

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE MANEJO DE RECURSOS FORESTALES

**ÀREAS POTENCIALES PARA LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS EN
PLANTACIONES FORESTALES DE LA VI REGIÓN DE CHILE**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

FRANCISCA CECILIA TORO CARRASCO

Profesor Guía: Ing. Forestal, Dr. Sr. Jaime Hernández P.

SANTIAGO – CHILE
2005

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE MANEJO DE RECURSOS FORESTALES**

**ÀREAS POTENCIALES PARA LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS EN
PLANTACIONES FORESTALES DE LA VI REGIÓN DE CHILE**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

FRANCISCA CECILIA TORO CARRASCO

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Jaime Hernández P.	
Prof. Consejera Sra. María Silvia Aguilera	
Prof. Consejero Sr. Miguel Castillo S.	

SANTIAGO – CHILE

2005

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	2
	2.1 OBJETIVO GENERAL	2
	2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
	3.1 PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	3
	3.1.1 Características de las aguas residuales	3
	3.1.1.1 Características físicas	3
	3.1.1.2 Características químicas	5
	3.1.1.3 Composición del agua residual	6
	3.1.2 Tratamiento de las aguas residuales	7
	3.1.2.1 Pretratamiento	10
	3.1.2.2 Tratamiento primario	10
	3.1.2.3 Tratamiento secundario.....	11
	3.1.2.4 Tratamiento terciario	15
	3.1.3 Características de los lodos	15
	3.1.4 Tratamiento de los lodos	20
	3.1.4.1 Procesos físicos	21
	3.1.4.2 Procesos químicos	21
	3.1.4.3 Procesos biológicos	22
	3.1.4.4 Proceso térmico.....	23
	3.1.5 Disposición final de los lodos	23
	3.1.5.1 Disposición en relleno sanitario	24
	3.1.5.2 Reciclaje	24
	3.1.5.3 Incineración	25

3.1.6	Costos de producción y transporte de lodos	26
3.1.6.1	Costos de inversión.....	26
3.1.6.2	Costos de operación y mantención.....	29
3.1.6.3	Costos de manejo de lodos.....	29
3.2	NORMATIVA EXTRANJERA Y EXPERIENCIA SOBRE EL MANEJO DE LODOS	32
3.2.1	Estados Unidos de América	32
3.2.2	Australia.....	34
3.2.3	Nueva Zelandia	34
3.2.4	Normativa Chilena	36
3.2.4.1	Análisis crítico del Reglamento	38
4	MATERIAL Y MÉTODO.....	40
4.1	MATERIAL.....	40
4.2	MÉTODO.....	41
4.2.1	Desarrollo y construcción del modelo.....	41
4.2.1.1	Definición de variables según la escala de percepción.....	41
4.2.1.2	Procesamiento de coberturas	42
4.2.1.3	Modelo de restricciones	44
4.2.1.4	Factibilidad económica de aplicación	45
4.2.2	Modelo de integración de la información	49
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
5.1	DEFINICIÓN DE VARIABLES DE APLICACIÓN	51
5.2	APLICACIÓN DEL MODELO DE RESTRICCIONES	53
5.2.1	Escala regional	53
5.2.2	Escala comunal.....	56

5.3	FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE APLICACIÓN	59
5.3.1	Determinación de costos.....	60
5.3.1.1	Costo de transporte y disposición en un sitio potencial	60
5.3.1.2	Costo relleno sanitario.....	60
5.3.1.3	Crecimiento diferencial de plantación	61
5.3.2	Determinación del radio económico de aplicación.....	61
6	CONCLUSIONES.....	63
7	BIBLIOGRAFÍA.....	65

RESUMEN

Una de las soluciones que existe frente a la disposición final de biosólidos, generados en plantas de tratamiento de aguas servidas, es su disposición en plantaciones forestales con la finalidad de aprovechar sus nutrientes y disminuir el impacto causado al medio ambiente en el uso de vertederos.

En Chile, la aplicación de lodos sanitarios en plantaciones forestales, se encuentra regulada por el “Reglamento sobre manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas” (Conama, 2001) donde se definen las características de las áreas de aplicación.

Bajo este enfoque, en la presente memoria se diseñó y construyó un modelo para identificar las áreas potenciales de aplicación de lodos sanitarios, que se aplicó en plantaciones forestales de la VI región de Chile, obteniendo que el 8,5% (138.641 ha) de la superficie de la VI región presenta características favorables para aplicación de lodos sanitarios. En esta aplicación se consideraron las variables restrictivas de aplicación que se definieron como representativas a escala 1:250.000 (suelos de uso forestal, pendiente, textura del suelo y los suelos con ph menor a 5).

La aplicación del modelo a las variables restrictivas de compatibilidad de uso y cursos de aguas superficiales, se desarrolló a escala comunal considerando un radio de 50 km desde la localidad de Pichilemu, donde se encontraba representado el 53% de la superficie apta y muy apta del análisis regional, esto es 73.561 ha. De la superficie anterior sólo el 10% no es apta para la aplicación de biosólidos, por lo cual existen 33.423 ha sin limitaciones de aplicación (suelos aptos) y 32.512 ha con suelos muy aptos para la aplicación de biosólidos.

Por otra parte, se determinó el radio económico factible de aplicación desde la localidad de Pichilemu hasta los rodales potenciales obtenidos del análisis comunal. Obteniendo que el 63% de la superficie total (63.736 ha) posee un costo de transporte y disposición menor o igual que tenerlo en relleno sanitario, mientras que si se considera el aumento de la productividad del bosque al aplicar biosólido esta cifra aumenta a un 78 %, es decir, de 39.839 ha a 49.792 ha.

SUMMARY

One of the existing solutions for the final disposition of biosolids generated in served water treatment plants, is to use it on forest plantations which purpose is to take advantage of its nutrients content and to reduce the impact caused to the environment, when it is use on garbage dump.

In Chile the sanitary muds applications on forest plantations is controlled by the "Regulation about non dangerous handling generated muds in water treatment plants" (Conama, 2001) where the characteristics of the application area are defined.

Within the scope of this approach, in this memory a model to identify the potential area of application of sanitary muds that was applied in forest plantations of VI region of Chile was designed and constructed, obtained that 8,5% (138.641 ha) of the surface of the VI region shows favourable characteristics for sanitary muds applications. To identify the application areas at this regional level a scale of 1:250.000 was used and the following variables: forest land use, slope, soil texture and Ph.

Also, the model was applied at communal scale, adding restrictive variables such as land use compatibility and distance to superficial watercourses. At this scale a radius of 50 km from the locality of Pichilemu was set, which represents 53% of the suitable and very suitable total areas for biosolid application at regional analysis, this is 73.561 ha. Only 10% of the former area is not recommended for biosolid application, thus 33.423 ha have no application limitations (suitable soils) and 32.512 ha have very suitable soils for biosolid utilization.

On the other hand, the feasible economic radius of application was determined by taken the locality of Pichilemu as origin. This way, the potential forest stand were identify at communal scale. The results shows that 63% of the total surface (63.736 ha) have a transport and disposition cost equal or less than the cost of using the sanitary filling alternative. Furthermore, if the increase of the forest productivity is considered then the biosolid applying area increases up to 78%, this is, from 39.839 ha to 49.792 ha.

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente se encuentran en desarrollo políticas ambientales que tienen por objetivo controlar los procesos productivos que causan impactos sobre el medio ambiente, de tal forma de conservar la biodiversidad. Dentro de éstos se encuentra el tratamiento de aguas servidas que producen residuos que no pueden ser vertidos a cauces de ríos y cuya eliminación y manejo no es fácil.

Los lodos sanitarios corresponden a sólidos orgánicos sedimentables que pueden ser depositados en rellenos sanitarios o utilizados como fertilizantes en suelos forestales que presenten déficit de nutrientes para el soporte de las plantaciones o en suelos que se encuentran degradados debido a una explotación histórica y no son productivos por tener pocos nutrientes (Whitehouse *et al.*, 2000).

Por lo anterior, una forma de solucionar el problema ambiental frente al destino de los lodos sanitarios, es la aplicación de éstos como fertilizante en plantaciones forestales. Esto permite una disminución considerable de costos en fertilizantes junto a la contribución de la materia orgánica que favorece los procesos químicos al aumentar la capacidad de intercambio catiónico; procesos físicos al mejorar la capacidad de almacenamiento de agua; y finalmente, procesos biológicos al entregar los nutrientes necesarios en la materia orgánica, para el crecimiento de las plantas y la sustentabilidad de los microorganismos del suelo (Cogger *et al.*, 2000).

Es necesario considerar que los lodos deben ser tratados antes de su aplicación, ya que contienen elementos patógenos y eventuales metales pesados. Además, se debe determinar cuáles son los requerimientos de nutrientes en el suelo y cómo éstos contribuyen en él, a modo de no exceder los nutrientes necesarios para la vegetación, cosecha o pastizales.

Por otra parte, se deben identificar los lugares en los cuales la aplicación de los lodos no genere efectos nocivos a la salud de la población, flora, fauna y suelo. Además, es preciso considerar un área factible de aplicación según costos de transporte desde la planta generadora hasta el destinatario del lodo o su disposición final. De esta forma la presente memoria tiene por objetivo Identificar las áreas potenciales, económicamente factibles para la aplicación de lodos sanitarios en plantaciones forestales de la VI Región de Chile.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar áreas potenciales, económicamente factibles para la aplicación de lodos sanitarios en plantaciones forestales de la VI Región de Chile.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir un modelo para determinar la localización de áreas potenciales para la aplicación de lodos sanitarios.
- Determinar la factibilidad económica de aplicación de lodos sanitarios en las áreas potenciales.

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

3.1.1 Características de las aguas residuales

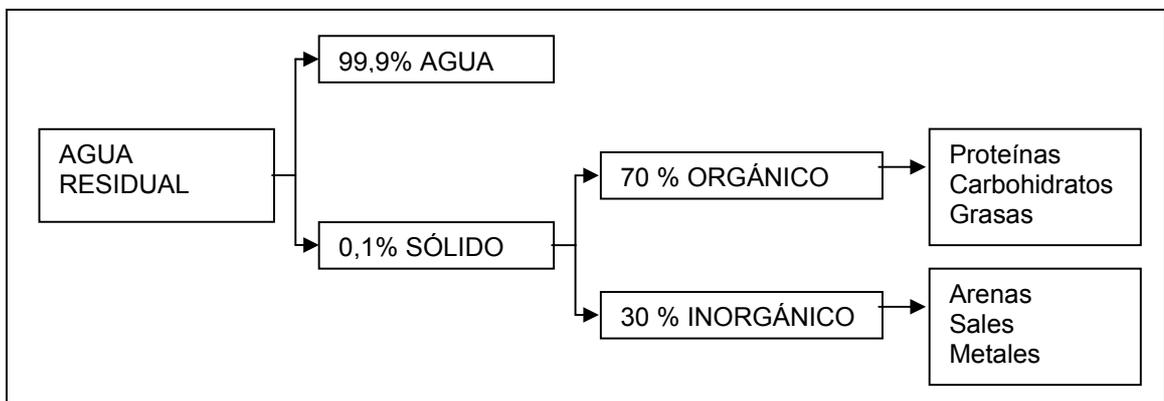
Las aguas residuales domésticas o sanitarias corresponden al agua procedente de residencias, instalaciones comerciales, públicas y similares, que contiene residuos líquidos y sólidos contaminados (Metcalf & Eddy, 1985).

3.1.1.1 Características físicas

- Sólidos totales

De las aguas residuales sólo un 0,1% (en peso) corresponde a fracción sólida, y aproximadamente el 70% de esas corresponde a sólidos orgánicos (Metcalf & Eddy, 1985), tal como se muestra en la figura 1.

Figura 1: Composición típica de las aguas residuales.



Fuente: Cortez, 2003.

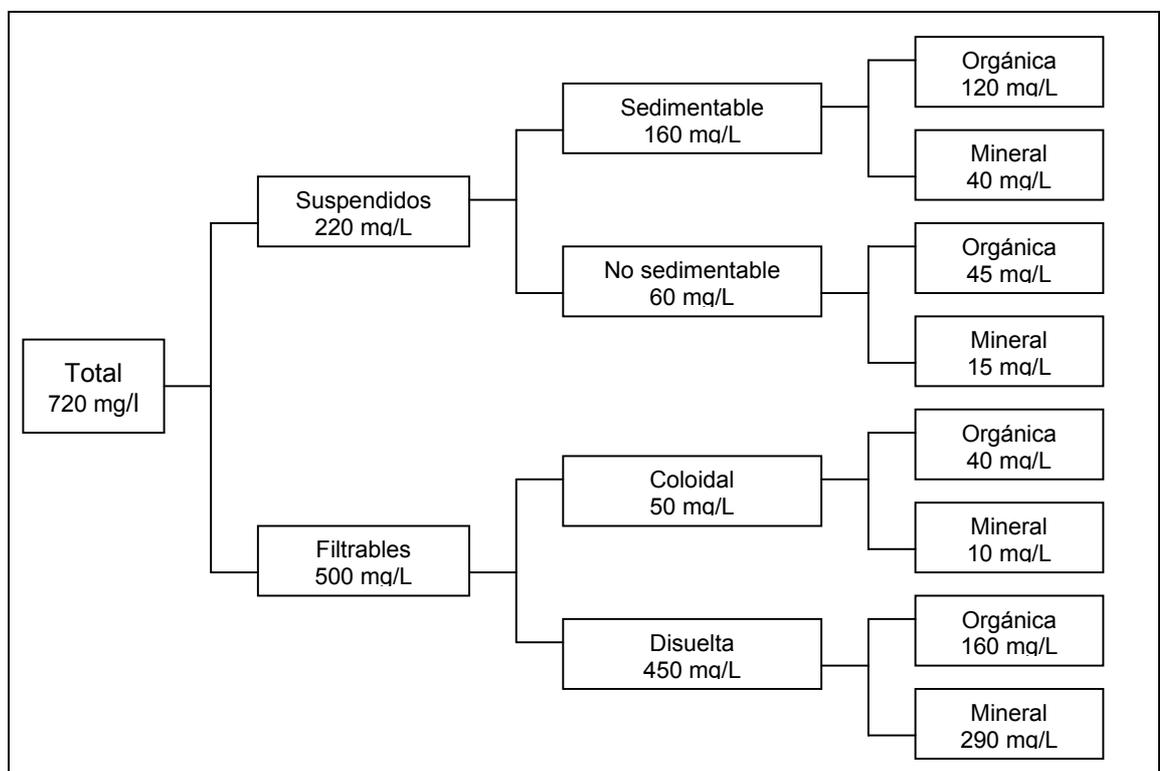
El contenido de sólidos totales de un agua residual se define como toda la materia que queda como residuo de evaporación a los 103-105°C. Éstos sólidos pueden clasificarse en sólidos suspendidos (no filtrables) y sólidos filtrables.

La fracción de sólidos suspendidos incluye los sólidos sedimentables que son una medida aproximada de la cantidad de lodos que se eliminará mediante la sedimentación. La

fracción de sólidos filtrables se componen de sólidos coloidales (partículas entre 10^{-3} y $1\mu\text{m}$ que no pueden ser eliminadas por sedimentación) y sólidos disueltos (moléculas orgánicas e inorgánicas e iones), como se indica en la figura 2 (Metcalf & Eddy, 1985).

Cada una de estas categorías pueden ser clasificadas en función de su volatilidad a $550^{\circ} \pm 50^{\circ}$ C. A esta temperatura la fracción orgánica se oxida formando gas, quedando la fracción inorgánica en forma de ceniza. Debido a lo anterior se habla de sólidos “volátiles”, que corresponden a la fracción orgánica de la muestra, y sólidos “fijos” correspondientes a la fracción inorgánica o mineral.

Figura 2: Clasificación de los sólidos presentes en aguas residuales de concentración media.



Fuente: Cortez, 2003

- Olores

Normalmente, los olores son debidos a los gases producidos por la descomposición de la materia orgánica. El agua residual reciente tiene un olor peculiar algo desagradable, pero más tolerante que el agua residual séptica (Metcalf & Eddy, 1985).

- Color

El color del agua residual reciente suele ser de un color grisáceo que al aumentar el tiempo de transporte en las redes de alcantarillado y al desarrollarse condiciones próximas a las anaeróbicas cambia gradualmente el color del agua de gris a gris oscuro para finalmente adquirir un color negro (Metcalf & Eddy, 1985).

3.1.1.2 Características químicas

- Materia orgánica

En un agua residual típica, un 75% de los sólidos suspendidos y un 40% de los sólidos filtrables son de naturaleza orgánica. Proceden del reino animal y vegetal y de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos. Los principales grupos de sustancia orgánicas hallados en el agua residual son las proteínas (40 a 60%), carbohidratos (25 a 50%) y grasas y aceites (10%). Los compuestos orgánicos están formados generalmente por una combinación de carbono, hidrógeno y oxígeno, junto con nitrógeno en algunos casos (Metcalf & Eddy, 1985).

Los métodos más utilizados actualmente para medir el contenido orgánico de las aguas residuales son:

- a) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): se utiliza para determinar la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos para oxidar o biodegradar, en un proceso biológico y aeróbico, la materia orgánica presente en el agua. Generalmente éste parámetro se mide durante 5 días a 20°C (DBO₅)
- b) Demanda Química de Oxígeno (DQO): fracción de materia orgánica capaz de ser degradada por mecanismos anaerobios, en una muestra de agua residual, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo.

- Materia inorgánica

Son varios los componentes inorgánicos de las aguas residuales que tienen importancia para el establecimiento y control de la calidad de las aguas. Sin embargo, los materiales inorgánicos son raramente tratados para su eliminación.

Dentro de éstos componentes se encuentra el ion hidrógeno; los cloruros provenientes de la disolución de suelo y rocas que los contienen; los hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos (calcio, magnesio, sodio, potasio o amoníaco) que producen alcalinidad en las aguas; y finalmente nutrientes como el nitrógeno, fósforo y azufre; compuestos tóxicos y metales pesados (Ni, Mn, Pl, Cr, Cd, Zn, Cu, Fe, Hg) (Metcalf & Eddy, 1985).

- Gases

Los gases más frecuentemente encontrados en el agua residual sin tratar son el nitrógeno (N_2), anhídrido carbónico (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), amoníaco (NH_3), y metano (CH_4). Los tres primeros son gases comunes en la atmósfera y se encuentran en todas las aguas que estén expuestas al aire. Los dos últimos proceden de la descomposición de la materia orgánica de las aguas residuales sin tratar (Metcalf & Eddy, 1985).

3.1.1.3 Composición del agua residual

La composición del agua residual se encuentra representada por la cantidad de constituyentes físicos, químicos y biológicos (tabla 1).

Tabla 1 Composición típica de aguas residuales domésticas no tratadas.

Constituyentes	Concentración (mg/L)		
	Fuerte	Media	Débil
Sólidos Totales:	1200	720	350
Disueltos totales	850	500	250
Fijo	525	300	145
Volátiles	325	200	105
En suspensión totales	350	220	100
Fijo	75	55	20
Volátiles	275	165	80
Sólidos sedimentables (ml)	20	10	5
Demanda bioquímica de oxígeno, a 5 días y a 20°C (DBO ₅ a 20 °C)	400	22	110
Carbono orgánico total (COT)	290	160	80
Demanda química de oxígeno (DQO)	1000	500	250
Nitrógeno (total como N)	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amonio libre	50	25	12
Nitrito	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo (total como P)	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
Cloruros ^a	100	50	30
Alcalinidad (como CaCO ₃) ^a	200	100	50
Grasas	150	100	50

^a Los valores deberían incrementarse en la cantidad correspondiente contenida en el agua de suministro.

Fuente: Metcalf & Eddy, 1985.

3.1.2 Tratamiento de las aguas residuales

Los objetivos de los procesos de tratamiento de aguas residuales son reducir el contenido orgánico, la remoción de nutrientes y la remoción o inactivación de organismos patógenos, que producen la contaminación de éstas aguas. Para conseguir estos objetivos, se deben llevar a cabo diferentes métodos individuales que se pueden combinar para dar lugar a diversos niveles de tratamiento de las aguas residuales (Alcota, 2002).

Los métodos individuales se suelen clasificar en operaciones físicas, procesos químicos y procesos biológicos, todos unitarios, en los cuales la eliminación o conversión de los contaminantes es provocado por aplicaciones de fuerzas físicas, adición de productos químicos o actividad biológica, respectivamente (Metcalf & Eddy, 1985).

Estos procesos y operaciones unitarias aplicados en el tratamiento de aguas residuales generan subproductos, llamados lodos¹ y biosólidos², que deberán someterse a proceso de acondicionamiento, independientemente de su destino final. Este proceso permite reducir al mínimo los riesgos sanitarios, que tienen relación con la reducción del potencial de atracción de vectores³ y con requisitos de higienización que permitan reducir o eliminar el contenido de patógenos (Leppe *et al.*, 2001).

El proceso de tratamiento de aguas residuales se puede dividir en: Se debe enfatizar que tanto la selección del tratamiento de las aguas residuales como el manejo y disposición de los lodos depende de la naturaleza de los residuos y de las condiciones técnicas, económicas y ambientales.

- Tratamiento preliminar o pretratamiento
- Tratamiento primario
- Tratamiento secundario o biológico
- Tratamiento terciario

En la figura 3 se observa esquema de un proceso de tratamiento típico en una planta de tratamiento de aguas residuales, en donde se considera la línea de tratamiento de aguas residuales y la línea de tratamiento de lodos.

¹ Lodo: acumulación de sólidos orgánicos sedimentables separados por los distintos procesos de tratamiento de aguas (Conama, 2001)

² Biosólido: definición establecida por la EPA (Environmental Protection Agency, Estados Unidos) para potencializar el aspecto de residuo biológico con potenciales de reutilización que presentan los lodos secundarios.

³ Vectores: Agente que transporta algo de un lugar a otro. En éste caso podría estar representado por roedores, moscas, mosquitos u otros organismos capaces de transportar agentes infecciosos.

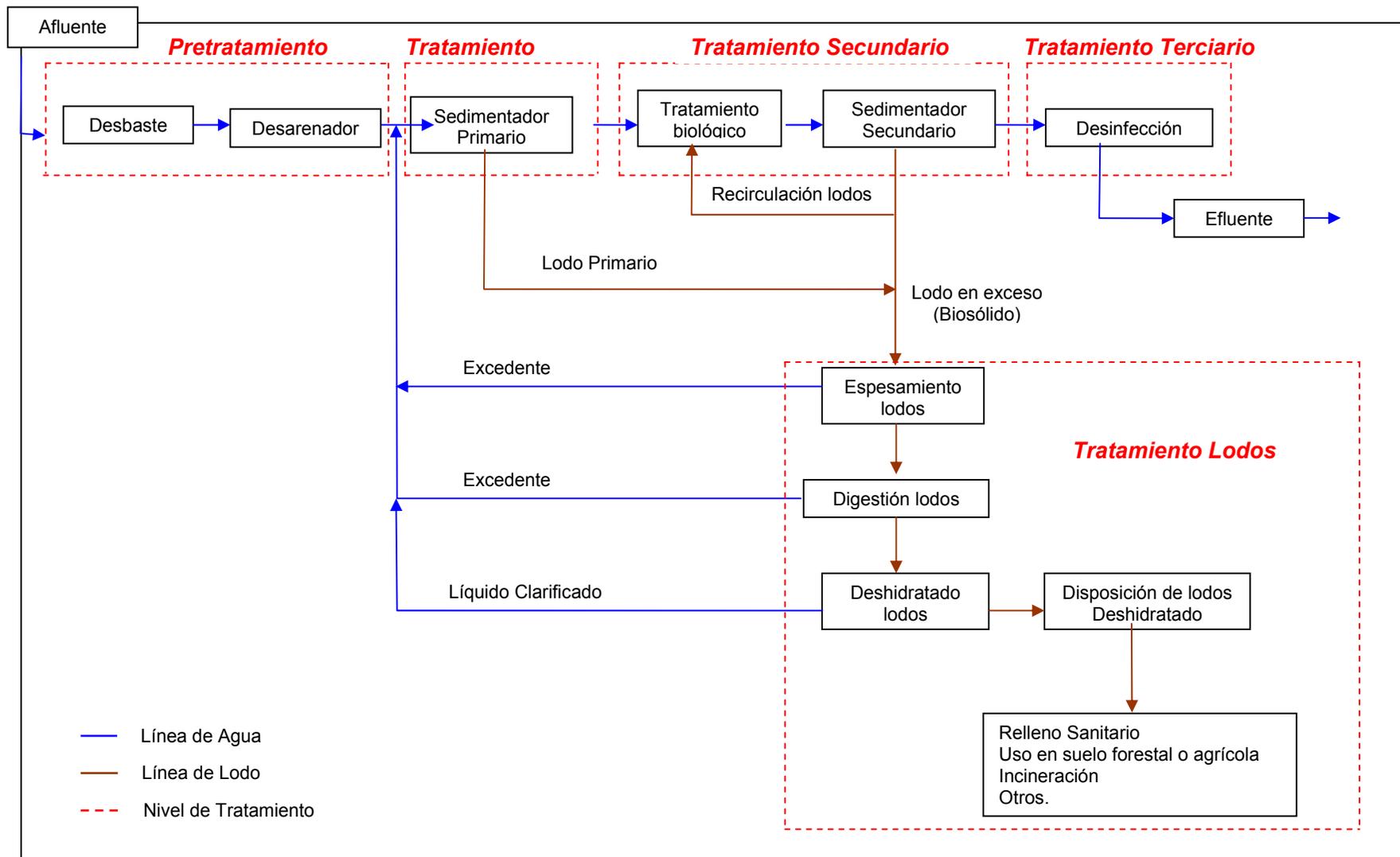


Figura 3: Proceso de tratamiento típico en una planta de tratamiento de aguas residuales.
Fuente: Elaboración propia.

La elección del tratamiento de aguas residuales a utilizar depende de varios factores, entre los cuales se pueden mencionar: factibilidad técnico económica, grado de depuración exigido por la descarga, según la norma correspondiente al tipo de cuerpo receptor (alcantarillado público, curso o masa de agua superficial, sistema de infiltración en terreno), características del caudal y de carga contaminante del agua a tratar (Torres, 1994).

Se debe enfatizar que tanto la selección del tratamiento de las aguas residuales como el manejo y disposición de los lodos depende de la naturaleza de los residuos y de las condiciones técnicas, económicas y ambientales.

Se describen a continuación los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

3.1.2.1 Pretratamiento

Se entiende por pretratamiento el proceso en que se produce la eliminación de sólidos gruesos de gran tamaño presentes en las aguas residuales cuya presencia pueda provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares (Alcota, 2002).

Dentro de las unidades que componen este tratamiento se puede nombrar el desbaste para eliminar sólidos gruesos y sedimentables por intercepción; la flotación para eliminar sólidos en suspensión finamente divididos y de partículas con densidades cercanas al agua (grasas y aceites); y el desarenado para eliminar materia en suspensión gruesa (Metcalf & Eddy, 1985).

3.1.2.2 Tratamiento primario

Proceso físico que tiene por objetivo reducir la concentración de sólidos en suspensión presentes en el agua (elimina entre el 50 y el 65% de sólidos en suspensión) y parte de la materia orgánica del agua residual (elimina entre el 25% y el 40% de la DBO₅) (Alcota, 2002).

En función del proceso se puede clasificar las diversas técnicas disponibles en (Metcalf & Eddy, 1985):

- Centrifugación: separa líquidos de diferentes densidades y espesa lodos. El espesado por centrifugación supone la sedimentación de las partículas bajo la influencia de las fuerzas centrífugas. El proceso es aplicable a la deshidratación de lodos.
- Sedimentación: separación de las partículas suspendidas más pesadas que el agua, mediante la acción de gravedad.
- Flotación: la separación se consigue introduciendo burbujas finas de gas en la fase líquida. Se usa principalmente en el tratamiento de aguas residuales que contienen grandes cantidades de residuos con cargas de grasa y sólidos suspendidos. También espesa los lodos biológicos.

3.1.2.3 Tratamiento secundario

El tratamiento secundario es el proceso biológico que tiene por objetivo la coagulación y la eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica, es decir, la eliminación de sustancias orgánicas disueltas o de aquellos sólidos que no han sido separados en la etapa de tratamiento primario. Esto se consigue gracias a la acción de una variedad de microorganismos, principalmente bacterias, las cuales convierten la materia orgánica en tejido celular y diferentes gases (Metcalf & Eddy, 1985).

Además, en algunos casos se trata de eliminar nutrientes como el nitrógeno y fósforo que pueden causar eutrofización⁴ en los cursos de aguas naturales receptores (Cortez, 2003).

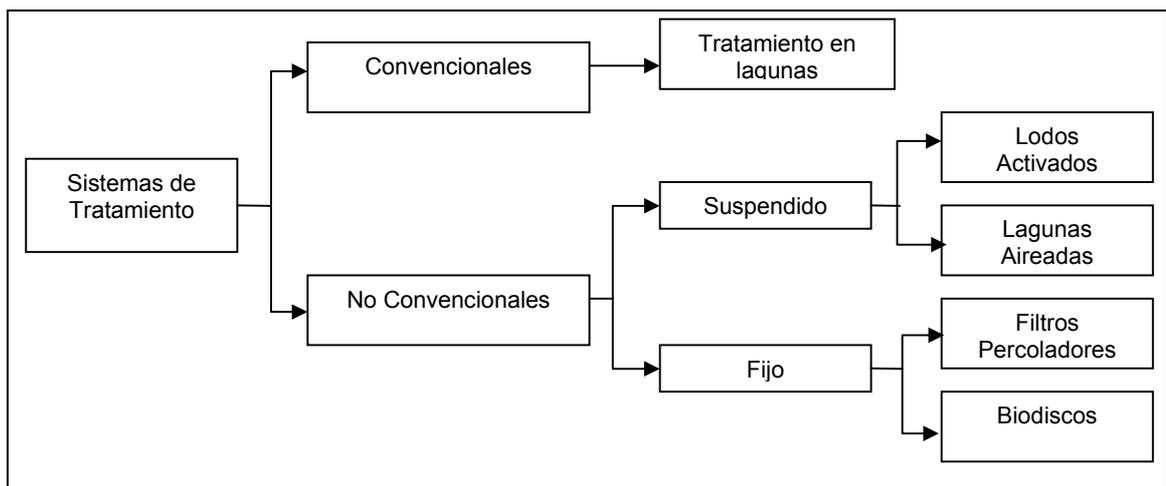
Una de las formas de clasificar los sistemas de tratamiento biológico es a través de Sistemas Convencionales, y Sistemas No Convencionales (figura 4). Los primeros abarcan procesos mecanizados, en tanto, que los segundos no involucran mecanización, pero requieren grandes áreas de terrenos (Nannig, 2001).

⁴ Eutrofización: proceso que se origina en cuerpos de aguas estáticas (lagos artificiales y naturales), cuando existe gran cantidad de nutrientes disponibles para las plantas con lo cual se produce el agotamiento de los recursos de oxígeno y se desarrollan condiciones sépticas.

Los sistemas convencionales se dividen a su vez según el tipo de cultivo de que se trate en (Nannig, 2001):

- Cultivo fijo: biomasa adherida en forma de película a un medio de soporte. Proceso aeróbico donde los requerimientos de oxígeno se satisfacen por la circulación del aire a través del espacio libre que deja el medio de soporte, también existen sistemas con inyección forzada de aire.
- Cultivo suspendido: corresponde a la biomasa en suspensión en un estanque, llamada licor de mezclado. En éstos cultivos pueden presentarse ambientes aeróbicos, anaeróbicos y anóxicos (ausencia de oxígeno libre pero presencia de nitratos como fuente de oxígeno para la biomasa)

Figura 4: Principales tipos de tratamiento de aguas residuales.



Fuente: Elaboración propia.

Otra forma de clasificar los procesos biológicos es según la dependencia del oxígeno, en aerobios y anaerobios, por parte de los microorganismos que convierten la materia orgánica en tejido celular y diferentes gases (Metcalf & Eddy, 1985).

A continuación se describen los distintos tipos de tratamiento biológico:

1) Tratamiento en lagunas

Normalmente una laguna es un reactor de crecimiento suspendido, sin recirculación y con distintos grados de mezcla, son de bajo costo, excepto por el uso de terreno, y fáciles de operar en el tratamiento de aguas residuales, siendo un sistema capaz de producir

efluentes satisfactorios. Se clasifican según el grado y tipo de aireación en (Bustamante, 1999):

- Lagunas aireadas: utilizan aireación mecanizada o difusora, la mezcla puede ser completa o parcial. Si se recircula parte de los biosólidos generados, el sistema funciona de manera análoga al de Lodos Activados con Aireación Extendida. Corresponde a un sistema aerobio de cultivo en suspensión.
- Lagunas aeróbicas: el oxígeno es suministrado por la fotosíntesis de las algas existentes en la superficie.
- Lagunas facultativas: estanques de profundidad reducida, su contenido de oxígeno varía de acuerdo a la profundidad. En el estado superior se tiene una oxidación aeróbica y en la parte inferior se tiene una degradación anaeróbica. Prácticamente no genera lodos.
- Lagunas anaeróbicas: reciben cargas orgánicas más elevadas de modo que la actividad fotosintética de las algas es suprimida encontrándose ausencia de oxígeno en todos los niveles.

2) Lodos activados (Tratamiento aerobio de cultivo en suspensión)

El proceso de lodos activados es la tecnología de tratamiento de aguas residuales más utilizada, que se caracteriza por consumir grandes cantidades de energía y generar grandes cantidades de biosólido, además de generar efluentes de gran calidad. Sus costos operacionales son mayores que otros tipos de tratamiento secundario debido a la necesidad de suministrar oxígeno molecular al proceso mediante aireadores mecánicos o difusores (Bustamante, 1999).

En el proceso de lodos activados, la materia orgánica de las aguas residuales se oxida y se transforma en biomasa microbiana. El proceso se lleva a cabo en un reactor aireado, en donde las aguas servidas y los microorganismos permanecen en contacto por algunas horas. La mezcla luego fluye a un estanque de sedimentación, donde los flóculos son eliminados en forma de biosólido. Una parte se recicla al tanque de aireación (recirculación de lodos) para mantener el proceso, mientras que el exceso de biosólido, producido por el crecimiento microbiano, es purgado del sistema.

Existen diferentes modalidades de lodos activados, siendo las más conocidas y utilizadas la Modalidad Aireación Extendida y Reactor Discontinuo Secuencial (o Sequencing Batch Reactor, SBR) (Nannig, 2001):

- Aireación Extendida o Prolongada: este proceso opera con bajas cargas de materia orgánica por unidad de volumen del reactor y altos tiempos de retención. Presenta la ventaja de prescindir de sedimentación primaria y que los lodos se digieren en el mismo estanque de aireación (y no en forma separado como en los otros procesos). Sus desventajas son el alto volumen del estanque de aireación y el mayor consumo de oxígeno. Estos sistemas se prestan especialmente para la remoción de nitrógeno a través de procesos de nitrificación y desnitrificación.
- Reactor Discontinuo Secuencial (SBR): sistema que envuelve un único reactor de mezcla completa en el cual se producen todos los pasos de un proceso de lodos activados (llenado, aireación, sedimentación, evacuación). El licor de mezcla se mantiene en el reactor durante todo el ciclo, eliminándose la necesidad de estanques separados de sedimentación secundaria. Este proceso se adapta bien a altas variaciones de caudal o carga orgánica, a través de la regulación de la duración de los ciclos y puede operar en modalidad de Aireación Extendida.

3) Filtros percoladores o Biofiltros (Tratamiento aerobio de cultivo fijo)

Consiste en un lecho formado por un medio sumamente permeable al que se le adhieren los microorganismos y a través del cual se percola el agua residual. El medio filtrante puede estar formado por piedras o diferentes materiales de plásticos. La materia orgánica del líquido es absorbida en la película biológica, en cuyas capas externas se degrada bajo la acción de microorganismos aerobios, cuando los microorganismos crecen, aumenta el espesor de la película y el oxígeno se consume antes de que pueda penetrar todo el espesor de la película, de esta forma se crea un ambiente anaerobio en la proximidad de la superficie (Metcalf & Eddy, 1985).

4) Reactores biológicos rotativos o Biodiscos (Tratamiento aerobio de cultivo fijo)

Consiste en una serie de discos situados a una corta distancia unos de otros. Se encuentran parcialmente sumergidos en el agua residual y se giran lentamente en el seno de la misma. Los microorganismos se adhieren a las superficies de los discos hasta formar una película biológica que entra en contacto, de forma alternativa, con la materia

orgánica presente en el agua residual y con la atmósfera, para la absorción de oxígeno (Metcalf & Eddy, 1985).

3.1.2.4 Tratamiento terciario

Proceso físico-químico que tiene como finalidad la eliminación de contaminantes que no han sido eliminados en los tratamientos primarios y secundarios de los procesos convencionales.

Los procesos más utilizados son la desinfección con cloro, la ozonización y la radiación ultravioleta. La desinfección con cloro es el desinfectante más usado, el cloro residual puede generar problemas a los peces de las aguas receptoras, producto de lo cual se realiza la decloración, que es la eliminación de la totalidad del cloro residual combinado que existe tras la cloración (Bustamante, 1999).

La ozonización es un desinfectante poderoso que no genera gases tóxicos. Según Bustamante (1999) requiere de un tiempo relativamente corto de contacto para matar los patógenos.

La desinfección por Radiación Ultravioleta (U.V) no requiere de almacenaje ni de manejo de residuos tóxicos, y no genera compuestos que son dañinos al medio ambiente. Se encuentra en función de la transparencia del agua (que afecta la transmitancia de los rayos U.V.), de la concentración de los sólidos suspendidos (que bloquean el paso de dichos rayos) y de la concentración y tipo de patógeno que se quiera abatir (Nannig, 2001).

3.1.3 Características de los lodos

Las características de los lodos varían según el origen de las aguas residuales y el tipo de proceso al que han sido sometidos. De ésta forma, se pueden describir algunos lodos característicos del tratamiento biológico (Araya, 1999):

- Lodo primario: lodo de color gris y aspecto grasiento. Contiene entre un 50 y un 60% de los sólidos en suspensión, además del excedente de los tanques de sedimentación. Las concentraciones típicas de lodos crudo primario son de un 6 a 8%, y la porción de

sólidos volátiles varía de un 60 a 80%. Generalmente en la mayoría de los casos produce un olor extremadamente molesto.

- Lodo activado: el lodo fresco, en buenas condiciones, tiene apariencia floculenta de color café y un característico olor a tierra que no es molesto, pero puede volverse séptico rápidamente, cambiando a color café muy oscuro. El contenido de sólidos suspendidos en un lodo activado de retorno es de 0.5 a 2%, con una fracción volátil de 0.7 a 0.8. Su alto contenido en agua, su resistencia al espesamiento por gravedad y la presencia de floc activo microbiano, hacen dificultoso el manejo de este residuo. Puede ser espesado por flotación o centrifugación, pero requiere la adición de químicos.
- Lodos digerido anaeróbicamente: Lodo de color café oscuro o negro, contiene gases como el dióxido de carbono y metano. No presenta olor molesto cuando esta completamente digerido.
- Lodos digerido aeróbicamente: Lodo de color café oscuro, floculento, de carácter relativamente inerte, producido por una aireación prolongada del lodo. Las principales funciones de un digestor aerobio son la estabilización de orgánicos y el almacenamiento temporal de lodo residual. La concentración de lodos en el espesador está en el rango del 1 al 2%, según el diseño y operación del digestor.
- Lodo desaguado mecánicamente: Varía sus características de acuerdo al tipo de lodo, acondicionamiento químico y proceso empleado. Su densidad varía, dependiendo de lo anterior, de un 15 a 40%. El más aguado es similar al barro húmedo, mientras que el más espeso es un sólido grueso. Los factores de tipo económico y el objetivo de disposición final indican el grado de reducción necesaria.

La fluidez y plasticidad de los lodos varían con el contenido de agua y la naturaleza de los sólidos (Cortez, 2003):

- Al reducir el contenido del agua del lodo aproximadamente un 15%, se puede observar un espesamiento bien definido.
- Con un 70% a un 80%, el lodo ya no escurre, y se conoce como torta de lodo.

- Los lodos con un contenido de humedad de hasta un 65%, pueden ser depositados sin restricciones, para ello es necesario aplicar secado térmico o acondicionamiento con cal.

Las características químicas de los biosólidos están relacionadas a sus cinco constituyentes principales: nutrientes, contenido orgánico, concentración de patógenos, compuestos orgánicos tóxicos y concentración de metales. En la tabla 2 se da a conocer los valores típicos de la composición química de los lodos. Estos valores, junto con las características de los organismos patógenos son de gran importancia para las consideraciones de tratamiento y disposición de los lodos.

Tabla 2: Composición química de lodos crudos.

Características	Lodo primario sin tratamiento		Lodo primario digerido		Lodo activado
	Rango	Valor típico	Rango	Valor típico	Rango
Sólidos secos totales (ST), %	2,0-8,0	5,0	6-12	10	0,83-1,16
Sólidos volátiles (% de ST)	60-80	65	30-60	40	59-88
Grasas y aceites (% de ST)	6-30	-	5-20	18	-
Proteínas (% de ST)	20-30	25	15-20	18	32-41
Nitrógeno (N, % de ST)	1,5-4	2,5	1,6-6	3	2,4-5
Fósforo (P ₂ O ₅ , % de ST)	0,8-2,8	1,6	1,5-4	2,5	2,8-11
Potasio (K ₂ O, % de ST)	0-1	0,4	0-3	1	0,5-0,7
Celulosa (% de ST)	8-15	10	8-15	10	-
Hierro (no como sulfuro)	2-4	2,5	3-8	4	-
Sílice (SiO ₂ , % de ST)	15-20	-	10-20	-	-
PH	5-8	6	6,5-7,5	7	6,5-8
Alcalinidad (mg/l como CaCO ₃)	500-1.500	600	2.500-3.500	3.000	580-1.100
Ácidos orgánicos (mg/l como HAc)	200-2.000	500	100-600	200	1.100-1.700
Poder calorífico (MJ/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.

Fuente: Metcalf & Eddy, 1985.

A continuación se describen los constituyentes químicos principales de lodos obtenidos del proceso de tratamiento de aguas servidas: (Cortez, 2003):

- Nutrientes: los biosólidos provenientes de aguas servidas domésticas contiene tres nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas: nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), éstos nutrientes pueden estar en diversas formas químicas. Sin embargo, los

niveles de NPK presentes en los biosólidos estabilizados son inferiores a los contenidos en fertilizantes químicos, como se establece en la tabla 3.

En la tabla 4 se describen los principales nutrientes y propiedades generales de los lodos generados en la VI Región de Chile. Datos obtenidos del Proyecto FONDEF D0111034: "Desarrollo de prácticas sustentables de reciclaje de biosólidos en plantaciones forestales", en donde se analizaron 2 tomas de muestra para cada una de las plantas de tratamiento a excepción de la Planta de Tratamientos de Rancagua (Planta Chancón) donde se analizaron 4 muestras.

Tabla 3: Comparación entre los niveles de nutrientes de los fertilizantes y el biosólido proveniente de aguas servidas.

Compuesto	Nivel Porcentual de Nutrientes		
	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
Fertilizante ^a	5,0	10,0	10,0
Biosólido estabilizado	3,3	2,3	0,3

^a Las concentraciones de nutrientes pueden variar ampliamente en función de la demanda del terreno y de los cultivos.

Fuente: Cortez, 2003.

Tabla 4: Propiedades generales de lodos VI Región.

Planta de Tratamiento	Numero muestra	%MO	%C	%N	%S	% H ₂ O	Fósforo (mg/g)	pH
Rancagua	1	62,7	36,5	5,9	1,3	6	10967	n.d
Rancagua	2	58,2	33,8	5,2	1,2	9	11213	n.d
Chimbarongo	1	34,4	20,0	2,6	1,7	n.d	4568	8
Chimbarongo	2	34,4	20,0	2,7	1,7	n.d	4316	8
San Francisco	1	28,9	16,8	2,3	1,4	n.d	8104	7
San Francisco	2	22,2	12,9	1,8	1,2	n.d	16605	6
Sta. Cruz	1	63,0	36,6	6,4	0,98	83,7	16605	n.d
Sta. Cruz	2	62,8	36,5	6,4	0,96	83,0	15969	n.d
Peralillo	1	15,6	9,1	1,3	0,6	89,0	2059	7
Peralillo	2	30,1	17,5	2,2	1,1	92,8	5430	7
Palmilla	1	3,2	1,9	0,4	0,6	57,1	1773	7
Palmilla	2	6,2	3,6	0,5	0,3	50,3	2231	8
Población	1	56,1	32,8	5,1	1,2	92,7	16923	6
Población	2	56,4	32,8	5,1	1,2	92,5	17399	6

Fuente: Universidad de Chile - FONDEF D0111034.

- Contenido orgánico: se expresa como el porcentaje que representan los sólidos volátiles, removidos tras someter al biosólido a una temperatura de 550°C, bajo condiciones de oxidación. Su determinación es importante para determinar su valor térmico, su potencial olor, la utilización como mejorador de suelo y para la generación de biogas.
- Concentración de patógenos: los biosólidos son principalmente masa residual que esta constituida por una heterogénea y significativa población de microorganismos como bacterias, virus, protozoos y huevos de helmintos, los que se concentran durante el proceso de depuración de aguas residuales, como se indica en la tabla 5. Todos los biosólidos crudos o no estabilizados son portadores de virus, bacterias y agentes infecciosos que pueden causar enfermedades. El tratamiento puede reducir, pero no eliminar completamente tales portadores.

Tabla 5: Densidad de organismos patógenos e indicadores en los lodos secundarios.

Tipo	Organismos	Densidad (NMP/gr peso seco)
Virus	Virus entéricos varios	10^2-10^4
	Bacteriofangos	10^5
Bacterias	Coliformes totales	10^8-10^9
	Coliformes fecales	10^7-10^8
	Estreptococcus fecales	10^6-10^7
	Salmonela sp.	10^2-10^3
	Clostridium sp.	10^6
	Mycobacterium de tuberculosis	10^6
Protozoos	Giardia sp.	10^2-10^3
Helmintos	Ascaris sp.	10^2-10^3
	Trichuris vulpis	10^2
	Toxocara sp.	10^1-10^2

Fuente: Alcota, 2002.

- Compuestos orgánicos tóxicos: el lodo contiene compuestos orgánicos cuya degradación en el suelo es un proceso lento. El problema principal de este tipo de compuestos no es el consumo por parte de las plantas, puesto que esto generalmente no se produce, sino por la ingesta indirecta por parte de los animales al pastar en un terreno tratado con lodo.
- Concentración de metales: los biosólido pueden contener cierta concentración de metales pesados e iones orgánicos que son función del tipo y cantidad del residuo descargado en el sistema de tratamiento de aguas servidas. Es posible encontrar metales como: boro, cromo, plomo, níquel, mercurio, plata, zinc. A bajas

concentraciones, algunos de estos elementos son micronutrientes esenciales requeridos por las plantas, sin embargo, a altas concentraciones pueden ser tóxicos para los humanos, animales y plantas. La concentración de metales pesados puede limitar la tasa de aplicación del lodo en terreno y la vida útil del terreno de aplicación.

En la tabla 6 se describen el contenido de metales pesados en lodos de la VI Región de Chile.

Tabla 6: Contenido de metales pesados en lodos de la VI Región (ppm).

Planta de Tratamiento	Numero muestra	Cu	Ni	Zn	Cd	Pb	Mn
Chimbarongo	1	381	38	774	<6	79	398
Chimbarongo	2	406	32	784	<6	82	282
San Francisco	1	517	26	486	<6	50	269
San Francisco	2	225	36	225	<6	38	561
Sta. Cruz	1	477	29	716	<6	79	656
Sta. Cruz	2	454	30	694	<6	83	694
Peralillo	1	141	30	309	<6	50	679
Peralillo	2	288	43	601	<6	72	421
Palmilla	1	146	29	121	<6	34	425
Palmilla	2	50	25	62	<6	26	436
Población	1	751	33	880	<6	85	103
Población	2	784	34	857	<6	38	98

Fuente: Universidad de Chile - FONDEF D0111034.

3.1.4 Tratamiento de los lodos

Antes de su disposición final, los lodos generados en los procesos de tratamiento primarios y secundarios deben ser sometidos a procesos de acondicionamiento que permitan estabilizar la materia orgánica, reducir al máximo los riesgos sanitarios y disminuir su contenido de humedad. Lo anterior con la finalidad de prevenir la generación de olores, la atracción de vectores, reducir su volumen para facilitar su manejo y hacer más económico su transporte.

Dentro de la línea de lodos se encuentran diferentes tipos de procesos de tratamiento de lodos que se combinan para obtener un producto apto para su disposición final. Estos procesos se dividen principalmente en cuatro categorías: procesos físicos, químicos, biológicos y térmicos. En la figura 3 se realiza un tipo de combinación de procesos físicos y biológicos para el tratamiento de lodos, que se describen a continuación.

3.1.4.1 Procesos físicos

Los procesos físicos están destinados a la separación, reducción de volumen y peso de los lodos. Se pueden llevar a cabo mediante:

- **Espesamiento:** tiene como fin la eliminación en parte de la fracción líquida del lodo, y se puede llevar a cabo mediante espesado por gravedad, flotación, centrifugación y filtros de banda por gravedad. La tecnología más común de espesamiento es por gravedad, con la cual se obtiene de un 4 a 6% de concentración de sólidos (Alcota, 2002).
- **Desaguado o deshidratación:** consiste en la remoción de agua del lodo tanto como sea posible, esta técnica se basa en operaciones básicas como la evaporación y percolación natural, o en la aplicación de medios mecánicos como filtros, centrífugas, canchas de secado y lagunaje. (Cortez, 2003).

3.1.4.2 Procesos químicos

Los procesos químicos funcionan con adición de químicos para modificar las características de los lodos. Entre las alternativas de procesos existentes se encuentra el acondicionamiento químico y la estabilización con cal.

El acondicionamiento químico es un proceso para mejorar las características de deshidratación y facilitar la separación de los sólidos desde la fase líquida. Las tecnologías más comunes son la adición de reactivos químicos y el tratamiento térmico. Los productos químicos que se emplean son cloruro férrico, cal, alúmina y polímeros orgánicos (Alcota, 2002).

La estabilización con cal consiste en aumentar y mantener el lodo a pH 12. Como consecuencia de ello, no se degradará la materia orgánica contenida en el biosólido, no se generarán olores desagradables y se combate la existencia de microorganismos patógenos (Cortez, 2003).

3.1.4.3 Procesos biológicos

Los procesos biológicos en el tratamiento de lodos implica la acción de microorganismos, a los cuales se les otorgan las condiciones óptimas para llevar a cabo el proceso de estabilización de lodos.

Entre los métodos más comunes se encuentran (Cortez, 2003):

- Digestión anaeróbica

Es uno de los procesos más utilizados, en la que la degradación de la materia orgánica e inorgánica ocurre en ausencia de oxígeno y genera biogas. Sus principales ventajas son que ocurre sin la incorporación de oxígeno, genera escasa cantidad de biomasa y favorece la desinfección. Tiene como desventaja un alto costo inicial y caudales residuales de baja calidad.

- Digestión aeróbica

Corresponde a la estabilización de la materia orgánica mediante el suministro de aire, obteniéndose anhídrido carbónico (CO_2), amoníaco (NH_3) y agua. No genera biogas.

Tiene como ventaja que la reducción de sólidos volátiles es aproximadamente igual a la obtenida en la digestión anaerobia, pero se reduce la concentración de DBO en el líquido excedente; produce biosólidos estables de tipo humus, exento de olores; es un proceso sencillo de operar y presenta un menor costo inicial.

Como desventaja existe un mayor gasto energético por la incorporación de oxígeno, el biosólido digerido presenta pobres características para su deshidratación mecánica, es un proceso muy sensible a la temperatura y a los materiales empleados en la construcción del equipo.

- Compostaje

Es un proceso biológico, aerobio y termófilo en que la materia orgánica sufre una degradación biológica bajo condiciones controladas, hasta obtener una materia orgánica estabilizada similar al humus llamado compost (Alcota, 2002).

Su principal ventaja es que genera un humus higiénico, libre de olores y de sustancias patógenas.

3.1.4.4 Proceso térmico

En el proceso térmico se somete al lodo a temperaturas extremas para inhibir o eliminar la acción de microorganismos, además de destruir elementos dañinos con ciertos contaminantes (Cortez, 2003).

Dentro de este proceso se encuentra (Cortez, 2003):

- Secado térmico: permite eliminar el agua mediante la aplicación de calor extremo, obteniéndose todo el material sólido con un contenido de humedad entre 5% a 10%.
- Incineración: es un proceso en que se realiza una oxidación química con exceso de oxígeno, en el cual se obtiene gases calientes de combustión (nitrógeno, CO₂, vapor de agua) y el lodo que pasa a ser ceniza.
- Pirólisis: consiste en que sólo una parte del residuo se quema, aprovechando el calor generado para destilar el resto del residuo. El residuo se quema a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, obteniéndose una fracción líquida y una sólida, gases, brea, carbón, alcoholes, etc. Es un proceso costoso y de alta tecnología. La cantidad de residuos es mayor que en la incineración dependiendo del proceso.
- Vitricación: se inmovilizan los residuos en una masa vítrea.
- Oxidación por vía húmeda: es un proceso que consiste en la oxidación del lodo crudo por vía húmeda a presión y temperatura elevada, entre 175 a 315°C.
- Pasteurización: es un tratamiento térmico que ocurre a 70°C durante 30 minutos, permitiendo inactivar las larvas y huevos de los parásitos.

3.1.5 Disposición final de los lodos

Una vez acondicionado el lodo, puede ser reciclado o dispuesto en una de las siguientes rutas: disposición en relleno sanitario, reciclaje o incineración.

Existen otras alternativas de disposición o destino que pueden resultar más específicas, pero menos desarrolladas o que se incluyen conceptualmente en los ya enumerados, tales como: pirólisis, oxidación húmeda, silvicultura o recuperación de suelos degradados (Leppe y López, 2003). Cada una de estas alternativas presenta ventajas y desventajas

desde el punto de vista técnico, económico y ambiental que son necesarias de analizar en cada caso.

3.1.5.1 Disposición en relleno sanitario

Conama (2001), define Rellenos Sanitarios como la instalación para la disposición final de residuos sólidos en el suelo con tratamiento de impermeabilización, que no origina molestias ni peligros para la salud, seguridad pública y el medio ambiente, y que utiliza principios de ingeniería para confinar los residuos en un área determinada, reduciéndolos al volumen más pequeño posible.

El objetivo es evitar el contacto entre los residuos y el medio ambiente (agua, suelo y aire, principalmente) utilizando ciertos recursos tecnológicos en su construcción, además de acoger los residuos en forma sanitariamente correcta y a un costo viable.

Presenta como desventaja pesados costos de transporte y contribuye a aumentar los impactos que acarrea la operación normal de un vertedero, tales como producción de gases, generación de lixiviados, olores, ruido de la maquinaria, aumento del tráfico, uso de tierras y alteración del paisaje.

3.1.5.2 Reciclaje

El reciclaje corresponde a una utilización benéfica de los lodos en el suelo que presenta dos objetivos principales (Leppe *et al.*, 2001):

- Aprovechar sus características físicas como elemento mejorador del suelo y su potencial fertilizante (determinado por su contenido de nutrientes).
- Disponer adecuadamente los sólidos generados durante el proceso de tratamiento de aguas, sin aumentar la masa de residuos sólidos que se producen diariamente en la sociedad.

El uso en suelo puede reemplazar parcialmente el uso de fertilizantes químicos y contribuir a mejorar la estructura del suelo. Sin embargo, se debe ejercer un control adecuado en la aplicación de lodos de modo de evitar la posibilidad de transferir al suelo los contaminantes que se encuentran contenidos en éstos, además de considerar los efectos indirectos que podrían haber sobre el aire o agua.

Un elemento importante para establecer las potencialidades reales de utilización de lodos es el costo asociado a su aplicación en suelo. Las restricciones pueden aumentar significativamente estos costos, y provienen de aspectos como el contenido de elementos contaminantes, así como de las normas vigentes en cada país. Estos elementos contribuyen a determinar las características de los lodos que es posible aplicar por unidad de superficie, así como los niveles de control y sistemas de monitoreo exigidos.

Desde el punto de vista como elemento mejorador del suelo y su potencial fertilizante, el biosólido se puede aplicar principalmente en dos áreas:

- Aprovechamiento en agricultura
- Aprovechamiento en silvicultura

La aplicación en agricultura presenta mayores limitantes que su aplicación en silvicultura, principalmente por ser aplicado en productos que serán consumidos por seres humanos y que por lo tanto deben ser sometidos a procesos de acondicionamientos y estabilización más rigurosos. En cambio, el aplicar el biosólido en plantaciones forestales presenta menos riesgos para la salud de la población.

3.1.5.3 Incineración

Es uno de los procesos térmicos de trato de desechos. Es considerada como una forma de disposición debido a que reduce el residuo a cerca del 10% de su masa inicial. Consiste en utilizar los gases calientes de combustión de los desechos como fuente calorífica para una turbina a vapor, con los que se genera energía eléctrica (Muñoz y Martínez, 2001).

Para la incineración de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales se suelen utilizar hornos que permiten lograr una mezcla intensiva del material evitando la formación de trozos que se carbonizan exteriormente, reteniendo agua en su interior. Por otro lado, para lograr el grado de sequedad óptimo del lodo (entre 40 y 45%, en base seca) conviene realizar un presecado antes de proceder a la incineración, lo cual permitirá ahorrar considerablemente el consumo de combustible y además permite utilizar un horno más pequeño (Cortez, 2003).

La incineración permite una cierta recuperación de energía (alrededor de 1/3 en el proceso, y el resto puede ser ofertado de la red eléctrica), pero presenta la desventaja de

no ser adecuado para cierto tipo de desechos, genera gases tóxicos y partículas no incineradas (gases ácidos, efecto invernadero, compuestos orgánicos volátiles, etc.), además del uso de posibles materiales reciclables en la combustión. A parte de esto, es una técnica apta para escalas que no representan la realidad mayoritaria de las plantas de tratamiento presentes en Chile, de tamaño excesivamente reducido (Leppe y López, 2003; Muñoz y Martínez, 2001).

Finalmente en cuanto a costos, el costo de incineración es aproximadamente dos veces y medio mas alto que el de un relleno sanitario (Muñoz y Martínez, 2001).

3.1.6 Costos de producción y transporte de lodos

3.1.6.1 Costos de inversión

Los costos de inversión varían según las condiciones que presente la planta, es decir, la tecnología empleada, los caudales a tratar y la población servida. De esta forma, en la tabla 7 se hace una comparación entre la Planta de tratamiento de aguas servidas de Rancagua y la Planta de tratamiento la Farfana, ambas con tecnología de Lodos Activados Convencionales.

Tabla 7: Detalles Técnicos y Parámetros de Diseño.

Detalles	Planta de Tratamiento La Farfana ^A	Planta de Tratamiento Rancagua ^B
Tecnología	Lodo Activado Convencional con Digestión Anaeróbica de Lodo	Lodo Activado Convencional con Digestión Aeróbica de Lodo
Superficie de terreno	145 hectáreas	15.4 hectáreas
Parámetros de Diseño		
Inversión Total del Proyecto	US\$ 315 millones	\$17 millones⁵
Población Servida	3.294.000 habitantes	321.00 habitantes
Caudal Medio Total	8.8 m ³ /s	0.742 m ³ /s
Caudal Máximo Total	15 m ³ /s	1,445 m ³ /s

^A Fuente: Aguas Andinas, 2003.

^B Fuente Essel, 2003.

⁵ Equivalente a \$10.000 millones con un valor del dólar de 587.79 (Marzo 2001, fecha en que se llevo a cabo la fase de construcción del proyecto).

Dentro de los costos de inversión se deben considerar los costos producto del tratamiento de las aguas residuales, el tratamiento de lodos y la disposición final. Según Araya (1999) en la tabla 8 se describen los costos de inversión para distintos tratamientos de agua; y en la tabla 9 se incluye el tratamiento de lodos, en ambos casos la información se entrega en función del número de habitantes. No se considera el costo de disposición final.

Con respecto a los costos de inversión de tratamiento de lodos, en la tabla 10 se detallan éstos costos para tres alternativas de tratamiento: digestión anaeróbica, digestión aeróbica y estabilización con cal, en función del número de habitantes.

Tabla 8: Costos de inversión de tratamientos de agua residual.

Numero de habitantes	Costo por habitante (UF/hab)		
	Aireación extendida	Reactor Discontinuo Secuencial	Tratamiento primario
1.000	4,2	4,0	2,7
5.000	2,3	2,3	1,1
10.000	2,0	2,1	0,8
30.000	1,8	1,7	0,7
50.000	2,3	2,0	0,9

Fuente: Araya, 1999.

Tabla 9: Costo de inversión tratamiento de agua residual y tratamiento de lodo, en miles de millones de pesos (MM\$).

Tratamiento lodo	Tratamiento agua para 10.000 habitantes			Tratamiento agua para 30.000 habitantes		
	Aireación Extendida	Reactor Discontinuo Secuencial	Tratamiento Primario	Aireación Extendida	Reactor Discontinuo Secuencial	Tratamiento Primario
Dig. Anaeróbica	530	545	354	1.030	986	633
Dig. Aeróbica	316	331	140	816	772	419
Estab. con cal	304	319	128	804	760	407

Fuente: Araya, 1999.

Tabla 10: Costo de inversión de tratamiento de lodos, en miles de millones de pesos (MM\$).

N° de Habitantes	Digestión Anaeróbica		Digestión Aeróbica		Estabilización con Cal	
	N° de Digestores	Costo Total	N° de Digestores	Costo Total	N° de Unidades	Costo Total
10.000	1	236	1	22	1	10
30.000	2	758	2	57	2	37
100.000	4	2.782	6	195	4	148
500.000	16	14.561	18	809	18	1554

Fuente: Araya, 1999.

A modo de resumen, en la tabla 11 se presentan los costos del proceso tratamiento de las aguas residuales más factibles de aplicar en Chile, en donde se consideran diferentes combinaciones de tratamientos de agua, tratamientos de lodos, su disposición final y el número de habitantes.

Tabla 11: Costos de Producción de diferentes plantas de tratamiento de aguas servidas.

Capacidad de Plantas depuradoras	Componentes	Costos (base seca)
Pequeña Menos de 10.000 hab. servidos	- Secado en laguna, estabilización parcial - Estabilización química - Transporte - Utilización en la agricultura	US\$ 92,5/ton
	- Secado en laguna, estabilización parcial - Transporte - Co-disposición en relleno sanitario	US\$ 144/ton
Mediana 25.000 hab. servidos	- Secado en laguna, estabilización parcial - Transporte - Mono-depósito	US\$ 216/ton
De mayor tamaño 100.000 hab. servidos	- Digestión anaeróbica - Deshidratación mecánica (hasta 15%) - Transporte - Utilización en la agricultura	US\$ 282,5/ton
	- Digestión anaeróbica - Deshidratación mecánica (hasta 15%) - Transporte - Co-disposición en relleno sanitario	US\$ 344/ton
	- Digestión anaeróbica - Deshidratación mecánica (hasta 15%) - Mono-depósito	US\$ 371/ton

Fuente: CONAMA, 1998.

3.1.6.2 Costos de operación y mantención

Con respecto a los costos operación y mantención en el tratamiento de lodos, en la tabla 12 se detallan éstos costos para tres alternativas de tratamiento: digestión anaeróbica, digestión aeróbica y estabilización con cal, considerando para cada caso cuatro rangos de población.

En el caso de la digestión aeróbica los costos de operación corresponden básicamente al costo de energía, al igual que en la estabilización con cal (consumo para los equipos de dosificación y mezcla), no así en la digestión anaeróbica donde no existe consumo de energía. Se asume como gasto de mantención el porcentaje por sobre los costos de inversión correspondiente a un 1% para el caso de la digestión anaeróbica, un 3% para la digestión aeróbica; y en el caso de la estabilización con cal 1% para las poblaciones más pequeñas y un 3% para poblaciones mayores. En la estabilización con cal se debe agregar además el costo por insumo químico (Araya, 1999).

Tabla 12: Costo de operación y mantención de tratamiento de lodos, en miles de millones de pesos (MM\$).

	Digestión Anaeróbica	Digestión Aeróbica	Estabilización con Cal
N° de Habitantes	Costo Total Anual (MM\$)	Costo Total Anual (MM\$)	Costo Total Anual (MM\$)
10.000	1,2	34	26
30.000	0,8	81	80
100.000	2,8	257	227
500.000	14,6	986	1020

Fuente: Araya, 1999.

3.1.6.3 Costos de manejo de lodos

Los costos del manejo de lodos se dividen en: almacenamiento, tratamiento, transporte, disposición final y otros (documentación, monitoreo y seguimiento).

- Almacenamiento

Los costos de almacenamiento se consideran dentro de los costos de tratamiento de las aguas servidas y lodos debido a que este ocurre generalmente en las unidades de tratamiento (clarificadores, digestores o reactores de compostaje).

- Tratamiento

El tratamiento corresponde principalmente a los procesos de concentración y reducción del volumen e higienización del lodo, este costo dependerá del tipo de tratamiento (CONAMA, 1998):

- a) Laguna de secado: costo total de 50 US\$/ton (base seca). El costo de inversión es de 40 US\$/ton (base seca), para una vida útil de 25 años y con un interés de 8%, y el costo de operación es de 10 US\$/ton (base seca).
- b) Deshidratación mecánica: costo total de 112 US\$/ton (base seca) para una instalación de 100.000 habitantes servidos. Con un costo de capital de 45 US\$/ton (base seca), para una vida útil de 12,5 años y un interés de 8%. El costo de operación es de 67US\$/ton (base seca). Si se considera una instalación para 25.000 habitantes servidos con una vida útil de 25 años se tiene un costo total de 142 US\$/ton (base seca), con 67US\$/ton (base seca) en costo de capital y 75 US\$/ton (base seca) en costos de operación.
- c) Digestión anaeróbica: costo total de 140 US\$/ton (base seca) para una instalación de 100.000 habitantes servidos. Con un costo de capital de 100 US\$/ton (base seca) y un costo de operación de 40 US\$/ton (base seca).
- d) Compostaje: costo de inversión de 50 US\$/ton (base seca), 34 US\$/ton (base seca) y 19 US\$/ton (base seca) para una instalación de 10.000, 25.000 y 100.000 habitantes servidos, respectivamente. Con un costo de operación de 5 US\$/ton (base seca) en todos los casos.
- e) Estabilización con Cal: costo total de 20 US\$/ton (base seca), considerando un precio estimado de US\$ 150 por tonelada de cal, con una dosificación del 15% del lodo seco.
- f) Tratamiento químico: costo total de 20 US\$/ton (base seca).
- g) Secado con calor: costo total de 200 a 300 US\$/ton (base seca).

- Transporte

Los costos de transporte de los lodos son variables debido a las distancias entre las plantas de tratamiento y los lugares de disposición final, diferente grado de deshidratación de los lodos y economías de escala del transporte en unidades grandes.

Si se consideran los tiempos de carga y descarga, se supone un valor de US\$ 0,15/Km/m³ para el transporte. Dependiendo de la distancia de transporte y grado de deshidratación, los costos estimados del transporte de lodo varían entre US\$ 15 y 20 por tonelada, base seca (CONAMA, 1998).

Otra forma de estimar el costo de transporte es por los tiempos de viaje, carga y descarga estimados desde las plantas de tratamiento hasta sus disposición final, considerando un costo estimado de \$2.500 ton/hr (López *et al.*, 2001).

- Disposición final

Con respecto a la disposición final del lodo, se tiene un costo total de US\$ 15 a 20 por tonelada, base húmeda o alrededor de US\$ 40 a 57 por tonelada, base seca, para el caso de disponerlo en relleno sanitario. En el caso de disponerlo en mono relleno los costos totales se encuentran entre US\$ 121 y 217 por tonelada de lodos, base seca (CONAMA, 1998).

En el caso de la utilización agrícola se considera un costo específico de US\$ 5 por tonelada húmeda, o de aproximadamente US\$ 15 por tonelada seca (en caso de lodo con 35% de sólido). En estos costos se consideran la higienización de lodos, almacenaje y transporte (CONAMA, 1998).

Para el reciclaje vía utilización en silvicultura o recuperación de suelos degradados, no existe información real sobre costos de disposición.

3.2 NORMATIVA EXTRANJERA Y EXPERIENCIA SOBRE EL MANEJO DE LODOS

Dentro de este análisis se consideran las normas extranjeras que por sus alcances, metodologías utilizadas en su desarrollo y su historia de aplicación se consideraron suficientemente desarrolladas para presentar una referencia exitosa y aplicable bajo las condiciones de nuestro país.

En el caso de la norma USEPA (Normativa Norteamericana) se incluyen requisitos para todas las etapas de manejo de los lodos, incluyendo la higienización, aplicación en suelo agrícola, incineración y el depósito final en tierra. Este enfoque tiene mayor simplicidad debido a que existe un solo manual o cuerpo legal.

Toda la normativa extranjera se refiere exclusivamente a lodos de tratamiento de aguas servidas domiciliarias o con características similares. En la normativa USEPA el lodo no está definido como un residuo sólidos en forma explícita (Conama, 1998).

En la normativa extranjera de manejo de lodos se establecen requisitos de protección ambiental específicamente relacionados con las características de los lodos utilizados en la agricultura, entre ellos: el contenido de metales pesados, el contenido de microorganismos patógenos y el potencial de atracción de vectores sanitarios. Estos determinarán los requisitos de tratamiento, la tasa máxima de aplicación y las restricciones respecto del tipo de cultivo o suelo (Conama, 1998).

3.2.1 Estados Unidos de América

En febrero del año 1993 la USEPA promulga los “Estándares para Uso o Disposición de Lodos de Aguas Residuales”, Código de la Regulación FEDERAL Título 40, Parte 257, 403 y 503, referido más tarde como Reglamento 503 (Code of Federal Regulation Title 40, Parts 257, 403 and 503 Regulation 503). El desarrollo de esta directiva contempló la utilización de aproximaciones sobre evaluaciones de riesgo⁶, definiendo buenas prácticas de manejo, estableciendo valores numéricos para patógenos y cargas contaminantes permisibles de metales pesados en aplicación de lodos en suelos agrícola.

⁶ Esta evaluación de riesgos involucra un proceso de modelamiento matemático que considera características biológicas, químicas y físicas de los contaminantes.

Esta normativa considera:

- Por lodos a residuos sólidos, semisólidos o líquidos generados durante el tratamiento de las aguas domésticas en sus diferentes etapas, incluyendo lodos de fosas sépticas, pero no incluye desechos de tratamiento preliminar.
- Considera límites en lodos de los siguiente metales: As, Cd, Cu, Pb, Hg, Mo, Ni, Se y Zn. No tiene definido la concentración máxima de metales pesados en suelos antes de la aplicación y restricciones para lodos con contenidos de PBCs inferiores a 10 ppm.
- Establece dos tipos de lodos A y B basados en criterios sanitarios; considera por lodo Clase A aquel que ha sido tratado esencialmente para eliminar patógenos (densidad de coliformes fecales menor a 1.000 NMP por gramo de sólido, en base seca y densidad de salmonella sp. menor a 3 NMP por 4 gramos de sólido, base seca), y por lodos Clase B a aquel que ha reducido su carga patógena (densidad de coliformes fecales menor a 2.000.000 NMP o CFU por gramo de sólido, base seca), presentando restricciones para su aplicación.

Dentro de las restricciones respecto de los terrenos de aplicación los lodos Clase A no poseen restricciones, en cambio para lodos de Clase B se tienen restricciones para el pastoreo de animales; restricciones de acceso al público a áreas forestales (después de la aplicación de los lodos); tiempo de aplicación en el caso de hortalizas, legumbres; y franja de protección en riberas de lagos, ríos o aguas marinas.

En caso de recuperación de zonas degradadas, las autoridades pueden permitir la aplicación de lodos con contenidos de metales pesados mayores a aquellos establecidos en los requisitos respectivos (Conama, 1998).

Se establece una tasa de aplicación de lodos, en suelos forestales, entre 0 - 220 ton/ha/año ms (materia seca) dependiendo del suelo, árbol (especie), calidad del lodo, etc., siendo la tasa típica alrededor de 18 ton/ha/año ms con una frecuencia de aplicación anual o de intervalos de 3 a 5 años y una vida útil entre 20 a 55 años o más, limitada por el contenido de metales pesados en el lodo (Becerra, 2003).

Investigaciones realizadas en la Universidad de Washington han demostrado que en algunas especies forestales tratadas con lodo como fertilizante, se produjo un excelente y prolongado incremento en altura y en diámetro, comparado con muestras de control. Este incremento varía según las características del área y edad del rodal (Cogger *et al.*, 2000).

En Estados Unidos se utiliza un sistema de ranking para evaluar las áreas de aplicación del lodo, en donde se le asigna una categoría a cada variable restrictiva en una escala de 1 a 10. De acuerdo a esto existe prohibición de aplicación de biosólidos en suelos cuya profundidad sea inferior a 1 m; y para suelos cuya profundidad esté entre 1 y 3 m, existe una baja categorización. La zona de amortiguamiento para ríos, lagos y arroyos es de 30,5 m (100 pies) y de 61 m (200 pies) si la zona de amortiguamiento presenta interrupciones. Se considera óptimo las áreas con pendientes menores del 10%, pero se aceptan áreas con pendientes entre 10 y 20% (Cogger *et al.*, 2000).

3.2.2 Australia

En Australia se realiza reciclaje de lodos sanitarios debido a los beneficios ambientales que genera en las masas boscosas que se ven favorecidas con la agregación de nutrientes y materia orgánica, con los correspondientes incrementos en volumen. Se han registrado incrementos en volumen de 3 a 4 m³/ha/año. La tasa mínima de aplicación ha sido determinada en 350 kg de N/ha comparable a una aplicación de fertilizante tradicional (Chye *et al.*, 2000).

Sin embargo, es necesario tomar medidas para no provocar un efecto negativo sobre el medio ambiente, razón por la cual en Australia no se puede aplicar lodo en pendientes mayores del 18%; en suelos anegados, con baja permeabilidad o en suelos altamente drenados. Se considera que para una frecuencia de aplicación mayor a una en cinco años el suelo debería tener como mínimo un pH de 5,5 y mantenerlo al menos dos años a continuación de la aplicación (Chye *et al.*, 2000).

Además, se debe considerar para los cursos de aguas superficiales un área de amortiguamiento de 50 m en pendiente menor a 3% y de 100 m donde tiene una pendiente mayor a 3%. Por otra parte, se prohíbe la aplicación de lodos hasta 250 m aguas arriba en zonas de protección de captación de agua potable (Chye *et al.*, 2000).

3.2.3 Nueva Zelanda

La aplicación de biosólido en tierra debe ser aplicado en concordancia con “El Plan de Manejo de Bosques” de aplicación de biosólidos de Junio de 1998, establecido para

bosques de pino en tres áreas de Nueva Zelanda: Chaneys, Burnham y Dunsandel. En éste, se establece que (Christchurch City Council, 1998):

- La localización explícita del bosque y el área en la cual se puede aplicar biosólido, que presenta una validez de 30 años.
- Antes de la aplicación en tierra el lodo tratado será desaguado mecánicamente a un biosólido con contenido de peso seco del 25% y del 30%.
- Zonas de amortiguamiento en: los bordes del bosque (10 m); cursos de agua superficial (50 m); áreas residenciales y campos militares (250 m); viviendas rurales (100 m); centros de captación de agua potable (50 m en cualquier dirección y 250 m aguas arriba en pendientes superiores a 30 grados).
- Debe existir una rotación en la aplicación de biosólido, de modo que en cualquier tercio del bosque no haya existido una aplicación de biosólido en los 12 meses anteriores.
- Ubicar señales cada 100 metros a lo largo del perímetro del sector en que se aplicó biosólido, las cuales deben permanecer durante 6 meses.
- La tasa de aplicación de biosólido no debe exceder los 400 Kg de N/ha ⁽⁷⁾, considerando ciclos anuales de aplicación de 2 años.
- El biosólido sólo se puede aplicar en áreas con plantaciones mayores a 6 meses, por otro lado, sólo se puede cosechar los bosques luego de 6 meses de realizada la aplicación.
- No se puede aplicar biosólido en áreas dentro del bosque que presenten acumulación de agua superficial o en zonas donde el agua subterránea puede presentarse sobre la superficie.

En parcelas experimentales en la localidad de Nelson, sobre suelos arenosos, se llegó a la conclusión que después de tres años de aplicación de biosólidos líquidos, en plantaciones de Pino insignis de seis años, los incrementos en volumen fueron entre un 27% y 39% en comparación con las parcelas testigos, en tanto que la carga de nutrientes fue de 300 y 600 kg N/ha, respectivamente (Whitehouse *et al.*, 2000).

⁷ Equivalente a 40 ton/ha de biosólido, considerando un 4% de nitrógeno, en base seca y un 25% de sólido, en base seca.

Biosólido aplicado en plantaciones de pino en la localidad de Rabbit Island ha significado un aumento en el crecimiento de los árboles por el incremento del diámetro y volumen. El biosólido se aplicó entre 1997 y 2000 con tasas de aplicaciones estándar de 300 Kg N/ha (tratamiento 1) y altas de 600 Kg N/ha (tratamiento 2), más una parcela testigo que no presento aplicación de biosólido. En Junio de 2001, las plantaciones de 10 años experimentaron en promedio un incremento del área basal en un 42% en el tratamiento 1 y un 23% en el tratamiento 2 sobre la parcela testigo; el volumen de los árboles en el tratamiento 1 aumentó en un 45% y el tratamiento 2 en un 26% sobre la parcela testigo (Wang, 2001). Lo anterior representa un mejoramiento significativo del valor económico de los activos del bosque, así como de los efectos sociales al realizar un reciclaje beneficioso del biosólido de una manera ambientalmente amistosa.

3.2.4 Normativa Chilena

Chile cuenta con el Reglamento sobre Manejo de lodos no peligrosos generados en Plantas de Tratamiento de Aguas. Este reglamento tiene por objeto regular el manejo sanitario de los lodos no peligrosos provenientes de plantas de tratamiento de aguas. Con ello se protege la salud de la población y previene el deterioro de los recursos naturales, aire, agua, flora, fauna y suelo (Conama, 2001).

La orientación de este reglamento es el uso agrícola de lodos, particularmente, la aplicación benéfica al suelo. Con lo cual se transforma en un producto útil para la recuperación de suelos degradados, así como para sustituir el uso de insumos tradicionales en la agricultura.

La aplicación de lodos en suelos de uso forestal se encuentra regido por el Título II, del Reglamento, de la Utilización de Lodos en la Agricultura, ya que ésta considera las actividades de siembra, plantación y cosecha; incluyendo cultivos, producción animal y silvicultura.

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

En el reglamento se establece (Conama, 2001):

- Definición de lodo como una acumulación de sólidos orgánicos sedimentables separados en los distintos procesos de tratamiento de agua.
- Entrega concentraciones máximas de metales pesados (mg/Kg, base seca) en lodos para la aplicación en agricultura y concentraciones de metales en suelo antes de la aplicación de los lodos.
- Recomendaciones de procesos de reducción de patógenos y atracción de vectores.
- Respecto a la utilización de lodos en la agricultura solamente pueden ser utilizados lodos estabilizados⁸ e higienizados⁹. Por otra parte, se distinguen dos tipos de lodos de acuerdo a su reducción del potencial de vectores ($\leq 38\%$ sólidos volátiles) y contenido de patógenos: lodos Clase A para uso agrícola sin restricciones por razones sanitarias y lodos Clase B apto para uso agrícola, con restricciones de aplicación según tipo y localización de los suelos y tipo de cultivo.
- Restricciones según tipo de lodo y tipo de cultivo.
- Tasa máximas de aplicación de lodos de acuerdo a tipo de uso: suelo agrícolas y forestales 15 ton/ha/año, base seca; césped, jardines y áreas verdes 2 ton/ha/año, base seca; y en suelos degradados 30 ton/ha/año, base seca.
- En suelos de uso forestal, la aplicación de lodos podrá efectuarse sólo si se cuenta con un control de acceso durante los 30 días posteriores de la aplicación.

Como características de las áreas de aplicación queda prohibida la aplicación de lodos en áreas con (Conama, 2001):

- Suelos de texturas arenosas, esto es, suelos cuyos porcentajes de partículas con diámetro entre 0,050 y 2 mm sea igual o superior a 30 y el porcentaje de arcilla o partículas menores a 0,002 mm de diámetro sea inferior a 10;
- Suelos con pendientes superiores a 15%. Para pendientes mayores del 2%, se exigirá un acanalado paralelo al contorno de la pendiente para evitar la erosión;

⁸ Lodo estabilizado: Lodo sometido a proceso de tratamiento para evitar la putrefacción y la atracción de vectores.

⁹ Lodo higienizado: Lodo sometido a un proceso destinado a la eliminación de gérmenes patógenos.

- Suelos de uso agrícola, forestal o jardines, cuyos pH sean inferiores o iguales a 5;
- Suelos saturados con agua durante algún periodo del año; o suelos con riesgo de inundación;
- Suelos cuyas napas freáticas se encuentren a menos de 1 m de profundidad y en aquellos suelos en los cuales se genere un efecto de napa colgante;
- Áreas cubiertas con nieve;
- Zonas de protección a fuentes de captación de agua potable, es decir, 300 metros aguas arriba en caso de aguas superficiales y en un radio de 300 metros en caso de fuentes de aguas subterráneas;
- Franjas de protección de ríos y lagos, esto es, a menos de 15 metros de sus riberas;

Además, en el Artículo 17 queda prohibida la aplicación de lodos en áreas pertenecientes a cualquier categoría de protección. Por otra parte, en el Artículo 24 se establece que los Lodos de Clase A pueden ser usados en cualquier uso agrícola y en el Artículo 25 se prohíbe la aplicación de Lodos Clase B a menos de 300 metros de áreas residenciales, hospitales, locales de expendio de alimentos, escuelas, parques y áreas similares. Sin perjuicio de lo anterior, la distancia a las viviendas aisladas deberá ser superior a los 100 metros.

3.2.4.1 Análisis crítico del Reglamento

La normativa chilena se encuentra basada en la normativa Norteamericana, sin embargo es necesaria adaptarla a los requerimientos de Chile. Se encuentra enfocada principalmente a la utilización en la agricultura.

El proyecto de normativa chilena, pretende regular varios aspectos del uso de lodos en agricultura en términos de metales pesados y carga patógena. Sin embargo, carece de regulaciones para compuestos orgánicos, considerando que la preocupación por el contenido de estos compuestos en Estados Unidos de América ha aumentado a causa de la capacidad de estos para bioacumularse; por lo tanto podrían ser considerados en una futura normativa.

Por otro lado, es necesario definir en forma más detallada los pasos a seguir en la utilización de biosólido en suelos forestales, tales como: restricciones de aplicación según edad de la especie; registro de la zona y fecha de aplicación para evitar sobrepasar las tasa máximas de aplicación estipuladas; delimitación del área aplicada y su zona de amortiguamiento, de modo que el biosólido no quede expuesto.

Además dentro de las restricciones de aplicación debería existir una relación entre las zonas de amortiguamiento y la pendiente, de modo que, a mayor pendiente aumente el ancho de esta y así evitar escurrimiento de material, contaminación de centros de captación de agua potable y/o franjas de protección de ríos y lagos.

Si se compara la normativa chilena con la normativa extranjera se tiene que:

- La normativa chilena es más estricta en cuanto a valores máximo de metales pesados, carga máxima de metales que se pueden depositar o acumular en el suelo, así como la carga máxima anual (Kg/ha) que se puede aplicar que la normativa Norteamericana.
- La normativa de la EPA establece una carga máxima a depositar, la Chilena propone como parámetro la carga máxima existente en el suelo.
- No separa el área forestal de la agricultura, aún cuando existen más restricciones como insumo agrícola que forestal.
- El lodo clase B presenta restricciones según tipo y localización de suelo y cultivo.

4 MATERIAL Y MÉTODO

4.1 MATERIAL

El estudio se desarrolló en lugares con plantaciones forestales localizadas en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, considerando todos los lugares que cumplen con las restricciones ambientales para la aplicación de biosólidos.

La región del Libertador General Bernardo O'Higgins posee un clima de tipo Templado Mesotermal Inferior Estenotérmico con régimen Mediterráneo Semiárido, el cual permite el desarrollo de suelos muy fértiles, siendo los mejores suelos de aptitud agrícola del territorio nacional. Se distinguen cuatro formas de relieve: planicies litorales, cordillera de la costa; depresión intermedia y cordillera de los andes. La red hidrográfica está representada principalmente por el Río Rapel, formado por la confluencia del Cachapoal y el Tinguiririca (Sánchez *et al*, 1993).

La VI región posee 124.900 ha de Bosque Nativo y 102.000 ha de plantaciones de las cuales el 67% corresponde a Pino Radiata y el 29% a Eucalipto (INFOR, 2005).

El material cartográfico para el desarrollo de la metodología se encuentra descrito en la tabla 13.

Tabla 13: Coberturas de información básica para la VI Región.

Cobertura	Características	Origen
Curvas de nivel	Cada 25 m	Cartas IGM
Uso de suelo	Mapa de zonas con uso de suelo forestal (bosques)	Catastro Bosque Nativo
Series de suelo	Mapa generalizados escala 1:100.00 a partir de estudio 1:20.00 de Ciren para la región. Contiene información de textura y de pH del suelo.	Cartas 1:100.000 CIREN
Hidrografía	Red de cursos de agua continua	Cartas IGM
Caminos	Red vial	Cartas IGM
Centros poblados	Polígonos urbanos de ciudades y pueblos	Cartas IGM

Fuente: elaboración propia.

4.2 MÉTODO

4.2.1 Desarrollo y construcción del modelo

La construcción del modelo se efectuó con base en las experiencias extranjeras que son posibles de aplicar en el País y a las restricciones descritas en el Anteproyecto de Reglamento para el Manejo de Lodos No Peligrosos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas, en Chile.

De esta forma se tiene que las variables restrictivas están representadas por:

- Topografía: pendiente.
- Uso de suelo: plantaciones forestales.
- Geología y suelo: textura del suelo, pH, áreas con riesgo de inundación, con nieve o que presenten ñadis, bofedales o vegas.
- Agua: cercanía a cursos de aguas superficiales y fuentes de captación de agua potable, y profundidad de la napa freática.
- Variables Sociales: distancias mínimas a centros poblados, zonas residenciales, hospitales, escuelas, áreas recreacionales y áreas protegidas.

4.2.1.1 Definición de variables según la escala de percepción

Cada una de las variables puede ser descrita en distintos niveles de percepción. Para el desarrollo de la memoria se definieron 2 escalas: regional en 1:250.000 y comunal en 1:50.000.

La utilización de las escalas varió para cada variable según la disponibilidad de información. De esta forma se obtuvo 4 categorías de aplicación de escalas: no aplicables, regular aplicación, buena aplicación y muy buena aplicación.

Para definir el nivel de precisión de las variables se utilizó el concepto de mínima unidad cartografiable, que a escala 1:50.000 queda representada por 6,25 ha (0,5 x 0,5 cm²).

Una vez que se recopiló la información cartográfica de las variables físicas restrictivas se procesaron en un SIG (ArcGis 8.1), según la restricción que poseían, con el fin de

superponerlas y obtener como resultado los mapas con las áreas potenciales de aplicación de biosólidos.

Las restricciones de cada variable que formaron parte del modelo se identificaron según su aptitud para la aplicación de biosólidos, en 4 categorías. De esta forma se asumió, *a priori*, una clasificación para cada unidad cartográfica de acuerdo a los siguientes tipos: no apto (0), poco apto (1), apto (2) y muy apto (3) (tabla 14).

4.2.1.2 Procesamiento de coberturas

- Topografía

La topografía se determinó con las curvas de nivel a través de una interpolación espacial para obtener así un modelo digital de elevaciones (MDE) con píxeles de 100 m de lado. A partir del MDE se deriva un archivo raster¹⁰ de pendientes en porcentajes, que fue filtrado y post-clasificado en dos categorías: píxeles con pendiente igual o menor a 15%¹¹ y píxeles con más de 15%. El raster final fue sectorizado y transformado a cobertura vectorial tipo *shape* (ArcView).

- Uso de suelo

La información de uso de suelo forestal se obtuvo a partir del catastro del bosque nativo desde el cual se construyó la cobertura de suelos con uso forestal, específicamente de bosques (nativo y plantaciones).

- Geología y tipo suelo

Con respecto a las series de suelo se obtuvo la información de cartas de suelos disponibles en el CIREN para la VI Región, las cuales se escanearon, rectificaron y vectorizaron. La cobertura final se asoció a una base de datos que contiene información detallada para cada serie de suelo respecto a clases texturales superficiales y en profundidad; pH; áreas con nieve, riesgo de inundación y la formación de vegas, bofedales o ñadis.

¹⁰ Un raster corresponde a un modelo de datos espaciales en donde el territorio se divide sistemáticamente en filas y columnas, formando celdas o grillas (píxeles en imágenes).

¹¹ Fuente: CONAMA, 2001. Reglamento para el manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas.

Tabla 14: Clasificación de variables restrictivas del modelo.

VARIABLE	RESTRICCIÓN	ATRIBUTO	TRATAMIENTO
a) Topografía			
- Pendiente	> 15%	No apto	Construir MDE y luego reclasificar según pendiente
	< 15%	Apto	
b) Uso de Suelo			
- Suelos de uso Forestal	Otro Uso	No Apto	Reclasificar
	Uso Forestal	Apto	
- Plantaciones Pino insigne	s/r	Apto	s/t
- Otras áreas con restricciones	Con nieve	No aptas	Reclasificar
	riesgo de inundación	No aptas	
	vegas, ñadis o bofedales	No aptas	
c) Geología y Suelo			
- Textura del suelo	Arenosa	No aptas	Reclasificar
	Media	Aptos	
	Moderadamente pesadas	Muy aptos	
	Pesada	Muy aptos	
- pH	< 5	No apto	Reclasificar
	≥ 5	Apto	
c) Agua			
- Cursos de aguas superficiales	< 15m de ribera	No apto	Buffer
	> 15m de ribera	Apto	
- Profundidad napa freática	< 1m profundidad	No apto	Buffer
	> 1m profundidad	Apto	
- Fuentes de captación de agua potable	≤ 300m aguas arriba	No apto	Buffer
	> 300m aguas arriba	Apto	
d) Compatibilidad de uso			
- Distancia y acceso a centros urbanos - Áreas recreacionales - Áreas Protegidas	≤ 300m de distancia	No aptas	Buffer
	> 300m de distancia	Aptas	
- Red vial	Pavimento	Apto	Reclasificar
	Ripio	Apto	
	Tierra	Apto	

Fuente: Elaboración propia.

- Agua

En relación a la hidrografía se aplicó zonas de amortiguamiento a través de la generación de coberturas tipo *buffer*, o áreas de amortiguamiento, sobre los cursos de agua presente en las cartas IGM, considerando 30 m desde sus riberas, distancia mayor a la definida en el reglamento (15m).

- Compatibilidad de uso

Respecto a las variables restrictivas de orden social también se generaron coberturas tipo *buffer* considerando distancias mínimas hacia centros poblados, zonas residenciales, hospitales, escuela, áreas recreacionales y áreas protegidas, disponible en las cartas IGM.

- Red vial

En el caso de las variables de orden económico, sólo se consideró a la red de caminos disponible en las cartas IGM, la cual fue clasificada según el tipo de carpeta (pavimento, ripio, tierra).

4.2.1.3 Modelo de restricciones

Una vez realizada la clasificación las variables restrictivas fueron procesadas a través de un modelo de integración de la información de tipo multiplicativo, que presenta la siguiente estructura:

$$Aptitud = \prod_{i=1}^n X_i$$

X_i = variable restrictiva categorizada en términos de números binarios (0,1) o números enteros (0, 1, 2, 3). En el caso de tratarse de variables que permitan o no el uso de biosólidos se usó la opción binaria de modo que 0 es equivalente a “no apto” y 1 a “apto”. Por el contrario, de tratarse de variables que permitan varios niveles de aptitud se usó los números enteros de la siguiente manera: 0 = no apto; 1= poco apto; 2 = apto; y 3 = muy apto.

La aplicación del modelo contempló sólo una variable con varios niveles de aptitud (textura de suelo), y todas las demás quedan en categoría de binarias. De esta forma, los

valores finales para Aptitud son 0 = no apto, 1= poco apto, 2 = apto, y 3 = muy apto, lo que permite su interpretación directa.

Cabe señalar que se optó por este tipo de modelo, debido a que su estructura es equivalente a la operación de superposición de coberturas digitales (vector o raster) cuando estas tienen valores binarios o enteros. Además, su aplicación no requiere mayores demostraciones lógicas para asegurar su construcción como es el caso de los modelos aditivos y aditivos ponderados.

4.2.1.4 Factibilidad económica de aplicación

Para evaluar la factibilidad económica fue necesario conocer los costos y rendimientos del proceso de tratamiento de aguas servidas, que incluyen desde la obtención del lodo en las plantas de tratamiento y las variables relacionadas con el transporte, hasta su disposición en el destino final. Esta información se encuentra descrita en el capítulo 1.6 Costos de Producción y Transporte de Lodos de la revisión bibliográfica.

La factibilidad económica de la aplicación está dada por la distancia máxima de recorrido (según radio de aplicación) desde las plantas generadoras hasta las áreas potenciales de aplicación de biosólidos, y condicionada por los costos de transporte y disposición en el sitio forestal o en el relleno sanitario. Además, puede incluirse el costo de oportunidad si se considera el aumento de la productividad del bosque al aplicar biosólido. De esta forma se trabajó en dos escenarios, el primero no consideró la productividad del bosque, mientras que en el segundo escenario lo hizo en forma explícita.

A continuación se describen los dos escenarios para determinar la factibilidad económica de aplicación.

- Escenario 1: no considera la productividad del bosque

El costo de transporte y disposición en el sitio forestal debe ser menor o igual al costo de transporte y disposición en relleno sanitario. Para un sitio de aplicación cualquiera k lo anterior se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Costo (sitio } k) \leq \text{Costo (relleno sanitario)}$$

Costo del sitio k

El sitio k se encuentra representado por todos aquellos sitios potenciales en los cuales es posible aplicar biosólidos. Su costo se calcula según la siguiente expresión:

$$\text{Costo (sitio k)} = \text{Costo (t)} + \text{Costo (d)}$$

Donde:

Costo (t) = costo de transporte del biosólido al sitio k

Costo (d) = costo de disposición del biosólido en el sitio k

Costo de transporte

$$\text{Costo (t)} = \left[\sum_{i=1}^n C_i \times \text{Km}_i \right] \times V$$

Donde:

i = tipo de carpeta, i = 1, ..., n

n = número total de carpetas

C_i = costo de desplazamiento unitario sobre la carpeta tipo i

Km_i = kilómetros recorridos sobre la carpeta tipo i

V = volumen transportado por viaje (ton)

Costo de disposición

$$\text{Costo (d)} = b \times m \times S$$

Donde:

b = costo unitario de la aplicación (\$/ton)

m = número de toneladas de biosólido a aplicar por hectárea

S = superficie de aplicación

Costo relleno sanitario

El costo de relleno sanitario es un “dato” que se asume conocido. Para su valor existen cifras referenciales.

- Escenario 2: considera la productividad del bosque

En este caso, el costo de transporte y disposición en el sitio forestal k, menos la ganancia por aumento en la productividad del bosque, debe ser menor o igual al costo de transporte y disposición en relleno sanitario. Lo anterior se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Costo (sitio k) - VPN (crecimiento diferencial)} \leq \text{Costo (relleno sanitario)}$$

VPN de crecimiento diferencial

La ganancia por productividad se encuentra representada por el Valor Presente Neto (VPN) del crecimiento diferencial total acumulado al final de la rotación.

$$\text{VPN} = C / ((1 + i)^n)$$

Donde:

C = ganancia obtenida al final de la rotación (m³/ha)

i = tasa de interés

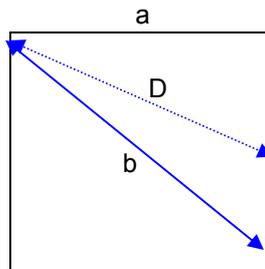
n = año de actualización

La ganancia obtenida al final de la rotación debe ser actualizada al año en que se aplicó el biosólido. Este valor reduce el costo asociado al sitio k y así se mejora la comparación con el costo alternativo del relleno.

Para determinar el radio de aplicación, bajo los dos escenarios descritos anteriormente, se utilizó la metodología de distancia de costo ponderado ("Cost Weighted Distance") en el programa ArcGis 8.1, en donde fue necesario partir con la creación de un raster de costos, en el cual el nivel digital representó el costo de atravesar un píxel en función del tipo de camino.

El costo de transporte es de 0,15 US\$ Km/ton (CONAMA, 1998), si se considera que el costo de transitar por un camino de ripio es un 50% más caro que el transporte en pavimento se tiene que el costo de pavimento es de US\$ 0,15 Km/ton y el costo por ripio es de 0,225 US\$ Km/ton.

El costo unitario de atravesar un píxel tiene asociado un factor de corrección que define su distancia media (D). Esta se encuentra representado por el promedio entre la distancia más corta (a) y la más larga (b) posibles de encontrar cuando se cruza un píxel, como se expresa a continuación:



a: distancia más corta
b: distancia más larga
D: distancia media

$$b = \sqrt{a^2 + a^2}$$

$$b = a \sqrt{2}$$

$$b = 1,41 a$$

$$D = (a + b)/2$$

$$D = (a + 1,41a)/2$$

$$D = 1,207 a$$

El tamaño del píxel se define en 100 m, por lo cual la distancia media corregida es de 120,7 m. Este factor de corrección al ser multiplicado por el costo unitario de transporte da como resultado el costo de atravesar por cualquier píxel. Este valor se incrementa a medida que se avanza por la carpeta para obtener así el costo acumulado desde el origen (Pichilemu) definido hasta todos los posibles puntos de destino (rodales forestales).

De esta forma, al aplicar el factor de corrección se tiene que el costo de atravesar un píxel es:

$$\text{Costo (t)}' = (D \times a \times \text{Costo (t)})/1000$$

Donde:

Costo (t)' = costo de transporte al atravesar el píxel

D = factor de corrección (m)

a = tamaño píxel (m)

Costo (t) = costo de transporte (km/ton)

El raster de costos obtenido fue superpuesto con la cobertura de rodales potenciales (puntos de destino) con el fin de establecer el costo acumulado del par origen-destino y así determinar cuales rodales se encuentran dentro del radio de aplicación. Este costo acumulado se obtiene hasta el punto más cercano al camino, por lo cual fue necesario estimar su costo hasta el centro del rodal. Para establecer éste costo se supuso que el rodal es cuadrado y se determinó el costo a través de su distancia media de la siguiente forma:

$$\text{Costo } (t_a) = [(\sqrt{S} \times 10000) / 2 \times \text{ND}] \times C_r$$

Donde:

Costo (t_a) = costo de transporte adicional para llegar al centro del rodal

S = superficie del rodal (ha)

ND = nivel digital (tamaño del píxel)

C_r = costo de desplazamiento unitario sobre la carpeta tipo ripio

A modo de ejemplo, si se considera un rodal con una superficie de 71,87 ha su distancia media al centro del rodal es de 423,87 m, al considerar el tamaño del píxel de 100 m y el costo de transporte en ripio de \$16/km se obtiene que el costo adicional para el rodal es de \$67,82/ton de aplicación.

4.2.2 Modelo de integración de la información

El modelo de integración de las variables es flexible en su construcción ya que depende de la información cartográfica disponible para cada una de ellas y de su nivel de percepción. De esta forma se definen variables que son representativas a escala comunal y otras que lo son a escala regional, para luego utilizarlas de acuerdo a la información obtenida de las diferentes fuentes (CIREN, Cartas IGM, entre otras).

Una vez determinada la zona de utilización de cada variable con respecto a su nivel de percepción y su disponibilidad se les aplicó el modelo de restricciones con el cual se obtuvo en primera instancia el Mapa de Áreas Potenciales (escala 1:250.000) y en segunda instancia el Mapa de Rodales Potenciales (escala 1:50.000). Ambos mapas fueron superpuestos con el fin de aplicarles el modelo de factibilidad económica y así obtener el Mapa de Sitios Potenciales para la aplicación de Biosólidos en Plantaciones Forestales.

El Mapa de Rodales Potenciales se realizó a partir de una comuna en la cual existe un alto desarrollo de plantaciones forestales, ya sea por características climáticas o edafológicas.

El modelo de integración de las variables se encuentra representado en la figura 5.

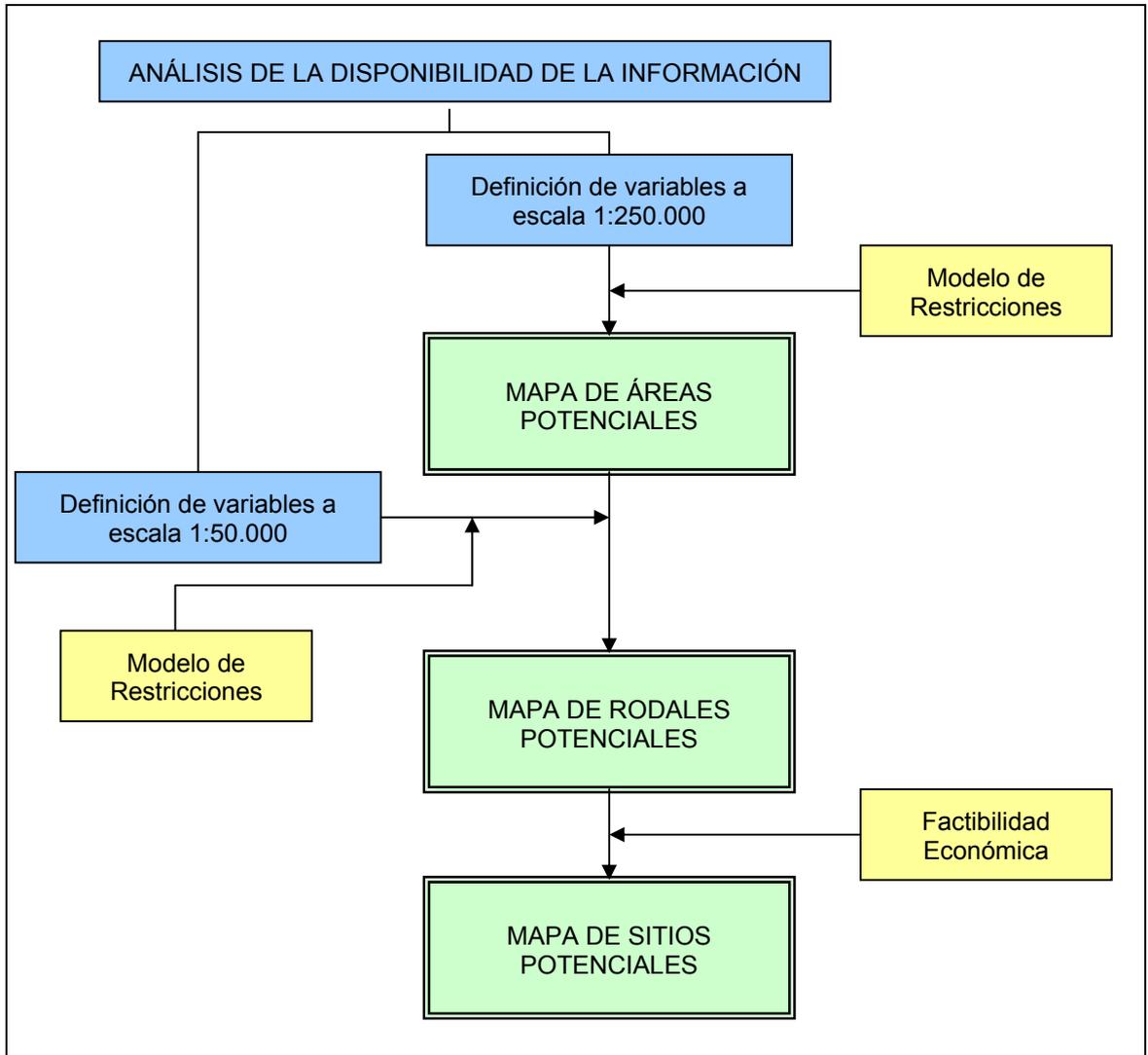


Figura 5: Modelo General de Integración de la Información.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES DE APLICACIÓN

Se definió inicialmente, como base para la recolección de información, la escala de percepción para cada variable (tabla 15). En ella se especifica la categoría de aplicabilidad de la escala de acuerdo a los siguientes tipos: no aplicables (----), regular aplicación (✓), buena aplicación (✓✓) y muy buena aplicación (✓✓✓).

Tabla 15: Escala de percepción según variable.

Variable	Disponibilidad de Información	
	Escala regional	Escala comunal
a) Topografía		
- Pendiente	✓✓✓	✓✓
b) Uso de Suelo		
- Suelos de uso Forestal	✓	✓✓✓
- Plantaciones de Pino Insigne	----	✓✓✓
- Áreas cubiertas con nieve	✓✓✓	✓✓
- Áreas con riesgo de inundación	----	✓✓
- Suelos con vegas, bofedales o ñadis	✓✓	✓✓
c) Geología y Suelo		
- Textura del suelo	✓✓✓	✓
- pH	✓✓✓	✓
d) Agua		
- Cursos de aguas superficiales	----	✓✓
- Profundidad napa freática	----	✓✓
- Fuentes de captación de agua potable	----	✓✓
e) Compatibilidad de uso		
- Distancia y acceso a centros urbanos	✓	✓✓✓
- Áreas recreacionales	----	✓✓✓
- Áreas protegidas	✓✓✓	✓
f) Red vial	✓✓	✓✓✓

Fuente: Elaboración propia.

Una vez definida la escala de percepción para cada variable se procedió a recopilar toda la información necesaria para poder aplicar las restricciones definidas en el Anteproyecto de Reglamento para el Manejo de Lodos No Peligrosos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas. Esta información se encuentra especificada en la tabla 13 (Material y Método).

Cada una de las coberturas representa una variable que posee restricciones de aplicación por lo cual se les entregó un atributo de clasificación de acuerdo a lo expresado en la tabla 14, con el cual fue procesada. Este atributo se cuantificó en su respectiva base de datos considerando para las variables binarias el valor 0 a las no aptas y valor 1 a las variables aptas. En el caso de la textura del suelo se consideraron los siguientes valores: 0 = no apto; 1= poco apto; 2 = apto; y 3 = muy apto.

5.2 APLICACIÓN DEL MODELO DE RESTRICCIONES

5.2.1 Escala regional

Del análisis y disponibilidad de información de las variables restrictivas se desprende el Modelo de Restricciones usado en la construcción del Mapa de Áreas Potenciales para la aplicación de biosólidos en la VI Región (figura 6), en donde se consideraron las variables que son representativas a escala 1:250.000 y de las cuales existía información disponible a ésta escala de percepción.

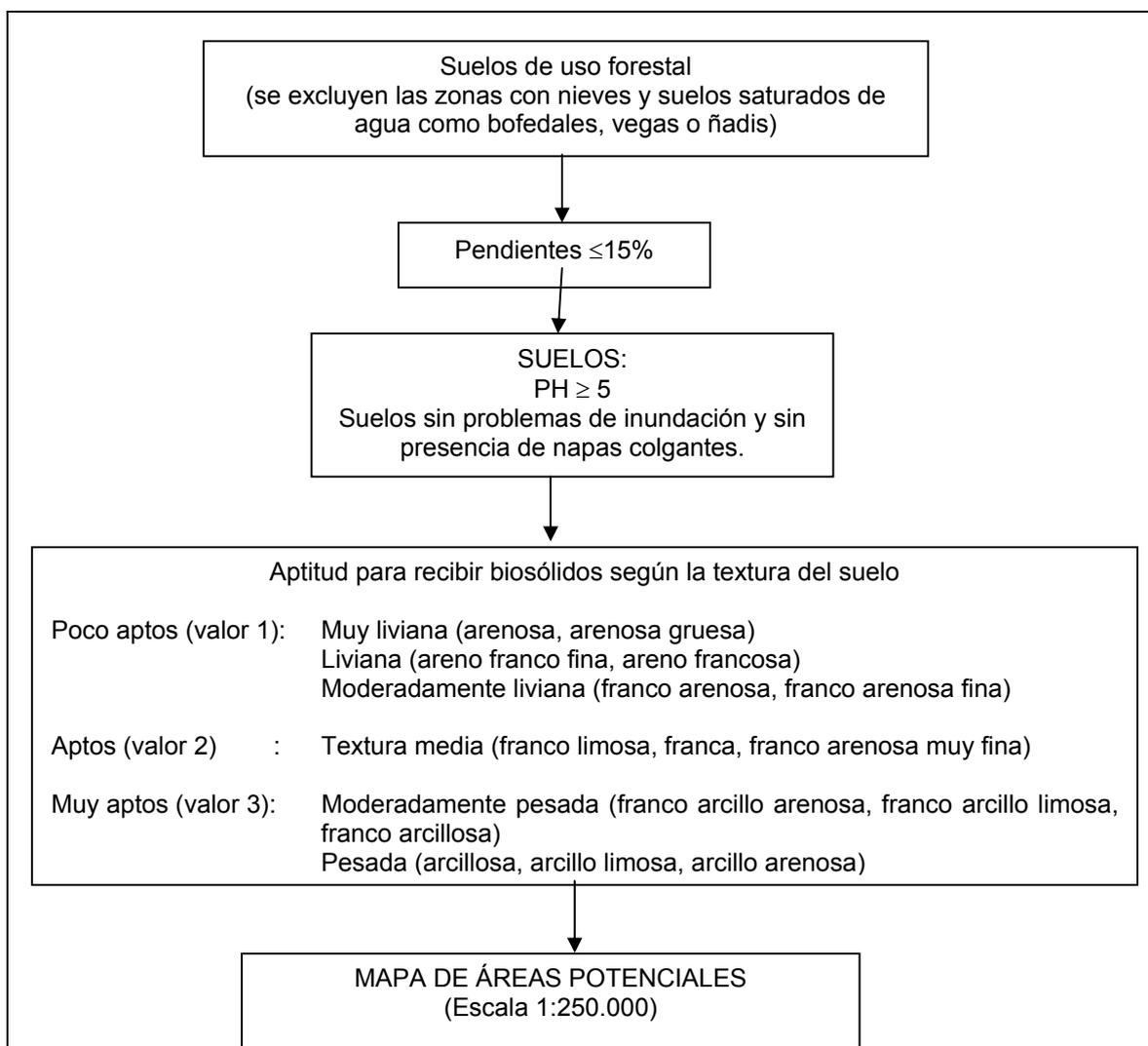


Figura 6: Modelo de restricciones usado en la construcción del mapa de áreas potenciales para la aplicación de biosólidos en la VI Región, a escala regional.

Como se observa en la figura anterior el modelo de restricciones a escala regional parte con la superposición de las variables binarias, de tal forma de dejar excluidas las variables no aptas representadas por el valor 0. Posteriormente para definir varios niveles de aptitud se contempla la variable textura de suelo que presenta 4 niveles que permiten la interpretación directa de aptitud de aplicación de biosólido (0 = no apto, 1= poco apto, 2 = apto, y 3 = muy apto).

De esta forma se obtiene que en la VI Región, del Libertador Bernardo O'Higgins existen 238.529 ha con pendientes menores a 15 % de uso forestal.

Con respecto a las características de los suelos, la superficie anterior se puede desglosar en las siguientes categorías:

- 1.329 ha con suelos no aptos para la aplicación de biosólidos.
- 27.437 ha con limitaciones para su aplicación (poco aptos).
- 74.332 ha sin limitaciones de aplicación (suelos aptos).
- 64.309 ha con suelos muy aptos para la aplicación de biosólidos.
- 56.280 ha sin información de suelos (principalmente zona Cordillera de los Andes).

El resultado indica que, excluyendo la zona de la cordillera de Los Andes, en el 8,5 % de la superficie de la VI Región - 138.641 ha - presenta características favorables para la aplicación de biosólidos. Esto es, sumando la superficie con suelos aptos y muy aptos.

La representación cartográfica de las áreas potenciales para la aplicación de biosólidos se observa en la figura 7.

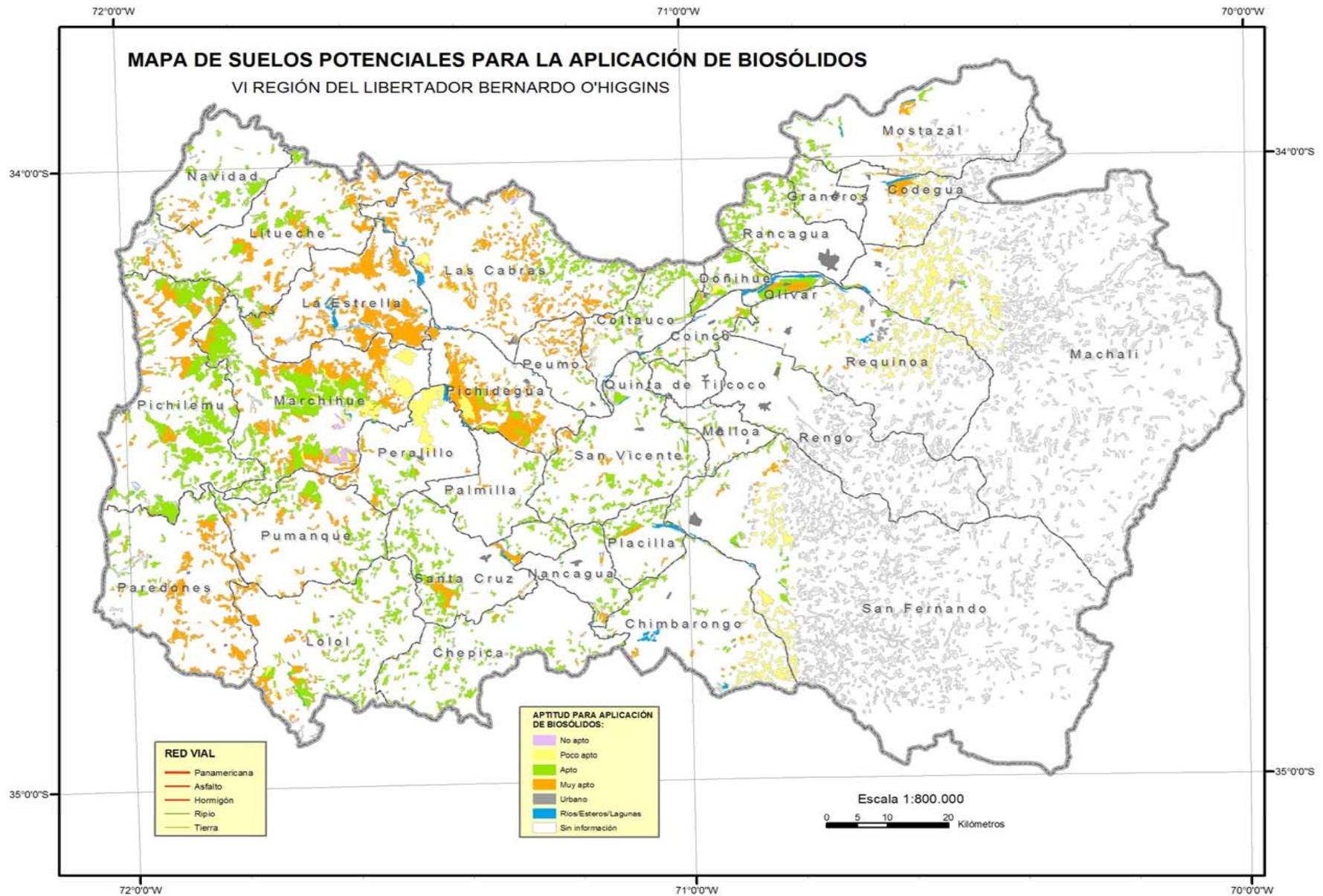


Figura 7: Mapa de áreas potenciales para la aplicación de biosólidos en la VI Región.

5.2.2 Escala comunal

Posterior al análisis regional se realizó la aplicación del modelo de restricciones a escala comunal (figura 8) en donde se aplicaron los siguientes criterios:

- Radio de aplicación de 50 km desde la localidad de Pichilemu.
- Suelos clasificados como muy aptos y aptos para la aplicación de biosólidos.
- Las variables que no se consideraron a escala 1:250.000 y que son representativas a escala 1:50.000.

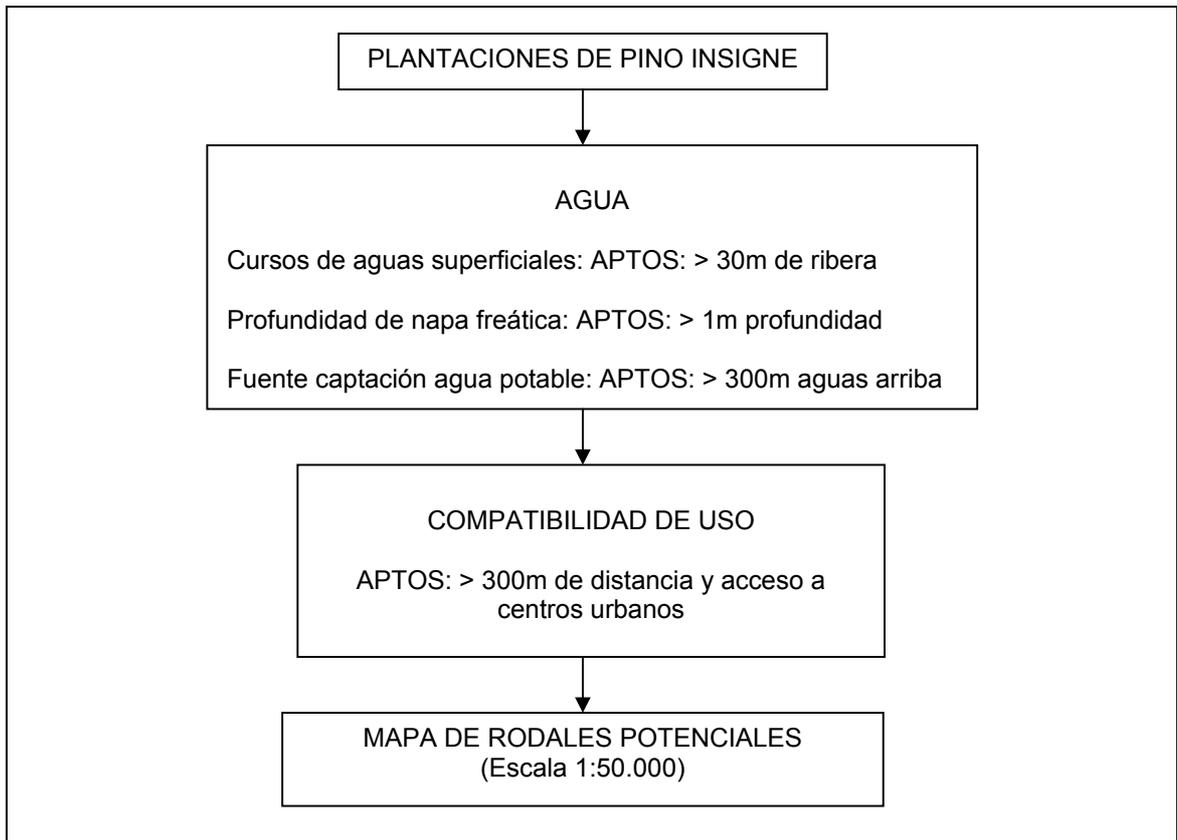


Figura 8: Modelo de restricciones usado en la construcción del mapa de rodales potenciales para la aplicación de biosólidos en la VI Región, a escala comunal.

Dentro de análisis comunal no se pudo integrar a la profundidad de la napa freática ni a las fuentes de captación de agua potable ya que no existía disponibilidad cartográfica de esta información y autogenerarla estaba fuera del alcance de esta memoria. Además, tampoco se pudo obtener la información cartográfica de las actuales plantaciones ya que esta información no está disponible en forma pública, por lo cual sólo se consideró la superficie clasificada como bosque de la cobertura de usos de suelo obtenida del Catastro de Bosque Nativo (CONAF-CONAMA).

Usando las herramientas SIG, se calcula que de las 138.641 ha de la VI región que presentan características favorables para la aplicación de biosólidos el 53% se encuentra dentro del radio de 50 km desde la localidad de Pichilemu, esto es, 73.561. De ellas, 37.513 ha corresponden a suelos aptos y 36.048 ha a suelos muy aptos.

Una vez aplicadas las restricciones se determinó que sólo el 10% de la superficie anterior no es apta para la aplicación de biosólidos, por lo cual existen finalmente 33.423 ha sin limitaciones de aplicación (suelos aptos) y 32.512 ha con suelos muy aptos para la aplicación de biosólidos.

La representación cartográfica de los rodales potenciales para la aplicación de biosólido se observa en la figura 9.

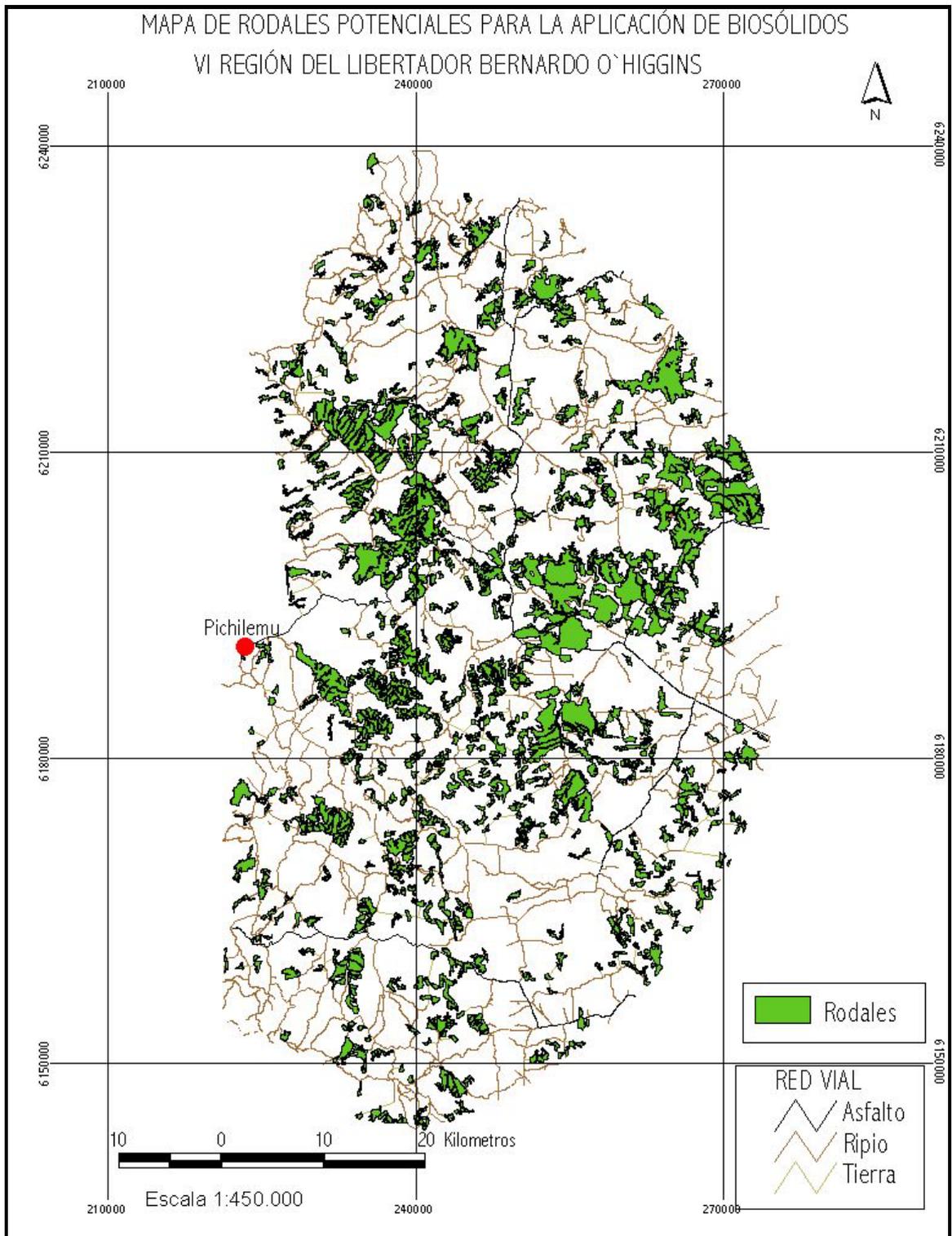


Figura 9: Mapa de rodales potenciales para la aplicación de biosólidos en la VI Región.

5.3 FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE APLICACIÓN

El estudio de la factibilidad económica se realizó bajo el supuesto que en la localidad de Pichilemu existe una planta de tratamiento de aguas servidas, de la cual se obtendrán los bioisólidos que serán aplicados en los lugares de aplicación definidos a través del análisis comunal.

Además fue necesario establecer los siguientes supuestos¹²:

- Utilización de lodos en base húmeda, con un 80% de humedad. Se asume que 1 metro cúbico pesa aproximadamente 1 tonelada¹³.
- Tasa de aplicación de 15 ton/ha/año.
- Sólo se aplica en rodales con superficies mayores a 15 ha. Debido que superficies menores aumentarían los costos de operación relacionados con la organización de los trabajos y transporte al tener que cambiar de localización. Con 15 ha se asegura de que se pueda trabajar en un rodal al menos 1 semana completa.
- Valor del dólar a \$ 600 para las conversiones de los valores referenciales a pesos.
- El análisis se realizó evaluando el transporte de 1 tonelada de biosólido al rodal de aplicación (análisis unitario). Es decir, no se consideró la superficie de cada rodal ni el volumen necesario para poder aplicar en toda su superficie, con el fin de determinar el radio de aplicación y no dejar excluidos los rodales cercanos por contar con mayor superficie.

¹² Estos supuestos son basados en valores referenciales que pueden cambiar de acuerdo a las situaciones específicas en que desarrolla el análisis.

¹³ La densidad del agua es 1 y la densidad del lodo es cercana a 1 (0,8-0,9) por lo cual se asume la equivalencia de que 1 metro cúbico de biosólido pesa aproximadamente 1 tonelada.

5.3.1 Determinación de costos

5.3.1.1 Costo de transporte y disposición en un sitio potencial

Factor de corrección

El tamaño del píxel se define en 100 m, por lo cual la distancia media corregida es de 120,7 m.

Costo de transporte

Al costo de US\$ 0,15 Km/ton en pavimento se le aplica el factor de corrección de 120,7 m obteniendo US\$ 0,018105/ton, esto por un valor del dólar de \$600 se traduce en \$10/ton.

Del mismo modo para el costo en ripio se tiene un costo de 0,225 US\$ Km/ton que al aplicar el factor de corrección se obtiene US\$ 0.02715/ton que se traducen en \$16/ton.

Costo de disposición

Para la aplicación de biosólido se considera una cuadrilla de 4 personas. La jornada hombre es de \$ 9.375¹⁴, con un rendimiento de 1 ha (15 ton). De esta forma el costo de disposición es de 2500 \$/ton.

5.3.1.2 Costo relleno sanitario

Costo de transporte y disposición en relleno sanitario es de 9000 \$/ton (15 US\$/ton), base húmeda (CONAMA, 1998).

¹⁴ Se calcula en base a un sueldo de \$225.000 en 24 días de trabajo.

5.3.1.3 Crecimiento diferencial de plantación

Supuestos:

- Rotación de 25 años
- Aplicaciones de biosólido a los 5 años de edad
- Aumento de 5 m³/ha al final de la rotación, producto de la aplicación del biosólido
- Tasa de interés 8%
- Valor m³ en pie de US\$ 25 (15.000 \$/m³)

A un valor de \$15.000 m³ en pie se obtendrá al final de la rotación una ganancia de \$75.000 ha que actualizados al año de aplicación corresponde a \$16.091/ha. De esta forma se tiene que el aporte de biosólido es de \$1.072 ton.

5.3.2 Determinación del radio económico de aplicación

Del análisis se obtuvo que de un total de 63.736 ha el 63% de la superficie posee un costo de transporte y disposición menor o igual que disponerlo en relleno sanitario, quedando sólo 23.987 ha no factibles de aplicación. Ahora, sí se considera el aumento de la productividad del bosque al aplicar biosólido esta cifra aumenta a un 78%, es decir, de 39.839 ha a 49.792 ha. Esta información se detalla en la tabla 16.

Tabla 16: Superficie factible de aplicación bajo los escenarios propuestos.

Factibilidad aplicación	Escenario 1		Escenario 2	
	N° Rodales	Superficie (ha)	N° Rodales	Superficie (ha)
Si	197	39.839	281	49.792
No	212	23.897	128	13.945
TOTAL	409	63.736	409	63.737

La representación cartográfica de los rodales económicamente factibles de aplicación de biosólidos se encuentra en el Mapa de sitios potenciales para la aplicación de biosólidos (figura 10).

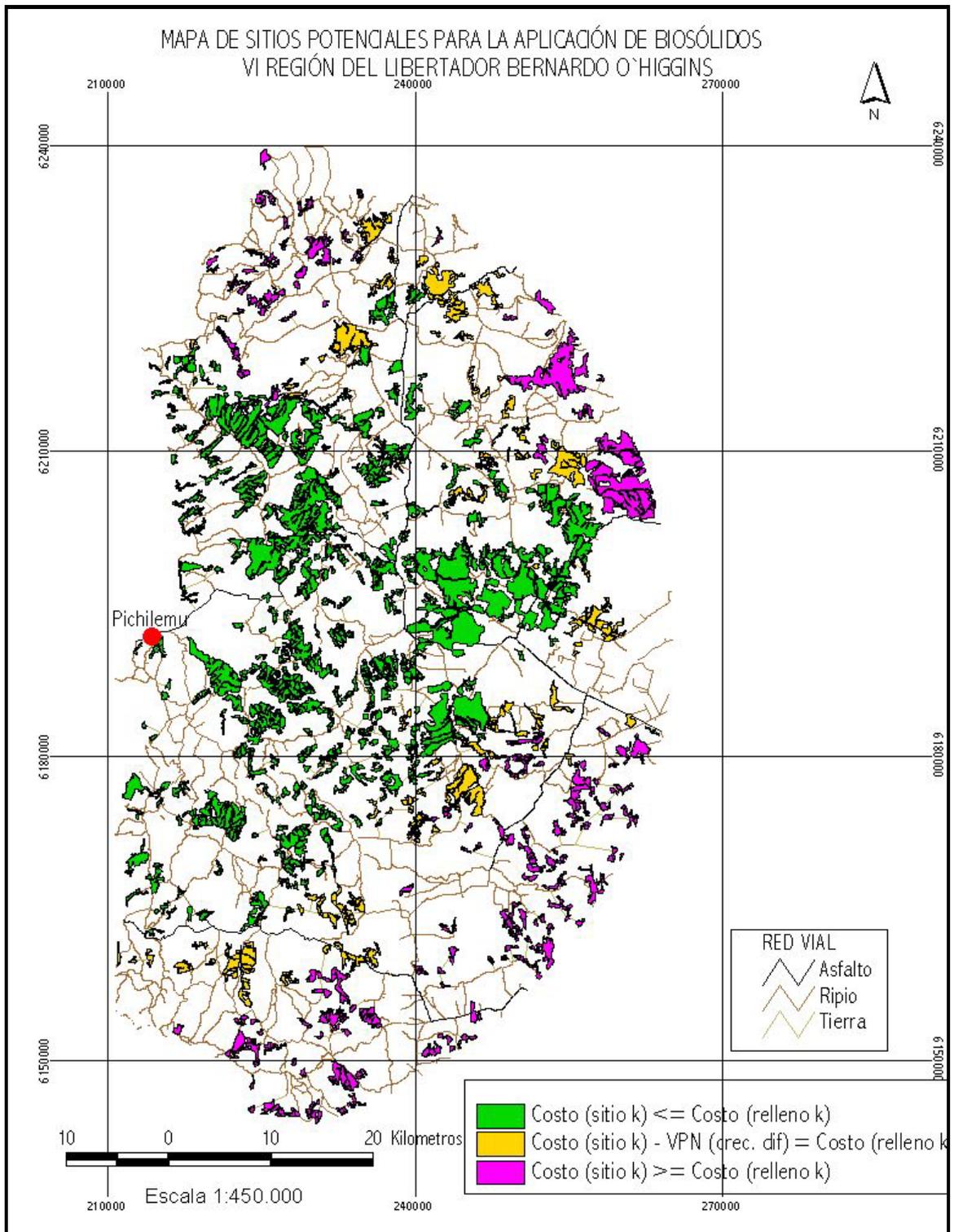


Figura 10: Mapa de sitios potenciales para la aplicación de biosólidos en la VI Región.

6 CONCLUSIONES

La presente memoria entrega un enfoque metodológico flexible para identificar las áreas potenciales de aplicación de biosólidos en sitios forestales de cualquier región, comuna o sitio. Su aplicación depende de la disponibilidad de información y de los valores de costos asociados al transporte y disposición de los biosólidos, así como del costo alternativo de disposición en relleno sanitario. También pueden redefinirse los supuestos de impacto en la productividad de los bosques cuando aún cuando en esta memoria se han usado valores bastante conservadores.

Del desarrollo de esta metodología bajo los supuestos expuestos y su aplicación a la VI Región y a la Comuna de Pichilemu, se concluye que:

- A nivel regional el 8,5% de la superficie de la VI región presenta características favorables para la aplicación de biosólidos, es decir, 138.641 ha de suelos aptos y muy aptos. Si se excluye la superficie sin información que se encuentra representada principalmente por la Cordillera de Los Andes, sólo 28.766 ha de la región no son aptas para la aplicación de biosólidos (poco aptas y no aptas).
- Para el análisis comunal se consideró la localidad de Pichilemu como origen con un radio de aplicación de 50 Km dentro del cual existían 73.561 ha con aptitud de aplicación, es decir, sólo el 53% de la superficie obtenida en el análisis regional. De la superficie anteriormente expuesta sólo el 10% (7.626 ha) no es apta para la aplicación de biosólidos, quedando 65.935 ha con características favorables de aplicación.
- Del análisis económico se desprende que 39.839 ha poseen un costo de transporte y disposición menor o igual que disponerlo en relleno sanitario, quedando sólo 23.987 ha no factibles de aplicación.
- Al considerar el crecimiento diferencial acumulado que se puede esperar al final de la rotación, al aplicar biosólido, la superficie anterior aumenta en 9.952 ha quedando una superficie total de aplicación de 49.792 ha. Este aumento del 15% de superficie de aplicación se debe al aporte de \$1.072 por tonelada de biosólido.

Bajo los resultados generados del análisis económico se desprende que es necesario considerar el aumento de la productividad del bosque al aplicar biosólido ya que se disminuye el costo de disposición debido al valor agregado que se generará al final de la rotación.

Por otra parte, es fundamental considerar que la aplicación de biosólidos en plantaciones forestales genera una utilización benéfica de un residuo industrial que hoy en día es depositado en vertederos o rellenos sanitarios que generan impactos ambientales, de una u otra forma. En el largo plazo no existirá capacidad de almacenamiento para todo el residuo generado, por lo cual aumentarán los costos de disposición y será necesario buscar diferentes alternativas de disposición.

7 BIBLIOGRAFÍA

AGUAS ANDINAS, 2003. Planta la Farfana, Ficha Técnica. [en línea] <http://www.aguasandinas.cl/minisitio_andina/la_farfana/planta_lafarfana.html> [consulta: 15 diciembre 2003].

ALCOTA, C., 2002. Acondicionamiento de biosólidos mediante compostaje. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 175p.

ARAYA, L., 1999. Estabilización de lodos de tratamiento de aguas residuales. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 109p.

BECERRA, J., 2003. 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 para optar al Título de Químico Ambiental, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias. 135p.

BUSTAMANTE, M., 1999. Diseño conceptual de la disposición de lodos y biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Químico. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 42p.

CHRISTCHURCH CITY COUNCIL, 1998. Biosolids to Forests Management Plan. New Zealand.

CHYE, A.; ENVIRONMENT POLICY AND SPARKES, J. 2000. Environment Guidelines: Use and disposal biosolids products. Environment Protection Authority. Sydney. 109p.

COGGER, C.; SULLIVAN, P.; HENRY, C. Y DORSEY, K. 2000. Biosolids Management Guidelines for Washington State. Washington State Department of Ecology. 235p.

CONAMA, 2001. Reglamento para el manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas. 27p.

CONAMA, 1998. Caracterización, reutilización, tratamiento y disposición final de lodos provenientes de planta de tratamiento, para la elaboración de una propuesta de normas técnicas de manejo.

CORTEZ, E., 2003. Fundamentos de ingeniería para el tratamiento de biosólidos generados por la depuración de aguas servidas de la región Metropolitana. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 102p.

INFOR, 2005. Estadísticas Forestales. Sector Forestal Chileno 2002 -2003. Distribución geográfica del recurso forestal. [en línea] <<http://www.infor.cl>> [consulta: 10 Enero 2005].

ESSEL, 2003. Obras y proyectos: Planta de Tratamiento Rancagua. [en línea] <http://www.essel.cl/obras_proyectos/planta_rancagua.asp> [consulta: 1 Mayo 2003].

LEPPE, A., LÓPEZ, A., 2003. Lodos: En busca de un destino. En: XV CONGRESO de Ingeniería Sanitaria y Ambiental: AIDIS - CHILE: Octubre de 2003. Concepción. 11p

LEPPE, A., LÓPEZ, A., NELSON, P., 2001. Lodos provenientes de plantas de aguas servidas: potencialidades y restricciones; temores y realidades. En: XIV CONGRESO de Ingeniería Sanitaria y Ambiental: AIDIS - CHILE: Octubre de 2001. Santiago. 12p

LÓPEZ, A., LEPPE, A., NELSON, P., 2001. Optimización del transporte y disposición de lodos desde planta de tratamiento de aguas servidas. En: XIV CONGRESO de Ingeniería Sanitaria y Ambiental: AIDIS - CHILE: Octubre de 2001. Santiago. 13p

METCALF & EDDY, INC., 1985. Ingeniería Sanitaria: tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. 2^{da} Edición. Barcelona. Editorial Labor, S.A. 969p.

MUÑOZ, E. y MARTÍNEZ R., 2001. Rellenos Sanitarios. [en línea] <<http://cipres.cec.uchile.cl/~edmunoz/rs2.html>> [consulta: 15 diciembre 2003].

NANNIG, J., 2001. Modelación de lodos activados por aireación extendida. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 142p.

SÁNCHEZ, A. Y MORALES, R., 1993. Las Regiones de Chile. Espacio Físico y Humano-Económico. Editorial Universitaria. Chile. 264p.

TORRES, L., 1994. Evaluación económica preliminar del tratamiento de los residuos industriales a nivel nacional. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 139p.

UNIVERSIDAD DE CHILE, 2003. Informe anual Proyecto FONDEF D0111034: Desarrollo de prácticas sustentables de reciclaje de biosólidos en Plantaciones Forestales. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas y Facultad de Ciencias Forestales.

WANG, H., 2001. Annual Report on the biosolids research trial at Rabbit Island. Forest Research. Roturua. New Zealand. 17p.

WHITEHOUSE, L.; WANG, H. Y TOMER, M. 2000. Guidelines for utilisation of sewage effluent on land. Part two: issues for design and management. Rotorua, New Zealand. 180p.