. Normativas: Canadá, México, Brasil y Chile**

- **Canadá**

La normativa Canadiense esta dirigida exclusivamente hacia el uso de lodo en la agricultura. La utilización de lodos en Canadá puede situarse en la década de los 70, cuando Universidades y Centros Tecnológicos comienzan a realizar experimentos sobre la aplicación de lodos a cultivos de maíz, trigo y especies forrajeras (WEAO, 1999).

En la actualidad en Canadá, el empleo de lodos en la agricultura esta regulado “Guía para la utilización de biosólidos (lodos) y otros residuos en suelos agrícolas” (*Guidelines for the utilization of biosolids and other waste on agricultural land*) (Canadian Ministry of Environment and Ministry Agriculture Food Rural Affairs; 1996) que proporciona información para una segura aplicación de lodos.

Los contenidos de metales en lodos y suelo se muestran en las **Tablas 2-8, 2-9 y 2-10**.

Respecto al contenido de patógenos, para minimizar el riesgo de la salud humana, animal y ambiental cuando el lodo es aplicado a suelos agrícolas, y teniendo en consideración el alto costo de los análisis de patógenos y la incertidumbre asociado a los resultados analíticos para patógenos, se requiere que los lodos estén estabilizados antes de ser aplicados a suelos agrícolas; al respecto se definen procesos de estabilización (WEAO, 2001), los más utilizados son:

- Digestión anaeróbica a 35°C por 15 días seguido por almacenamiento en condiciones anaeróbicas a temperatura ambiente por 15 días adicionales.
- Digestión aeróbica a temperatura ambiente para los sólidos totales durante un tiempo de retención de 45 días. El tiempo total de retención esta definido como la suma de los tiempos de retención de los sólidos en el sistema de tratamiento secundario biológico y en el digester aeróbico. La **Tabla 2-14** contiene las restricciones asociadas a la protección de la salud y los patógenos tras la aplicación de lodos en Canadá.

La tasa de aplicación de lodos, se basa en la concentración de nitrógeno disponible (amonio y nitrato). En ningún caso la tasa de aplicación debe exceder los 135 kg de N/ha sobre un periodo de 5 años para cultivos y un periodo de 4 años para césped (**Tabla 2-15**).

- **México**

En México cuenta con la norma NOM-004-ECOL-2001 que establece límites para metales en lodos equivalentes a la normativa de la U.S. EPA (ver **Tabla 2-8**); además, restringe el contenido de patógenos. Para coliformes fecales se establecen 10 log/g ST, Salmonella 6 log/g ST y huevos helmintos entre 73-177 huevos/g. Dentro de las alternativas para la reducción y eliminación de patógenos se encuentra la estabilización con cal.

- **Brasil**

Presenta la *Norma P 4230 – CETESB (1999)* en el estado Sau Paulo, referida como “Aplicación de lodos de sistemas de tratamiento biológico en áreas agrícolas”. Esta norma excluye los lodos generados de tanques sépticos, residuos del tratamiento preliminar de aguas y aquellos que contiene PCBs, dioxinas y furanos.

Establece procesos para la reducción de patógenos y vectores, establece dos tipos de lodos A y B en base a los contenidos de patógenos; como también, métodos de aplicación de lodos a suelos (Regadas, 2002; Higa y Lopolito, 2002). Esta norma es similar la normativa de Estados Unidos de América referente a lodos (Regulación 503). En la **Tabla 2-8** se muestra el límite para metales en lodos.

- **Chile**

Actualmente cuenta con el Reglamento sobre Manejo de lodos no peligrosos de la CONAMA, que se encuentra en su etapa final para entrar en vigencia (CONAMA, 2001a). La orientación de este reglamento es el uso agrícola de lodos, particularmente, la aplicación benéfica al suelo. Este reglamento considera a los lodos no peligrosos generados por plantas de tratamientos de agua potable, de agua servidas, incluyendo

fosas sépticas, así como las plantas de tratamiento de residuos industriales líquidos (CONAMA, 2001a).

Dentro de los principales apartados de este de reglamento, se establece:

- Metales pesados en lodos de uso agrícola (**Tabla 2-8**);
- Metales en suelos antes de la aplicación de lodos (**Tabla 2-9**);
- Recomendaciones de procesos de reducción de patógenos y atracción de vectores (**Tabla 2-11**);
- Respecto a la utilización de lodos en la agricultura, se distinguen dos tipos de lodos de acuerdo a su reducción del potencial de atracción de vectores ( $\leq 38\%$  sólidos volátiles) y contenido en patógenos (ver **Tabla 2-12**), estos son:
  - lodos clase A, lodos aptos para uso agrícola sin restricciones de aplicación por razones sanitarias,
  - lodos clase B, aquellos aptos para uso agrícola, con restricciones de aplicación según tipo y localización de suelos o cultivos.
- Restricciones según tipo de lodo y tipos de cultivo (**Tabla 2-13**);
- Tasas máximas de aplicación de lodos de acuerdo a tipos de uso; agrícola, áreas verdes y suelos degradados (**Tabla 2-15**);
- Métodos de muestreo, análisis y medición de suelos y lodos;
- Registro de la producción de lodos e información necesaria para la aplicación de lodos en la agricultura; características fisicoquímicas y otra información;

- Entidades fiscalizadoras.

La norma no se refiere a compuestos orgánicos en lodos. Además de restricciones para patógenos, metales en suelo y lodos, y tipos de cultivo, el reglamento prohíbe la aplicación de lodos (*Artículo 12*) en los siguientes casos:

- Suelos de uso agrícola, forestal o de áreas verdes como parques y 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 85 y el porcentaje de arcilla o partículas menores a 0,002 mm de diámetro sea inferior a 10.
- Suelos saturados con agua, 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 subterráneas de captación de agua potable en un radio inferior de 300 metros. En caso de acuíferos vulnerables (por ejemplo napas ubicadas a bajas profundidades, altas permeabilidades, etc.) la autoridad competente podrá determinar distancias mayores.
- Zonas de protección de fuentes superficiales de captación de agua potable en una franja mínima de 500 metros de ancho con una longitud de 1000 metros aguas arriba desde el punto de captación y 200 metros hacia aguas abajo.
- 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 a 15%.

**Tabla 2-8. Concentración máxima de metales pesados (mg/kg ms) en lodos para aplicación en la agricultura (basado en WEAO, 2001)**

Pais		Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Zn	As	Co	Mo	Se
Austria	Alta	400	5	400	400	80	7	1.600				
Bélgica	Flandes	600	12	500	750	100	10	2.500				
	Valonia	500	10	500	600	100	10	2.500				
Dinamarca (1)		120	0,8	100	1.000	30	0,8	2.400				
	Basado en fósforo total	10.000	100			2.500	200					
Comunidad Europea (presente) (2)		750-1.200	20-40		1.000-1.750	300-400	16-25	2.500-4.000				
Comunidad Europea (propuesto) (3)	Presente y limite	750	10		1.000	300	10	2.500				
	Condición media	500	5		800	200	5	2.000				
	Largo tiempo	200	2		600	100	2	1.500				
Finlandia		150	3	300	500	30	2	500				
Francia (1)	Referencia	800	20	1.000	1.000	200	10	3.000				100
	Limite	1.600	40	2.000	2.000	400	20	6.000				200
Alemania	pH 5-6	900	5	900	800	200	8	2.000				
	pH>6	900	10	900	800	200	8	2.500				
Irlanda		750	20		1.000	300	16	2.500				
Italia		750	20		1.000	300	10	2.500				
Países Bajos		100	1,25	75	75	30	4,75	300				
Noruega		100	4	125	1.000	80	5	1.500				
España	pH<7	750	20	1.000	1.000	300	16	2.500				
	pH>7	1.200	40	1.500	1.750	400	25	4000				
Suecia		100	2	100	600	50	2,5	800				
Suiza (4)		500	5	500	600	80	5	2.000				
Reino Unido	Suelo pastoreo	1.000										
Estados Unidos de América (5)	Calidad excepcional	300	39		1.500	420	17	2.800	41			100
	Concentración limite	840	85		4.300	420	57	7.500	75		75	100
Ontario-Canadá (6)	Presente	1.100	34	2.800	1.700	420	11	4.200	170	340	94	34
	Largo tiempo	220	4	530	380	80	1,4	840	35	77	1,2	6
México (7)		840	85	3.000	4.300	420	57	7.500	75			
Sau Pablo-Brasil (8)		840	85		4.300	420	57	7.500	75		75	100
Chile (9)	Suelo agrícola	300	8		1.000	80	4	2.000	20		10	50
	Suelo erosionado	400	40		1.500	420	20	2.800	40		20	100

(1) Recientemente revisado, con un menor límite para metales pesados; (2) Comité Económico y Social Europeo, EC Directiva del Consejo (1986); (3) Propuesta del Comité Económico y Social Europeo, Directiva del Consejo (2000); (4) U.S. EPA (1999b); (5) Si los lodos exceden el límite para alguno de los 10 metales pero mantienen la concentración máxima para metales que pueden ser aplicados (manteniendo la carga límite acumulativa). Si los lodos exceden la concentración de alguno de los 10 metales no pueden ser aplicados a suelos; (6) Máximos para lodos aeróbicos; (7) Proyecto de norma, Barrios y Jiménez (2002); (8) Regadas (2002); (9) Proyecto de norma, CONAMA (2001a)

**Tabla 2-9.** Máximo permisible para la concentración de metales pesados en suelos (mg/kg ms) (basado en WEAO, 2001)

País		Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Zn	As	Se	Mo
Austria	Alta	100	11	100	100	60	1	300			
Bélgica	Flandes	56	0,9	46	40	18	1,3	170	22		
	Valonia	100	2	100	50	50	1	200			
Dinamarca		40	0,5	30	40	15	0,5	100			
Comunidad Europea (presente) (1)	pH 6-7	50-300	1-3		50-140	30-75	1-1,5	150-300			
Comunidad Europea (propuesto) (2)	pH 5-6		0,5		20	15	0,1	60			
	pH 6-7		1		50	50	0,5	150			
	pH>7		1,5		100	70	1	200			
Finlandia		60	0,5	200	100	60	0,2	150			
Francia	pH>6	100	2	150	100	52	1	300			
Alemania	pH 5-6	100	1	100	60	50	11	150			
	pH>6	100	1,5	100	60	50	11	200			
Irlanda		50	1		50	30	1	150			
Italia		100	1,5		100	75	1	300			
Países Bajos		85	0,6	100	36	35	0,3	140	29		
Noruega		50	1	100	50	30	1	150			
España	pH<7	50	1	100	50	30	1	150			
	pH>7	300	3	150	210	112	1	450			
Suecia		40	0,4	30	40	30	0,3	75			
Reino Unido	pH 5-5,5	300	3	400	80	50	1	200	50		
	pH 5,5-6	300	3	400	100	60	1	200	50		
	pH 6-7	300	3	400	135	750	1	200	50		
	pH >7	300	3	400	200	110	200	300	50		
Ontario-Canadá	pH< 6	60	1,6	120	100	32	0,5	220	14		
Chile(3)	pH>6,5 Macrozona Norte	75	2		150	112	1,5	175	20	4	2
	pH<6,5 Macrozona Norte	50	1,25		100	50	1	120	12,5	3	3
	Todo pH, Macrozona Sur	50	2		75	30	1	175	10	4	3

(1) Comunidad Europea, Directiva del Consejo (1986); (2) Propuesta de la Comunidad Económica Europea, Directiva del Consejo (2000); (3) Proyecto de norma, CONAMA (2001a)

\*Estados Unidos de América no tiene definido la concentración máxima de metales pesados en suelo

**Tabla 2-10.** Límites máximos anuales y acumulativos en el tiempo para metales pesados en suelos cuando los lodos son aplicados en la agricultura (kg/ha) (basado en WEAO, 2001)

<b>País</b>		<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Hg</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>
Austria	Anual (4)	1,25	0,025	1,25	1,25	0,25	0,025	5	0,05
Comunidad Europea (presente) (1)	Anual (5)	15	0,25		12	3	0,1	30	
Comunidad Europea (propuesto) (2)	Presente (5) (Anual)	2,25	0,03		3	0,9	0,03	7,5	
	Condición media (Anual)	1,5	0,015		2,4	0,6	0,015	6	
Finlandia	Largo tiempo (Anual)	0,6	0,006		1,8	0,03	0,006	4,5	
Francia	Anual	2,4	0,06	3	3	0,6	0,03	9	
Alemania	Anual	1,5	0,016	1,5	1,3	0,3	0,013	2,5	
	Tiempo de vida acumulativo	90	1,6	210	150	32	0,8	330	14
Reino Unido	Anual	15	0,15	15	7,5	3	0,1	15	0,7
Estados Unidos de América	Anual (6)	15	1,9		75	21	0,85	140	2
	Tiempo de vida acumulativo (7)	300	39		1.500	420	17	2.800	41
Ontario-Canadá	Anual (8)	1,8	0,05	4,7	2,7	0,7	0,02	6,7	0,28

(1) Directiva del Consejo de la Comunidad Europea (1986); (2) Propuesta de la Directiva del Consejo de la Comunidad Europea (2000);

(4) Carga para suelos arables, pasturas para recibir cargas medias; (5) Cargas son sobre un promedio de valores para un periodo de 10 años

(6) Carga límite aplicable a lodos que son comerciabilizados o entregados en bolsa o contenedor; (7) Carga límite aplicable a lodos que

exceden la concentración límite para metales de lodos de calidad excepcional; (8) Estos valores son un quinto de la carga de cinco años

**Tabla 2-11.** Comparación de tratamientos que reducen la carga patógena de los lodos

<b>Propuesta Comunidad Europea (a)</b>	<b>Estados Unidos de América (b)</b>	<b>Proyecto de Norma Chile (c)</b>
<b>Tratamiento A</b>	<b>Lodo Clase A</b>	<b>Lodo Clase A</b>
Compostaje; Secado térmico; Estabilización aeróbica termofilica; Digestión anaeróbica termofilica; Tratamiento térmico; Acondicionamiento con cal; Proceso que reduzca el contenido de organismos como Salmonella en un 5 log 10 en la prueba de organismos; Tratamiento que elimine el contenido de Salmonella ssp en 50 g (masa húmeda) y que reduzca el contenido de Escherichia Coli, <math>5 \times 10^3</math> UFC/g	Digestión Aeróbica; Secado al aire; Digestión anaeróbica; Compostaje; Estabilización con cal	Compostaje; Secado térmico; Tratamiento con calor; Digestión Aeróbica termofilica; Irradiación con haces de electrones; Irradiación con rayos Gamma; Pasteurización; Tratamiento alcalino, mediante acondicionamiento con cal; Tratamientos térmicos según determinadas combinaciones de tiempo y temperatura;
<b>Tratamiento B</b>	<b>Lodo Clase B</b>	<b>Lodo Clase B</b>
Estabilización aeróbica termofilica; Digestión anaeróbica termofilica; Condicionamiento con cal	Compostaje; Secado por calor; Tratamiento con calor; Digestión Aeróbica Termofilica; Radiación Beta; Radiación Gamma; Pasteurización	Digestión Aeróbica; Secado al aire; Digestión Anaeróbica; Compostaje; Estabilización con cal
<b>Tratamiento C</b>		
Digestión aeróbica mesofilica; Aireación extendida a temperatura ambiente; Almacenamiento en forma líquida a temperatura ambiente		

(a) Tratamiento propuestos (no vigentes) para la reducción de patógenos; Tratamiento A y C, son similares a Lodos Clase A y Lodos Clase B

(b) U.S. EPA (1995)

(c) CONAMA (2001a)

**Tabla 2-12. Límite para concentración de patógenos en lodos**

<b>País</b>	<b>Salmonella</b>	<b>Otros patógenos</b>
Francia (a)	8NMP/10 g ms	Enterovirus: 3NCMP/10g de ms Huevos helmintos: 3/10g de ms
Italia (a)	1000 NMP/g ms	
Luxemburgo (a)		Enterobacterias: <100/g
Estados Unidos de América (b)	Clase A, Densidad de Salmonella<3NMP/4 g ms	Clase A, Coliformes fecales: menor a 1.000 NMP/g ms Virus entérico: <1 PFU/ 4 g ms Huevos helmintos viables: < 1/4g ms
		Clase B, coliformes fecales menor a 2.000.000 NMP o UFC/g ms
Chile (c)	Clase A, densidad de Salmonella<3NMP/4 g ms	Clase A, Coliformes fecales: menor a 1.000 NMP/g ms. Huevos helminto: <1/4 g ms. Virus MS-2: <1UFP/4 g ms.
		Clase B, densidad de Coliformes fecales: <2.000.000 NMP/g ms

\* NMP: número más probable; NCPM: número citopático más probable; UFP: unidades formadoras de placas; UFC: unidades formadoras de colonias

(a) EC (2001)

(b) WEAO (2001)

(c) Proyecto de norma, CONAMA (2001a)

**Tabla 2-13.** Superficies en que el uso de lodo se encuentra prohibido (basado en EC, 2001)

<b>Directiva 86/278/EEC</b>  <b>Requerimientos Artículo 7</b>	En pasto o cultivos forrajeros no se procederá al pastoreo o cosecha en un periodo no menor a tres semanas después de la aplicación	En cultivos hortícolas y frutícolas durante el periodo de vegetación, con la excepción de los cultivos de árboles frutales	En suelos destinados a cultivos hortícolas o frutícolas que estén normalmente en contacto directo con el suelo y que se consuman normalmente en estado crudo, durante un periodo de diez meses antes de la cosecha y durante la cosecha misma
Austria	Prohibición en praderas, pasturas, pastura alpina	=	Prohibido en cultivos hortícolas, bayas, hierbas medicinales; no deben crecer antes de un año
Bélgica Flandes, Valonia	Antes de 6 meses	=	=
Finlandia	El lodo puede ser usado en el suelo en aquellos cultivos como granos, azúcar u otros que no sean para consumo humano o alimento para animales	=	Papas, en cultivos o vegetales que crecen a ras de suelo antes de 5 años
Francia	=	=	=
Alemania		Prohibido	
Grecia	=	=	=
Italia	Antes de 5 meses	=	=
Luxemburgo	Antes de 4 semanas	=	=
Países Bajos	Prohibido en cultivos forrajeros, prohibido durante la estación de pastoreo	=	=

*Continuación*

Portugal	=	=	=
España	=	=	=
Suecia	Prohibido en pasto, en suelos arables que también han sido usados para pastoreo o cultivo forrajero que ha sido cosechado dentro diez meses de la aplicación de lodos	=	=
Reino Unido	=	=	=
Estados Unidos de América (a) Lodo clase B	Pastoreo de animales antes de 30 días		Cultivos alimenticios en contacto directo con el lodo o sobre la superficie del suelo no pueden ser cosechados antes de 14 meses de la aplicación
Chile (b) Lodo clase B	Antes de 30 días		Deben aplicarse por lo menos 12 meses antes de la siembra; prohibido en cultivos hortícolas o frutícolas menores durante el ciclo vegetativo de estos cultivos.

\* =: no hay diferencia respecto a la Directiva

- (a) Restringe el uso en: Cultivos alimenticios con parte bajo la superficie del suelo no pueden ser cultivados hasta 20 meses después de la aplicación del lodo; Cultivos alimenticios y cultivos de fibra no deben ser cosechados hasta 30 días después de la aplicación del lodo; Crecimiento de pasto en el suelo donde el lodo es aplicado no debe ser cosechado hasta 1 año después de la aplicación del lodo; El acceso con alto potencial de exposición pública debe ser restringido por 1 año después de la cosecha; U.S. EPA (1995)
- (b) El borrador de proyecto prohíbe en suelos de uso forestal, la aplicación de lodos podrá efectuarse solo si se cuenta con un control de acceso al área durante los 30 días posteriores de la aplicación; CONAMA (2001a)

**Tabla 2-14.** Restricciones asociada a la protección de la salud y los patógenos tras la aplicación de lodos en Canadá\*

<b>Cultivo</b>	<b>Periodo de espera después de aplicación de lodos</b>
Forrajero (heno)	3 semanas antes de la cosecha
Pastura para caballos, ganado vacuno o lechero	2 meses antes del pastoreo
Pastura para cerdo, oveja o cabras	6 meses antes del pastoreo
Comercial	12 meses antes de la cosecha
Frutas pequeñas	15 meses antes de la cosecha
Árboles frutales y uvas	3 meses antes de la cosecha
Vegetales	12 meses antes de la cosecha
Tabaco	Aplicación no recomendada
Césped y jardines de casa	Aplicación no recomendada
Pistas de golf y suelos de recreación	Aplicación solo recomendada si adicionalmente se reduce el contenido de patógenos

\* Canadian Ministry of Environment and Ministry Agriculture Food Rural Affairs (1996)

**Tabla 2-15.** Cantidad máxima de lodo para ser aplicada en suelos  
(basado en EC, 2001; CCE, 2000)

	<b>Tasa de aplicación (tons/ha ms)*</b>
Directiva 86/278/EEC Comunidad Europea	
Austria	2,5-10/2 años (a)
Bélgica (Flandes)	4/2 años (suelo arable)
	2/2 años(suelos de pastoreo)
Bélgica (Valonia)	12/3 años (suelo arable)
	6/3 años (suelos pastoreo)
Dinamarca	10/año
Alemania	5/3 años
Irlanda	2/año
Luxemburgo	3/año
Países Bajos	2-4/año, en suelo arable (b)
	1-2/año, suelos de pastoreo (b)
Portugal	6/año
Canadá (c)	135 kg N/5 años (lodo digerido anaerobicamente)
	8/5 años (lodo deshidratado o seco)
Chile (d)	15/año, suelos agrícolas y forestales
	2 /año, césped, jardines y áreas verdes
	30 /año, suelos degradados

\* La tasa de aplicación se interpreta como toneladas por hectárea por año; por ej. 4/2 significa 4 toneladas por hectaria por 2 años

(a) Dependiente del suelo, la masa seca y el tipo de lodo

(b) Dependiente del estado del lodo (líquido o sólido)

(c) Canadian Ministry of Environment and Ministry Agriculture Food Rural Affairs (1996)

(d) Proyecto de norma, CONAMA (2001a)

**Tabla 2-16.** Regulaciones de compuestos orgánicos en países europeos

(basado en EC, 2001; EU, 2000)

País	Diox / Fur (PCDD, PCDF)	PCBs	AOX	LAS	DEP	NPE	HAPs	Tolueno
	(ng TE/kg ms)	(mg/kg ms)						
Austria	100(a,b,c)	0,2(a,b,c)	500(a,b,d)	-	-	-	6(f)	-
	50(d)	1(d)						
Dinamarca (del 01/07/2002)				1300	50	10	3	
Francia	-	0,8(e)	-	-	-	-	2-5(f)	-
							1-4(g)	
Alemania	100	0,2(h)	500	-	-	-	-	-
Suecia	-	0,4	-	-		100	3	5
Comunidad Europea*	100	0,8(i)	500	2.600	100	50	6(j)	

Diox y Fur: dioxinas y furanos, PCDD/PCDF, policlorinados dibenzo-p-dioxinas y furanos; PCB: compuestos bifenilos policlorinados; AOX: suma de compuestos orgánicos halogenados; LAS: lineal alquil-benceno sulfonatos; DEHP: Di(2-etilhexil)ftalato; NPE: incluye nonifenol; HAP: Hidrocarburos aromáticos policíclicos

a: baja Austria; b: alta Austria; c: Voralberg; d: Carinthia; e: suma de 7 PCB(PCB 28,52,101,118,138,153,180); f: Fluoranteno, Benzo(b)fluoranteno, Benzo(a)pireno; g: cuando es usado en suelos de pastoreo; h: para cada uno de los seis congéneres; i: suma de 6 PCB(PCB 28,52,101,138,153,180); j: suma de acenafteno, fenantreno, fluoreno, fluoranteno, pireno, benzo(b+j+k)fluoranteno, benzo(a)pireno, benzo(ghi)perileno, indeno(1,2,3-c,d)pireno

-: no presenta información

\* Propuesta de límite para compuestos orgánicos (EU, 2000)

## **2.4. Utilización de Lodos en la Agricultura**

### **2.4.1. Aspectos Generales**

En la actualidad, habitualmente se emplean fertilizantes sintéticos en la agricultura con la finalidad de aportar elementos nutritivos para las plantas y mejorar su tasa de producción. Consecuentemente, se buscan alternativas distintas a los fertilizantes comerciales tradicionales que presenten un costo económico menor y un nivel de producción similar o superior. No obstante, es importante que estos materiales con propiedades fertilizantes, no causen impactos ambientales significativos, permitiendo así, el desarrollo sostenible de la agricultura.

El empleo de residuos orgánicos de animales como estiércol o guanos, ha sido y sigue siendo una opción al empleo de fertilizantes sintéticos. Estos residuos, ya se utilizaban con fines benéficos en cultivos antes del uso masivo de los fertilizantes sintéticos.

Rutinariamente, los residuos de animales son aplicados a suelos agrícolas para satisfacer las necesidades de nitrógeno y fósforo de las plantas. Sin embargo, su mayor aporte se encuentra en su contenido de materia orgánica, mejorando las propiedades físicas del suelo, como la aireación y conductividad hidráulica (movimiento del agua) y la exploración radicular (Inostroza y Gaete, 1997).

No obstante, los residuos de animales no son los únicos productos de base orgánica. Otra fuente alternativa de nutrientes para las plantas son los lodos<sup>1</sup>. Con un historial, por lo menos, de 30 años en Europa y Estados Unidos de América, este

---

<sup>1</sup> En varios países, como Estados Unidos de América y Canadá, cuando los lodos son empleados benéficamente en la agricultura se utiliza el termino biosolids (biosólidos). En Europa, el término usado es sewage sludge (barro de alcantarillas, traducción libre) o fango (España).

residuo ha sido utilizado en la agricultura en su estado líquido, semisólido y sólido por su contenido de contenido de materia orgánica y elementos fertilizantes.

Entre las razones de dar una salida benéfica a los lodos a través de su empleo en la agricultura, se encuentra el reciclaje aprovechando la condición de filtro natural y la capacidad de autodepuración de los suelos, y los beneficios agronómicos que presentan (U.S. EPA, 1995; IX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, 2002).

Al emplear el suelo como sistema depurador para los lodos, dada su composición y dinámica permite que los elementos nutritivos que contiene puedan reciclarse a través de su paso a las plantas, al aire o al agua. Por tanto, es posible considerar que el suelo representa un destino natural y óptimo para estos (Yahüe et al., 1987). La aplicación benéfica de lodos al suelo dada su composición, afecta las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y las plantas. A continuación se describen los principales efectos del empleo de lodos cuando estos son aplicados al suelo.

#### **2.4.2. Efectos sobre las Propiedades del Suelo**

##### **• Propiedades Físicas**

El aporte de materia orgánica (comúnmente 50%) a 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 et al., 1987; Clapp et al., 1986; EC, 2001; U.S. EPA, 1995; EC, 2001).

Cuando el contenido de materia orgánica o arcilla es bajo, los agregados del suelo son menos estables en el agua y se dispersan en partículas o granos (Rechigl, 1995). La materia orgánica contenida en los lodos, puede unir partículas en el suelo

formando agregados estables, permitiendo el paso de aire y agua (permeabilidad). En la literatura, se indica que para tener efectos detectables sobre las propiedades físicas del suelo cuando se adicionan lodos, la cantidad mínima a aplicar debe ser de 5 tons materia orgánica/ha (EC, 2001).

Los efectos del aporte de materia orgánica de los lodos han sido ampliamente estudiadas. En estudios sobre cambios en la densidad aparente de suelos minerales tras aplicación de lodos se ha encontrado una disminución de esta con el incremento de la tasa de aplicación, aparentemente esta reducción estaría influenciada por la tasa de lodo y su contenido respectivo de materia orgánica.

En Estados Unidos de América, estudios después de tres años de aplicación de 50 tons/ha de lodos en suelos minerales reportan un aumento de los agregados a más del doble. Se ha encontrado que el tipo de cultivo y el tipo de secuencia de rotación modifican el efecto de la aplicación de lodos sobre la agregación. Usando secuencias de rotación (ej. pasto/trébol, maíz y trigo) y diferentes tipos de suelos minerales, han detectado que el efecto de la aplicación de lodos sobre el estado de agregación se favorece más que en los cultivos permanentes (Clapp et al., 1986).

La aplicación de lodos también puede afectar la porosidad total, el espacio poroso grande y no capilar del suelo. Estudios reportan que estos incrementan en varios tipos de suelos, variando de suelos franco arenosos a francos arcillosos con diferentes tipos de lodos (Clapp et al., 1986). Incrementos en la porosidad de total del suelo se han encontrado a un año de la aplicación de lodos; sin embargo, aparentemente estos cambios son más notorios en alguna de las estaciones de cosecha que cuando el lodo es aplicado. Los efectos significativos sobre la porosidad cuando se aplican lodos a suelos dependerían de su condición física y podrían no existir efectos cuando estos son aplicados (Clapp et al., 1986).

La conductividad hidráulica saturada o tasa máxima de movimiento de agua puede aumentar con la aplicación de lodos. La adición de lodos a suelos puede incrementar la retención de agua entre la capacidad de campo<sup>2</sup> (-33kPa) y el punto de marchites<sup>3</sup> (-1500 kPa), este aumento podría ser explicado por la textura del suelo (%arena) y el aumento del carbono orgánico (Clapp et al. , 1986).

## ▪ Propiedades Químicas

### - pH

Los lodos comúnmente presentan un valor de pH que fluctúa entre 6 y 8 ( Rocha y Shirota, 1999; U.S. EPA, 1995) cuando estos son aplicados pueden alterar las condiciones del suelo. La magnitud del cambio de pH ante la adición de lodos depende principalmente de las propiedades del suelo, incluidas la textura, la capacidad tampón y el tiempo transcurrido después de la aplicación (Clapp et al., 1986; EC, 2001).

La producción de los cultivos y su mantención esta estrechamente relacionada con el pH del suelo. 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 su vez, inhiben el movimiento de metales a través del suelo (Rechcigl, 1995; U.S. EPA, 1995; EC, 2001).

En la **Tabla 2-17** muestra el efecto de los lodos sobre el pH del suelo. Materiales alcalinos, principalmente cal, causan un aumento del pH de suelo; en cambio, las formas de ácidos orgánicos y formas amoniacales generadas por la mineralización del nitrógeno orgánico y el sulfato pueden provocar la disminución del pH.

---

<sup>2</sup> Es el contenido de agua del suelo cuando virtualmente ha cesado todo movimiento descendente de ella

<sup>3</sup> Es el límite inferior del agua disponible para las plantas. Este se alcanza cuando la tasa de absorción de agua por parte de las raíces se hace tan lenta que las plantas se marchitan sin poder recuperarse

**Tabla 2-17.** Efecto de los lodos sobre el pH del suelo (Sullivan, 1998)

Tipo de lodo	Aporte de lodos al suelo	Efecto del lodo sobre el pH del suelo	Procesos en el suelo
Alcalino-estabilizado	Óxidos e hidróxidos de calcio	Incrementa	Convierten la acidez del suelo a agua y dióxido de carbono
Todos	Sales solubles	Temporalmente decrece	Cationes desplazan la acidez de las arcillas y la materia orgánica, pasando a la solución suelo
Todos	Nitrógeno orgánico y azufre	Decrece	La oxidación en el suelo a nitrato y sulfato produce acidez
Todos	Calcio y magnesio intercambiables	Aumenta	No hay acidificación por cationes

#### - Capacidad de Intercambio Cationico

La capacidad de intercambio cationico es la capacidad (CIC) de absorber o retener cationes y para intercambiar especies de esos iones en reacciones químicas. Esta cualidad es importante para la nutrición y fertilidad de los suelos. En general una CIC de suelos alta indica una alta capacidad de almacenamiento de nutrientes para las plantas (U. de Chile, 1992).

En el suelo, los coloides orgánicos tienen una CIC de 100 a 300 meq/100 g; minerales coloidales, como la montmorillonita y vermiculita presentan una CIC que varía entre 80 y 150 meq/100 g (U. de Chile, 1992). La mayor parte de la CIC conseguida por el aporte de lodos cuando se aplican a suelo, es debida a la elevada capacidad de cambio de la materia orgánica que contienen, comúnmente de 250 meq/100 g (Yahüe et al., 1987).

Los cambios de la CIC en el suelo por aplicación de lodo dependen particularmente de su textura inicial, contenido de arena, los óxidos de Al y Fe, de la CIC inicial antes de la aplicación y del tiempo transcurrido de la aplicación (Rechcigl, 1995, Clapp et al., 1986; U. de Chile, 1992).

Algunos estudios que informan sobre la alteración de la CIC cuando se aplican lodos al suelo, son los siguientes:

- Kladvikov y col. (citado por Yahüe et al., 1987), al suministrar 90 tons/ha de lodos duplico el contenido de carbono orgánico en los primeros 5 cm de suelo e incremento la CIC de 10 a 20 meq/100 g.
- Epsein et al. (citado por Rechcigl, 1995) reportan incremento de la CIC de 5,5 a 15,4 meq/100 g a un mes de la aplicación de 240 tons/ha de lodos (digerido anaerobicamente) en un suelo Ultisol en Maryland (U.S.A).
- Kladviko y Nelson (citado por Rechcigl, 1995) luego de la aplicación de 56 tons/ha de lodo a un suelo Alfisol encontraron que la CIC incremento de 9,7 a 24 meq/100 g a los dos meses y de 8,2 a 17,9 meq/ 100 g a doce meses de la aplicación.

La CIC puede incrementar con el aumento de materia orgánica; sin embargo, este puede ser atribuido a la alta capacidad de intercambio de la materia orgánica del lodo. La capacidad de intercambio puede disminuir con el tiempo debido a la degradación de la materia orgánica (Clapp et al., 1986).

#### **- Conductividad Eléctrica**

Las aplicaciones sucesivas de lodos a suelos pueden aumentar la 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. El método rápido para

evaluar la salinidad es la medición de la conductividad eléctrica (CE) (Yahüe et al., 1987).

Los principales efectos debido al exceso de la salinidad de los lodos son la disminución de la capacidad de germinación de la semilla y el crecimiento de la planta, y también el empeoramiento de la estructura del suelo (Yahüe et al., 1987). El incremento de CE, incrementa el potencial osmótico de la solución suelo, que puede reducir la habilidad de las plantas para absorber agua, afectando por tanto, su sobrevivencia y rendimiento (Yahüe et al., 1987; Clapp et al., 1986).

En estudios en Minnesota-Estados Unidos de América, la aplicación de 60 tons/ha/año de lodos durante cinco años al suelo mostró un incremento de la CE entre los 0-15 cm de profundidad de 0,32 a 0,46 dS/m, y de 0,30 a 0,43 dS/m entre los 15 y 30 cm. Estudios similares en Minnesota, con aplicaciones de 164 tons/ha/año de lodo durante tres años, informan un incremento de la CE de 0,08 a 1,40 dS/m (Clapp et al., 1986).

El incremento de la CE cuando se aplican los lodos en suelo, en un comienzo puede explicarse por la alta concentración de sodio, magnesio, calcio y cloruro; no obstante, la lixiviación de las sales solubles fuera del zona de las raíces puede disminuir la CE.

#### ▪ **Propiedades Biológicas**

La aplicación de lodos entrega nutrientes al suelo (materia orgánica) que incrementan la actividad microbiana (principalmente bacterias, hongos y actinomicetos). Sin embargo, tasas altas y elementos contenidos en los lodos pueden tener efectos adversos sobre la población microbiana.

Los microorganismos heterotróficos<sup>4</sup> del suelo son estimulados cuando se aplican lodos, probablemente porque aumenta la fertilidad y la estructura. (Rechcigl, 1995). Stadelmann and Furrer (citado por Rechcigl, 1995) reportaron un incremento de 164% a 204% en bacterias aeróbicas y de 142 a 251% de actinomicetos respecto a un fertilizante mineral cuando se aplicaron 13,3 tons/ha en un suelo franco arenoso en Suiza entre los años 1977 y 1981. Sin embargo microorganismos autótrofos<sup>5</sup>, como algas pueden disminuir por la aplicación de lodos (Rechcigl, 1995; Häni et al., 1996).

Dentro de los principales efectos cuando se aplican lodos de acuerdo Häni et al. (1996), principalmente grandes cantidades, se encuentran:

- reducción del tamaño de masa microbiana total,
- reducción de la actividad de fijación de nitrógeno, y
- cambios en la composición de la población microbiana del suelo.

Metales pesados y otras sustancias tóxicas contenidos en los lodos pueden dañar la diversidad de microorganismos afectando los procesos bioquímicos del suelo, y por tanto, el potencial de descomposición microbiano para eliminar sustancias orgánicas foráneas (Rechcigl, 1995; Häni et al., 1996).

---

<sup>4</sup> Microorganismos que necesitan de otros organismos para su alimentación

<sup>5</sup> Microorganismos que generan su propio alimento

### 2.4.3. Lodos como Fuente de Nutrientes

La aplicación de lodos permite aportar con elementos que pueden ser escasos en el suelo y necesarios para el crecimiento de las plantas. Los suelos habitualmente presentan un contenido de materia orgánica (<10%) inferior a los lodos (~50%). Otros elementos como el nitrógeno y carbono en los lodos también son relativamente más altos comparados con su contenido en el suelo.

La composición de los lodos y sus características (físico-químicas y biológicas) pueden afectar la disponibilidad de los macro y micronutrientes para las plantas. La **Figura 2-7** ilustra el aporte de materia orgánica y nutrientes contenidos en los lodos. Los lodos son una fuente de elementos potencialmente fertilizantes; en el suelo la liberación de sus constituyentes esta determinada por los procesos fisicoquímicos y biológicos (principalmente adsorción, precipitación, complejación, quelación, oxidación-reducción), que se desarrollan constantemente; una vez en la solución suelo, los elementos en sus formas iónicas son absorbidos por las plantas para su desarrollo y crecimiento.

Los lodos contienen una gran variedad de elementos y cuando se comparan respecto a otros materiales fertilizantes como guanos de animales y fertilizantes sintéticos es posible encontrar variadas diferencias, principalmente respecto al contenido de nitrógeno, fósforo, potasio y metales. En la **Tabla 2-18** se muestra el contenido de nutrientes en lodos, guanos de animales y fertilizantes sintéticos. El porcentaje de nitrógeno y fósforo disponible es mayor en fertilizantes sintéticos, pero similar o superior en los lodos respecto a guanos.

El contenido de metales en lodos puede ser mayor respecto a otros fertilizantes (ver **Tabla 2-19**). Algunos fitonutrientes con un alto contenido en los lodos son el cobre y cinc; otros elementos como el cromo y el plomo no esenciales también son posibles de encontrar en los lodos.

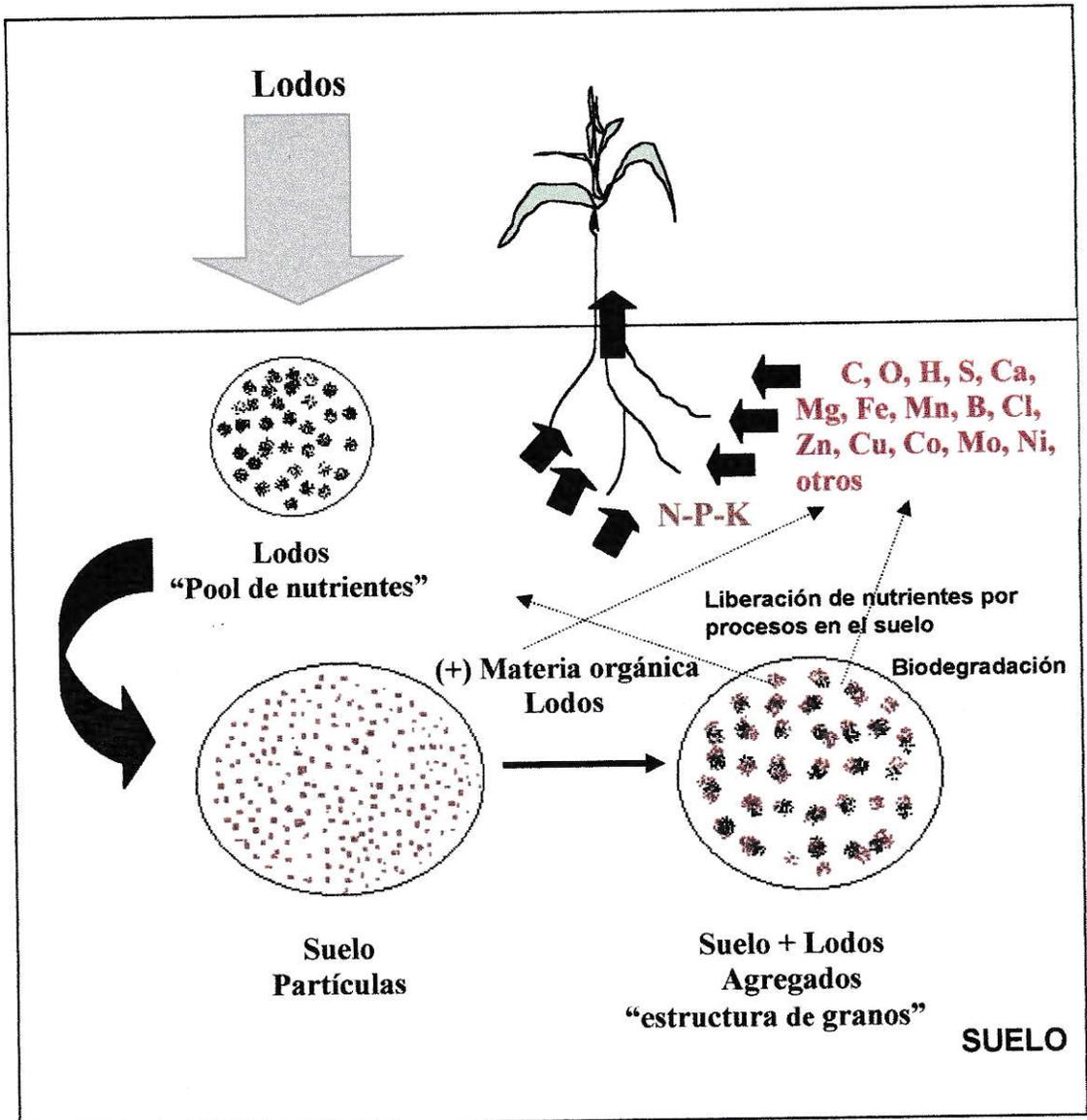


Figura 2-8. Aportes de elementos y materia orgánica contenidos en lodos

**Tabla 2-18.** Contenido de N-P-K (%) ms en lodos, guanos de animales y fertilizantes tradicionales

<b>Material</b>	<b>N (%)</b>	<b>P (%)</b>	<b>K (%)</b>
<b>Lodos</b>			
Lodo, PTAS El Trebal RM –Chile (a)	2-3	1-2	0,3-0,5
Lodo, U.S.A. (b)	3,9	2,5	0,4
Lodo, España (c)	3	1,3	0,5
<b>Guanos de animales (d)</b>			
Guano vacuno	0,94	0,42	1,89
Guano oveja	2,82	0,41	2,62
Guano cerdo	1,77	2,11	0,57
Guano caballo	1,98	1,29	2,41
Guano ave piso	2,89	1,43	2,14
Purín bovino	0,30	0,20	0,30
Guano rojo	1,80	1,80	1,65
<b>Fertilizantes sintéticos (disponibles en Chile) (e)*</b>			
Urea	46		
Nitrato calcio	36		
Nitrato de amonio	33		
Superfosfato triple		46	
Fosfato diamónico	18	46	
Cloruro de potasio			60
Sulfato de potasio			50

(a) Aguas Andinas S.A. (2003)

(b) U.S. EPA (1995)

(c) Aguilar et al. (1999)

(d) SAG (1998)

(e) CONAMA RM (2001b) ; \* Fósforo como P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Potasio como K<sub>2</sub>O

**Tabla 2-19.** Contenido de metales en lodos, abono y fertilizantes sintéticos

Metal	CONAMA (2001a)(a)	Aguas Andinas S.A. (2002) (b)	Rechcigl (1995)	EC (2001) (c)	Raven and Loeppert (1997)	GVRD (1999)	Bossche (2002)
		PTAS El Trebal RM-Chile	Lodo Estados Unidos de América	Lodo Europa	Abono (estiércol de vaca)	Fosfato Diamonio	Superfosfato Triple
(mg/kg ms)							
<b>As</b>	20	<b>12,1</b>	0,3 - 315,6		6,8	16,2	16
<b>Cd</b>	8	<b>2,85</b>	0,7 - 8.220	0,4-3,8	0,7	35,5	43 - 53
<b>Cu</b>	1000	<b>340</b>	6,8 - 3.120	39 - 641	17,5	41,8	90 - 60
<b>Hg</b>	4	<b>0,85</b>	0,2 - 47,0	0,3 - 3	<0,4		0,1 - 16
<b>Mo</b>	10		2 - 67,9				28
<b>Cr</b>		<b>244</b>	2,0 - 3.750	16 - 275	nd		145 - 315
<b>Ni</b>	80	<b>64</b>	2,0 - 976	9 - 90	9,6	48,3	55 - 66
<b>Pb</b>	300	<b>70,4</b>	9,4 - 1.670	13 - 221	7,5	2,1	0,5 - 5
<b>Se</b>	50		0,5 - 70,0		nd		
<b>Zn</b>	2.000	<b>1.873</b>	101 - 27.800	142 - 2.000	nd	386	141 - 625

(a) Propuesta de contenido de metales para aplicación de lodos a de suelos agrícolas en Chile (CONAMA, 2001a)

(b) Contenido promedio

(c) Contenido promedio para metales en lodos de estados miembros de la Comunidad Europea

nd: no detectado

#### 2.4.4. Calculo de Tasa de Aplicación de Lodos

La aplicación de lodos a suelos para cubrir la necesidad de nutrientes puede realizarse en base al nitrógeno, fósforo y potasio ( Franklin, 2001; Henry et al., 1999, U.S. EPA, 1995). Los requerimientos de nitrógeno varían de una especie a otra. Para determinar la cantidad de lodo necesaria para cubrir las necesidades de nitrógeno de los cultivos, es necesario conocer los requerimientos de cada planta, así como también, la proporción relativa del nitrógeno orgánico e inorgánico del suelo y del lodo (Henry et al., 1999).

En los lodos, el nitrógeno se encuentra principalmente en formas orgánicas (aminoácidos, proteínas, humus) cuando es adicionado al suelo y en menor cantidad, en la formas inorgánicas, amonio y nitrato (Henry et al., 1999). Todas las formas inorgánicas de nitrógeno se encuentran inmediatamente disponibles para las plantas. El nitrógeno inorgánico que mayoritariamente se encuentra en los lodos corresponde a las formas amonio y amoniacal. El nitrógeno amoniacal esta sujeto a perdidas por volatilización.

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 la descomposición de la materia orgánica, este proceso es realizado por microorganismos presentes en el suelo y es conocido como mineralización (Yahüe et al., 1987; Henry et al., 1999, U.S. EPA, 1995).

La mineralización del nitrógeno orgánico contenidos en los lodos, da lugar a una liberación progresiva pero no controlada del nutriente, encontrándose formas no asimilables inmediatamente e incluso no disponibles durante los primeros años de aplicación de lodos (Yagüe et al., 1987). La disminución de la tasa de mineralización, en primer caso la fracción de nitrógeno orgánico mineralizable disminuye a la mitad con el paso de los años tras su aplicación inicial al suelo (U.S. EPA, 1995).

El fósforo (expresado comúnmente como  $P_2O_5$ ) en lodos se considera de alta disponibilidad para las plantas ( Wen et al., 1997), encontrándose en general que la cantidad de fósforo suministrada, es más que suficiente para satisfacer las necesidades de los cultivos cuando el lodo es aplicado como fuente de nitrógeno. Al igual que el nitrógeno, se debe tener cuidado con su aplicación, ya que su disponibilidad en ciertas áreas puede ser excesiva, convirtiéndose en un riesgo para aguas subterráneas debido a su lixiviación.

La solubilidad del potasio (como  $K_2O$ ) es alta y generalmente la aplicación de lodos se realiza en base a los contenidos de nitrógeno y fósforo dado que son elementos esenciales para el desarrollo y crecimiento de las plantas.

La aplicación de lodos debe considerar el estado basal de suelo al momento de aplicación, análisis de suelos, y en el caso del lodo, análisis de su composición. Además, análisis de irrigación y otros parámetros como la estación y las precipitaciones deben ser considerados al momento de la aplicación (U.S. EPA, 1995).

La cantidad de lodos a aplicar, por unidad de superficie y por unidad de tiempo, se denominada **tasa agronómica** (CONAMA, 2001a) y puede ser en su forma líquida, semisólida o sólida. El general lodos bien estabilizados con relación C/N del orden de 10 puede emplearse como abono orgánico (Yahüe et al., 1987 ).

A continuación se presentan una serie de pasos que permiten estimar la tasa de aplicación de lodos de acuerdo a Guías para la aplicación de lodos a suelos de la U.S. EPA (1995), Henry et al. (1999) , Franklin (2001) y Yahüe et al. (1987).

#### 1. Calculo de nutrientes necesarios para las plantas

Se basa en las recomendaciones obtenidas del resultado de ensayos de suelos y objetivos reales de campo (en el **Anexo B** se muestran tasas aplicación de nitrógeno para diferentes cultivos en Chile). El requerimiento total de nitrógeno puede ser calculado mediante la cantidad de nitrógeno que necesita la planta, nitrógeno requerido ( $N_{req}$ ) (cultivos, árboles) menos el nitrógeno residual ( $N_{res}$ ) en el suelo previa aplicación de lodos. En el caso del fósforo y potasio, el caculo es similar.

$$\text{Requerimiento Total de Nitrógeno} = N_{req} - N_{res} \quad (\text{ec.1})$$

## 2. Calculo del valor total de nutrientes

Se obtiene a partir de los análisis muestras representativas del lodo a aplicar. En el caso del nitrógeno total Kjeldahl (TKN), incluye formas orgánicas e inorgánicas de nitrógeno. Para obtener la concentración de nitrógeno orgánico, se deben restar las formas inorgánicas de nitrógeno (N-NO<sub>3</sub> y N-NH<sub>4</sub>) al TKN.

a. Composición del lodo: **N-Org, N-NO<sub>3</sub>, N-NH<sub>4</sub>, P, K**

b. Nitrógeno orgánico:

$$\begin{aligned} \text{N-Org} &= [\text{TKN} - (\text{N-NO}_3) - (\text{N-NH}_4)] \quad (\text{ec. 2}) \\ \text{\%N-Org} &= [\text{\%TKN} - (\text{\%N-NO}_3) - (\text{\%N-NH}_4)] \end{aligned}$$

## 3. Estimación de los nutrientes disponibles

a. Nitrógeno

Nitrógeno disponible para las plantas corresponde al contenido neto de nitrógeno inorgánico disponible para las plantas. Para obtener el nitrógeno disponible, debe ser considerada la mineralización del nitrógeno orgánico (ec.3). La multiplicación de la concentración de nitrógeno orgánico por su factor de mineralización (FM<sup>6</sup>) y la consideración de las pérdidas de volatilización de amoníaco (FV<sup>7</sup>) permiten obtener la contribución al nitrógeno disponible total (el Anexo B muestra estimaciones de factores de mineralización y de volatilización del amoníaco). El porcentaje de nitrógeno disponible de la fracción orgánica puede ser estimado como sigue:

$$\text{N}_{\text{disponible}} = (\text{FM}) \times [\text{\%TKN} - (\text{\%N-NO}_3) - (\text{\%N-NH}_4)] \quad (\text{ec. 3})$$

---

<sup>6,7</sup> Factores obtenidos de ensayos de invernadero y campo

El nitrógeno total disponible puede ser calculado como:

$$N_{\text{disponible}} = \% \text{ N-NO}_3 + (\text{FV}) \times \% \text{ N-NH}_4 + (\text{FM}) \times [\% \text{TKN} - (\% \text{ N-NO}_3) - (\% \text{ N-NH}_4)]$$

(ec. 4)

#### b. Fósforo

Mayoritariamente el fósforo contenidos en los lodos corresponde a formas inorgánicas de inmediata disponibilidad para las plantas. Por tal razón, se considera que alrededor del 50% (0,5) del fósforo contenido en lodos se encuentra disponible para las necesidades de las plantas al igual que en fertilizantes comerciales como el superfosfato triple o fosfato diamonio. El fósforo disponible puede ser calculado como:

$$\text{kg P}_2\text{O}_{5\text{disponible}} \text{ total/tons ms} = \% \text{P del lodo} \times 2,3 \times 0,5 \quad (\text{ec. 5})$$

2,3: factor para convertir g o kg de P a g o kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ( relación de masas atómicas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:P; 142:62)

#### 4. Tasa agronómica

Para calcular la tasa de aplicación de lodo, basada en cualquiera de los nutrientes, se debe dividir el valor del paso 1 por el paso 3, para el respectivo nutriente.

$$\text{Tasa N agronómica} = (N_{\text{req}} - N_{\text{res}}) / N_{\text{disponible}} \quad (\text{ec. 6})$$

$$\text{Tasa P agronómica} = P_{\text{req}}(\text{kg/ha}) / (\text{kg P}_2\text{O}_{5\text{disponible}} \text{total /tons ms}) \quad (\text{ec. 7})$$

Los siguientes son ejemplos para calcular la tasa agronómica.

**Ejemplo 1.** Calculo de % de N<sub>disponible</sub>, cuando se emplea lodo (lodo activado) con un contenido de 0,5% N-NO<sub>3</sub>, 0,8% N-NH<sub>4</sub> y 5,75% TKN, que es aplicado mediante

dispersión superficial y con inmediata incorporación al suelo. Las pérdidas por lixiviación y desnitrificación se consideran insignificantes.

Empleando la **ecuación 4** para nitrógeno total disponible:

$$\begin{aligned} N_{\text{disponible}} &= 0,5 \% + 0,75 \times 0,8\% + 0,4 \times (5,75\% - 0,5\% - 0,8\%) \\ &= 0,5\% + 0,6\% + 1,78\% \\ &= \sim 3 \% \text{ (o } 30 \text{ g } N_{\text{disponible}} / \text{kg ms)} \end{aligned}$$

**Ejemplo 2.** Estimación de la tasa de aplicación de lodos ( $B_{ap}$ ) basada en el nitrógeno, considerando las presentes condiciones:

- El requerimiento de N para la producción anual de 30 tons de una hierba de pastoreo es 480 kg/ha.
- Análisis del contenido de N residual en el suelo (mineralización de materia orgánica y contenido de  $\text{NO}_3^-$ ) indican 336 kg/ha.
- La aplicación de un lodo que puede proporcionar 19 kg/tons de N, después de pérdidas de  $\text{NH}_3$ , y N por desnitrificación.

$$N_{\text{req}}: 480 \text{ kg/ha}; N_{\text{res}}: 336 \text{ kg/ha}; N_{\text{disponible}}: 19 \text{ kg/tons}$$

Empleando la **ecuación 6** :

$$\begin{aligned} \text{Tasa N agronómica} &= (480 - 336) / 19 \\ &= \sim 7,6 \text{ tons /ha} \end{aligned}$$

**Ejemplo 3.** Calculo de tasa agronómica a base del fósforo para aplicación de lodo con un contenido de 1,9% ms de P (como  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), o 19 g P/ kg lodo ms, para un cultivo de trigo con un  $P_{\text{requerido}}$  de 66 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$ /ha considerando un 50% de fósforo disponible.

Empleando las ecuaciones 5 y 7:

$$\begin{aligned} \text{kg P}_2\text{O}_{5\text{disponible}} \text{ total/tons ms} &= 1,9\% \times 2,3 \times 0,5 \times 1000 \\ &= 21,85 \end{aligned}$$

Tasa P agronómica= ~3 tons ms/ha

## 5. Selección de la tasa agronómica

Este paso es muy importante, se debe seleccionar el nutriente considerando el paso 4, el valor mas alto nos indica que puede ser empleado como un completo fertilizador, mientras que el más bajo permite la máxima eficiencia de nutrientes.

También, la aplicación puede ser de acuerdo a límites de contaminantes contenidos en los lodos, como los metales pesados cuando estos se encuentran regulados, principalmente para límites de metales anuales (U.S. EPA, 1995).

La estabilización y reducción de la disponibilidad de metales pesados cuando se aplican lodos al suelo, es la progresiva inmovilización en formas menos solubles como su oclusión en óxidos de hierro y aluminio, o precipitados como silicatos, fosfatos y carbonatos (Keller et al., 2002). La materia orgánica, entre otros, es un importante regulador de estos elementos en el suelo. Es bien conocida la afinidad de la materia orgánica por algunos metales, como el cobre y el plomo. Sin embargo, la mineralización de la materia orgánica (degradación) puede liberar elementos retenidos hacia el medio ambiente, incrementando su biodisponibilidad y lixiviación (Keller et al., 2002).

La biodisponibilidad y fitotoxicidad de metales pesados al utilizar lodos en la agricultura han sido estudiados por largo tiempo, las conclusiones obtenidas al respecto varían con la especie, características del suelo y carga de metales pesados (Keller et al., 2002). En la **Tabla 2-20** se muestran tasas de aplicación de lodo y algunos contenidos de metales totales en plantas obtenidos en experiencias de empleo de lodo con fines

agrícolas; la parte inferior, muestra rangos de concentraciones de metales totales habituales en hojas de plantas que indican deficiencia, normalidad y contenidos excesivos en hojas.

**Tabla 2-20.** Contenido total de metales en plantas tras aplicaciones de lodos estabilizados

Cultivo	Tasa de lodo	Metal (mg/kg ms)						
		Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Hierba pastoreo (a)	22,4 tons/ha			5,86				25,7
	44,8 tons/ha			5,1				25,9
Trigo hojas (b)	0,16-0,24 tons N/ha		0,64	10				52
Alfalfa, retoños (c)	100 ton/ha	21,4		11,9		102,7		690,1
Maíz, hojas (d)	10 tons/ha/año	65,6		12,5		4,7		59,1
Acelga, hojas (e)	100 tons	2,1		11,4 (12,2)		7,2		106 (199)
Referencia para concentraciones en hojas (f)	Deficiente			2-5				10-20
	Suficiente o normal	0,05-0,2	0,1-0,5	5-30		0,1-5	5-10	27-150
	Excesivo o tóxico	5-30	5-30	20-100	1-3	10-100	30-300	100-400

\* Valores entre paréntesis corresponden al segundo año de la aplicación

- (a) Tiffany et al. (2000b) (Estados Unidos de América)
- (b) Kiemnec et al. (1990) (Estados Unidos de América)
- (c) Ibekwe et al. (1995) (Estados Unidos de América)
- (d) Boisson et al. (1998) (Francia)
- (e) Miller et al. (1995) (Estados Unidos de América)
- (f) EC (2001)

#### 2.4.5. Época, Forma y Cuidados de la Aplicación de Lodos

La aplicación de lodos a cultivos esta determinada, entre otros factores, por estación de aplicación y el periodo de crecimiento de la planta. Para cultivos estacionales pueden adicionarse durante los meses de verano en los cuales se desarrolla el ciclo biológico, permitiéndose la rápida absorción de lodos cuando éste se encuentra en estado líquido (Yagüe et al., 1987). En el caso de prados y cultivos herbáceos en

general, lodos en estado líquido pueden aplicarse en el período de actividad vegetativa; aunque, se obtienen mejores resultados en los meses de verano.

La aplicación a frutales, viñedos, olivos y bosques esta determinada por las características de la planta y las condiciones edafo-climáticas, aunque no depende del tipo lodo a utilizar, se sigue como etapa de aplicación el período que precede a la reanudación de la actividad vegetativa (Yagüe et al. , 1987).

La rotación de cultivos puede permitir la aplicación de lodos, ciertos cultivos como el maíz y el girasol pueden recibir altas tasas de aplicación de lodos. Así por ejemplo, en una rotación cuatrienal de una planta estacional como el maíz (maíz-trigo-trébol de prado-trigo) puede emplearse cantidades elevadas de lodos (3 o 4 veces superiores a las recomendadas como dosis media anual) cada cuatro años (Yagüe et al., 1987).

Cuando se aplica lodos en estado sólido es conveniente que esta sea tiempo antes al cultivo, meses antes, para dar tiempo a los procesos de mineralización y por tanto, disponibilidad de nutrientes. La aplicación durante la etapa de crecimiento de cultivos a ras de piso se encuentra prohibida en varios países. La aplicación de los lodos debe considerar aspectos ambientales, asociados principalmente a su contenido patógenos y metales pesados. Algunas consideraciones propuestas por Yagüe et al. (1987) para cultivos son:

- Cultivos paisajistas: la aplicación de lodos a este tipo de cultivos no debería presentar problemas para la alimentación humana; sólo cuando se aplique en parques y jardines urbanos habrá de procurarse que se encuentran bien estabilizados para evitar malos olores.
- Cereales : Aquí el riesgo es mayor, a pesar de no esperarse concentraciones importantes de elementos tóxicos en granos, sí, en cambio, será probable

encontrarlos más abundantemente en los órganos vegetativos. En el caso de emplear las pajas para la alimentación de animales, es necesaria tomar resguardos apropiados.

- Praderas: En praderas el riesgo esta asociado principalmente a los patógenos contenidos en los lodos, por lo que es aconsejable respetar un cierto plazo entre la adición de lodos al suelo y la entrada del ganado a pastar, dando tiempo a los mecanismos del suelo para eliminar organismos.
  
- Cultivos de huerta: Las precauciones para estos cultivos deben ser mucho más estrictas. Al respecto los principales cuidados son la acumulación de metales pesados y la infección por patógenos. Algunas especies hortícolas como la lechuga (*Lactuca sativa*) y el tomate (*Solanum lycopersicum*) poseen una capacidad exacerbada para la absorción de metales pesados, principalmente cadmio. Agentes patógenos pueden causar trastornos sobre la salud, sobre todo sí los productos hortícolas se consumen crudos.

Las forma de aplicación de lodos a cultivos va a estar determinada por el estado físico del lodo, el tipo de suelo, la época de aplicación (periodo estacional y periodo de desarrollo de la planta) y el tipo de organización (instrumentación, maquinaria disponible, sistemas de irrigación adecuados, etc.) (Yagüe et al. , 1987, U.S. EPA, 1995). En la **Tabla 2-21** se muestran sistemas de distribución utilizables en función del estado de los lodos.

**Tabla 2-21.** Sistemas de distribución utilizables en función del estado del lodo (Yagüe et al., 1987)

(%) Agua	Estado del lodo	Modo de distribución
100, 90	Líquido	Abonado por aspersión, infiltración en surcos, adicionado al agua de riego
90, 80	Pastoso	De consistencia blanda poco adaptados al abonado mecánico
70, 60, 50, 40, 30,20	Semisólido	Los mismos tipos empleados para estiércoles o guanos (abonadoras)
20,10	Sólido (en polvo o granulado)	Igual que para fertilizantes minerales, pala o tolva, otros

La elección del lugar de almacenamiento de los lodos es importante. El almacenar los lodos en el lugar de aplicación puede resultar ventajoso. Para uso no inmediato y grandes cantidades, estos pueden ser lugares acondicionados, como fosas o silos; para uso en el corto tiempo los bordes de los sitios de aplicación, como los costados de las parcelas son una alternativa (Lesty, 2001). Los lugares de almacenamiento deben reunir características mínimas para evitar efectos sobre el medio ambiente, entre ellas la elección de un lugar limitado, con acceso restringido, una distancia mínima respecto a aguas superficiales y subsuperficiales, entre otros.

#### 2.4.6. Experiencias del Empleo de Lodos en la Agricultura

A continuación se presentan algunos resultados obtenidos de estudios del uso de lodos.

Resultados de Soon and Bates (1985) en experimentos de campo con maíz (*Zea mays L.*) y pasto (*bromegrass-Bromus inermis Leyess*) con lodos (lodo digerido aeróbicamente) y nitrato de amonio-fertilizante comercial, en la década de los setenta en

Ontario-Canadá, indican que la concentración de Mo, Co y B en los cultivos, no presentó problemas significativos cuando el lodo es fue utilizado.

Gómez et al. (1994) en experimentos realizados en invernaderos (Alicante-España) para el cultivo de tomates, empleando tres tratamientos —suelo sin abonar, adición de 175 g de lodo por 100 g de suelo, adición de un abono químico equivalente al lodo aplicado— encontraron que la producción de tomates aumenta significativamente al abonar el sustrato del cultivo, con respecto al tratamiento sin abonar. Además, al abonar con el lodo se alcanzaron mejores rendimientos que con el abonado químico en cuanto a fruto se refiere. Respecto al balance de N-P-K del suelo, el lodo resultó ser positivo a diferencia de los no fertilizados; en comparación al abonado químico, el lodo aportó más nitrógeno, no así fósforo ni potasio, aunque su relación inicial fue similar, esto debido a que estos elementos se encuentran ligados o formando parte de compuesto orgánicos, menos disponibles para las plantas que los compuestos inorgánicos.

Proyecto INIA-España (1994-1997), en ensayos con girasol en invernaderos, estos manifestaron incremento en el contenido de proteínas con dosis crecientes de lodos. En ensayos con lodo compostado y con vermiculita o perlita, se encontró que estas mezclas pueden sustituir sin ningún problema agronómico a sustratos comerciales utilizados en semilleros profesionales.

Cogger et al. (1998) en estudios realizados con trigo (*Triticum aestivum L.*) y lodos (deshidratados), encontró que bajas tasas de aplicación proporcionan suficiente nitrógeno, con variable incremento en el contenido de proteínas y el nitrato residual del suelo. Con altas tasas de aplicación el contenido de proteínas y el nitrato residual en el suelo presentan un incremento mayor. Cogger et al. (1998) plantea que bajas tasas de aplicación proporcionan beneficios más prácticos, permitiendo reducir riesgos agronómicos y ambientales, y facilitan la aplicación en grandes extensiones de terreno.

Cogger et al. (1999), en estudios realizados sobre un periodo de 2 años con lodos, (seco al aire y deshidratados) en Washington -Estados Unidos de América y otros estudios (ver **Tabla 2-22**) sobre el suministro de nitrógeno a cultivos forrajeros, plantea que los lodos pueden sustituir a fertilizantes sintéticos nitrogenados en cultivos forrajeros irrigados a una tasa de 3 kg N –lodo por kg de fertilizante nitrogenado en el primer año y a una tasa de 2 kg N-lodo por kg de fertilizante en el segundo año. Estas tasas pueden ser equivalentes al emplear fertilizantes sintéticos nitrogenados y no incrementar el nitrato residual en el suelo. También sugiere, que el número de aplicaciones por año pueden reducirse por la lenta liberación de nitrógeno.

**Tabla 2-22.** Equivalencia de fertilización con nitrógeno para lodos en estudios de campo con cultivos perennes (adaptado de Cogger et al., 1999)

Locación	Cultivo Forrajero	Lodos	Lodo		N Total aplicado	Equivalencia anual de fertilizar con nitrógeno	
			N Total	N-NH <sub>4</sub>		Año 1	Año 2
			(g/kg)	(g/kg)	(kg/ha/año)	(%)	(%)
Irlanda	<i>Lolium perenne</i>	Activado, líquido	63	NR	107, 214, 321	41	60
Francia	<i>Lolium perenne</i>	Digestión anaeróbica, líquido	36	9	235, 470, 705	33	-
Canadá	<i>Bromus inermis</i>	Lodo Fe, líquido	29	10	400	26	57
U.S.A.	<i>Festuca arundinacea</i>	Digestión anaeróbica, líquido	26	12	110, 220, 440, 880	27	41
U.S.A.	<i>Bromus uniloides</i>	Aeróbico/anaeróbico termofílico, deshidratado	43	9	245, 490, 980	35	43
U.S.A.	<i>Paspalum notatum</i>	Secado con calor, pelets	45	3	100, 200, 400	44	-
<b>Promedio</b>						<b>32</b>	<b>50</b>

Tiffany et al. (2000a,b) realizó aplicaciones de lodos en dos localidades de Estados Unidos de América (Tampa y Baltimore) de acuerdo a las recomendaciones locales para la fertilización de cultivos forrajeros con nitrógeno (179 kg N /ha). La

aplicación consideró una tasa de mineralización del nitrógeno total de los lodos de 40%. La **Tablas 2-23 y 2-24** muestran algunos de los resultados obtenidos. Tiffany et al. (2000b) de acuerdo a los resultados obtenidos plantean que los lodos pueden ser una potencial fuente de elementos fertilizantes para cultivos forrajeros; respecto al contenido de macronutrientes como calcio, fósforo, magnesio y sodio estos fueron superiores a los valores obtenidos en el control (fertilizante comercial), por otro lado, los cultivos forrajeros no manifiestan toxicidad por acumulación de micronutrientes.

**Tabla 2-23.** Proteína cruda en cultivo forrajero<sup>1</sup> en Estados Unidos de América (tomado de Tiffany et al , 2000a)

Tratamiento	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.
	Proteína Cruda (% ms) <sup>2</sup>					
Control						
496 kg/ha; NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	18,9	13,6	11,8	9,3	12,8	11,3
Lodo (tons/ha)						
16,8; Loc. Tampa	19,9	16,5	12,9	11,8	15,8	14,0
33,6; Loc. Tampa	23,0	14,5	14,1	12,0	17,2	15,9
22,4; Loc. Baltimore	18,8	14,3	13,7	11,6	15,0	15,3
44,8; Loc. Baltimore	19,5	16,1	14,4	12,3	16,5	15,4

\* Loc.: Localidad

<sup>1</sup> Paspalum notatum

<sup>2</sup> La concentración crítica para proteína cruda es 7,0

**Tabla 2-24.** Concentración de Cu, Mo y Zn en cultivos forrajeros<sup>1</sup> tras aplicaciones de lodos<sup>2</sup> (tomado de Tiffany et al., 2000b)

Tratamiento	Junio			Julio			Agosto		
	Cu	Mo	Zn	Cu	Mo	Zn	Cu	Mo	Zn
	(mg/kg ms)								
Control									
496 kg/ha; NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	4,66	0,28	26,1	7,79	0,12	25,6	4,56	0,23	22,3
Lodo (tons/ha)									
16,8; Loc. Tampa	5,13	0,88	28,8	5,23	0,57	28,5	4,22	1,00	24,3
33,6; Loc. Tampa	5,25	0,99	26,1	6,86	0,70	28,1	4,54	0,82	25,5
22,4; Loc. Baltimore	5,86	0,47	25,7	6,41	0,26	26,0	4,84	0,38	24,9
44,8; Loc. Baltimore	5,10	0,44	25,9	6,15	0,24	26,5	4,67	0,56	23,3

<sup>1</sup> Paspalum Notatum

<sup>2</sup> Concentraciones críticas son Cu 10 mg/kg, Mo 5 mg/kg y Zn 30 mg/kg

Banuelos (2002), aplicaciones en California-Estados Unidos de América de lodo compostado basadas en contenido total de nitrógeno (0, 57, 170 y 340 kg N/ha,) a árboles de damascos durante siete años muestran cambios en la calidad y fertilidad del suelo. Incremento en la salinidad del suelo se observan luego de los siete años; sin embargo, no se encontraron efectos negativos sobre la calidad y producción de los frutos. Tampoco, encontraron incrementos significativos en metales pesados dentro de los primeros 60 cm de profundidad, y contenido de metales pesados significativos en hojas y frutos comparados con muestras de árboles sin aplicación. Contenidos totales de nitrógeno, calcio, manganeso y cinc fueron significativamente superiores en hojas, y todos los macro y micronutrientes fueron mayores en frutos de árboles que crecieron con aplicación de lodos.

En la **Tabla 2-25** se comparan tasas de aplicación entre suelos agrícolas, suelos forestales y suelos degradados en Estados Unidos de América.

**Tabla 2-25.** Características típicas de practicas de aplicación de lodos en Estados Unidos de América

Práctica	U.S. EPA (1995)*		
	Tasa	Frecuencia	Vida útil
Suelos agrícolas	Varía entre 2-70 tons/ha/año ms dependiendo del cultivo, tipo y características del lodo, etc. Tasa típica: 10 tons/ha/año ms **	Repetida anualmente	Entre 20 a 100 años, limitada por regulaciones para metales en lodos y suelos
Suelos forestales	Varía entre 0-220 tons/ha/año ms dependiendo del suelo, árbol (especie), calidad del lodo, etc. Tasa típica: alrededor de 18 tons/ha/año ms	Anualmente o intervalos de 3 a 5 años	Entre 20 a 55 años o más. Limitada por el contenido de metales en el lodo
Suelos degradados	Varía entre 70-450 tons/ha/año ms. Tasa típica: 112 tons/ha/año ms	Comúnmente una sola aplicación	Usualmente una sola aplicación ayuda a revegetar el sitio. Limitado por metales, no puede alcanzar 13 a 50 años o más

\* Referencias de tasas de aplicación presentadas en el Manual de Aplicación de Lodos a Suelos de la U.S. EPA (1995), "Process Design Manual, Land application of Sewage Sludge and Domestic Septage"

\*\* Rechcigl (1995) informa una tasa típica de 15 tons/ha/año

#### 2.4.7. Ventajas y Desventajas en la Agricultura del Uso de Lodos

Dentro de las principales ventajas y desventajas del uso de lodos basados en U.S. EPA (1995), EEA (1997), Henry et al. (1999) , O'Connor (2001), (EC, 2001) y Banuelos (2002) en la agricultura, se encuentran:

- Aporte de materia orgánica, proporciona humus al suelo.
- Incrementa el crecimiento y la cubierta vegetal.

- Incrementa la infiltración del agua y mejora la retención de agua, disminuye la pérdida de materiales del suelo por efecto de la erosión del agua.
- Disminuye la erosión causada por escorrentías.
- Disminuye la erosión causada por el viento.
- Mejora la capacidad de intercambio cationica.
- Permite convertir un residuo en una fuente aprovechable de elementos como nitrógeno y fósforo, para el suelo y plantas.
- Mejora la calidad del forraje y árboles frutales, con alta concentración de nutrientes en el tejido de las plantas.
- Sustitución o reemplazo de fertilizantes sintéticos.
- Valorización agrícola de lodos.

Principales desventajas:

- Dificultad para su aceptación, efecto social.
- Restricciones ambientales.
- Inversión en almacenamiento.
- Dependencia de agricultor de la producción y composición del lodo.

## **2.5. Impactos Ambientales y Sociales por Uso de Lodos en la Agricultura**

### **2.5.1. Impactos Ambientales**

La gran variedad y naturaleza de los compuestos contenidos en los lodos junto con los sistemas con que puede interactuar, hace que existen diferentes vías a través de las cuales el lodo puede tener algún efecto sobre la vegetación, animales y el ser humano.

Los sistemas susceptibles a perturbación cuando se aplican lodos en la agricultura son el suelo, agua y aire ( U.S. EPA, 1995; EC; 2001; WEAO, 200). La dinámica, el tipo de interacción y la respuesta genotípica diferente de quienes componen estos sistemas, plantas, animales y humanos, hace que estos sistemas sean difíciles de evaluar.

A continuación se presentan algunos de los efectos de constituyentes de los lodos sobre los sistemas suelo, aire y agua. Principalmente se destaca el sistema suelo por ser la base que sustenta la vida y donde se originan los alimentos.

- **Suelo**

- **Patógenos**

Dentro de las restricciones para el empleo de lodos en la agricultura se encuentran el contenido de patógenos. El contenido de patógenos excretado en material fecal puede infectar comúnmente por vía oral a animales y humanos, ya sea por contacto directo con el lodo, por consumo de alimentos contaminados, por aguas contaminadas (escorrentías) o por contacto con animales infectados (EC, 2001).

Los microorganismos patógenos, para su crecimiento necesitan de condiciones favorables como humedad y temperatura. Muchos pueden sobrevivir en condiciones adversas como los huevos de Tenia (*Taenia ss.p*) y Ascaris (*Ascaris ssp.*); sin embargo, estos no pueden reproducirse sin un huésped y su concentración promedio en lodos comúnmente es baja (EC; 2001). Las lluvias también pueden reducir su concentración a través de escorrentía o lixiviación.

La **Tabla 2-26** contiene algunos de los patógenos encontrados en lodos y sus efectos sobre la salud humana y en la **Tabla 2-27** el tiempo de sobrevivencia de algunos de ellos.

**Tabla 2-26.** Patógenos y efectos sobre la salud humana (adaptado de WEAO, 2001)

Patógenos	Síntomas/Enfermedad
<b>Bacterias</b>	
Salmonella spp.	▪ Salmonelosis (envenenamiento comida), tifus
Vibrio Cólera	▪ Cólera
Escherichia coli	▪ Gastroenteritis
<b>Virus</b>	
Poliovirus	▪ Poliomiелitis
Hepatitis A virus	▪ Hepatitis infecciosa
Rotavirus	▪ Gastroenteritis aguda con diarrea severa
<b>Protozoos</b>	
Giardia lamblia	▪ Giardiasis (diarrea y calambres abdominales)
Balantidium coli	▪ Diarrea y disentería
<b>Helmintos (gusanos)</b>	
Taenia saginata	▪ Insomnio, anorexia
Ascaris lumbricoides	▪ Alteraciones digestivas, dolor abdominal
Hymenolepsis nana	▪ Teniasis

**Tabla 2-27.** Tiempo de sobrevivencia de patógenos en suelos y plantas (EC, 2001)

Patógenos	Suelos		Plantas	
	Máximo absoluto	Máximo común	Máximo absoluto	Máximo común
Bacterias	1 año	2 meses	6 meses	1 mes
Virus	6 meses	3 meses	2 meses	1 mes
Protozoos	10 días	2 días	5 días	1 día
Gusanos Helmintos	7 años	2 años	5 meses	1 mes

### - Compuestos Orgánicos

Los lodos contienen compuestos orgánicos que pueden ser degradados por los microorganismos. Los compuestos orgánicos no tienden acumularse en las plantas, pero si persisten sobre la superficie de estas y pueden ser traspasados a animales y seres humanos a través de su consumo, bioacumularse.

En general, se ha encontrado que la absorción de PCBs es baja en plantas; es nula para el maíz, lechuga, espinaca, granos de avena o trigo, y es más significativa en porotos y zanahorias. La transferencia de PCBs a plantas es menor que HAPs (EC, 2001).

Existen referencias respecto contaminación por PCBs, se ha encontrado que es mayor en animales que en plantas, principalmente se acumula en tejidos y leche de animales; el movimiento de estos compuestos va ligado al grado de cloración, siendo mayor en los más clorados (EC, 2001; WEAO, 2001).

La **Tabla 2-28** muestra el origen de PCBs y HAPs; el mayor aporte en suelos cultivados en áreas urbanas y rural, estaría dado por el lavado de estos compuestos desde

la atmósfera. No obstante, una importante contribución entre los materiales fertilizantes sería vía lodos.

**Tabla 2-28.** Origen de PCBs y HAPs en áreas rural y urbana (EC, 2001)

		<b>Suelos cultivados en área rural</b>	<b>Suelos cultivados en área urbana</b>
PCBs	Lluvia	48%	48%
	Lodo	18%	18%
	Residuo animal	17%	17%
	Fertilizante	1%	1%
HAPs	Lluvia	48%	80%
	Lodo	18%	14%
	Residuo animal	17%	6%
	Fertilizante	1%	0%

El riesgo de contaminación de napas subterráneas por lixiviación de compuestos orgánicos no ha sido tan estudiado, pero se estima que es bajo dada la biodegradación de estos compuestos, la volatilización, su retención por la materia orgánica del suelo (lipofílicos) y la condición de hidrofobia de gran parte de estos compuestos, hacen que su paso aguas subterráneas sea bajo (EC, 2001).

En la **Tabla 2-29** se dan a conocer las propiedades de ocurrencia y transferencia de los principales grupos orgánicos contaminantes encontrados en lodos y suelos tratados con lodos. El fraccionamiento de las moléculas y su dinámica hace que sea difícil su evaluación cuando son incorporados al suelo.

**Tabla 2-29.** Propiedades, ocurrencia y transferencia de grupos orgánicos encontrados en lodos y suelos tratados con lodos (adaptado de EC, 2001)

Grupo de Compuestos	Propiedades físico-químicas	Concentración en lodos	Degradación	Potencial lixiviación	Tomado por plantas	Transferencia a animales
HAPs	Soluble en agua/volátil a lipofílico	1-10 mg/kg	Semana→10 años fuertemente adsorbido por materia orgánica	Ninguna	Muy pobre, absorción foliar	Posiblemente, pero rápidamente metabolizado, no acumulativo
PCBs	Compuestos, >20 congéneres baja solubilidad en agua, altamente lipofílicos y semivolátiles	1 - 20 mg/kg	Muy persistentes, periodo medio varios años, fuertemente adsorbidos por la materia orgánica del suelo	Ninguna	Retención en raíces, absorción foliar, tomado por raíces y translocación mínima	Posiblemente en leche y tejidos vía ingestión de suelo; mediano y largo plazo
PCDD/F	Compuestos, 75 congéneres PCDD, 135 congéneres PCDDF Baja solubilidad en agua, altamente lipofílicos semivolátiles	Muy bajo < pocos µg/kg	Muy persistentes, varios años, fuertemente adsorbidos por la materia orgánica del suelo	Ninguna	Retención en raíces, absorción foliar tomado por raíces y translocación mínima	Posiblemente en leche y tejidos vía ingestión de suelo; mediano y largo plazo
Pesticidas organoclorados	Variado, lipofílico a hidrofílico, algunos volátiles	<pocos mg/kg	Baja > 1 año Perdidas por volatilización	Ninguna	Retención en raíces, no importante translocación, absorción foliar	Vía ingestión de suelo, persistente en tejidos
Clorobenzenos	Solubles en agua/volátil a lipofílico	< 0,1 – 50 mg/kg	Baja (en tipo peso de molecular) por volatilización, altamente (en tipo de peso molecular) persistente	Alta a baja	Posibilidad de ser metabolizado vía raíces y follaje	Importante persistencia
Fenol	Variados, lipofílicos, alta solubilidad en agua y volátiles	0 – 5 mg/kg	Rápida	Moderado a bajo	Posibilidad vía raíces y follaje	Ninguna

## **- Compuestos Inorgánicos**

Los metales en los suelos se pueden distribuir en la fase líquida o fase sólida del suelo, la mayoría se puede ligar a compuestos minerales u orgánicos del suelo. Dentro de los parámetros que pueden afectar la distribución de metales en el suelo se encuentran el pH, la CIC, la materia orgánica, temperatura y la humedad.

La concentración de metales en suelos varía con la profundidad, normalmente su concentración decrece con la profundidad. Experiencia sobre uso de lodos indica que los metales tienden a acumularse entre 0-15 cm y 15-40 cm. Para suelos arenosos, el enriquecimiento con metales puede encontrarse en la capa comprendida entre los 60-80 cm (EC, 2001).

Normalmente, en suelos, uno de los principales afectados por la aplicación de lodos son las plantas, los constituyentes responsables de ello son las sales y los metales, la planta pierde calidad para su consumo o muere por toxicidad, cuando hay exceso de sales o la acumulación de metales en sus tejidos supera los niveles de tolerancia. De esta manera, es poco probable que un producto que manifieste signo toxicidad y más aun, no se encuentre apto para ser consumido, constituya un riesgo para la salud humana. Sin embargo, existen especies que son acumuladoras de metales y no disminuyen su rendimiento, por tanto, pueden ser consumidas al no manifestar efectos visibles y provocar trastornos sobre la salud animal y humana por su consumo continuo. Ejemplos de ello son la acumulación de Zn y Hg en plantas de nabos, la acumulación de Cd en soja y tomate, estos cultivos pueden acumular metales sin disminuir su rendimiento (Yahüe et al, 1987).

En el campo, los animales pueden consumir plantas que han acumulado metales; en este caso, existen riesgos directamente sobre el animal que las consume, como la deficiencia de cobre por efecto de exceso de molibdeno (plantas con más de 10-20 pp. de Mo son tóxicos para rumiantes) (EC, 2001; Thompson and Troeh, 1988).

La **Tabla 2-30** muestra los efectos de metales sobre plantas, animales y humanos. No todos los metales posibles de encontrar en los lodos son esenciales para la vida; para plantas principalmente el cadmio y el plomo no lo son. Otros como el molibdeno, su ausencia puede repercutir en la producción de los cultivos, en el caso de los cultivos de legumbres es esencial en la fijación simbiótica de nitrógeno y en la reducción de nitratos a la forma amina (Thompson and Troeh, 1988). Otros metales como el selenio y el cromo no son esenciales para las plantas; en el caso del cromo, este metal presenta un transporte lento hacia las plantas en el suelo (GVRD, 1999).

Los metales pesados tienden a incrementar su concentración con la tasa de aplicación en el suelo (EC, 2001; U.S. EPA, 1995). En el corto tiempo los metales pesados no son degradables, por tanto es posible esperar un aumento en el contenido de los metales. La acumulación de metales por plantas cuando se aplican los lodos va a depender de principalmente de la tasa de aplicación, tiempo de la aplicación y el tipo de cultivo (respuesta genotípica).

La lixiviación de metales pesados a aguas subterráneas cuando se aplican lodos al suelo es poca conocida. La dilución de los metales comúnmente previene efectos tóxicos Sin embargo, áreas poco profundas con pequeños cuerpos de agua y grandes extensiones tratadas con lodos pueden alcanzar niveles inaceptables para el agua de beber (Keller et al., 2002).

**Tabla 2-30.** Efectos de metales en plantas, animales y humanos (adaptado de GVRD, 1999; Thompson and Troeh, 1988)

Metal	Plantas	Animales	Humanos
As	Nivel en plantas es bajo, incrementa su disponibilidad cuando disminuye el pH.	Es ingerido principalmente a partir del suelo, bajo nivel de ingestión por animales.	Es beneficioso, puede provocar dolores abdominales, vómitos, diarrea, hiperpigmentación. Principio de toxicidad: 20 mg/día.
Cd	No es esencial, usualmente es retenido en raíces, alta concentración reduce el crecimiento de raíces.	Tóxico, puede ser traspasado a través de alimentos.	Beneficioso a bajas concentraciones. Puede provocar enfermedad itai-itai, bronquitis, neumonitis. Principio de toxicidad: 0,03 mg/día
Pb	No es esencial, solo una pequeña fracción de Pb en el suelo se encuentra disponible para las plantas.	No es esencial, el riesgo de movimiento de Pb desde el suelo a de plantas de consumo es bajo.	Beneficioso a bajas concentraciones. Causa náuseas, vómitos, anorexia. Principio de toxicidad: 1 mg/día.
Hg	Toxicidad en plantas es rara, baja disponibilidad de Hg del suelo para las plantas, raíces son efectivas barreras.	Tóxico, no es esencial.	Principio toxicidad: 0,40 mg/día.
Mo	Esencial micronutriente, cofactor en enzimas que fijan nitrógeno, legumbres son sensibles a la deficiencia de Mo.	Excesiva cantidad es tóxico, induce a molibdenosis o deficiencia de Cu.	Correlacionado con aumento de jugo gástrico y cáncer al esófago. Principio de toxicidad: 5 mg/día.
Ni	Importante en los procesos metabólicos.	Es importante en la dieta, se requiere >100 µg/kg en rumiantes.	Causa asma bronquial, cáncer, sinusitis. Principio toxicidad: 20 mg/día.
Cu	Esencial en la fotosíntesis, fijación de nitrógeno y síntesis de proteínas.	Elemento esencial.	Alteración en crecimiento, anomalía en el cabello, hipotermia, cardiomegalia. Principio de toxicidad: 200 mg/día
Zn	Esencial micronutriente, su concentración es alta en plantas jóvenes y decrece con la edad.	Esencial micronutriente, importante cofactor en un número importante de enzimas.	Alopecia, hipogonadismo, anorexia, retardo del crecimiento. Principio de toxicidad: 600 mg/día.

Los lodos contienen sales, estas pueden incidir directamente sobre planta, como en la germinación, afectando la sobrevivencia de estas y su rendimiento; también pueden causar atrofiamiento de las estructuras vitales para el desarrollo de las plantas, ausencia de pigmentación (clorosis) y muerte de tejido (necrosis), entre otros. El efecto sobre animales y humanos es poco probable cuando los lodos son aplicados a cultivos con altos contenidos de sales.

#### ▪ Agua

Patógenos pueden ser arrastrados por escorrentías o lixiviados, su consumo en aguas contaminadas pueden causar trastornos sobre la salud, animal y humana.

La mayoría de los compuestos orgánicos no migran a aguas superficiales o napas subterráneas dado sus características de hidrofobicidad y también por que son rápidamente degradados y/o fuertemente adsorbidos por el suelo. No obstante, surfactantes y clorobenzenos pueden arrastrados por aguas superficiales o lixiviados a napas subterráneas (EC, 2001).

El mayor trastorno que pueden sufrir las aguas, se deba probablemente a la lixiviación de nitratos y fósforo. Los nitratos son solubles en agua pueden causar eutroficación de los cuerpos de agua, contaminar plantas y causar problemas a la salud cuando se ingiere agua con un alto contenido de ellos, principalmente agua de pozo. Por su parte, el fósforo también puede contribuir a la eutroficación de las aguas, pero su baja solubilidad hacen que este sea de menor consideración.

- **Aire**

Algunos compuestos orgánicos volátiles (VOCs) como el benceno, tolueno y cloroformo son liberados a la atmósfera cuando se aplican los lodos a los suelos, dentro de las 48 horas de la aplicación. Por el contrario, los HAPs y los PCBs, no se evaporan. Los riesgos asociados a los VOCs tras la aplicación de lodos a suelos no sea establecido, pero se cree que son bajos. En general, la liberación de compuestos a la atmósfera cuando se emplean lodos es baja (CE, 2001; CHHIA, 1999).

### **2.5.2. Impactos Sociales**

El uso de lodos en la agricultura tiene diferentes formas de percibido por la población. El desconocimiento de que es el lodo, es uno de principales factores de su rechazo por parte de la comunidad (EC, 2001). El común de la población, cree que los lodos son “*excremento humano*”; sin embargo, esto no es cierto, los componentes de las aguas servidas sufren una serie transformaciones al ser sometidos a los diferentes tratamientos, estos pierden su integridad y al final se obtiene un material de aspecto y composición diferente al material base (aguas servidas).

En una segunda instancia, el rechazo de su empleo puede pasar por creer que el uso de lodos pueda afectar a suelos, plantas, animales y humanos de diferentes formas (U.S. EPA, 1995; EC, 2001; WEAO, 2001), entre estas se encuentran: el contagio de agentes patógenos causantes de enfermedades, la acumulación de metales pesados (toxicidad), la acidificación y salinización del suelo, lixiviación de nitratos y fósforo a acuíferos (como contribuyentes a la eutroficación de cuerpos de agua) y acumulación de compuestos orgánicos en las plantas y su traspaso dentro de la malla trófica.

Por otro lado, existe aceptación respecto a su uso, esta puede ser debido a costos económicos (más baratos que los fertilizantes tradicionales), antecedentes del empleo de

residuos animales en la agricultura, como el guano de aves (EC, 2001), y además, la cultura del reciclaje de residuos.

Algunos antecedentes sobre el empleo de lodos en países de Europa entregados por la Comunidad Europea en el 2001 (EC, 2001) son los siguientes:

- Francia; en general, los agricultores de este país creen que los factores que pueden incrementar el uso de lodos, son:
  - El reconocer que los agricultores sirven actualmente a la sociedad al reciclar los lodos.
  - El establecimiento de un sistema que asegure cubrir los potenciales daños.
  - Garantizar que no existirán consecuencias comerciales por el uso de los lodos.
  
- Alemania; entre los años 1970-1980, al dar a conocer resultados de niveles de cadmio y dioxinas en lodos mostraron un impacto negativo sobre la aceptación de los lodos. Consecuentemente, el uso agrícola decreció en un 40% del total de la producción, como respuesta a ello autoridades alemanas han introducido fuertes medidas para lograr la aceptación del uso de lodos en suelos. En el año 1999, asociaciones de agricultores se reunieron para aclarar el uso de los lodos en suelos, el resultado fue favorable, principalmente porque esta practica es económicamente viable. Sin embargo, recientemente ha existido presión para incrementar regulaciones contrarias al uso de lodos en la agricultura.
  
- Irlanda; en este país, los agricultores debaten mas sobre el esparcido en suelos de residuos animales; el debate sobre el empleo de lodos en suelos ocupa un segundo lugar.
  
- Italia; no existe un debate real sobre el uso de lodos en la agricultura, debido a que esta ruta de reuso sólo ocupa un 18% de la producción. De acuerdo a la información disponible, los agricultores no se han opuesto al reciclaje de lodo en la agricultura.

- Países Bajos; las fuertes restricciones para el empleo de lodos en la agricultura, han desincentivado esta alternativa, limitándola a un 4% de la producción nacional. Las organizaciones de agricultores creen que los lodos contienen más metales pesados que los residuos animales y fertilizantes.
- España; en este país se ha favorecido el empleo de lodo en suelos, esta ruta se ha incrementado en los últimos años. Por el momento, no existe un debate real sobre el empleo de lodos en la agricultura.
- Reino Unido; desde el año 1998 ha existido debate por la aplicación de lodos a suelos. La oposición, de operadores de plantas de agua y de tratamiento, en conjunto con el Consorcio Británico de Ventas ha argumentado que la practicas no garantizan la seguridad de los alimentos, principalmente por los patógenos y metales presentes en los lodos. Por su parte los agricultores han sobrellevado el empleo de lodos en la agricultura siempre que se consideren los sistemas de control. La contaminación por patógenos del suelo, es uno de temas de mayor interés para la comunidad agrícola.

En Estados Unidos de América la Regulación 503 tiene muchos retractoros que sostienen que no protege la salud humana, animal y ambiental en el largo tiempo. En la Universidad Cornell, el Instituto de Manejo de Residuos es uno los generadores de criticas a la Regulación 503 (“The Case For Caution”, Recommendations for Land Application of Sewage Sludges an Appraisal of the U.S. EPAs Part 503 Sludge Rules 503, 1999) y hacía algunas ciudades Europeas, donde las regulaciones y guías de manejo son más restrictivas.

Algunas de las criticas del Instituto de la Universidad Cornell son:

- Los límites sobre el aporte de metales contenidos en lodos carecen en cuanto a la calidad de los datos, particularmente los referidos a experimentos de largo tiempo.

- Los efectos en el corto tiempo (1-10 años) pueden que no sean un problema, pero en largo plazo la degradación de la materia orgánica seguida de la carga máxima de metales pesados puede incrementar su biodisponibilidad y causar pérdidas en la productividad del suelo.
- Compuestos químicos orgánicos no deben ser excluidos de la regulación por su baja presencia en los lodos.
- La U.S. EPA debería reevaluar el resguardo del pastoreo de animales de 30 días de espera luego de aplicación de lodos clase B a las pasturas.

La U.S. EPA y la Federación del Agua en Estados Unidos de América, ante las críticas sobre el empleo de lodos en la agricultura, sostienen que la Regulación 503 está basada en una gran cantidad de información científica, y ha servido para proteger la exposición individual (humanos, animales, cultivos, etc.). Además la Regulación 503 ha sido sometida a revisión por un comité de científicos ambientales y agrícolas expertos en el uso de lodos.

## 2.6. Proyecciones del Uso Benéfico de Lodos

### 2.6.1. Europa y Estados Unidos de América

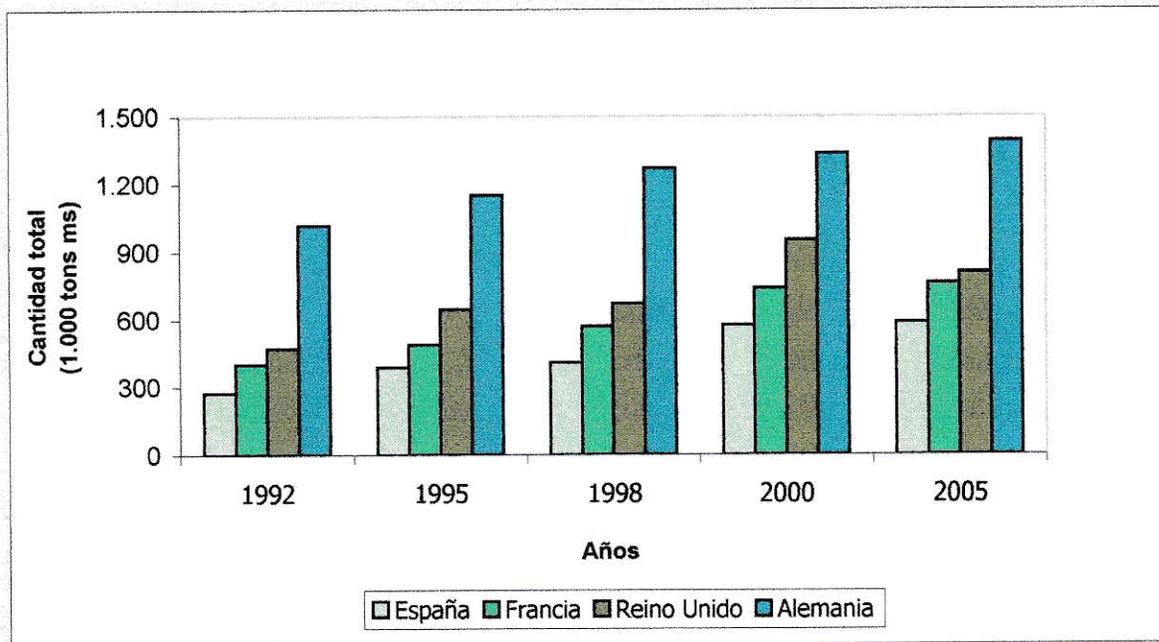
Para el año 2005 en Europa y Estados Unidos de América se espera que parte importante de la producción de lodos sea canalizada hacia el uso benéfico, principalmente en la agricultura (EC, 2001; EEA, 2002).

En el año 2000, Alemania fue el país europeo que mayor cantidad de lodos uso benéficamente, para el año 2005 espera un incremento de esta alternativa en un 4% ms aproximadamente. Le siguen en importancia para el año 2005, Francia ( 3% ms) y España (2% ms) (EEA, 2002).

Las proyecciones de los principales países productores de lodos en Europa para el año 2005, muestran un incremento del uso benéfico comprendido entre un 1 y 5% ms. De estos, el Reino Unido es el único que tiene proyectado para ese año, una disminución de esta vía en aproximadamente un 15% ms. Se cree que las principales causas que incidirían en esta disminución serían el temor de los agricultores por el impacto que pueda tener el lodo respecto a su contenido de metales y patógenos sobre el ambiente (EC, 2001). En la **Figura 2-9** se muestran las proyecciones para el uso lodos en los principales países productores de lodos en Europa.

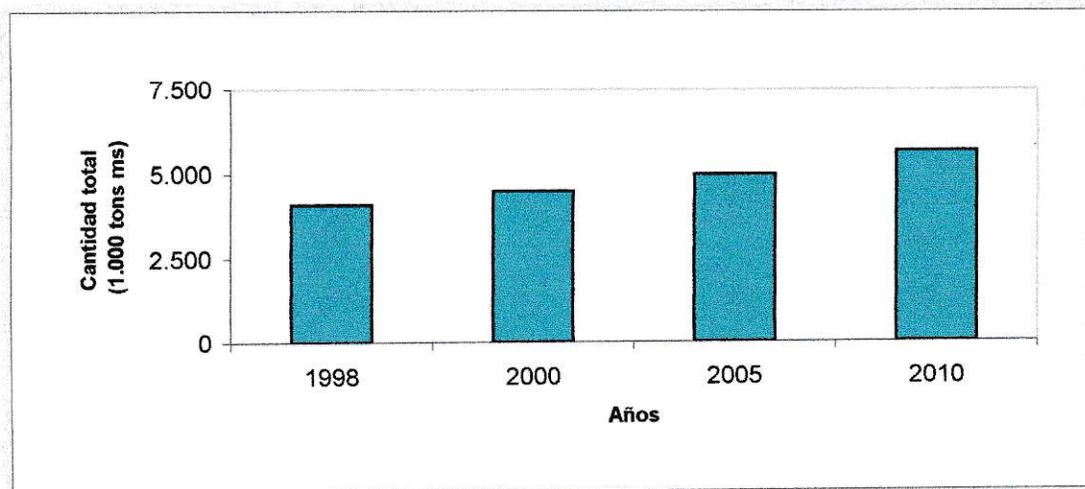
Uno de los países de Europa preocupado por la adecuada gestión de los lodos es España. En este país, el día 12 de julio del año 2001 se publicó en el Boletín Oficial del Estado el Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales 2001-2006, aprobado por Acuerdo del Consejo de Ministros (Secretaría General de Medio Ambiente, Madrid, 2001). Dentro de los objetivos que se pretende con este plan, se encuentra el proteger el medio ambiente y especialmente la calidad del suelo gestionando adecuadamente los lodos, así como el logro de algunos de los siguientes objetivos:

- valorización de al menos el 80% de los lodos de depuradora, antes del año 2007;
- valorización en usos agrícolas del 25% de lodos depuradora, previamente compostados antes del año 2007;
- valorización en usos agrícolas del 40% de los lodos de depuradora tratados anaerobicamente o sometidos a otros tratamientos, antes del año 2007.



**Figura 2-9.** Proyecciones de uso benéfico de lodos en países de Europa para el año 2005 ( basado en EEA, 2002)

En Estados Unidos de America, las autoridades con el incentivo continuo del uso de lodos, superior al de Europa (Renne, 2000; U.S. EPA, 1999a), esperan un incremento del uso benéfico para el año 2010 en un 27% respecto al año 2000. La **Figura 2-10** muestra el aumento gradual proyectado para el uso benéfico de lodos para el año 2010; estimandose para este año sobre las 5 millones de toneladas destinadas a uso benéfico.



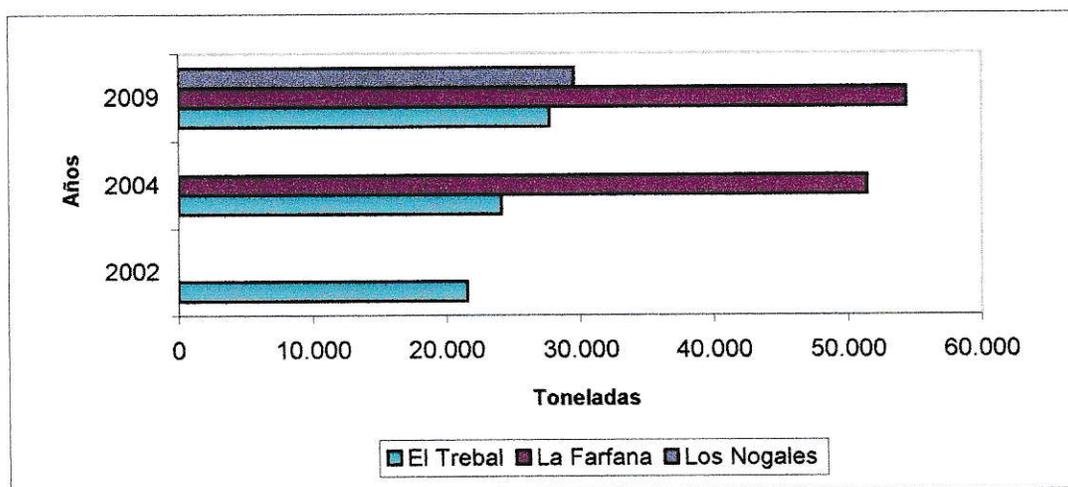
**Figura 2-10.** Proyecciones de uso benéfico de lodos en Estados Unidos de América para el año 2010 (basado en U.S. EPA, 1999a).

A nivel mundial, se espera que el uso benéfico de lodos, principalmente vía agricultura, manifieste un aumento gradual para el año 2005, dentro de las principales causas que provocarían tal aumento, de acuerdo a la Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. EPA, 1999a) y la Comunidad Europea (EC, 2001), se encuentran:

- El aprovechar los elementos fertilizantes contenidos en los lodos;
- Disminución de la disposición de lodos en vertederos; en el futuro se espera su disminución por la implementación gradual de regulaciones sobre vertederos (*Directive on the Landfill of the Waste, 1999/31/EEC*).
- En el futuro, los incineradores en Estados Unidos de América estarán sujetos a regulaciones más estrictas (*Clear Air Act, U.S. EPA, 1999a*), probablemente esta ruta de disposición se vea afectada, destinando parte de los lodos principalmente al uso en la agricultura.

## 2.6.2. Perspectivas para el Uso Agrícola de Lodos en Chile (Región Metropolitana)

En la Región Metropolitana, con la creación de las nuevas plantas de tratamiento se espera un incremento en la producción de lodos. La **Figura 2-11** muestra la producción de lodos estimada para las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas El Trebal, La Farfana y Los Nogales de Aguas Andinas S.A. Para el año 2009 estas tres plantas en conjunto producirían del orden de las 100.000 tons ms al año.



**Figura 2-11.** Producción de lodos de la tres principales Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas para el Gran Santiago (Lesty, 2001)

Estos lodos producidos necesitan un destino. La CONAMA en el Informe Final sobre Caracterización, Reutilización, Tratamiento y Disposición Final de Lodos Provenientes de Plantas de Tratamiento, para la Elaboración de una Propuesta de Normas Técnicas de Manejo Contrato N° 07-0002-044, presenta alternativas de disposición final de lodos y su posible aplicabilidad. En la **Tabla 2-31** se muestran las alternativas de uso o disposición de lodos propuestas en Chile por la CONAMA. De acuerdo al informe, los lodos podrían ser utilizados en la agricultura en la Región Metropolitana con limitaciones dependiendo de disponibilidad de suelos agrícolas. Otras opciones para la Región Metropolitana son los vertederos y la incineración. Ésta última

opción no es factible por restricciones ambientales (calidad del aire) y elevados costos. La co-disposición u otro tipo de depósito en tierra se encontrarían limitados por disponibilidad de suelos.

La Región Metropolitana cuenta con **163.707** hectáreas de suelos agrícolas y **294.496** hectáreas de suelos forestales para recibir parte de los lodos (Espindola y Madariaga, 2000). Dentro de los factores que podrían favorecer la utilización de los lodos en la Región Metropolitana se encuentran las pérdidas de materia orgánica de nuestros suelos (CONAMA, 1994; IX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, 2002), creciente demanda de fertilizantes y el alto costo de los fertilizantes sintéticos (FAO, 2002).

**Tabla 2-31.** Alternativas de uso o disposición de lodos en Chile (CONAMA, 1997)

<b>Lodos Provenientes del tratamiento de Aguas Servidas</b>	
Alternativas de disposición final	Aplicabilidad
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aplicación a suelos agrícolas, forestales o para recuperación de sitios degradados</li> </ul>	Aplicable en todas las regiones de Chile, con algunas limitaciones dependiendo de la disponibilidad de suelos agrícolas (desde la IV Región hacia el Norte)
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Comercialización como fertilizante orgánico</li> </ul>	Aplicable en todas las regiones de Chile; sin embargo, se considera poco factibles desde el punto de vista económico
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Co-disposición en rellenos sanitarios</li> </ul>	Aplicable en todas las regiones e Chile, con limitaciones dependiendo de la disponibilidad de rellenos sanitarios
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mono-depósito</li> </ul>	Aplicable en todas las regiones de Chile
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Otro tipo de depósito en tierra, sin impermeabilización (lagunas, pilas o montones, sitios designados para aplicación de lodos</li> </ul>	Aplicable, con limitaciones dependiendo de las condiciones hidrogeológicas de los sitios de los depósitos (desde la V Región hacia el Sur)
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Incineración</li> </ul>	Aplicable en todas las regiones de Chile (con excepción de RM); poco factible desde el punto de vista económico
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vertido al mar</li> </ul>	Prohibido en Chile

En la actualidad, en la Región Metropolitana, existe un gran interés por dar un uso benéfico al lodo en la agricultura y evitar el desperdicio energético que significa mantenerlo almacenado. Proyectos en ejecución en las regiones Metropolitana y VI, entre otras, se encuentran valorando el uso de lodos en la agricultura. El efecto del aporte de nutrientes para el desarrollo forestal y el uso de lodo en suelos degradados, son otras alternativas que también se están evaluando.

## **2.7. Conclusiones Revisión Bibliográfica**

- La información recopilada respecto a la generación, normativas y uso o disposición de lodos sirve de complemento para una adecuada gestión de los lodos, principalmente uso benéfico vía utilización en la agricultura.
- El proyecto de normativa chilena, pretende regular variados aspectos del uso de lodos de agricultura en términos de metales pesados y carga patógena. No obstante, carece de regulaciones para compuestos orgánicos, considerando que la preocupación por el contenido de estos compuestos en países de Europa y en los Estados Unidos de América a aumentado a causa de la capacidad de estos para bioacumularse; por tanto, podrían ser considerados en una futura normativa.
- Los lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas pueden ser utilizados en la agricultura en reemplazo o sustitución de fertilizantes tradicionales. Principales efectos positivos encontrados cuando se emplean lodos en agricultura son: aporte de materia orgánica y mejoría de las propiedades físicas y químicas del suelo, aporte de macro y micronutrientes a cultivos, incremento en el contenido de proteínas en cultivos y aumento en la producción. Para la obtención de máximos beneficios se sugiere estudiar su dinámica.
- Los lodos son aplicables en la agricultura y ello lo respalda 30 años de experiencia mundial. Durante este período de práctica continua de aplicación de lodos, no se ha

producido ningún evento que afecte la salud pública. En países como Francia y España la aplicación benéfica de lodos ha dado buenos resultados en este periodo. Al respecto, el seguir buenas prácticas agrícolas para fertilizantes, y respetar normativas existentes que regulen su uso, puede permitir que sea sostenible en el tiempo. Es importante entonces, que la aplicación de los lodos considere las características físicas químicas del suelo y los lodos, a fin de evitar efectos sobre el medio ambiente.

- De las variadas alternativas para dar una salida a los lodos en el mundo, su empleo en la agricultura aparece como una importante vía para reciclar sus constituyentes principalmente materia orgánica y nitrógeno en el mediano y largo plazo. Otras alternativas que le siguen son la disposición en vertederos y la incineración.
- La aplicación de lodos en Chile, específicamente la Región Metropolitana en suelos agrícolas aparece como la opción más factible para dar una salida a los lodos. Los problemas de contaminación de la cuenca de Santiago y el elevado costo de la incineración de lodos no favorecen a ésta alternativa. La disposición de los lodos en vertederos aparece como una segunda opción, sin embargo, estaría limitada en el tiempo por el volumen propuesto para rellenos sanitarios (6% por peso base húmeda del total de residuos). Los factores que podrían facilitar el empleo de lodos en la agricultura en Chile, son: disponibilidad de suelos agrícolas, bajo desarrollo industrial (aporte de metales pesados en aguas residuales domésticas no debería ser significativo), necesidad de insumos baratos en la agricultura, necesidad de fertilizantes, necesidad de retornar al suelo materia orgánica y minerales extraídos por actividades antrópicas en el marco de un uso sustentable del lodo en el largo plazo, experiencia en el uso de otros materiales similares como guano de animales, residuos de aves y cerdos, alternativa sustentable en el mediano y largo plazo.

## **CAPITULO 3**

### **EVALUACIÓN DE FITOTOXICIDAD DE LODOS PRODUCIDOS EN LA REGIÓN METROPOLITANA (CHILE), MEDIANTE PRUEBAS DE GERMINACIÓN**

#### **3.1. Aspectos Generales**

En el cultivo de especies comerciales se necesita que las plantas respondan adecuadamente a las condiciones en las cuales serán manejadas. En este contexto, el uso de sustratos orgánicos como lodos con fines comerciales, requiere de ensayos de fitotoxicidad para encontrar la dosis adecuada, mezcla sustrato orgánico/suelo, que permita obtener buenos rendimientos y productos de calidad. Uno de los ensayos habituales que permiten detectar efectos sobre plantas cuando se desea utilizar sustratos con fines comerciales, son los ensayos de germinación de semilla.

En el caso del empleo de lodos como sustratos, estos ensayos permiten obtener información respecto al efecto de los sustratos sobre las plantas, como el comportamiento de las semillas ante la adición del lodo, la capacidad del cultivo para resistir elementos contenidos en el lodo, el rendimiento de las especies e información de la especie que mejor se adapte a las condiciones del sistema (suelo-lodo), entre otras.

Como parte del proyecto entre Aguas Andinas S.A. e INIA-CRI La Platina “Valorización de Lodos de Plantas de Tratamientos de Aguas Andinas como Fertilizante” se realizó un ensayo de germinación en las instalaciones del INIA-CRI La Platina en el año 2001. Este, consistió en el cultivo de cinco especies comerciales, maíz, trigo, alfalfa, poroto y tomate, sobre los sustratos lana de roca (sustrato inerte) y suelos de las localidades de Maipo, Chada y Los Morros pertenecientes a la Región Metropolitana, con la finalidad de evaluar la posible fitotoxicidad de lodos producidos

en la Región Metropolitana. Cabe hacer mención que este ensayo consideró como referencia lodo puro (sustrato de germinación), no obstante, el empleo en la agricultura e invernaderos en otros países considera siempre la mezcla de suelo y lodo u otro material.

Con participación directa en este ensayo (parte experimental e informe de avance del proyecto) y con la autorización de los Directores del Proyecto para divulgar los resultados de este, a continuación se presenta el ensayo de germinación de semillas.

## **3.2. PARTE EXPERIMENTAL**

### **3.2.1. Etapa de Muestreo**

Los lodos utilizados en este ensayo fueron obtenidos de la planta de tratamiento CEXAS (Centro Experimental de Tratamiento de Aguas Servidas) que purifica las aguas de la ciudad de Melipilla en base a un tratamiento biológico (filtros biológicos). El lodo se obtuvo del lecho 6 de la planta de tratamiento, y fue transportado al INIA el día 27 de abril del año 2001, donde quedó almacenado.

### **3.2.2. Etapa de Calibración**

Para la puesta en marcha del ensayo debió calibrarse 2 cámaras de crecimiento Heraeus VOTSCH, HPS 500 de propiedad del INIA-CRI La Platina. Estas cámaras permiten controlar condiciones de temperatura, humedad y luz. Ensayos preliminares, con las mismas especies y las condiciones anteriormente mencionadas permitieron obtener información preliminar sobre el tiempo de emergencia y la cantidad de agua que necesitaban las plantas par su desarrollo. Posteriormente, se calibró la cámara para régimen de temperatura constante de 25%, régimen de humedad relativa constante de 70%, y régimen de luz regulares de 12 horas; 12 horas luz y 12 horas oscuridad.

### 3.2.3. Etapa de Elección del Material

a. Semillas: el ensayo consideró 5 especies vegetales de importancia agrícola, estas son: Maíz (*Zea mays*), Trigo (*Triticum durum*), Fréjol (*Phaseolus vulgaris*), Alfalfa (*Medicago sativa*) y Tomate (*Lycopersicon esculentum*). Las semillas fueron minuciosamente seleccionada de forma manual, para garantizar su homogeneidad en cuanto a salud, tamaño, vigor y apariencia. En el caso del trigo, maíz y tomate, se siguió las recomendaciones del ISTA<sup>1</sup> para romper la latencia<sup>2</sup> de las especies, y asegurar su correcto desarrollo; estas recomendaciones son: refrigeración de las semillas de trigo y alfalfa durante 4 días a una temperatura de 10°C y, tratamiento de las semillas de tomate con un baño de KNO<sub>3</sub> (1M).

b. Sustratos: se trabajo con suelos de las localidades Maipo (SMa), Los Morros (SMo) y Chada (SCh), de la Región Metropolitana (profundidad 0-20 cm, estrata arable). Además, se empleo lana de roca (LR), un sustrato inerte, y lodo puro estabilizado (L). Estos sustratos fueron secados al aire y tamizados (4 mm).

La **Tabla 3-1** presenta algunas de las propiedades físicas y químicas de los suelos publicadas por el Centro de Información de Recursos Naturales, CIREM (1996), correspondientes a Estudios Agrológicos. La lana de roca es un sustrato de silicato aluminio de baja densidad, porosidad total elevada (>95%), una alta capacidad de retención de agua fácilmente disponible (50%) y una alta capacidad de aireación (40-50%).

---

<sup>1</sup> ISTA, Reglas Internacionales para Ensayos de Semillas (1976); Ministerio de Agricultura; Instituto Nacional de Semillas y Plantas de Viveres, España

<sup>2</sup> Periodo de inactividad

**Tabla 3-1.** Propiedades físicas y químicas de los suelos Maipo, Los Morros y Chada

Profundidad (cm)	Suelo Maipo		Suelo Los Morros		Suelo Chada
	0-16	16-33	0-15	15-33	0-23
<b>Distribución de partículas por tamaño (%)</b>					
2-0,05	42,0	38,0	31,8	29,6	25,1
0,005-0,002	41,7	39,7	49,4	48,5	52,0
<0,002	27,3	22,3	18,8	21,9	22,9
Textura	Franco arenoso	Franco	Franco	Franco	Franco limoso
<b>Humedad aprovechable (%)</b>	8	8	9,8	10,1	10
Corg (%)	1,5	1,2			2,6
MO (%)	2,6	2,1	3,4	3,2	4,5
pH (H <sub>2</sub> O)	8,0	8,0	8,1	8,2	6,3
CE (dS/m a 25°C)	0,7	0,5	1,3	1,1	0,3
<b>Capacidad total de intercambio(cmol+/kg)</b>	17,9	18,1	15,5	15,7	28,5

\* CIREM (1996)

### 3.2.4. Montaje del Ensayo

El procedimiento del ensayo de germinación consideró el empleo de los sustratos antes mencionados; una vez tamizados y a partir de su humedad y densidad, se determinó la masa de los sustratos y las mezclas a contener en bandejas acrílicas sin cubierta (ancho 10 cm, largo 18 cm, altura 3 cm) (ver **Anexo C**). En el ensayo, se utilizaron sustratos puros más mezclas sustrato - lodos correspondientes a 4 tratamientos. Asignándose como los siguientes tratamientos a:

- Tratamiento 0%: consiste en los sustratos puros, sin mezclas. Ejemplo: suelo Chada sin lodo (representado como SCh0%); lana de roca sin lodo (LR0%).
- Tratamiento 25%: relación sustrato-lodos peso/peso de 1/3. Ej.: 25% suelo Chada y 75% lodo (SCh25%); 25% lana de roca y 75% de lodo (LR25%)

- Tratamiento 50%: consiste en las mezclas sustrato- lodos en relaciones peso/peso de 1/1. Ej.: 50% de suelo Chada y 50% de lodo (SCh 50%)
- Tratamiento 100%: consiste en solo lodo. Se identificó como L100%.

La **Tabla 3-2** muestra los tratamientos y el número de semillas empleadas por especies.

**Tabla 3-2.** Tratamientos y número de semillas empleadas en los tres ciclos en el ensayo (INIA-CRI La Platina, 2002)

Especies	Tratamientos	Bandejas	N° Semillas	N° Ciclos	Total Bandejas	Total Semillas
Maíz	0,25,50, 100%	13	25	3	39	975
Trigo	0,25,50, 100%	13	25	3	39	975
Fréjol	0,25,50, 100%	13	25	3	39	975
Alfalfa	0,25,50,100%	13	25	3	39	975
Tomate	0,25,50, 100%	13	25	3	39	975
Total		65			195	

La forma de llenado de las bandejas fue la siguiente:

- (a) las bandejas fueron llenadas hasta la mitad con los sustratos puros y las mezclas, dependiendo de la especie,
- (b) se humedecieron los sustratos y las mezclas con agua destilada, aplicando aproximadamente 50 ml de agua destilada dependiendo del sustrato y la mezcla,
- (c) 25 semillas de cada especie previamente tratadas con Captan (producto funguicida) fueron incorporadas en cada bandeja, y luego, cubiertas con la cantidad de sustrato puro o mezcla calculado anteriormente,
- (d) las bandejas fueron introducidas en las cámaras.

Con las bandejas listas, se dio inicio al ensayo. A lo largo del ensayo para cada especie se realizaron 2 actividades de mantención: riego de las bandejas dos veces por día con 50 ml de aguas destilada c/u, y desmalezamiento.

### **3.2.5. Evaluaciones y Mediciones**

El ensayo consideró dos etapas de evaluaciones: diarias y finales. Las primeras a lo largo de todo el ensayo para cada ciclo, y la últimas, abordadas luego del término del ensayo.

#### **• Evaluaciones diarias**

Se realizaron conteos diarios de plántulas para cada tratamiento y ciclo, observaciones generales en cuanto a pigmentación (color) y forma de las plántulas, referidas a tamaño. Los datos fueron recolectados en una planilla). De esta etapa, se obtuvieron dos parámetros:

a. Índice de velocidad de emergencia de semillas (IVE): es un parámetro que refleja emergencia de las plántulas ante determinadas condiciones -en este caso adiciones de todos a sustratos puros- y permite tener alguna noción del comportamiento de las distintas especies manejadas, como la vigorosidad con que las especies enfrentan un medio determinado. Este parámetro se obtuvo como, la sumatoria de la diferencia entre la cantidad de plántulas emergidas el día de la observación ( $p(f)$ ) y la cantidad de plántulas emergidas en el día anterior de la observación ( $p(i)$ ). El IVE, permite comparar la velocidad de emergencia de las semillas entre los diferentes suelos y las mezclas considerando solo las semillas germinadas que asoman a la superficie en forma de plántula. Para su calculo se empleo la siguiente expresión:

$$\text{IVE} = \sum [p(f) - p(i)] / n^\circ \text{ día} \quad (\text{ec. 8})$$

b. Porcentaje de germinación intermedio: obtenido como las semillas germinadas en forma de plántulas del total inicial correspondiente a 25 semillas por 100, para cada día.

$$\text{(\% germinación)} = \frac{\text{N}^\circ \text{ semillas germinadas diariamente}}{25 \text{ semillas}} \times (100) \text{ (ec. 9)}$$

25 semillas

#### . Evaluaciones finales

Al final del ensayo para cada especie, las bandejas fueron retiradas de las cámaras de crecimiento y llevadas al laboratorio (Germoplasma y Suelos). Antes de extraer las plántulas, se aplicó agua destilada (cuando fue necesario) a cada bandeja con la finalidad de humedecer el sustrato y facilitar la extracción de las plántulas evitando algún daño de su estructura. Una vez extraídas las plántulas, se realizaron evaluaciones visuales de vigor, color, desarrollo general de las plantas y homogeneidad del ensayo por cada repetición, y también la clasificación de las semillas y las plántulas (generales), en:

a. **Semillas no germinadas:** semillas frescas que aparecen cerradas y aparentemente viables, incluso después de algún tratamiento para interrumpir la latencia.

b. **Semillas duras:** semillas que permanecen duras al finalizar el período del ensayo prescrito, por no haber absorbido agua a causa de la impermeabilidad de su tegumento.

c. **Semillas muertas:** aquellas que no han producido germinación al finalizar el ensayo.

d. **Plántulas normales, cuando:**

- Manifiestan la capacidad de continuar con su desarrollo hacia plantas normales al estar en condiciones adecuadas de suelo, agua, luz y temperatura.
- Poseen todas sus estructuras esenciales, al estar en sustrato artificial.

- Plántulas que aun con ligeros defectos, manifiestan desarrollo vigoroso y equilibrado de sus estructuras esenciales.
- Plántulas seriamente podridas por hongos o bacterias, pero que no evidencian la semilla de origen como foco infeccioso, mostrando estructuras esenciales.

f. **Plántulas Anormales:** durante la evaluación final se separaron las plantas normales de las anormales, y las mediciones se realizaron sobre el universo de plantas normales. En la categoría de anormales considerando criterios ISTA generales, adaptados para cada especie, considerando por anormal a:

- *Maíz:* hipocotilos poco desarrollados, enroscados, poco desarrollo radical, bajo crecimiento del brote.
- *Trigo:* plántulas con desarrollo de hojas comparativamente menor respecto a las demás, raíz enroscada, atrofiada o sin raíces secundarias y/o escaso crecimiento del brote.
- *Fréjol:* las plántulas anormales se presentan con un atrofiado crecimiento radicular, leve necrosis en las hojas verdaderas, menor crecimiento vegetativo, así como también, un crecimiento escaso del brote, con ausencia o atrofiamiento de epicotilos e hipocotilos retorcidos y poco desarrollados.
- *Alfalfa:* hojas con escaso crecimiento y enroscadas, reducción de la raíz y escaso desarrollo de tallo.
- *Tomate:* plantas con tamaños de hipocotilos comparativamente inferiores, escaso desarrollo radicular, crecimiento escaso del brote y alteración en la pigmentación.

Sobre el total de las plántulas normales se realizaron mediciones del desarrollo de hipocotilo y elongación de raíces (ver **Tabla 3-3**), y cuantificación de la producción de materia seca, mediante el peso de la masa seca previo secado de las plántulas normales en estufa a 40°C por 48 horas. También se cuantificó la masa húmeda de las plántulas normales; sin embargo, este parámetro no es significativo.

**Tabla 3-3.** Criterios cuantitativos utilizados en la asignación de normalidad en la germinación de semillas (INIA-CRI La Platina, 2002)

<b>Especie</b>	<b>Largo raíz principal (cm)</b>	<b>Elongación de hipocotilo (cm)</b>	<b>Elongación de epicotilo* (cm)</b>
Maíz	>4	>2	-
Trigo	>3	>1,5	-
Fréjol	>3	>6	>1,5
Alfalfa	>1	>0,5	-
Tomate	>1	>1,5	-

\*Sólo el poroto posee epicotilo

Los sustratos remanentes, fueron guardados en bolsas plásticas y rotulados para su posterior análisis de pH y conductividad eléctrica. Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Química y Edafología Ambiental del CRI-INIA La Platina. Los métodos utilizados fueron los métodos utilizados en este laboratorio para este tipo de análisis, fundamentalmente corresponden a los Métodos de Análisis Recomendados para Suelos Chilenos por Sadzawka et al. (2000).

#### **- Determinación de % Humedad y Densidad Aparente**

Para la determinación de la humedad en basa seca, se pesó 20,0 g del sustrato seco al aire, luego se seco a estufa a 105°C durante 24 horas.

La densidad aparente para los sustratos puros se determinó por el método de la parafina. Este método consiste en tomar un terrón del sustrato a utilizar (previamente pesado) y sumergirlo en parafina sólida calentada a 59-70°C. Luego con el volumen del terrón y la masa del sustrato seco a 105°C se determina la densidad aparente.

### **- Determinación de pH**

Se trabajó sólo con los sustratos utilizados en los ensayos de germinación para los ciclos 2 y 3, estos fueron dispuestos en bandejas de aluminio para ser secados en una estufa a 40°C durante 48 horas. Una vez secadas, las muestras fueron desintegradas en un mortero.

Del total de las muestras (65) por repetición se pesó 20,0 g de cada una en un vaso plástico y, se agregó 50 ml de agua destilada. Luego, cada muestra se agitó manualmente durante un minuto y, posteriormente en forma mecánica por dos horas (comúnmente, la agitación manual es de 5 minutos).

Finalizado el procedimiento de acondicionamiento de la muestra, la lectura de pH se realizó potenciométricamente en la suspensión acuosa relación 1: 2,5 p/v, (excepto para el sustrato Lana de roca, tratamiento 0%, donde se debió utilizar la relación sustrato/agua de 1:5 y 1:10, en los casos respectivos por especie dada la capacidad absorbente de agua de la Lana de roca). La determinación del pH se realizó utilizando un pH metro *SCHOTT GERAETE*, modelo *CG832*.

### **- Determinación de Conductividad Eléctrica**

La determinación de la conductividad eléctrica (CE) de los sustratos utilizados en la germinación de semillas, se realizó a 25°C en forma inmediatamente posterior a la medición pH en la misma suspensión acuosa empleando un conductivímetro *SCHOTT GERAETE*, modelo *CG852*.

### **- Análisis Estadísticos**

Para el análisis estadístico de los datos obtenidos en el ensayo se empleo el programa SAS (Statistical Analysis System) Versión 8.2 de la Universidad de Carolina

del Norte de Estados Unidos de América, con este programa se realizó análisis de varianza, con diseño completamente al azar y para el procedimiento de comparación múltiple se utilizó la Diferencia mínima significativa (Dms).

### 3.3. Resultados

#### 3.3.1. (%) Humedad y Densidad Aparente

Las humedades y densidades para los utilizados en el ensayo de germinación se muestran en la **Tabla 3-4**.

**Tabla 3-4.** (%) Humedad y densidad aparente de los sustratos  
(INIA-CRI La Platina, 2002)

<b>Sustrato</b>	<b>Humedad (%) ms</b>	<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Lana de roca	0,44	0,08
Suelo Maipo	13,67	1,33
Suelo Los Morros	6,26	1,5
Suelo Chada	4,43	1,09
Lodo	23,88	0,66

#### 3.3.2. IVE

Los valores promedios de los 3 ciclos por especies para el IVE se muestran en la **Tabla 3-5**; en la **Tabla 3-6** se muestra la diferencia del IVE de los sustratos puros respecto a la lana de roca.

**Tabla 3-5.** Valores promedio IVE por especie (INIA-CRI La Platina 2002)

Sustrato	Maíz	Trigo	Poroto	Alfalfa	Tomate
LR0%	4,42	6,07	3,13	5,59	3,50
LR25%	6,14	3,27	1,55	4,79	1,64
LR50%	5,29	2,69	1,48	6,00	1,29
SMa0%	5,84	4,33	2,25	3,50	2,40
SMa25%	4,30	4,16	2,76	4,83	2,38
SMa50%	5,58	3,79	2,70	5,27	1,59
SMo0%	4,82	4,12	1,80	5,09	2,31
SMo25%	4,54	2,82	2,46	4,15	2,21
SMo50%	4,18	3,21	1,85	4,74	1,57
SCh0%	5,40	4,63	1,48	5,38	1,59
SCh25%	3,41	3,60	1,88	5,00	1,75
SCh50%	3,60	3,55	1,40	4,89	2,31
L100%	3,61	1,48	0,85	5,33	0,61
VES al 5%	S	S	S	N.S.	S

VES: variación estadística significativa

S: sí presenta variación significativa

N.S.: no presenta variación significativa

**Tabla 3-6.** Tasa de variación para el IVE en sustratos suelos puros (INIA-CRI La Platina, 2002)

Especie	Lana de roca (IVE)	Diferencia de IVE respecto a Lana de roca pura		
		Suelo Maipo	Suelo Los Morros	Suelo Chada
Maíz	4,42	<b>1,42</b>	<b>0,40</b>	<b>0,98</b>
Trigo	<b>6,07</b>	-1,73	-1,95	-1,44
Fréjol	3,13	-0,89	-0,45	-0,32
Alfalfa	5,59	-2,09	-0,50	-0,21
Tomate	3,50	-1,09	-1,18	-1,91

### 3.3.3. Germinación de Semillas (%)

La **Tabla 3-7** muestra el porcentaje de germinación promedio de los 3 ciclos obtenido por especie y la **Tabla 3-8** se muestra la variación de germinación normal en sustratos puros respecto al testigo Lana de roca.

**Tabla 3-7.** Porcentaje germinación normal por especie (INIA-CRI La Platina, 2002)

Sustrato	Germinación Normal (% promedio, por especie)				
	Maíz	Trigo	Poroto	Alfalfa	Tomate
LR0%	68	97	64	81	90
LR25%	30	58	33	88	70
LR50%	52	55	40	92	53
SMa0%	77	89	61	60	85
SMa25%	84	80	41	93	82
SMa50%	87	76	57	82	67
SMo0%	73	89	32	85	68
SMo25%	80	73	47	81	67
SMo50%	91	72	36	65	74
SCh0%	47	77	32	77	71
SCh25%	36	55	34	86	84
SCh50%	81	66	41	83	51
L100%	42	26	23	78	28
VES al 5%	S	S	S	N.S.	S

**Tabla 3-8.** Tasa de variación para germinación normal en sustratos suelos puros (INIA - CRI La Platina, 2002)

Especie	Lana de roca (% germ. Normal)	Diferencia de germinación normal (%) respecto a lana de roca pura (%)		
		Suelo	Suelo	Suelo
		Maipo	Los Morros	Chada
Trigo	<b>97</b>	-8	-8	-20
Fréjol	64	-2	-31	-31
Alfalfa	81	-22	<b>4</b>	<b>-4</b>
Tomate	90	-5	-22	-20

### 3.3.4. Desarrollo de Biomasa

En las **Tablas 3-9 a 3-13** se muestran el resultado de las evaluaciones finales

**Tabla 3-9.** Evaluaciones finales para tomate (INIA-CRI La Platina, 2002)

Sustrato	Tomate					
	Sistema Radicular			Parte Aérea		
	Desarrollo raíces (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Elong. hipocotilo (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)
SCh0%	0,94	0,08	0,01	3,32	0,37	0,04
SCh25%	1,76	0,15	0,03	3,39	1,01	0,09
SCh50%	2,53	0,19	0,01	2,06	0,96	0,10
SMa0%	2,43	0,64	0,10	2,40	0,64	0,11
SMa25%	2,88	0,82	0,09	3,13	1,59	0,17
SMa50%	1,79	0,14	0,04	2,78	0,86	0,10
SMo0%	1,13	0,12	0,03	2,94	0,60	0,09
SMo25%	1,61	0,19	0,03	3,92	1,29	0,15
SMo50%	1,49	0,15	0,02	3,31	1,01	0,10
LR0%	3,58	0,54	0,09	4,35	1,98	0,21
LR25%	1,43	0,20	0,02	2,90	0,94	0,10
LR50%	0,84	0,17	0,01	2,29	0,76	0,07
L100%	0,86	0,16	0,01	1,87	0,56	0,05

**Tabla 3-10.** Evaluaciones finales para trigo (INIA-CRI La Platina, 2002)

<b>Trigo</b>						
Sustrato	Sistema Radicular			Parte Aérea		
	Desarrollo raíces (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Elong. hipocotilo (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)
SCh0%	9,29	1,91	0,59	2,34	1,97	0,38
SCh25%	6,35	1,85	0,47	2,31	1,49	0,19
SCh50%	7,15	2,14	0,52	2,80	1,67	0,33
SMa0%	11,61	2,76	0,88	2,97	2,08	0,32
SMa25%	8,54	2,35	0,58	4,91	2,81	0,40
SMa50%	8,04	2,12	0,68	3,01	1,63	0,24
SMo0%	9,14	3,73	0,81	3,26	2,91	0,27
SMo25%	8,84	1,98	0,54	2,62	1,62	0,24
SMo50%	8,59	2,51	0,57	3,15	2,22	0,30
LR0%	12,50	4,82	1,22	2,93	2,60	0,47
LR25%	7,17	1,57	0,57	3,39	1,12	0,22
LR50%	6,53	1,48	0,56	3,81	1,50	0,23
L100%	5,65	0,63	0,30	2,99	0,40	0,11

**Tabla 3-11.** Evaluaciones finales para el maíz (INIA-CRI La Platina, 2002)

<b>Maíz</b>						
Sustrato	Sistema Radicular			Parte Aérea		
	Desarrollo raíces (cm)	Peso húmedo (g)	Masa seca (g)	Elong. hipocotilo (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)
SCh0%	9,37	6,27	2,28	4,34	1,76	0,16
SCh25%	5,12	3,80	1,57	2,92	1,64	0,16
SCh50%	8,81	10,70	3,72	3,22	4,49	0,53
SMa0%	10,41	11,10	4,43	3,65	4,37	0,44
SMa25%	11,51	11,55	3,77	4,94	6,21	0,66
SMa50%	9,38	12,23	4,17	3,77	5,53	0,62
SMo0%	9,07	10,05	3,43	3,45	4,33	0,36
SMo25%	10,68	11,96	2,25	4,39	6,28	0,67
SMo50%	11,58	13,02	3,97	4,02	7,40	0,94
LR0%	7,89	8,56	3,52	3,33	3,44	0,52
LR25%	6,77	3,28	1,41	3,16	1,98	0,16
LR50%	6,67	6,24	2,39	3,53	2,49	0,26
L100%	8,72	5,03	1,92	7,26	2,38	0,25

**Tabla 3-12.** Evaluaciones finales para la alfalfa (INIA-CRI La Platina, 2002)

Alfalfa						
Sustrato	Sistema Radicular			Parte Aérea		
	Desarrollo raíces (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Elong. hipocotilo (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)
SCh0%	4,94	0,10	0,06	1,13	0,57	0,11
SCh25%	4,58	0,16	0,06	1,98	0,77	0,13
SCh50%	5,57	0,15	0,06	2,34	0,85	0,16
SMa0%	3,40	0,09	0,08	0,71	0,24	0,06
SMa25%	4,49	0,09	0,04	1,32	0,71	0,12
SMa50%	4,31	0,11	0,04	1,55	0,74	0,13
SMo0%	4,84	0,60	0,18	1,27	0,45	0,10
SMo25%	5,28	0,17	0,07	1,75	0,56	0,14
SMo50%	6,21	0,28	0,07	1,67	1,05	0,18
LR0%	9,05	0,27	0,11	1,20	0,48	0,10
LR25%	6,09	0,18	0,05	1,73	0,71	0,14
LR50%	5,01	0,19	0,05	2,02	1,06	0,21
L100%	4,38	0,14	0,03	2,33	0,67	0,12

**Tabla 3-13.** Evaluaciones finales para el fréjol (INIA-CRI La Platina, 2002)

Fréjol							
Sustrato	Sistema Radicular			Parte Aérea			
	Desarrollo raíces (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Elong. hipocotilo (cm)	Elong. epicotilo (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)
SCh0%	6,49	2,26	0,26	10,77	6,05	10,53	1,42
SCh25%	5,50	1,23	0,12	8,98	2,52	6,77	1,02
SCh50%	5,15	3,78	1,04	5,85	3,55	8,47	5,13
SMa0%	6,10	3,92	0,34	11,69	5,27	18,43	2,21
SMa25%	4,74	3,37	0,42	6,59	1,44	9,78	1,44
SMa50%	6,21	4,70	0,50	9,16	5,32	20,68	2,53
SMo0%	6,38	2,07	0,22	7,64	4,49	7,31	1,06
SMo25%	6,24	4,27	0,62	8,76	5,33	15,02	2,17
SMo50%	6,94	2,82	0,30	7,92	5,79	10,48	1,35
LR0%	6,53	8,75	0,93	8,25	8,67	27,97	3,51
LR25%	7,44	6,13	0,51	7,14	7,62	17,65	1,54
LR50%	4,99	7,14	0,55	5,70	2,51	21,70	2,89
L100%	11,11	3,45	0,27	8,32	3,68	9,06	1,23

### 3.3.5. pH y CE

pH y CE para los sustratos se muestran en la **Tabla 3-14** y **3-15**.

**Tabla 3-14.** pH promedio de los sustratos utilizados en el ensayo (INIA-CRI La Platina, 2002)

Sustrato	Especie				
	Tomate	Fréjol	Trigo	Maíz	Alfalfa
	pH (H <sub>2</sub> O) promedio				
LR0%	9,22	8,58	8,79	8,83	9,08
LR25%	6,63	6,78	6,93	6,82	6,60
LR50%	6,41	6,49	6,65	6,71	6,17
SCh0%	6,63	5,79	5,96	6,43	5,80
SCh25%	6,76	6,21	6,21	6,56	5,97
SCh50%	6,69	6,47	6,51	6,66	6,33
SMo0%	7,74	7,52	7,62	7,84	7,84
SMo25%	7,29	7,33	7,28	7,34	7,27
SMo50%	6,98	6,98	7,01	7,05	7,07
SMa0%	6,77	7,93	8,07	8,10	8,04
SMa25%	6,77	7,37	7,46	7,55	7,49
SMa50%	6,76	7,22	6,99	7,25	7,13
L100%	6,59	6,77	6,81	6,87	6,78

**Tabla 3-15.** CE promedio de los sustratos utilizados en el ensayo (INIA-CRI La Platina, 2002)

Sustrato	Especie				
	Tomate	Poroto	Trigo	Maíz	Alfalfa
	CE (dS/m) promedio*				
LR0%	0,27	0,17	0,12	0,13	0,12
LR25%	5,00	3,97	4,32	4,37	4,40
LR50%	5,24	4,89	4,73	4,57	5,77
SCh0%	0,60	0,20	0,13	0,64	0,19
SCh25%	2,10	1,64	1,73	1,33	2,40
SCh50%	3,73	2,91	2,99	1,96	3,50
SMo0%	0,87	0,86	0,76	0,67	0,64
SMo25%	2,44	1,98	2,05	1,85	2,21
SMo50%	3,39	4,94	3,17	3,24	2,95
SMa0%	0,40	0,56	0,44	2,41	0,55
SMa25%	2,46	2,02	1,75	1,77	2,05
SMa50%	3,67	3,06	3,42	2,98	3,25
L100%	5,17	5,05	5,17	5,35	5,24

### 3.3.6. Resumen de Resultados Estadísticos

El análisis estadísticos para el IVE y el porcentaje de germinación promedio de los tres ciclos con sus correspondientes subclasificaciones (normales, anormales, germinadas) obtenidos se muestran en la **Tabla 3-16**. En la **Tabla 3-17** se muestra el análisis estadístico para el pH y la CE.

**Tabla 3-16.** Resultados estadísticos de los parámetros considerados en los tratamientos (INIA-CRI La Platina 2002)

Tratamientos Especie	IVE	Germinadas (%)	Germinadas Normales (%)	Germinadas Anormales (%)	No Germinadas (%)	Masa seca raíz (g)	Masa seca parte aérea (g)
Maíz	0,0001 B	0,5398 A	0,0690 A	0,0714 A	0,5398 A	0,0008 B	0,0709 A
Trigo	0,0001 B	0,2373 A	0,0566 A	0,0867 A	0,2373 A	0,8462 A	0,7064 A
Fréjol	0,0001 B	0,9946 A	0,8472 A	0,7664 A	0,9946 A	0,8696 A	0,2455 A
Alfalfa	<b>0,161</b> A	0,0001 B	0,0001 B	0,0433 B	0,2969 A	0,6800 A	0,8358 A
Tomate	0,0001 B	0,9456 A	0,3004 A	0,5563 A	0,9454 A	0,4202 A	0,0001 B

A: No registra variación estadística significativa ( $p > 5\%$ )

B: Si hay variación estadística significativa para la variable ( $p < 5\%$ )

**Tabla 3-17.** Resultados estadísticos pH y CE de los distintos tratamientos (INIA - CRI La Platina, 2002)

Especie	pH	CE
Maíz	0,4593 A	0,0053 B
Trigo	0,0001 B	0,0001 B
Fréjol	0,0004 B	0,0006 B
Alfalfa	0,0001 B	0,0001 B
Tomate	0,2998 B	0,0001 B

A: No registra variación estadística significativa para la variable ( $p > 5\%$ )

B: Si hay variación estadística significativa para la variable ( $p < 5\%$ )

### 3.4. Discusión Ensayo de Germinación

#### 3.4.1. % Humedad y Densidad Aparente

Para los suelos la densidad es similar, en el caso de lana de roca y los lodos, estos presentan el valor más bajo dado que carecen de estado de agregación y estructura.

#### 3.4.2. IVE

Los resultados obtenidos para el índice de velocidad (**Tablas 3-5 y 3-6**) muestran al sustrato inerte, lana de roca, con la condición más favorable para la expresión de esta variable.

En los sustratos suelos (ver **Tabla 3-6**); el IVE para el maíz se manifestó mejor entre todas las especies, el orden correspondiente es  $SMo(+0,40) < SCh(+0,98) < SMa(+1,42)$ . El sustrato puro que más favoreció la emergencia de maíz y tomate fue el SMA; por otro lado, el trigo, el fréjol y la alfalfa emergieron más rápido en el sustrato puro SCh. Para el trigo, el IVE fue similar en los tres sustratos suelo. En las especies fréjol y alfalfa la respuesta siguió el orden  $SMa < SMo < SCh$ . La especie alfalfa fue la especie con uno de los IVE promedio más alto, superior a 3 en todos los tratamientos, la especie que le sigue en importancia para esta variable fue el maíz.

En la **Tabla 3-16** es posible observar que la alfalfa, fue la única especie que no presentó diferencias estadísticas significativas (<5%) entre los suelos en estudio, sin embargo, se observó lo contrario respecto a las otras especies. En los tratamientos, cuando se compara el tratamiento 0% respecto al 50% se encuentra que el IVE decrece con la adición de lodos.

### 3.4.3. Germinación de Semillas

La germinación presentó una tendencia similar de menos a más favorable como sigue: SCh < SMo < SMa < LR; para la alfalfa, la germinación normal fue más favorecida en SMo (**Tabla 3-7**).

La germinación normal (%) en trigo favoreció en los tratamientos 0 y 25%, principalmente en los suelos SMa y SMo. El maíz presenta los más altos porcentajes de germinación en los tratamientos 50%, excepto en el sustrato LR pura, tratamiento 0%. Para el fréjol y la alfalfa la germinación es mayor en los tratamientos 0% y 25%; por su parte, las semillas de tomate ven favorecidas su germinación en los sustratos puros (ver **Tabla 3-7**).

La alfalfa fue la especie que presentó el valor más alto para el porcentaje de germinación normal, superior al 60% en todos los tratamientos. Es la única especie que no presentó variación estadística significativa para un mismo tratamiento y entre tratamiento, la especie que le sigue es el trigo.

Al igual que el IVE, el % de germinación se ve favoreció en los tratamientos 25% y 50%, principalmente alfalfa en el tratamiento 25% y maíz en el tratamiento 50%. Dentro de los suelos puros, el SCh es el menos favorable en la germinación normal de las semillas, principalmente para maíz, trigo y fréjol.

Es bien conocida la tolerancia a las sales que presenta la alfalfa. Es de esperar entonces, que la alfalfa respecto a las otras especies podría presentar una mejor respuesta frente a la naturaleza de lodos. Sin embargo, la germinación y particularmente la germinación normal, fue más baja para esta especie.

La disminución de la germinación normal presenta variación significativa, excepto en la alfalfa. Probablemente, la germinación de las semillas se vea influenciada

por el contenido de sales. Estudios similares realizados por INIA-España (1994-1997) sobre la influencia de lodos compostados, sobre la germinación de maíz (*Zea mays*), trigo (*Triticum aestivum*), tomate (*Lycopersicon esculentum*) indican que el empleo de lodo compostado resulto más inhibitor que él sin compostar y que el efecto inhibitor depende de cada especie; estos estudios plantean que probablemente el efecto se deba al elevado contenido de sales (elevada conductividad de los extractos de saturación), así como también el elevado contenido de amonio. Los resultados obtenidos para el porcentaje de emergencia no indican un aumento significativo para el maíz y tomate; mientras que para el trigo el aumento registrado no fue significativo.

Se observaron efectos positivos cuando se adicionó lodo al suelo sobre la germinación de semillas. Probablemente, y debido a que las semillas poseen una reserva energética que les permite su desarrollo hasta la aparición de las primeras hojas y no son dependientes del sustrato como fuente de nutrientes, el lodo favoreció la germinación de semillas, al mejorar las condiciones de la estructura del suelo, principalmente la aireación y la conductividad hidráulica.

#### **3.4.4. Desarrollo de Biomasa**

El maíz, presenta un aumento en el desarrollo radicular con el incremento de la dosis de lodos para el sustrato SMO. En cambio, en biomasa se observó lo contrario en SMO y SCh, esta especie presenta variación significativa al 5% (ver **Tablas 3-9 a 3-13**).

El fréjol, presenta una clara disminución del desarrollo radicular y elongación del epicotilo con los tratamientos en SCh y LR, respectivamente, aun cuando no presentó variación significativa.

En el trigo; el desarrollo de raíces disminuye claramente con el aumento de aplicación de lodos (0, 25 y 50%) para los sustratos SMA, SMO y LR. Sólo en el sustrato

LR se observa un leve aumento en la masa de la parte aérea, cuando el tratamiento es 50% en el maíz, trigo y fréjol.

La alfalfa presenta un aumento del desarrollo del hipocotilo y biomasa de la parte aérea con el tratamiento en SCh y SMa. El tomate, muestra aumento de la extensión de raíces y biomasa parte área con el incremento de dosis de lodos para SCh (0-25-50%) y disminuye con los tratamientos para el sustrato LR; presenta variación significativa al 5%.

La adición de lodo al suelo favoreció el desarrollo de biomasa, además del aporte de elementos contenidos en los lodos para el crecimiento de las plántulas, y al igual que en la germinación de las semillas, el lodo probablemente tuvo efectos sobre el desarrollo de biomasa al mejorar el movimiento de agua y aire, y la exploración radicular.

#### **3.4.5. pH y CE**

En general valores de pH disminuyeron con la adición de lodos a los suelos. Estas variaciones se presentan claramente para los tratamientos en SMa, SMo y LR. No obstante, existe variación significativa al 5% excepto para el maíz. Probablemente el decaimiento del pH ante la adición de los lodos, se deba a ácidos orgánicos y la mineralización de materia orgánica (**Tabla 3-14**).

Los valores de CE en los diferentes tratamientos, muestran que el lodo tiene la CE más alta con relación a los otros tratamientos. Con la adición de lodos a los sustratos puros, esta tiende a aumentar, probablemente por el aporte de las sales contenidas en los lodos (**Tabla 3-15**).

Existe variación significativa entre las especies y los tratamientos en el pH y la CE (**Tabla 3-17**). Sin embargo, para los sustratos SMA, SMO, SCh y LR se observó que la adición de lodos, causa un aumento de la CE.

A pesar de no ser el objetivo de éste, la determinación de los contenidos de metales de los lodos y suelos, así como sus salinidades podrían haber aportado información adicional al ensayo de germinación.

### **3.5. Conclusiones Ensayo de Germinación**

- Existen efectos sobre las semillas y plántulas cuando se incorporaron los lodos a suelos puros, los efectos dependen del tratamiento y tipo de cultivo. Los principales efectos observados son la alteración del IVE y la germinación normal y alteración de la masa, parte radicular y aérea.
- El sustrato puro con mejores resultados es la lana de roca; en general la adición de lodo a este sustrato causó detrimento en el IVE y la germinación normal.
- La especie menos sensible a la adición de lodo es la alfalfa, esta especie es menos afectada que el resto en cuanto a germinación y desarrollo de masa. Presentó un  $IVE > 3$  y un (%) de germinación normal  $\geq 60\%$  en todos los tratamientos.
- La especie más sensible a la adición de lodos, es el tomate. Presenta mejores resultados de germinación y desarrollo de masa cuando la adición de lodos es menor.
- La variación de pH depende del suelo y la especie cultivada. En general, el pH decrece con los tratamientos; no obstante, se mantuvo dentro de los rangos esperados para el suelo, entre 6,5 – 8.

- El aumento de la conductividad eléctrica con el tratamiento puede ser explicado por las sales contenidas en el lodo, estas probablemente pudieron afectar la velocidad de germinación, la germinación normal y el desarrollo de biomasa. Sin embargo, en la alfalfa una especie sensible a las sales, ésto no fue evidente.
- Los resultados de la evaluación de fitotoxicidad del lodo indican aparentemente que por sus características físicas, el lodo puro no es un buen sustrato; pero mezclado con el suelo favorece la germinación normal y el desarrollo de biomasa, dependiendo de la especie de cultivo, dosis de lodo y tipo de sustrato. No así la mezcla de lodo y lana de roca, donde también por sus características físicas, la lana de roca como sustrato presenta mejores resultados cuando la adición de lodo es menor.
- La mezcla lodo-suelo puede ser empleada como sustrato para la germinación de semillas, no obstante, las respuestas de las semillas son diferentes y dependen principalmente de la especie, la dosis de lodo y el suelo.

## CONCLUSIONES

- La experiencia mundial indica que el uso benéfico del lodo es sustentable en el mediano y largo plazo. Su tasa de aplicación depende principalmente de la especie, la composición del lodo y las condiciones biogeoclimáticas. Los principales efectos positivos del empleo de lodos en la agricultura son: aporte de materia orgánica al suelo, mejora las propiedades físicas y químicas del suelo, y aumento de la producción.
- El conocimiento de cuales son las características y los beneficios del uso de los lodos en la agricultura se plantean como factores que pueden ayudar a su aceptación. Consecuentemente, el reconocimiento de la aplicación de lodos como una buena alternativa para reciclarlos, permitiendo el reuso de elementos fertilizantes contenidos en el lodo, como materia orgánica, nitrógeno y fósforo, y por tanto, la sustitución de fertilizantes sintéticos, puede favorecer su uso.
- El proyecto de normativa chilena, pretende regular variados aspectos del uso de lodos de agricultura en términos de metales pesados y carga patógena. No obstante, carece de regulaciones para compuestos orgánicos, la preocupación por el contenido de estos compuestos en los lodos en países de Europa y en los Estados Unidos de América a llevado a la necesidad de regularlos a causa de la capacidad de éstos para bioacumularse; por tanto, podrían ser considerados en una futura normativa.
- La aplicación de lodos en Chile, específicamente en la Región Metropolitana, en suelos agrícolas es una de las opciones más factibles para dar un reuso a los lodos. Otras opciones como la disposición en vertederos y la incineración se encuentran limitadas por el volumen de lodos en el caso de los vertederos (6% por peso base húmeda del total de residuos) y restricciones ambientales (en cuanto a emisión de

gases y partículas) en la incineración. Los factores que podrían facilitar su empleo son: la disponibilidad de suelos agrícola, bajo desarrollo industrial (aporte de metales pesados no debería ser significativo), necesidad de reducir los costos de fertilizantes, necesidad de retornar al suelo materia orgánica y minerales extraídos por actividades antrópicas, experiencia en el uso de otros materiales similares como guano de animales y ser una alternativa sustentable en el mediano y largo plazo.

- La capacitación de los agricultores (usuarios de los lodos) en cuanto a dosis, formas y cuidados en la aplicación de los lodos, así como las buenas prácticas de manejo agrícola y el cumplimiento de la normativa vigente, son un buen criterio en cuanto a la prevención y cuidado de la aplicación del lodo al suelo. El compromiso de los agricultores en el seguimiento de recomendaciones y el manejo adecuado de registros asociados a su aplicación, pueden ayudar a estos efectos.
- El ensayo de germinación de semillas empleando lodo y suelos de la Región Metropolitana muestra que existen efectos sobre semillas y plántulas cuando se adiciona lodo al suelo bajo las condiciones ya descritas. Los principales efectos observados son la alteración del IVE y la germinación normal y alteración de la masa, parte radicular y aérea. El aumento de la germinación y la masa de las plántulas con la adición de lodos muestra que existe efectos positivos sobre la germinación y el desarrollo de masa, no obstante, éstos dependen del tratamiento y tipo de cultivo.
- Dentro de las cinco especie empleadas en el ensayo de germinación, la alfalfa resultó ser la que mostró mejores resultados en relación a la germinación y desarrollo de masa. Ésta especie presentó un  $IVE > 3$  y un (%) germinación normal  $\geq 60\%$  en todos los tratamientos. En cambio, la especie más sensible ante adición de lodo resultó ser el tomate; ésta especie se vio más favorecida cuando la adición de lodo fue menor.

- La evaluación de fitotoxicidad del lodo indica aparentemente que por sus características físicas el lodo puro no es un buen sustrato; pero mezclado con el suelo favorece la germinación normal y el desarrollo de biomasa. También, probablemente el contenido de sales podría haber tenido algún efecto sobre la germinación, sin embargo, esto no fue evidente. No se encontró relación entre aumento de la CE y el detrimento de la germinación y el desarrollo de biomasa.
- La investigación y el desarrollo del empleo de lodos como sustrato y fertilizante en la agricultura, permitirían maximizar los beneficios de su reuso. La participación de centros de investigación e instituciones y universidades pueden realizar una importante contribución al respecto.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Agua para el Siglo XX. 2000. De la Visión a la Acción para América del Sur. Documento presentado en la Conferencia Ministerial del Segundo Foro Mundial en la Haya, Holanda.
2. Aguilar, M. A., Ordóñez, R. y González, P.. 1999. Capacidad de Aportación de Macronutrientes de un Lodo de Depuradora a un Cultivo de Ray-grass y Calidad de los Lixiviados. Disponible en: <http://www.icia.es/eventos/zns99/abstracts/iii-07.html>
3. Aguas Andinas. 2001. Enlace: [www.aguasandinas.cl](http://www.aguasandinas.cl)
4. Almeyda, E. L.. 1967. Manual de Fertilizantes para Chile. Banco del Estado de Chile. Editorial del Pacífico.
5. Andrade, C.A. and Mattiazzo, M.E.. 2000. Nitrates And Heavy Metals in Soil and Trees after Application of Sewage Sludge (Biosolids) on Eucalyptus grandis. *Scient. Fores.* 58:59-72.
6. Araos, J. F.. 1977. Manual de Uso de Fertilizantes. Santiago-Chile. Pp 125-137.
7. Araya, L.P.. 1999. Estabilización del Tratamiento de Aguas Residuales. Memoria Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
8. Banuelos, G.. 2002. Orchard Study of long-term biosolids Application shown no Significant Negative Effects on Apricot Fruit. Research Report. California Agricultural Technology Institute.
9. Barrios, J.A. y Jiménez, B. E.. 2002. Manejo de Lodos en Países en Desarrollo: Experiencia en México. Disponible en: [www.eaidis.org/edición\\_023/articulo\\_español.htm](http://www.eaidis.org/edición_023/articulo_español.htm)
10. Becvacqua, F. R. and Mellano, V. J.. 1994. Cumulative Effects of Sludge on Crop Yields and Soil Properties. *Commun. Soil. Sci. Plant. Anal.* 25 (3&4): 395-406.
11. Benkiser, G. and Simarmata, T.. 1994. Environmental Impact of Fertilizing soils by using Sewage Sludge and Animal Wastes. *Fertil. Res.* 37: 1-22.

12. Bitton, G.. 1994. Wastewater Microbiology. Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville, Wiley-Liss. Chap. 7-8. Pp 139-166.
13. Boisson, J.; Mench, M.; Sappin-Didier, V.; Solda, P. and Vangronsveld, J.. 1998. Short-term in Situ Immobilization of Cd and Ni by Beringite and Steel Shots Application to Long-term Sludge Plots. *Agronomie* 18: 347-359.
14. Bossche, H. V.. 2002. Esparcimiento de lodos, La experiencia Francesa. ONDEO Services.
15. Canadian Ministry of Environment and Ministry Agriculture Food Rural Affairs. 1996. Guidelines for the Utilization of Biosolids and other Waste on Agricultural Land.
16. Commission of the European Communities (CEC). 2000. Report from Comisión to the European Parliament, on the Implementation of Community Waste Legislation, for the Periodo 1995-1997. Brussels.
17. Cervantes, C. y Sánchez, R. M.. 1999. Contaminación por Metales Pesados. A. G.T. S. A.. México. Pp 1-11.
18. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREM). 1996. Estudio Agrológico – Región Metropolitana. Publicación CIREM-Chile No 115, V.1.
19. Clapp, C.E.; Stark, S.A.; Clay, D.E. and Larson, W.E.. 1986. Sewage Sludge Organic Matter and Soil Properties. En Chen, Y. and Avnimelech (eds.). *The Role of Organic Matter in Modern Agriculture*. Martinus Nijhoff Publishers. Chap.10. Pp 209-253;
20. Cogger, C.G.; Sullivan, D. M., Bary, A.I. and Fransen, S.D.. 1999. Nitrogen Recovery from Heat-Dried and Dewatered Biosolids Applied to Forage Grasses. *J. Environ. Qual.* 28: 754-759.
21. Cogger, C.G.; Sullivan, D.M., Bary, A.I. and Kropf, J.A. 1998. Matching Plant-Available Nitrogen from Biosolids with Dryland Wheat Needs. *J. Prod. Agri.* 11: 41-47.

22. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 2001a. Proyecto Definitivo de Reglamento sobre Manejo de Lodos no Peligrosos. Borrador Versión 6, Republica de Chile.
23. CONAMA. 2001b. Manual de Buenas Prácticas Agrícolas para Evitar la Contaminación Difusa de Aguas. Santiago-Chile.
24. CONAMA. 1997. Caracterización, Reutilización, Tratamientos y Disposición Final de Lodos Provenientes de Plantas de Tratamiento, para la elaboración de una Propuesta de Normas Técnicas de Manejo Contrato N° 07-0002-044. Informe Final (Ref. No. 2040B.01).
25. Canadian Handbook on Health Impact Assessment (CHHIA), The Basics. 1999. Decision Making in Environmental Health Impact Assessment. Draft. Vol. 2. Disponible en: [www.hc-sc.gc.ca/ehp/ehd/oeha/hia/](http://www.hc-sc.gc.ca/ehp/ehd/oeha/hia/).
26. Diario Oficial de las comunidades Europeas. 2001. Dictamen del Comité técnico y Social sobre la “Revisión de la Directiva 86/278/CEE del Consejo relativa ala utilización de lodos de depuradora en la agricultura”.
27. Directiva 86/278/CEE del Consejo de 12 de junio de 1986 relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura. Diario Oficial n° L 181 de 04/07/1986: 6 – 12.
28. Encuentro de las Aguas (III). 2001. Organizado por el Ministerio de Obras Publicas, Ministerio de Agricultura y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Santiago-Chile.
29. European Communities (EC). 2001. Disposal and Recycling Routes for Sewage Sludge. Part 1-2-3-4. Enlace: <http://europa.eu.int>.
30. European Environment Agency (EEA). 1997. Sludge Treatment and Disposal. Management Approaches and Experiences. Disponible en <http://reports.eea.eu.int:80/GH-10-97-106-EN-C/en/sludge.pdf>
31. EEA. 2002. Review of Selected Waste Streams: Sewage Sludge, Construction and Demolition Waste, Waste Oils, Waste from Coal-fired Power Plants and Biodegradable Municipal Waste. Technical Report N° 69.

32. Espindola, K. y Madariaga, F.. 2000. Propuesta Técnico- Económica de la Alternativas de Disposición de Lodos para la Región Metropolitana. Tesis Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería Geográfica.
33. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2002. FAO Fertilizer yearbook. FAO Statistic Series. Rome. No.162, Vol. 50.
34. Franklin, R.. 2001. Land Application of Sewage Sludge. Disponible en: <http://es.epa.gov/techpubs/8/628.html>
35. Gómez, I.; Moral, R.; Navarro, J., García, F. y Mataix, J.. 1994. Efecto Fertilizante NPK de un Lodo de Depuradora; I Congreso de la Sociedad Española de Agricultura Ecológica, Toledo-España.
36. Greater Vancouver Regional Distric (GVRD). 1999. Recycling Biosolids to Soil- Trace Metals. The Biosolids Report. U.S.A.
37. Guerrero, A.. 1996. El Suelo, Los Abonos y La Fertilización de Cultivos. Ediciones Mundi Prensa. España. Pp 88-91.
38. Häni, H.; Siegenthaler, A. and Candinas, T.. 1996. Soil Effects due to Sewage Sludge Application in Agriculture. Fertil. Res. 43: 149-156.
39. Henry, C.; Sullivan, D.; Rink, R.; Dorsey, K. and Cogger, C.. 1999. Managing Nitrogen from Biosolids. Washington State Department of Ecology and Northwest Biosolids Management Association.
40. Higa, L. E. y Lopolito M. F.. 2002. Noticias y Comentarios Técnicos Proporcionados por la División Aguas Servidas (DIASE) de AIDIS Argentina. Disponible en: <http://www.aidisar.org/diase01.htm>
41. Ibeckwe, A. M.; Angle, J.S; Chaney, R.L. and van Berkum, P.. 1995. Sewage Sludge and Heavy Metal Effects on Nodulation and Nitrogen Fixation of Legumes. J. Environ. Qual. 24: 1201.
42. INIA-España. 1994-1997. Utilización Agrícola de Lodos Estabilizados de Depuradora – Análisis de Respuesta Agronómica, Dinámica del Nitrógeno, y Evolución de Metales pesados en Suelos y Plantas. Proyecto N°SC94-025.

43. INIA - CRI La Platina. 2002. Valorización de Lodos de Plantas de Tratamientos de Aguas Andinas, como Fertilizantes. Proyecto. Primer Informe Anual elaborado por INIA-CRI La Platina para Aguas Andinas S.A.. Mayo.
44. Inostroza, J. y Gaete, N.. 1987. Estiércol de Vacuno en Papa. Revista Tierra Adentro, N°14 (Mayo-Junio): 44-47.
45. Ippolito, J.A., Barbarick, K.A. and Jepson, R.. 1997. Application of Anaerobically Digested Biosolids to Dryland Winter Wheat. Technical Report. Agricultural Experiment Station. Colorado-U.S.A.
46. Reglas Internacionales para Ensayos de Semillas (ISTA). 1976. Ensayo de Germinación. Ministerio de Agricultura, Instituto Nacional de Semillas y Plantas de Viveres, Madrid- España. Cap. 5. Pp 16- 123.
47. Keller, C., McGrath, S. P. and Dunham. .2002. Trace Metal Leaching Through a Soil – Grassland System After Sewage Sludge Application. J. Environ. Qual. 31: 1550 –1560.
48. Kiemeneck, G.L.; Hemphill, D.D.; Hickey, M.; Jackson, T.L., and Volk, V.V.. 1990. Sweet Corn Yield and Tissue Metal Concentration after Seven Years of Sewage Sludge Application. J. Prod. Agri. 3 (2): 235.
49. Koenig, R.; Miner, D. and Goodrich, K..1998. Land Application of Biosolids, A Guide for Farmers. Utah State University Extension. U.S.A.
50. Lesty, Y.. 2001. Disposición Final de Biosólidos en Chile. Seminario Medio Ambiental, 19 Abril 2001. Gerencia Técnica y Medio Ambiente, EMOS. S.A. (actualmente Aguas Andinas S.A.), Santiago-Chile.
51. Lue-Hing, C.; Zenz, D. R. And Kuchenriter, R.. 1992. Municipal Sewage Sludge Management, Processing, Utilization and Disposal. Water Quality Management Library. Vol. 4. Pp 587-657.
52. Matysik, M.A.; Gilmore, D.W. and Mozafarri, M.; Rosen, C. J.; Halbach, T. R. 2001. “Application Wood Ash, Biosolids, And Papermill Residuals to Forest Soil – A Review of the Literature. Staff Paper Series N° 153.

53. Miller, R. W.; Azarri, A.S. and Gardiner, D.T.. 1995. Heavy Metals in Crop As Affected By Soil Types And Sewage Sludge Rates. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 26(5&6): 708-709.
54. Ministry of Environment, Ministry Agriculture, Food and Rural Affairs. 1996. Guidelines for the Utilization of Biosolids and the other Wastes on Agricultural Land. Canada.
55. Montigni, L. And Smith, S.S..2001. Douglas-Fir Fertilization with Biosolids: Five year Results at Wistler, British Columbia. Ministry of Forest Research Program. Disponible en: <http://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/En/En50.htm>
56. The National Academy Press (NAP). 1996. Use of Reclaimed Water and Sludge in Food Crop Production"; Committee on the Use of Treated Municipal Wastewater Effluents and Sludge in the Production of Crops for Human Consumption, National Research Council, Washington, DC, Pp 17-88. Enlace: <http://books.nap.edu/>
57. O'Connor, G.A.; Kieldhl, D.; Eiceman,G.A. and Ryan, J.A.. 1990. Plant Uptake Of Sludge-Borne PCBs. *J. Environ. Qual.* 19: 113-118.
58. O'Connor, G.A.; Brobs, R.B.; Chaney, R.L.; Kinkaid, R.L.; McDowell, L.R., Pierzinky, G.M.,; Rubin, A., and Van Riper, G.G.. 2001. A Modofief Risk Assessment to Establish Molybdenum Standards For Land Application of Biosolids. *J. Environ. Qual.* 30: 1490.
59. Ortega, A. P. .1985. Aspectos Sanitarios del Lodo Proveniente del Tratamiento de Aguas Servidas. Tesis Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
60. Peralta, M. P. y Espinoza, G. G.. 1994. Conservación y Degradación de Suelos en Chile. En *Perfil Ambiental Chileno*. CONAMA-Chile. Cap. 15. Pp 311- 332
61. Raven, K. P. and Loeppert, R.H.. 1997. Trace Metals Composition of Fertilizer and Soil Amendments. *J. Environ. Qual.* 26: 551-557.
62. Renner, R.. 2000. Sewage Sludge, Pros & Cons. *Environ. Scienc. & Technol.* 34: 430-435.

63. Regadas, L. E.. 2002. Disposição Final do Lodo de Esgoto como Fertilizante Agrícola, na Região Metropolitan Brasil. Disponible en:  
<http://www.geocities.com/lododeesgoto/principal.htm>
64. Rechcigl, J. E.. 1995. Sewage Sludge. En Soil Amendments and Environmental Quality. Agronomia, Agriculture and Environment Series, Lewis Publishers. Chap. 6. Pp 199-247.
65. Rocha, M.T. y Shiota, M.. 1999. Disposición Final de Lodo de Esgoto. Revista de Estudios Ambientales. Vol. 1. N° 3. 25 p.
66. Sadzawka, A. R.; Grez, R. Z., Moraga, M., Carrasco, M. y Rojas, C.. 2000. Métodos Recomendados para los Suelos Chilenos.
67. Secretaría General de Medio Ambiente, Madrid. 2001. Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales-EDAR (PNLD)-(2001-2006). España.
68. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). 1998. Manual de Producción Orgánica. Chile. Pp 27.
69. Soon, Y. K. and Bates, T.E.. 1985. Molybdenum, Cobalt and Boron uptake from Sewage-Sludge Amended Soils. Can. J. Soil Sci. 65: 507-517.
70. Sullivan, D.. 1998. Fertilizing with Biosolids. Enlace: <http://www.gvrd.bc.ca>
71. Tiffany, M.E.; McDowell, L.R.; O'Connor; G.A; Nguyen, H; Martin, F.G.; Wilkison, N.S., and Cardoso, E.C.. 2000a. Effects of Pasture-Applied Biosolids on Forage and Soil Concentrations Over a Grazing Season in North Florida. I. Macrominerals, Crude Protein, and Vitro Digestibility. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 31(1&2): 201-213.
72. Tiffany, M.E.; McDowell, L.R.; O'Connor; G.A; Nguyen, H; Martin, F.G.; Wilkison, N.S., and Cardoso, E.C.. 2000b. Effects of Pasture-Applied Biosolids on Forage and Soil Concentrations Over a Grazing Season in North Florida. II. Microminerals. Commun. Soil Sci. Plant Anal. Vol. 31(1&2): 215-227.
73. Thompson, L. M. and Troeh, F.R.. 1988. Los Micronutrientes. En Los Suelos y su Fertilidad. Editorial Reverté S.A.. Barcelona..Cap. 14. Pp 407-436.
74. U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). 1999a. Biosolids Generation, Use, and Disposal inThe United States. U.S. Environmental Protection Agency

Municipal and Industrial Solid Waste Division Office of Solid Waste EPA530-R-99-009.

75. U.S. EPA. 1999b. Background Report on Fertilizer Use, Contaminants and Regulations. Disponible en: <http://www.epa.gov/opptintr/fertilizer.pdf>
76. U.S. EPA. 1995. Process Design Manual, Land application of Sewage Sludge and Domestic Septage. Disponible en:  
[http://oaspub.epa.gov/webi/meta\\_first\\_new2.try\\_these\\_first](http://oaspub.epa.gov/webi/meta_first_new2.try_these_first)
77. U.S. EPA. 2000. Estándares del Reglamento Nacional Primario del Agua Potable. Office of Water. Enlace: [www.epa.gov](http://www.epa.gov)
78. U.S. EPA. 1993. Guidance for Writing Permits for the Use or Diposal of Sewage Sludge. Working Draft.
79. European Union (EU). 2000. Working Document on Sludge. 3<sup>ra</sup> Draft. Brussels.
80. Universidad de Chile. 1992. Suelos una Visión Actualizada del Recurso. Publicaciones Misceláneas Agrícolas N°18. Pp 103-109.
81. Water Environment Association Ontario (WEAO). 2001. Fate and Significance of Contaminans in Sewage Biosolids Applied to Agricultural Land Through Literature Review and Consultation with Stakeholder Groups. Report Final. Canada. Disponible en: [http://www.weao.org/report/Fate\\_and\\_Significance.html](http://www.weao.org/report/Fate_and_Significance.html).
82. Webber, M. D., Pietz, R. I., Granato, T. C. and Sovoboda, M. L.. 1994. Organics Chemicals in the Environment, Plant uptake and other Organic Contaminants from Sludge-Treated Coal Refuse. J. Environ. Qual. 23: 1020.
83. Wen, G., Bates, T. E., Voroney, R. P., Winter, J. P. and Schellenbert, M. P.. 1997. Comparación of Phosphorus Availability with Application of Sewage Sludge, Sludge Compost, and Manure Compost. Comm. Soil. Sci. Plant. Anal. 28 (17&18): 1481-1497.
84. 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.

## ANEXO A

### A.1. Normativas Específicas para Uso de Lodos

Algunas regulaciones específicas sobre uso de lodos, basados en reportes de la Comunidad Europea (EC, 2001) son las siguientes:

#### A.1.1. Silvicultura

El uso de lodos en la silvicultura está definido como uso comercial forestal y energético, en cambio, el uso de lodos en bosques naturales está definido sobre los bosques ya existentes y los bosques para recreación.

Existe un número limitado de regulaciones con requerimientos específicos en los países europeos que conciernen al empleo de lodos en la silvicultura. Existen algunas regulaciones, que hacen distinción entre aplicaciones a bosques naturales o cultivados, como en la región de Flandes, Bélgica.

Algunas regulaciones específicas sobre uso de lodos son las siguientes:

- En Dinamarca, la Orden del Estatutaria No. 49 del Consejo local puede permitir el uso de lodo en cultivos forestales, basados en las necesidades de fertilización. El Consejo también establece restricciones específicas para su uso.
- En Alemania, el uso de lodos en suelos para la silvicultura está prohibida en el párrafo 4 de la Ordenanza sobre lodos.
- En los Países Bajos, los suelos para silvicultura son considerados como suelos agrícolas y se aplican las mismas regulaciones.
- En Suecia, no hay elementos que dirijan estos aspectos en la regulación. Sin embargo, la Guía del año 1990 de la Agencia de Protección Ambiental Escocesa (SEPA), establece que los lodos de plantas de tratamientos de aguas municipales

deben contener valores máximos recomendados cuando el lodo es empleado en la silvicultura.

La propuesta de Directiva 2000 establece que los lodos no pueden ser usados en bosques. No obstante, los Estados miembros pueden permitir su uso en plantaciones forestales (plantaciones de corta rotación, árboles de navidad y similares).

### **A.1.2. Bosques Naturales**

Algunas regulaciones referentes a aplicaciones a bosques naturales basados en reportes de la Comunidad Europea (2001) son las siguientes:

- Las regulaciones nacionales para Grecia, Finlandia, Irlanda, Italia, Países Bajos, Portugal, España y Suecia no están dirigidas hacia el uso de lodos en bosques naturales.
- Las ciudades con explícita prohibición de uso de lodos en bosques son: Austria, Bélgica (*Flandes y Valonia*) y Alemania. Sin embargo, en Austria la regulación sobre uso de lodos no menciona su uso en bosques, pero la sección 16 de la Ley Forestal prohíbe el uso de lodos en Bosques, no así en bosques de jardín como semillas de plantaciones forestales y árboles de navidad.
- En Francia, el Decreto de Gobierno del día 8 diciembre del año 1997 especifica en el *Artículo 16* que los requerimientos para uso de lodos en la agricultura son aplicables a áreas forestales, sea público o privada, previniendo mínimos riesgos para la salud humana y fauna.
- Luxemburgo, la regulación del Gran Ducado del día 14 de abril del año 1990 establece que el uso de lodos en suelos forestales esta sujeto a licencia. Sin embargo, la licencia también es necesaria antes del esparcido sobre suelos agrícolas a una distancia menor a 300 metros de bosques aledaños.
- En el Reino Unido, el uso de lodos en bosques naturales y áreas reforestadas no esta dirigida por regulación alguna.

## A.2. Aplicación a Suelos Forestales

El uso de lodos en la silvicultura -plantaciones- ha sido una importante vía para su reciclaje mediante la entrega de materia orgánica y compuestos fertilizantes al suelo. En Estado Unidos de Estados de América, la utilización de lodos en suelos forestales ha sido estudiada desde el año 1960. Algunas resultados de experiencias de aplicación son los siguientes:

En estudios realizados por la Universidad de Washington en plantaciones forestales de *Douglas Fir* se ha encontrado un incremento entre un 48% y 93% del diámetro de crecimiento cuando se aplican lodos.

En Washintong, altas tasas de aplicación de lodos, nitrógeno total equivalente de 8 tons/ha, en plantaciones forestales de *Douglas Fir* y *Grand Fir* después de 10 años han provocado clorosis foliar y la reducción de la tasa de crecimiento. El exceso de nitrógeno ha incrementado la tasa de nitrificación y consecuentemente la acidificación, aumentando la lixiviación de cationes y la disminución del intercambio de magnesio. En este caso se ha recomendado el empleo de co-aplicación de cenizas de madera con lodos para reducir los impactos negativos de acidificación. Niveles de contenidos foliares para Ni, Cd, y Cr se han encontrado significativamente tóxicos (Matysik and Gilmore, 2001).

En la ciudad de Michigan de Estados Unidos de América, aplicaciones de lodos con un contenido de nitrógeno total equivalente de 1.160 kg/ha en plantaciones de Pino Rojo (*Pinus resinosa*) y Pino Blanco (*Pinus strobus*) no muestran un cambio en el contenido foliar de Cu, Zn, Cr, Pb y Ni o P foliar, pero sí se detectó incremento en el N foliar (Matysik and Gilmore, 2001).

Aplicaciones de tasas de 13 y 26 tons/ha ms a plantaciones de Abeto (*Picea sitchencis*) con un contenido de nitrógeno equivalente de 445 y 893 tons/ha y fósforo

equivalente de 128 y 256 tons/ha muestran un incremento significativo de Cu y Zn después de siete años (Matysik and Gilmore, 2001).

Aplicaciones de lodos en British Columbia en coníferas forestales jóvenes con una tasa equivalente de 416 kg/ha no presentan problemas en el tamaño de la población, peso del cuerpo o diversidad de especies después de un año de aplicación. Acumulación de metales no fue encontrada (Matysik and Gilmore, 2001).

Montigny and Smith (2001) en aplicaciones de lodos 750-1000-1500 kg N/ha y 225 kg N/ha de un fertilizante comercial (Urea) a plantaciones de Douglas-Fir en tres estaciones (primavera, verano, invierno) en British Columbia-Canadá, para cinco años de estudio, encontró que tasas y efectos son independientes de la estación. Los resultados encontrados muestran que no hay diferencia en el diámetro de crecimiento para las tres tasas, con un promedio de 1,2 cm por año; sin embargo, en las plantaciones donde se aplicó lodo, los árboles mostraron un diámetro significativamente mayor que cuando se utilizó el fertilizante convencional (1,0 cm/año). Durante los cinco años de estudios, la respuesta del diámetro de crecimiento para la aplicación de lodos (0,3 cm/año) fue mayor que con en el fertilizante convencional (0,1 cm/año). También, se encontró que los tratamientos con altas tasas de crecimiento (verano e invierno) tienden a causar mayor daño y mortandad.

Andrade and Mattiazzo (2000) en estudios realizados sobre movimiento de nitrógeno y metales (Cd, Cr, Cu y Ni) en suelos con plantaciones forestales (*Eucalyptus grandis*) en Brasil con tasas de aplicación de lodo activado que variaron entre 10 y 40 tons/ha, no encontraron incremento y movimiento  $\text{NO}_3^-$  a través del perfil del suelo.

La U.S. EPA (1995) recomienda que las aplicaciones de lodos a sitios forestales puede realizarse anualmente o una vez por varios años. La aplicación anual se basa sólo en proporcionar el nitrógeno que necesitan los árboles para crecer y desarrollarse, considerando las pérdidas por volatilización, desnitrificación y mineralización. Dentro

de las restricciones para la aplicación a sitios forestales con fines recreativos, se encuentran el ingreso del público, este debe llevarse a cabo en los periodos de no aplicación (U.S. EPA, 1995).

La U.S. EPA tiene como límite para agua de beber un límite 10 mg de N-NO<sub>3</sub> por litro de agua, en general la aplicación de lodos en esta práctica ha mostrado una mínima lixiviación. Los resultados son variables y dependientes de las condiciones biogeoclimáticas. En general, altas de aplicación del orden de las 0,25 tons/ha de nitrógeno total equivalente no presentan excesiva lixiviación de nitrato.

Las principales ventajas para esta alternativa de reciclaje de lodos son el empleo de elementos fertilizantes, bajo costo de aplicación y los reducidos riesgos sanitarios.

## ANEXO B

### B.1. Tasas Recomendadas de Fertilización

**Tabla B-1.** Recomendaciones de fertilización de cultivos (Almeyda, 1967)

Cultivos	Suelos			
	Secano costino Santiago a Curicó			
	Secano interior		Secano marítimo	
	(kg/ha)			
	N	P2O5	N	P2O5
Trigo, avena,cebada; solos	32	50	48	80
Trigo, avena,cebada; asociados	32	75	48	120
Lentejas			64	80
Viñas	64	25	96	40
Frutales	64	25	96	40
Praderas leguminosas o mixtas, heno	16	40	24	60
Praderas de gramíneas solas, talajo	24	20	32	30
Semilleros de gramíneas	48	75	72	120

**Tabla B-2.** Recomendación de fertilización hortalizas (Araos, 1977)

Hortalizas	kg N/ha	Zona	kg P2O5/ha
Repollo, coliflor, apio, acelga, espinaca lechuga, alcachofa	180	Coquimbo a O'Higgins	75
Ajos, tomate, betarraga, espárrago	150		
Mejón, sandía, zapallo, pepino, zanahoria	120		
Cebolla, frutilla	90		
Arvejas, habas,porotos verdes y granados	50		

**Tabla B-3.** Recomendación de fertilización frutales\* y viñas (Araos, 1977)

Frutales/Viñas	Años de edad					En producción
	1	2	3	4	5	
	kg N/ha					
Duraznos	25	40	75	120	150	220
Damasco, almendro**	25	40	60	90	120	150
Manzano, peral, ciruelo	25	40	60	90	120	160
Cerezo, naranjo, limón	25	40	60	90	120	160
Palto, nogal	25	40	60	75	90	125
Viña, Parronal	25	40	50	60	75	90

\* Los árboles frutales necesitan de aplicación de nitrógeno todos los años, la dosis requerida por viñas es menor que en frutales. Generalmente es necesario aplicar fósforo a los frutales y viñas después de la plantación; sólo en suelos fuertemente ácidos, altamente fijadores de fósforo, puede ser necesario fertilizar con este elemento

\*\* Almendros con riego adecuado

**Tabla B-4.** Recomendación de fertilización de praderas (Araos, 1977)

Praderas	Zona	Condiciones	Mixta	Gramínea	Legum. o mixtas	Gramínea
			kg N/ha		kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	
Establecimiento de praderas	Coquimbo a Talca	riego	60	120	90	75
Mantenimiento anual praderas	Coquimbo a Bio-Bio	riego	60	90		
Mantenimiento anual praderas	Coquimbo a Talca				30	

Legum.: leguminosas

## B.2. Factores de Mineralización y Volatilización

**Tabla B-5.** Estimaciones de factores de mineralización y de volatilización del amoníaco (Franklin, 2001; U.S. EPA, 1995; U.S. EPA, 1993)

Proceso de tratamiento	Factor de Mineralización (FM)	Método de aplicación	Factor de volatilización del amoníaco (FV)
Lodos no estabilizados/ lodos activados	0,4	Dispersión superficial	0,5
Estabilización alcalina	0,3	Dispersión superficial seguida por incorporación	0,75
Digestión aeróbica	0,3	Inyección bajo superficie	1,00
Digestión anaeróbica	0,2	Deshidratado y aplicado de alguna manera	1,00
Compostaje	0,1		

## ANEXO C

**Tabla C-1.** Duración ensayo de germinación (INIA- CRI La Platina, 2002)

Especie	N° de días del ensayo		Fecha de inicio (i) Fecha de termino (t)		
			Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
Maíz	7	i	02/08/01	23/08/01	27/09/01
		t	09/08/01	30/08/01	05/10/01
Trigo	8	i	02/08/01	23/08/01	27/09/01
		t	10/08/01	31/08/01	05/10/01
Fréjol	11	i	02/08/01	23/08/01	27/09/01
		t	13/08/01	03/09/01	22/10/01
Alfalfa	12	i	02/08/01	23/08/01	27/09/01
		t	14/08/01	04/10/01	09/10/01
Tomate	14	i	02/08/01	23/08/01	27/09/01
		t	16/08/01	06/09/01	14/10/01

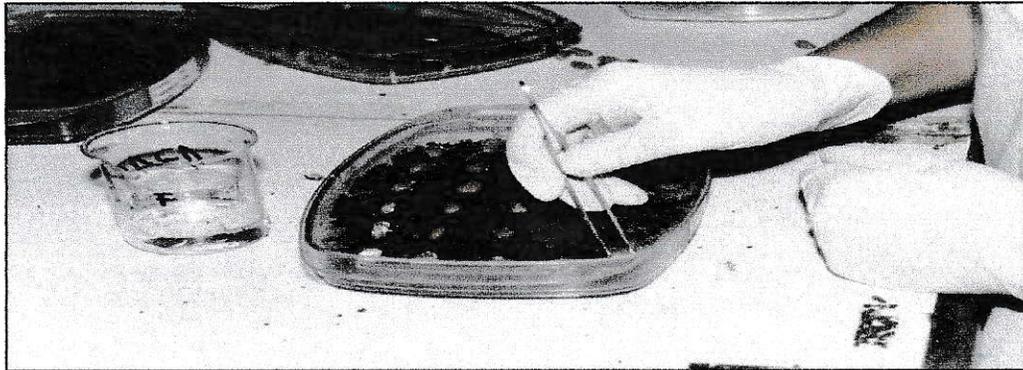
**Tabla C-2.** Cantidad de sustratos (mezclas suelo-lodo) por bandeja ensayo de germinación (INIA- CRI La Platina, 2002)

Sustrato	Tratamiento (%)	Masa mezcla sustrato-lodo* (g)
S. Chada	0	609
S. Chada	25	533
S. Chada	50	456
S. Maipo	0	590
S. Maipo	25	610
S. Maipo	50	522
S. Los Morros	0	575
S. Los Morros	25	653
S. Los Morros	50	537
Lana de roca	0	83
Lana de roca	25	195
Lana de roca	50	265
Lodo	100	360

\* Cantidades de referencia



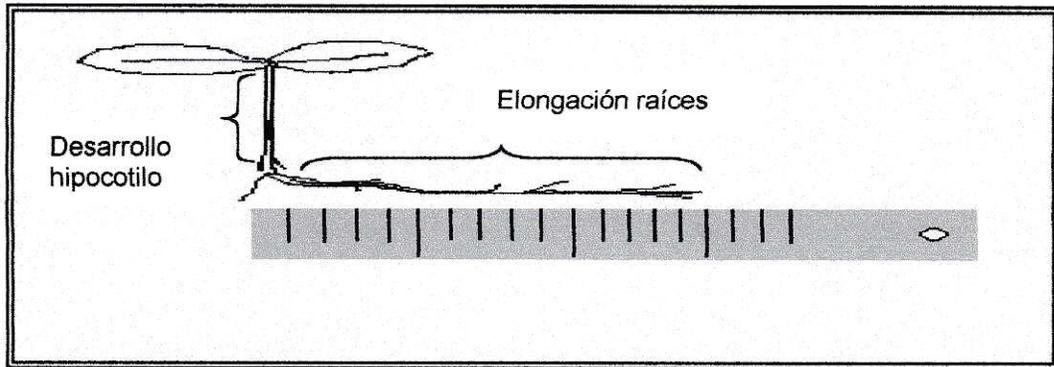
**Figura C-1.** Lodo utilizado en el ensayo de germinación (INIA-CRI La Platina, 2002)



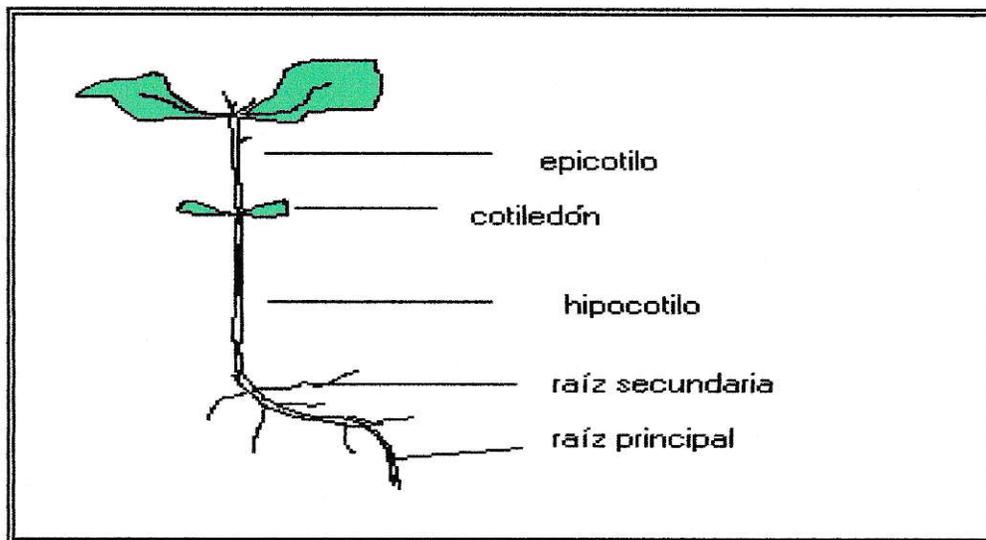
**Figura C-2.** Siembra de semillas (INIA-CRI La Platina, 2002)



**Figura C-3.** Ensayo en ejecución (INIA-CRI La Platina, 2002)



**Figura C-4.** Medición de partes esenciales de las plántulas (INIA-CRI La Platina, 2002)



**Figura C-5.** Estructuras esenciales plántulas dicotiledóneas (INIA-CRI La Platina, 2002)