

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

**Memoria de Título**

**EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE  
DISTINTOS TRATAMIENTOS DE BIOSÓLIDOS GENERADOS POR LA  
EMPRESA AGROINDUSTRIAL INVERTEC S.A.**

**María Carolina Reyes Marambio**

**Santiago, Chile**  
**2011**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

**Memoria de Título**

**EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE  
DISTINTOS TRATAMIENTOS DE BIOSÓLIDOS GENERADOS POR LA  
EMPRESA AGROINDUSTRIAL INVERTEC S.A.**

**EVALUATION OF TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY OF  
ALTERNATIVE TREATMENTS OF BIOSOLIDS GENERATED BY THE  
AGRIBUSSINES ENTERPRISE INVERTEC J.S.C.**

**María Carolina Reyes Marambio**

**Santiago, Chile  
2011**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

**Memoria de Título**

**EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE  
DISTINTOS TRATAMIENTOS DE BIOSÓLIDOS GENERADOS POR LA  
EMPRESA AGROINDUSTRIAL INVERTEC S.A.**

Memoria para optar al Título Profesional de  
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

**María Carolina Reyes Marambio**

**PROFESOR GUÍA**

Calificaciones

Pablo Morales P.  
Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Ph.D.

María Teresa Varnero  
Químico Farmacéutica.

**PROFESORES EVALUADORES**

Alejandro León.  
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

**Santiago, Chile**  
**2011**

## INDICE

RESUMEN.....	5
1 INTRODUCCIÓN.....	7
2 ANTECEDENTES GENERALES.....	10
2.1 Tratamientos de Agua.....	10
2.1.1 Situación Internacional y Nacional de los Tratamientos de Agua.....	13
2.2 Tratamientos de Lodos.....	16
2.2.1 Situación Internacional y Nacional de los Tratamientos de Lodos.....	18
2.2.2 Descripción de los Principales Tratamientos de Lodos Utilizados en Chile.	22
3 ANTECEDENTES EMPRESA AGROINDUSTRIAL INVERTEC.....	29
3.1 Descripción de la Empresa.....	29
3.2 Tratamiento de Aguas en Invertec Terra S.A.....	31
3.2.1 Tratamiento Primario de Aguas.....	31
3.2.2 Tratamiento Secundario de Aguas.....	32
3.3 Lodo generado en la Empresa.....	32
4 ESTUDIO TÉCNICO.....	37
4.1 Elección de la Alternativa Tecnológica.....	37
4.2 Descripción de la Tecnología Propuesta.....	37
4.2.1 Temperatura de Funcionamiento.....	38
4.2.2 Tiempo de Retención.....	39
4.3 Calidad del lodo como sustrato para la Digestión Anaeróbica.....	40
4.3.1 Parámetros Químicos.....	40
4.3.2 Parámetros Biológicos.....	48
4.3.3 Parámetros Físicos.....	49
4.4 Dimensionamiento Digestor.....	50
4.5 Instalaciones.....	52
4.6 Resultados Esperados.....	53
4.6.1 Producción de biogás.....	53
4.6.2 Producción de energía a partir de biogás.....	56
4.6.3 Características del lodo obtenido luego de la digestión anaerobia.....	57

4.7	Escenarios de utilización del biogás generado.....	58
4.7.1	Escenario 1: Destrucción térmica del biogás .....	58
4.7.2	Escenario 2: Inyección de biogás a calderas existentes .....	58
5	ESTUDIO FINANCIERO .....	61
5.1	Inversiones.....	61
5.1.1	Inversiones y Costos Anexos Escenario 1 .....	62
5.1.2	Inversiones y Costos Anexos Escenario 2 .....	63
5.2	Costos de Operación y Mantenimiento.....	64
5.3	Ingresos .....	64
5.3.1	Ingresos por venta de bonos de carbono. ....	64
5.3.2	Ingresos por sustitución de combustible .....	66
5.3.3	Ingresos por ahorro en la disposición del lodo en un relleno sanitario.....	66
5.3.4	Ingresos por generación de abono.....	66
5.4	Evaluación de las Alternativas Propuestas .....	67
6	ESTUDIO AMBIENTAL Y LEGAL.....	74
6.1	Consideraciones Legales .....	74
6.1.1	Normativas .....	74
6.1.2	Autorizaciones y Permisos.....	75
6.1.3	Futura normativa de manejo de lodos D.S. N°123/2006 .....	76
6.2	Consideraciones Ambientales .....	78
6.2.1	Impactos ambientales causados en la etapa de construcción del proyecto ....	78
6.2.2	Impactos ambientales causados en la etapa de operación del proyecto.....	79
7	CONCLUSIONES.....	80
8	BIBLIOGRAFÍA .....	82
9	ANEXOS .....	87

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se realiza una evaluación de la factibilidad técnica y económica de distintos tratamientos para los biosólidos generados por la empresa agroindustrial Invertec S.A. Esto con el fin de proponer una alternativa viable que permita a la Empresa gestionar adecuadamente el problema del manejo de lodos provenientes del sistema de tratamientos de aguas utilizado.

Este trabajo se realizó por medio de revisiones bibliográficas de literatura especializada y otros trabajos de investigación que se han realizado acerca de este tema. Sumado a esto, se consultaron los precios de mercado, a empresas dedicadas a la consultoría medioambiental.

Se evaluaron los siguientes tratamientos de lodos: estabilización con cal, digestión aeróbica, digestión anaeróbica y compostaje; cumpliendo todos el objetivo de estabilización de lodos. Se concluyó que la mejor alternativa de tratamiento para la realidad de la Empresa es la digestión anaeróbica. Se propone que se implemente un digestor de alta carga, de 1.250 m<sup>3</sup>, que funcione a 37°C y con un período de retención de 22 días

Implementando este biodigestor, se espera que se generen 673.251 metros cúbicos de biogás, equivalentes a 15.629 millones de BTU. Se evaluaron dos escenarios de utilización del biogás generado, por medio de la herramienta de toma de decisiones valor actual neto (VAN), luego de realizar un flujo de caja puro. El resultado obtenido, es que el utilizar el biogás como sustituto de combustibles fósiles en una caldera, además de vender bonos de carbono, y la generación de abono resulta ser una alternativa rentable económicamente para la Empresa Invertec S.A.

## **PALABRAS CLAVE**

Lodos, Biosólidos, Digestión Anaeróbica, Biogás.

## ABSTRACT

In this study, is evaluated the technical and economic feasibility of different treatments for biosolids produced by the agribusiness enterprise, Invertec J.S.C. The purpose of this study is to propose a practical solution, allowing the enterprise to properly handle problematic secondary sludges that come from the utilized water treatment system.

This study was made by reviewing specialized literature and other research studies regarding this topic. Additionally, market prices were researched in regards to the sale of anaerobic digestive solutions.

The following secondary sludge treatments were evaluated: lime stabilization, aerobic digestion, and anaerobic digestion and composting. Each treatment fulfilled all of the stabilization purposes of secondary sludges. It was concluded that the best alternative treatment for the current process is anaerobic digestion. It was proposed to use a high-capacity digester, of 1.20 m<sup>3</sup>, that works at 37°C for a retention period of 22 days.

By implementing this biodigester, it is expected that 673. 251 m<sup>3</sup> of biogas are generated, which is equivalent to 15.629 million BTU. The scenarios were analyzed for the use of the produced biogas by evaluating a cash flow for the net present value. The result is that the use of biogas as a substitute for fossil fuels in a boiler, in addition to selling carbon credits and the generation of fertilizer is to be an economically viable alternative for enterprise Invertec J.S.C.

## KEYWORDS

Secondary sludge, Biosolids, Anaerobic Digestion, Biogas.

## 1 INTRODUCCIÓN

El termino agroindustria se utiliza para distinguir dentro del sector industrial al grupo de empresas que utiliza como materias primas productos agrícolas. Esta actividad económica es muy importante para Chile. El año 2008 este sector alcanzó los US\$ 18.757 millones en exportaciones. (Bravo, 2010)

Sumado a las exportaciones, este sector también aporta al país bastantes puestos de trabajo. Para el año 2009, se estima que este sector ofreció 600 mil plazas de trabajo, las cuales en su gran mayoría son ocupadas por mujeres. (Álvarez, 2009)

La agroindustria es también uno de los sectores más dinámicos de la economía nacional, lo que implica un crecimiento permanente en la producción. Estudios de Bravo (2010) indican que las exportaciones de fruta industrializada a aumentado durante los años 2001 a 2008 en un 245% y dada las condiciones de nuestro país, se prevé que sigan aumentando. Este aumento de producción conlleva también, a un crecimiento constante de los residuos que se generan en el proceso productivo.

Los principales residuos que se producen en este tipo de industrias, son los líquidos y los sólidos. Los residuos sólidos se componen principalmente de restos de frutas y verduras; y producto de los tratamientos de agua, se generan grandes cantidades de un residuo orgánico llamado lodo. (CONAMA, 1998)

Los lodos son residuos semisólidos, que contienen microorganismos y sus productos. Estos son generados en las plantas de tratamientos de aguas, siendo el tratamiento más utilizado el de lodos activos. En este tratamiento, el agua residual es mezclada con bacterias en un ambiente aeróbico, las cuales, degradan gran parte de la materia orgánica contenida en los riles; y como productos finales de este tratamiento se obtiene agua residual tratada y lodo,



finalmente parte de este residuo es recirculado al tratamiento y la fracción restante es purgada del sistema. (Metcalf & Eddy, 2003)

El tratamiento de lodos activos produce una gran cantidad de biosólidos, Yasuko (2006) afirma que por cada milígramo de materia orgánica biodegradada mediante este tratamiento, se generan alrededor de 0,5 a 0,8 miligramos de nuevas células, que componen los llamados biosólidos o lodos.

Este residuo actualmente constituye un gasto para las empresas, ya que deben costear tanto el transporte como la disposición en rellenos sanitarios, desaprovechando el potencial energético y agronómico contenido en este residuo.

Ésta es la realidad de la Empresa Invertec S.A Planta Rengo, empresa agroindustrial dedicada al procesamiento de frutas y hortalizas para la producción de deshidratados, congelados y jugos. Actualmente, para el tratamiento de sus Riles (residuos industriales líquidos) se cuenta con un reactor de lodos activados, y los residuos generados por éste (lodos), están siendo dispuestos en un Monorrelleno.

El costo de llevar los lodos al Monorelleno, sumado al costo de disposición de éstos, hace que esta alternativa de manejo de lodos sea costosa para la Empresa, y por ende, se genere el interés de buscar otras alternativas para el tratamiento de los biosólidos generados en el proceso de depuración de los Riles.

En consecuencia, el propósito de este trabajo, es realizar una evaluación técnica y económica de las distintas alternativas de tratamientos de los biosólidos generados por la empresa agroindustrial INVERTEC, que tienen por finalidad estabilizarlos y adicionalmente, obtener subproductos útiles que puedan ser reincorporados al proceso productivo; dando así respuesta a las necesidades de la Empresa Invertec S.A. respecto al problema del manejo de biosólidos.

### Objetivo General

Evaluar la factibilidad técnica y económica de tratamientos de biosólidos generados por la Empresa Invertec S.A.

### Objetivos Específicos

1. Evaluar la factibilidad técnica de la implementación de una planta de tratamiento de biosólidos en la Empresa Invertec S.A.
2. Evaluar aspectos legales y ambientales de la implementación de una planta de tratamiento de lodo en la Empresa Invertec S.A.
3. Evaluar los aspectos financieros de una planta de tratamiento de lodo en la Empresa Invertec S.A.

## 2 ANTECEDENTES GENERALES

### 2.1 Tratamientos de Agua

El objetivo principal de los sistemas de tratamientos de aguas servidas, es devolver un efluente inocuo al medio ambiente, que no genere problemas de salud en la población ni degrade las condiciones ambientales iniciales del sector, en donde se realice la descarga. Para esto, es necesario remover sustancias que pudieran afectar el cumplimiento de este objetivo, existiendo para su logro, diversos sistemas de tratamientos de aguas. (Metcalf & Eddy, 1996)

Los tratamientos de agua pueden clasificarse en tres categorías distintas, en función del tipo de proceso que se utiliza, de acuerdo al tipo de contaminante que se desee remover, y finalmente, el grado de tratamiento que se utilice. A continuación se realizará una descripción de estas clasificaciones en base a los estudios de Metcalf & Eddy (1996).

- a. Clasificación de acuerdo al tipo de proceso que se utiliza: La primera clasificación que puede realizarse es si se utilizan procesos físicos, biológicos o químicos; los que pueden utilizarse tanto en conjunto como por separado. A continuación se realiza una pequeña descripción de cada uno de ellos:
  - Operaciones Físicas Unitarias: En este tipo de tratamiento, predomina la acción de fuerzas físicas. Dentro de esta categoría se encuentran tratamientos como el desbaste, mezclado, floculación, sedimentación, flotación, transferencia de gases y filtración.
  - Procesos Químicos Unitarios: En esta categoría se incluyen los procesos en los que, para eliminar un contaminante, se adicionan productos químicos, o se desarrollan reacciones químicas. Los tratamientos químicos más utilizados son la precipitación, adsorción y desinfección.

- Procesos Biológicos Unitarios: Estos tratamientos se caracterizan por utilizar la actividad biológica para eliminar contaminantes. Su principal aplicación es eliminar sustancias orgánicas biodegradables presentes en el agua residual. Lo que se busca por medio de estos procesos, es convertir estos contaminantes en gases que se liberen a la atmósfera y en tejido celular biológico que se elimina por sedimentación.
- b. Clasificación de acuerdo al tipo de contaminante que se desea remover: El segundo tipo de clasificación que puede realizarse es en función del tipo de contaminante que se desee remover. Estos se encuentran mencionados en el cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación de los tratamientos de aguas existentes en función del tipo de contaminante que se desea remover. (Continúa)

<b>Contaminante</b>	<b>Operación Unitaria, Proceso Unitario o Sistema de Tratamiento</b>
Sólidos en suspensión	Desbaste y dilaceración
	Desarenado
	Sedimentación
	Filtración
	Flotación
	Adición de polímeros
	Coagulación
	Sistemas Naturales (evacuación al terreno)
	Materia orgánica biodegradable
Película Fija: Filtros percoladores o Biodiscos	
Lagunaje	
Filtración en arena	
Sistemas físico-químicos	
Sistemas naturales	
Compuestos orgánicos volátiles	Arrastre por aire
	Tratamiento de gases
	Adsorción de carbón

Cuadro 1. Clasificación de los tratamientos de aguas existentes en función del tipo de contaminante que se desea remover. (Continuación)

Contaminante	Operación Unitaria, Proceso Unitario o Sistema de Tratamiento
Patógenos	Cloración
	Hipocloración
	Cloruro de bromo
	Ozonación
	Radiación UV
	Sistemas naturales
Nutrientes: Nitrógeno	Variantes de cultivo en suspensión con nitrificación y desnitrificación
	Variantes de sistemas de película fija con nitrificación y desnitrificación
	Arrastre de amoníaco
	Cloración al breakpoint
Nutrientes: Fósforo	Adición de sales metálicas
	Coagulación y sedimentación con cal
	Eliminación biológica del fósforo
	Eliminación biológica-química del fósforo
Nutrientes: Nitrógeno y fósforo	Eliminación biológica de nutrientes
Materia orgánica refractaria	Adsorción en carbón
	Ozonación terciaria
	Sistemas naturales
Metales pesados	Precipitación química
	Intercambio iónico
Sólidos orgánicos disueltos	Intercambio iónico
	Ósmosis inversa
	Electrodialisis

Fuente: Metcalf & Eddy, 2003

- c. Clasificación de acuerdo al grado de tratamiento que se aplica:
- Pre tratamientos: Éstos buscan remover del afluente elementos de gran tamaño que puedan entorpecer el funcionamiento de tratamientos posteriores. Ejemplos de este tipo de tratamiento es el desbaste y dilaceración, para la eliminación de sólidos gruesos, la flotación para la eliminación de grasas y el desarenado, que busca remover materia en suspensión gruesa.
  - Tratamientos Primarios: Estos son utilizados para remover sólidos suspendidos y materia orgánica del agua residual. Esta remoción es generalmente realizada por medio de operaciones físicas como el tamizado y sedimentación. Generalmente, es utilizado como una etapa previa a los tratamientos secundarios.
  - Tratamientos Secundarios: Este tratamiento se enfoca principalmente en eliminar sólidos en suspensión y compuestos orgánicos biodegradables de las aguas residuales. Los tratamientos secundarios más utilizados son: Los lodos activados, reactores de lecho fijo y los sistemas de lagunaje. Generalmente a estos tratamientos se les adicionan mecanismos para la eliminación de nutrientes presentes en el agua.
  - Tratamiento Terciario: Se encuentran dentro de esta categoría, todos los tratamientos adicionales a los tratamientos secundarios mencionados, que son necesarios de llevar a cabo para eliminar sólidos suspendidos y sustancias disueltas que no fueron removidas con los procesos anteriores.

### **2.1.1 Situación Internacional y Nacional de los Tratamientos de Agua**

Según Metcalf & Eddy (1996), en Estados Unidos, durante los últimos 40 años casi se ha triplicado el número de plantas de tratamiento de aguas servidas, debido principalmente a la promulgación del decreto federal “*Clean Water Act*” el cual generó importantes cambios en el control de las aguas servidas. Actualmente, en este país existen aproximadamente 15.000 plantas de tratamiento funcionando, siendo más numerosas las que tratan menos de 3.800 m<sup>3</sup> al día, éstas corresponden al 81% del total de plantas de tratamiento. Se prevé que este porcentaje no sufra mayores cambios durante los próximos 20 años, y además de esto, el número de plantas de tratamiento funcionando aumente en un 10%.

Respecto al grado de tratamiento, en este país el tratamiento secundario es el que tiene una mayor presencia respecto a los demás tratamientos existentes, ocupando el 54% del total de plantas. Referente a las tendencias esperadas, se proyecta que el número de plantas con tratamiento primario disminuya en el tiempo, ya que se espera que estas evoluciones a plantas con tratamiento secundario.

En relación a Latinoamérica, estudios de Reynolds, K. (2002) informan que sólo al 10% de las aguas servidas recolectadas se les aplica algún tipo de tratamiento, además de esto, se duda de la eficiencia de los métodos empleados, dando como ejemplo el caso de México, donde solo un 5% de las plantas de tratamiento estudiadas operan de manera satisfactoria.

En Chile, la construcción de plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS), comenzó a masificarse en la década de los años noventa. El tipo de tratamiento utilizado, varía en función del tipo de clima en la que está localizada la PTAS es así como, en la zona norte de nuestro país, se utilizan principalmente lagunas de aireación como tratamiento secundario, a diferencia de la zona sur, en donde se ha masificado la utilización de sistemas de lodos activados.

Los procesos de tratamiento más utilizados en Chile, de acuerdo a estudios estadísticos de Baraño y Tapia (2004) son:

1. Pre-tratamientos:

- a. Rejas: En Chile, alrededor del 64% de las PTAS tiene algún tipo de pre tratamiento, siendo el más usado las rejas, en donde se interceptan sólidos gruesos, plásticos, ramas y otros elementos que puedan provocar daño en las tuberías o en otras instalaciones de la PTAS. Estas rejas pueden tener más de un tamaño de tamiz y ser manuales o automáticas
- b. Desarenadores: Otro pre-tratamiento muy utilizado es el desarenador, presente en un 45% de las PTAS catastradas en el estudio de Baraño y Tapia (2004). Este pre-tratamiento se utiliza para evitar la abrasión que provoca la arena en las tuberías, y evitar su acumulación en los estanques.
- c. Desgrasadores: Es el tratamiento menos utilizado en las PTAS del país, presente sólo en un 23% del total. Estos típicamente utilizan un sistema de flotación.

## 2. Tratamientos Primarios:

- a. Tanques de Sedimentación: En Chile, sólo un 11% de las PTAS utilizan un sistema de tratamiento primario, siendo el más utilizado los tanques de sedimentación, que buscan reducir el contenido de sólidos en suspensión del agua utilizando, el principio de que si un sólido tiene un peso específico mayor que el agua que lo contiene, tiende a decantar, por lo que transcurriendo un período de tiempo, es posible removerlo de la base del estanque que contiene el agua servida.

## 3. Tratamientos Secundarios:

- a. Lodos Activados: Dentro de estos tratamientos, el más común es el de lodos activados, utilizado en el 61% de las PTAS. Este tratamiento busca estabilizar la materia orgánica contenida en el afluente, manteniendo el reactor en condiciones aeróbicas, lo que se logra gracias a difusores de aire o sistemas mecánicos de aireación. Posteriormente a esto, la masa biológica resultante se separa del agua en un tanque de sedimentación, en donde parte de los sólidos sedimentados vuelven al reactor y otra parte, es purgada. Dentro de sus variaciones, la más utilizada es la de aireación extendida, alcanzando un 62% del total nacional.
- b. Lagunas de Aireación: este tratamiento es utilizado en un 23% de las PTAS. Principalmente, es usado en comunidades pequeñas de la zona centro-norte del país. Dentro de sus variantes, la más utilizada son las lagunas aireadas, las que alcanzan un 75% del total.

4. Tratamientos terciarios: en Chile, solo el 8% de las PTAS utiliza este tipo de tratamiento, siendo las más usadas la remoción biológica de nitrógeno y fósforo, 65% del total y la remoción química de fósforo, 30% del total.

Actualmente en Chile, el tratamiento de aguas servidas es un tema que se espera, llegara un 99% de cobertura en los próximos años. (Mena, 2002)



## 2.2 Tratamientos de Lodos

Los lodos son residuos provenientes de los tratamientos de aguas servidas. Este es un residuo semisólido, que constituye el de mayor volumen de los desechos de este tipo de tratamiento. El lodo proveniente de plantas de lodos activados se conoce como lodo secundario, y sus principales características son tener un color marrón y apariencia floculenta, y si no ha comenzado a degradarse, tiene un olor a tierra húmeda. (Metcalf & Eddy, 2003)

Los tratamientos de lodos existentes en la actualidad, pueden ser clasificados en función del objetivo que buscan alcanzar. Estos objetivos, con los tratamientos generalmente utilizados para lograrlos, están indicados en el cuadro 2.

Cuadro 2 Alternativas de tratamiento para procesar el lodo.

(Continúa)

Proceso	Método de Tratamiento
Operaciones Preliminares	Bombeo de Fangos
	Trituración de Fangos
	Almacenamiento y homogeneización de fangos
	Desarenado de Fangos
Espesamiento	Espesamiento por Gravedad
	Espesamiento por Flotación
	Centrifugación
	Espesamiento con Filtros de Banda
	Espesamiento con Tambor Giratorio
Estabilización	Estabilización con Cal
	Tratamiento Térmico
	Digestión Anaerobia
	Digestión Aerobia

Fuente: Metcalf & Eddy, 2003

Cuadro 2. Alternativas de tratamiento para procesar el lodo.

(Continuación)

Proceso	Método de Tratamiento
	Compostaje
Acondicionamiento	Acondicionamiento Térmico
	Acondicionamiento Químico
Desinfección	Pasteurización
	Almacenamiento por Largos Períodos
Deshidratación	Filtro al Vacío
	Centrífuga
	Filtro de Banda
	Filtro de Prensa
	Eras de Secado
	Lagunaje
Secado Térmico	Variantes de Hornos de Secado
	Evaporador de Efecto Múltiple
Reducción Térmica	Incinerador de Pisos
	Incinerador de Lecho Fluidificado
	Incineración Conjunta de Residuos Sólidos
	Oxidación por Vía Húmeda
	Reactor Vertical Profundo
Evacuación Final	Evacuación al Terreno
	Distribución y Comercialización
	Vertedero Controlado
	Lagunaje
	Fijación Química

Fuente: Metcalf &amp; Eddy, 2003

En el caso de la estabilización de lodos, los tratamientos indicados deben reducir en el sustrato a tratar, la carga patógena presente, eliminar su potencial generación de olores, controlar la potencial putrefacción de la materia orgánica que lo compone y disminuir la atracción de vectores sanitarios. (Qasim, 1985)

### 2.2.1 Situación Internacional y Nacional de los Tratamientos de Lodos

La disposición de lodos a nivel mundial actualmente, tiene preocupados a gran parte de los países Europeos y a Estados Unidos. Según estudios de Aguilera y Rodríguez (2005), el mayor productor de lodos es Estados Unidos con 6.856.000 toneladas, seguido por lejos por Alemania con 2.681.000 toneladas. Los países con mayor generación de lodo, medido en porcentaje se indican en la figura 1.

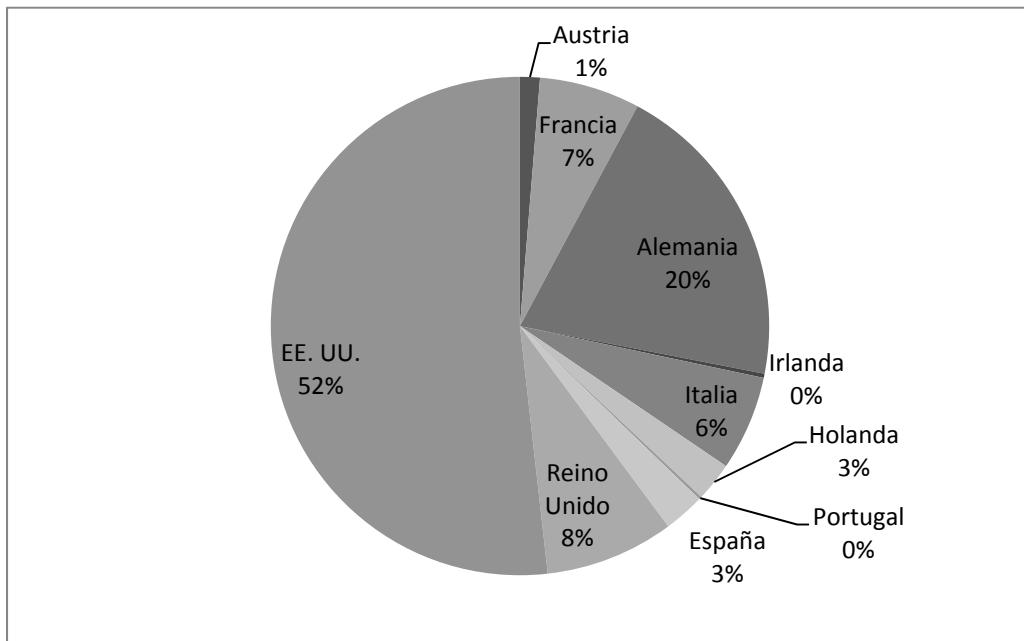


Figura 1. Producción de lodos a nivel mundial

Fuente: Aguilera y Rodríguez, 2005.

Respecto a la disposición final, gran parte de los biosólidos generados se emplean en la agricultura a nivel mundial, siguiendo la disposición en rellenos sanitarios, como se observa en la figura 2.

En lo referente a destinación final de lodos por país, los países que destinan en mayor medida sus biosólidos a la agricultura son Francia, Estados Unidos y España; los que destinan una mayor parte a rellenos, son Italia y Alemania; la incineración y vertido al mar, es una medida poco utilizada a nivel mundial. El detalle de lo indicado, se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3. Distribución de biosólidos de acuerdo al destino final.

	Miles de Toneladas	Agricultura	Relleno	Incineración	Mar	Otros
Austria	170	18%	35%	34%	0%	13%
Francia	865	58%	27%	15%	0%	0%
Alemania	2681	27%	54%	14%	0%	0%
Irlanda	36	12%	45%	0%	35%	8%
Italia	816	33%	55%	2%	0%	10%
Holanda	335	26%	51%	3%	0%	20%
Portugal	25	11%	29%	0%	2%	58%
España	350	50%	35%	5%	10%	0%
Reino Unido	1107	44%	8%	7%	30%	11%
EE. UU.	6856	54%	18%	19%	0%	9%

Fuente: Aguilera y Rodríguez, 2005.

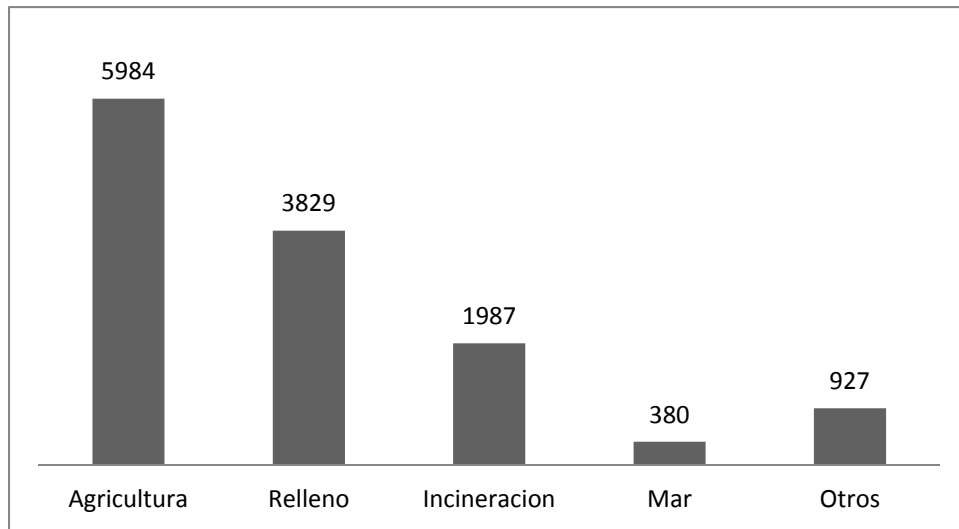


Figura 2. Disposición final de biosólidos a nivel mundial.

Fuente: Aguilera y Rodríguez, 2005.

Producto del aumento de la cobertura de tratamientos de aguas, se espera que cuando se logre un 99% de cobertura, se generen en Chile aproximadamente 250.00 toneladas por año, produciéndose aproximadamente un 40% del total, solo en la Región Metropolitana. (Mena, 2002)

Actualmente en Chile, se desperdicia el potencial agronómico y energético de lodos, debido a que la mayor parte de estos está siendo destinada a vertederos. (Aguilera y Rodríguez, 2005) Pero debido al aumento sostenido de la producción de este residuo, ésta no es una solución ambientalmente sostenible en el tiempo, ya que se perderán cantidades enormes tanto de energía como de fertilizante.

Respecto a los tratamientos de lodo, en Chile, según lo indicado en estudios de Barañao y Tapia (2004), utilizan algún sistema de tratamiento:

- El 60% de las PTAS que usan el sistema de lodos activados convencional.
- el 25% de las PTAS que emplean plantas de lodos activados con la modificación de de aireación extendida (esta modificación consiste en reducir la carga orgánica de la alimentación del reactor y aumentar el período de aireación en éste).
- el 40% de las PTAS que utilizan plantas con medio fijo. Este proceso se utiliza para eliminar la materia orgánica presente en el agua residual y llevar a cabo el proceso de nitrificación (convertir los nitratos en nitritos). Este tipo de proceso engloba los siguientes tratamientos: Filtros percoladores, filtros de pretratamiento, biodiscos y reactores de nitrificación de lecho fijo.

Dentro de los tratamientos de estabilización anteriormente mencionados, en Chile, el más utilizado es la digestión aeróbica, utilizada en un 80% de las PTAS siguiéndole la digestión anaeróbica, que es la alternativa más utilizada en grandes plantas de tratamiento, debido a que los costos operacionales son menores y se puede recuperar energía a través del metano.

Respecto a los tratamientos para deshidratar de lodos, el 95% de las PTAS realiza algún proceso destinado a reducir el volumen de este residuo. Dentro de los procesos más utilizados está el espesamiento gravitacional, presente en un 53% de las PTAS que realizan algún tratamiento de deshidratación; le siguen la deshidratación mecánica que alcanza un 42%, y las tecnologías más utilizadas son centrífugas, que son empleadas en un 64% de los casos, y un 36% corresponde a filtros de banda o filtros prensa.

Sobre las estabilizaciones adicionales a los lodos, sólo un 3% de las PTAS realiza esta acción, utilizando principalmente estabilización con cal.

## 2.2.2 Descripción de los Principales Tratamientos de Lodos Utilizados en Chile.

A continuación, se describirán los principales tratamientos que se realizan en Chile para estabilizar los lodos generados en tratamientos primarios y secundarios de aguas, identificados en los estudios de Baraña y Tapia (2004), de acuerdo a la información entregada por Metcalf & Eddy (2003). En conjunto a esta descripción general, se incluyen las indicaciones descritas en el futuro reglamento de lodos DS N° 123/2006., que aseguran una adecuada estabilización de lodos:

**2.2.2.1 Estabilización con Cal:** Este tratamiento químico busca estabilizar los lodos, aumentando su nivel de pH hasta 12 por medio de la adición de cal (se utiliza tanto cal hidratada como cal viva,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $\text{CaO}$  respectivamente), creando un entorno en donde los microorganismos no pueden sobrevivir, es así como, manteniendo el pH en este nivel, el lodo no se pudrirá, no generara olores ni afectará la salud pública.

Para estabilizar los lodos por medio de cal, se utilizan dos métodos:

- Pretratamiento con Cal: En esta metodología, se adiciona la cal antes de que el lodo ingrese a un tratamiento de deshidratación. Esta forma de tratar el lodo, necesita de una mayor cantidad de cal, debido a que el lodo está en un estado semilíquido.
- Postratamiento con Cal: En esta metodología, se adiciona la cal posteriormente a que el lodo haya ingresado a un tratamiento de deshidratación. Esta mezcla se realiza en un mezclador de paleta, o en un transportador de tornillo. En esta forma de tratar el lodo, se recomienda el uso de cal viva, ya que genera una reacción exotérmica al estar en contacto con el agua, lo que eleva la temperatura del lodo por encima de los 50 °C, lo que permite eliminar los huevos de gusanos presentes en el lodo.

El DS N° 123/2006 estipula que se considerará un lodo estabilizado por medio de este método, si se ha cumplido que se mantenga el pH elevado a 12 o más, por al menos un período de tiempo de dos horas luego, se debe mantener el pH como mínimo a 11,5 por al menos, un período de 22 horas. Para que el lodo sea considerado como clase A, además de mantener el pH a 12 por 72 horas, es necesario aumentar la temperatura de los lodos durante 12 horas a 52°C, y finalmente, debe secarse al aire para obtener un contenido de sólidos mínimo del 50%. Entre otras restricciones.

Las ventajas de este método son:

- La reducción de patógenos que alcanza a un 99%. (Qasim, 1985)
- El olor propio de los lodos que se reduce considerablemente al mantener el pH elevado con cal. (Qasim, 1985)

Las desventajas de este método son:

- Este no es un tratamiento que asegure una estabilización permanente de lodos, como afirma Aguilera y Rodríguez (2005). Con la disminución del pH se puede generar nuevamente una proliferación de microorganismos y olores.
- Se requieren grandes cantidades de cal para lograr la estabilización del lodo. Usualmente se adicionan al lodo 0,25 kilos de cal viva por kilo de sólido seco de fangos provenientes de el tratamiento de lodos activados. Esto eleva los costos de transporte y disposición final. (Qasim, 1985)
- El lodo resultante es únicamente aplicable a suelos ácidos. (Mahamud *et al.*, 1996)

**2.2.2.2 Digestión Aeróbica:** El proceso de digestión aeróbica de lodos es similar al tratamiento de lodos activos dado a las aguas residuales. En este proceso, grupos de bacterias en presencia de oxígeno actúan sobre la materia orgánica, transformándola en un producto final estabilizado y en materia celular. La fórmula general de este proceso se muestra en la figura 3.



Figura 3. Fórmula general de oxidación y síntesis presente en la digestión aeróbica.

Fuente: Metcalf & Eddy, 2003

Los objetivos de este tratamiento son disminuir la materia volátil presente en el lodo y mineralizar la fracción orgánica presente en éste y concentrarlo.



Los tanques de digestión aerobia pueden ser circulares o rectangulares, con o sin cubierta (en el caso de climas fríos ésta ayuda al mantenimiento de la temperatura). Los tanques van provistos de equipos de aireación de tipo turbina o difusores, para mantener las condiciones aerobias. Cada tanque tiene una turbina de alimentación de fangos a media profundidad y tras un tiempo de retención, el fango estabilizado se conduce mediante otra tubería a un espesador. Los fangos espesados pueden o no, ser recirculados, siendo lo primero lo más habitual. La mayor parte de los digestores funcionan en un régimen de mezcla completa, tomando como base de diseño la reducción de sólidos volátiles.

Actualmente, existen dos variantes de este proceso, la digestión aerobia convencional y la digestión aerobia con oxígeno puro. La más utilizada actualmente en el tratamiento de fangos, es la digestión aerobia convencional.

Las ventajas de este método son (basado en Mahamud *et al.*, 1996):

- Tiene bajos costos de instalación.
- Tiene una operación simple.
- Buena desinfección del lodo.
- Baja generación de olores.
- Reducción de la masa total del lodo, aproximadamente en un 47% (Cortez, 2003)
- Se genera un lodo con buenas características fertilizantes.

Las desventajas de este método son (basado en Mahamud *et al.*, 1996):

- Altos costos energéticos de operación, debido a los suministros de oxígeno y requerimientos de mezcla.
- Los sólidos volátiles se reducen en una menor proporción que en la digestión anaerobia.
- En algunas ocasiones es necesaria la adición de álcali para reducir la bajada del pH.
- Existe la posibilidad de producción de espumas.
- Los patógenos pueden dispersarse por medio de aerosoles.
- El lodo resultante es difícil de deshidratar por medios mecánicos.
- Las bajas temperaturas podrían afectar el funcionamiento del digestor.
- Debido al proceso, se genera una gran cantidad de ruido.

El DS N° 123/2006 estipula que se considerará un lodo estabilizado por medio de este método, si se han cumplido las siguientes condiciones. La tasa máxima de consumo de oxígeno debe ser igual o menor a 1,5 mg de oxígeno por hora, por gramo de sólidos totales a una temperatura de 20°C. Este indicador está hecho especialmente para lodos provenientes de tratamientos de lodos activados tipo aireación extendida. Además de esto, en el caso de ser una digestión aerobia termofílica, para ser considerado un lodo clase A, debe estar en el digestor por lo menos 10 días a una temperatura entre 55°C y 60°C. Entre otras restricciones.

**2.2.2.3 Digestión Anaeróbica:** En este proceso, la materia orgánica contenida en el fango se convierte, en un ambiente sin oxígeno, en metano y dióxido de carbono. Este proceso se efectúa en un reactor completamente cerrado. Los lodos pueden ser introducidos a este reactor de forma continua o discontinua, y se mantienen dentro del reactor durante períodos variables. El resultado de este proceso, es un fango con bajas concentraciones de materia orgánica y patógena, y no es putrescible. (Metcalf &Eddy, 2003)

Los digestores más empleados son los de baja y alta carga. En el primer tipo de reactor, el lodo no se calienta ni mezcla, y los períodos de residencia varían entre 30 y 60 días. A diferencia del primer tipo, en los digestores de alta carga, los lodos son mezclados y calentados, disminuyendo los tiempos de residencia del lodo a 15 días aproximadamente. Existe un tercer tipo de proceso de digestión anaerobia, llamado doble etapa, que consiste en la combinación de los dos tipos de reactor descritos anteriormente. En la segunda etapa se separan los lodos digeridos del líquido sobrenadante. (Metcalf &Eddy, 2003)

La conversión biológica del lodo se produce en tres etapas, éstas son (basado en Metcalf &Eddy, 2003):

- Hidrólisis: Esta etapa consiste en la transformación por vía enzimática de los compuestos de alto peso molecular como polímeros orgánicos y lípidos, en compuestos que sirvan como fuentes de energía y de carbono celular, tales como monosacáridos, aminoácidos y compuestos relacionados.
- Acidogénesis: En esta etapa las bacterias convierten los compuestos producidos en la etapa anterior en ácidos orgánicos simples, los cuales son compuestos intermedios de menor peso molecular, siendo el más común el ácido acético.

- **Metanogénesis:** En esta etapa las bacterias transforman los compuestos formados en la Acidogénesis en compuestos más simples, principalmente metano y dióxido de carbono. Estas bacterias son conocidas como metanogénicas, siendo los principales géneros encontrados los bastoncillos y las esferas. Las más importantes de este grupo son las que degradan el ácido acético y el ácido propiónico, siendo su metabolismo un factor limitante del proceso.

Las ventajas de este método son (basado en Mahamud *et al.*, 1996):

- Importante reducción de los sólidos volátiles.
- Se genera metano, elemento que puede usarse como fuente de energía, disminuyendo los costos de operación.
- Gran reducción de los microorganismos patógenos.
- Se produce un lodo estabilizado con excelentes propiedades agronómicas.
- El fango resultante ocupa menos volumen, y puede deshidratarse más fácilmente que el generado en la digestión aeróbica. Se reduce hasta un 77% según estudios de Cortez (2003).

Las desventajas de este método son (basado en Mahamud *et al.*, 1996):

- Altos costos de inversión.
- Pueden depositarse minerales en el reactor, y existe la posibilidad de formación de espumas.
- Existen muchos factores que pueden inhibir el proceso.

El DS N° 123/2006 estipula que para obtener un lodo clase A por medio de la digestión anaeróbica, se deben reducir los sólidos volátiles en un 38%, entre otras restricciones.

**2.2.2.4 Compostaje:** El compostaje es un proceso biológico, aerobio y termófilo, en el que la materia orgánica se degrada bajo condiciones controladas hasta obtener un material estabilizado con características similares al humus, el cual es un reconocido fertilizante y mejorador de la estructura del suelo.

Aproximadamente un 30 por ciento de los sólidos volátiles iniciales del lodo se convierten en dióxido de carbono y agua, y a medida que la degradación biológica se lleva a cabo, el lodo comienza a calentarse hasta temperaturas que aseguran la pasteurización (entre 50° y 70° grados Celsius).

Los factores que determinan el tipo de sistema de compostaje a emplear, son:

- Periodicidad de la producción de lodo.
- Disponibilidad de terreno para implementar el sistema de compostaje.
- Naturaleza del fango a compostar.
- La existencia de un método de estabilización previo al compostaje. Este factor es muy importante, ya que la existencia de un método previo de estabilización, puede disminuir las instalaciones en un 40 por ciento.

En este proceso existen tres fases de actividad, con diferentes temperaturas asociadas, éstas son la etapa mesofílica, termofílica y enfriamiento.

Los microorganismos que actúan son:

- Bacterias: A pesar que el conocimiento de las relaciones entre los microorganismos responsables del proceso de compostaje no es completo, al parecer las bacterias son las responsables de la descomposición de proteínas, lípidos y grasas; y la energía calorífica producida.
- Actinomicetos y hongos: Las poblaciones de estos microorganismos son variables durante el proceso. Son los responsables de la degradación de materia orgánica compleja y de la celulosa.

En una primera instancia, para comenzar el proceso de compostaje, se mezcla el fango previamente deshidratado con material de enmienda o soporte que tiene por finalidad, facilitar la aireación del material. Con esta mezcla se forman las pilas de compostaje. Éstas pueden ser pilas aireadas, volteadas o sistemas mecánicos cerrados. Luego de formadas estas pilas es necesario airearlas, tanto como para acelerar el proceso, bajar la temperatura y eliminar el exceso de humedad, esto se realiza ya sea por inyección de aire o por volteo mecánico, o ambas. Por medio de este sistema, el lodo comienza su degradación a un material estable, y una vez finalizado este proceso puede almacenarse.

El DS N° 123/2006 estipula que para obtener un lodo clase A, usando el tratamiento de compostaje, se deben seguir las siguientes indicaciones según el método a utilizar. En el caso del método de confinamiento o pilas estáticas, el lodo debe mantenerse a una temperatura mínima de 55 °C por tres días. Si se utilizan pilas de volteo esta temperatura debe mantenerse por lo menos 15 días, y las pilas deben voltearse mínimo 5 veces. Entre otras restricciones generales.

Las ventajas de este método son (basado en Mahamud *et al.*, 1996):

- Se obtiene un producto de excelente calidad para ser usado como fertilizante en suelos agrícolas.
- Este tratamiento funciona muy bien como complemento de otros procesos de estabilización.
- Los costos iniciales son muy bajos.

Las desventajas de este método son (basado en Mahamud *et al.*, 1996):

- Requiere que el lodo tenga un contenido de sólidos entre un 40 y 60 por ciento, por tanto se necesita implementar previamente un tratamiento de deshidratación, e incorporar material de soporte.
- Debido a los sistemas de aireación o de volteado mecánico, puede existir una dispersión de patógenos por medio del polvo.
- Grandes requerimientos de terreno.

## 2.3 ANTECEDENTES EMPRESA AGROINDUSTRIAL INVERTEC

### 2.4 Descripción de la Empresa

Los orígenes de la Empresa Invertec Terra S.A. comienzan con la llegada a Chile de las Empresas Montanari; las que en un inicio, enfocaron sus actividades en la industria metalmeccánica. Luego de esta época, se inicia una reformulación de las líneas de negocio de este grupo, debido a las características agropecuarias de nuestro país. Es por esto que en el año 1987, el grupo Montanari decide hacer un giro en su línea industrial, dedicándose a la industria alimentaria, naciendo así la Empresa Invertec S.A.

Actualmente, la Empresa Invertec S.A. está constituida por las empresas mencionadas en la figura 4.

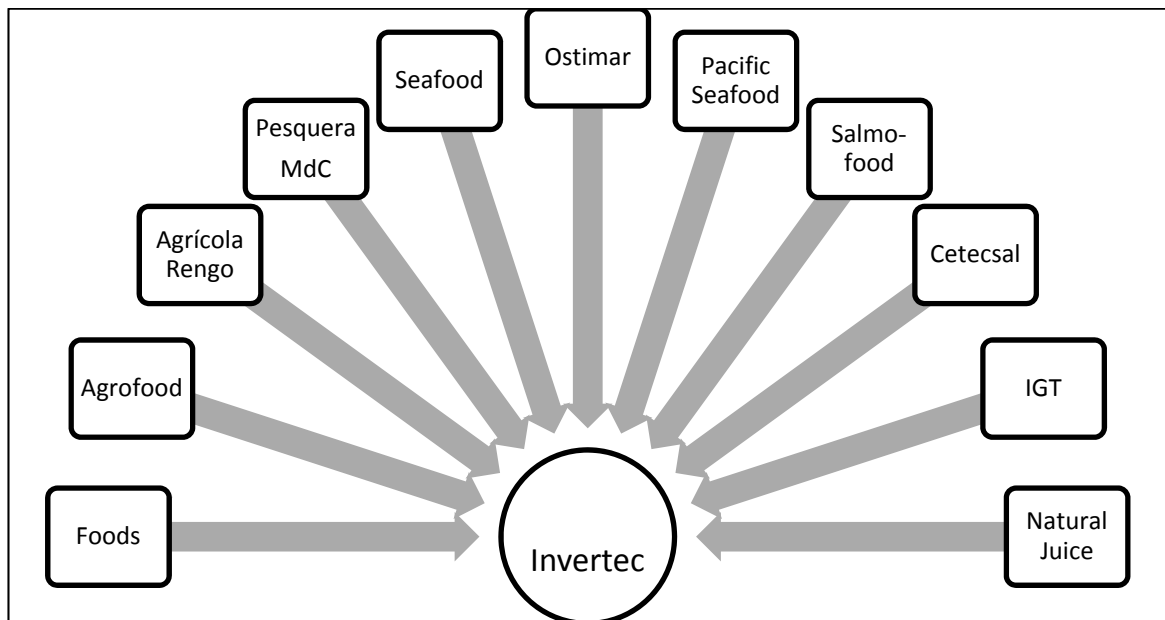


Figura 4. Empresas que conforman Invertec S.A.

Fuente: Memoria Anual Invertec, 2008

La empresa Invertec Terra nace el año 1988, en la comuna de Rengo, ubicada en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins. Ésta corresponde a una planta agroindustrial cuya actividad principal es el procesamiento de frutas y hortalizas, para la elaboración de productos deshidratados y congelados, los que comercializa principalmente en el extranjero. El mercado mayoritario de la Empresa está compuesto por EE.UU. (37% y 29% en hortalizas y frutas respectivamente), Japón (41% en hortalizas), Alemania (22% en frutas), entre otros países de Oceanía y Europa.

Esta compañía se transformó en el corto plazo, en uno de los líderes mundiales en la producción de pimentones deshidratados y en la producción de manzanas a nivel mundial. Los productos elaborados en esta planta son utilizados como ingredientes en la industria de alimentos en los mercados más exigentes del mundo.

La planta de productos deshidratados tiene una superficie construida de 13.000 m<sup>2</sup> con una capacidad instalada de 240 toneladas/día, y más de 300 empleados entre operarios, técnicos y profesionales.

En el año 2004 comenzó a operar la planta de congelados, con una superficie construida de 3.690 m<sup>2</sup>, donde trabajan aproximadamente 250 personas. La capacidad instalada de esta planta es de aproximadamente 40 toneladas/día de producto congelado. Durante el año 2008, el mercado mayoritario de Invertec Frozen Foods, estuvo constituido por Japón (41%), Norteamérica (11%) y Europa (38%).

La planta de jugos concentrados tiene una superficie de construcción de 3.750 m<sup>2</sup> con una capacidad instalada de 500 toneladas/día y aproximadamente 150 empleados entre operarios, técnicos y profesionales. El mercado mayoritario de Invertec Natural Juice, durante el año 2008, lo conformó EE.UU. (58.14%) y Japón (41.72%).

En el año 1995, Invertec Foods, crea las subsidiarias Invertec Agrofoods e Invertec Agrícola Rengo, cuyo objetivo se enfoca en la explotación de campos propios de frutas y hortalizas destinados como proveedores de materias primas a las plantas agroindustriales del holding. En la figura 5 se indican las propiedades de la subdivisión Terra.

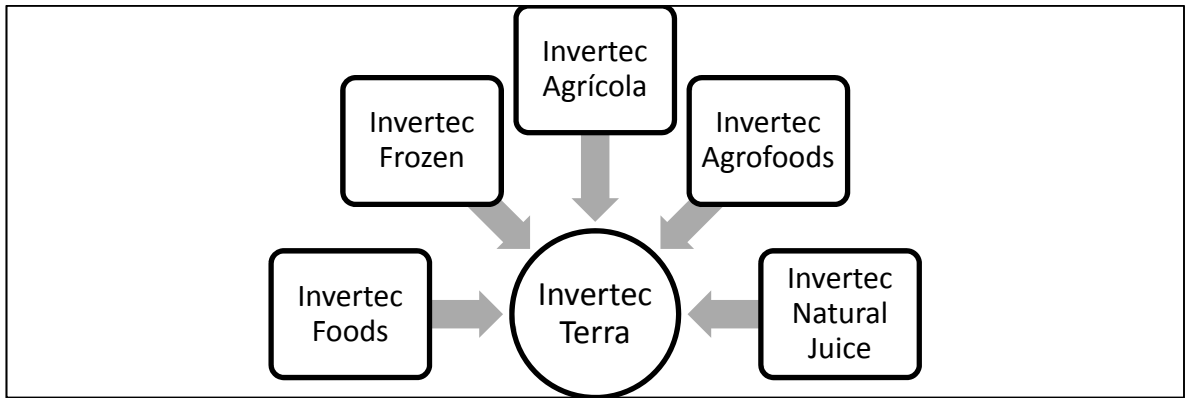


Figura 5. Malla de propiedades de Invertec Terra S.A.

Fuente: Memoria Anual Invertec, 2008

## 2.5 Tratamiento de Aguas en Invertec Terra S.A

El tratamiento de aguas residuales tiene como objetivo remover la materia orgánica biodegradable, los sólidos suspendidos y los patógenos de las aguas servidas. Para lograr estos objetivos en la Empresa, se cuenta con un sistema primario y uno secundario de tratamiento, los que se detallan a continuación:

### 2.5.1 Tratamiento Primario de Aguas

El primer paso en el tratamiento de aguas es separar los sólidos gruesos. En las instalaciones productivas de la Empresa, se cuenta con rejillas en cada desagüe de agua, con el fin de evitar el paso de fragmentos de las frutas utilizadas en el proceso, o cualquier otro elemento que pudiera pasar a este primer filtro. Estos filtros son limpiados manualmente de manera constante, debido a la alta putrefactibilidad de los elementos que en él son almacenados.



Luego de estos primeros filtros en la recolección de agua servida, los riles se conducen por un canal común hasta un filtro elevador, que remueve todos los restos de sólidos que no fueron filtrados anteriormente. El último filtro utilizado es el que se encuentra antes de que las aguas ingresen al proceso de lodos activados, el cual tiene un tamiz de 1 mm, por tanto intercepta gran parte de los sólidos que han sorteado los filtros anteriores.

### **2.5.2 Tratamiento Secundario de Aguas**

En la Empresa se utiliza como tratamiento secundario de aguas el sistema de lodos activados. Éste se caracteriza por introducir el agua residual dentro de un reactor en el cual se mantiene un cultivo bacteriano en suspensión. Dentro del reactor se lleva a cabo la degradación de la materia orgánica contenida en las aguas de desecho, por medio de reacciones de oxidación, síntesis y respiración endógena. El ambiente aerobio dentro del reactor se logra por medio de difusores de oxígeno, lo que también ayuda a la mezcla dentro del reactor. Luego de un tiempo, las células antiguas y nuevas se conducen a un segundo tanque, llamado tanque de sedimentación, para separarlas del agua residual tratada. Una parte de este fluido se retorna al primer reactor, con el fin de mantener constante la concentración de bacterias, y el excedente es purgado del sistema.

En la Empresa se utiliza una modificación de este sistema denominada Aireación Extendida. Ésta consiste en aumentar el tiempo de retención celular dentro del reactor, disminuyendo la cantidad de lodo generada en el proceso y dejándolo parcialmente estabilizado.

## **2.6 Lodo generado en la Empresa**

Respecto a la cantidad de lodo generado, durante los años 2007 y 2009, ésta ha variado a lo largo de los tres años registrados, pero se mantiene como patrón común que, en los meses de diciembre y enero, no existe generación de lodos.

El año 2007 fue el período donde se generó la menor cantidad de lodo, registrando un total de 1.210 toneladas. Estas toneladas se generaron en un período de 84 días, comenzando el día 21 de febrero y finalizando el día 15 de mayo, existiendo en este período, 62 días en los que se purgaron lodos desde el tratamiento secundario. El período de mayor generación de lodo fueron los meses de marzo y abril, donde se produjo aproximadamente el 72% del total anual; los días de mayor generación se registraron en los meses de marzo, abril y mayo; superando las 40 toneladas diarias. Respecto a la periodicidad de generación, solo en una ocasión, en el mes de marzo transcurrieron 6 días en los que no se generó lodo, el resto del tiempo, la purga de lodo del sistema de tratamiento secundario generalmente fue diaria. Se entiende como purga, la remoción periódica de lodos del sistema de lodos activados con el fin de mantener el equilibrio del sistema. Lo indicado anteriormente se muestra en la figura 6.

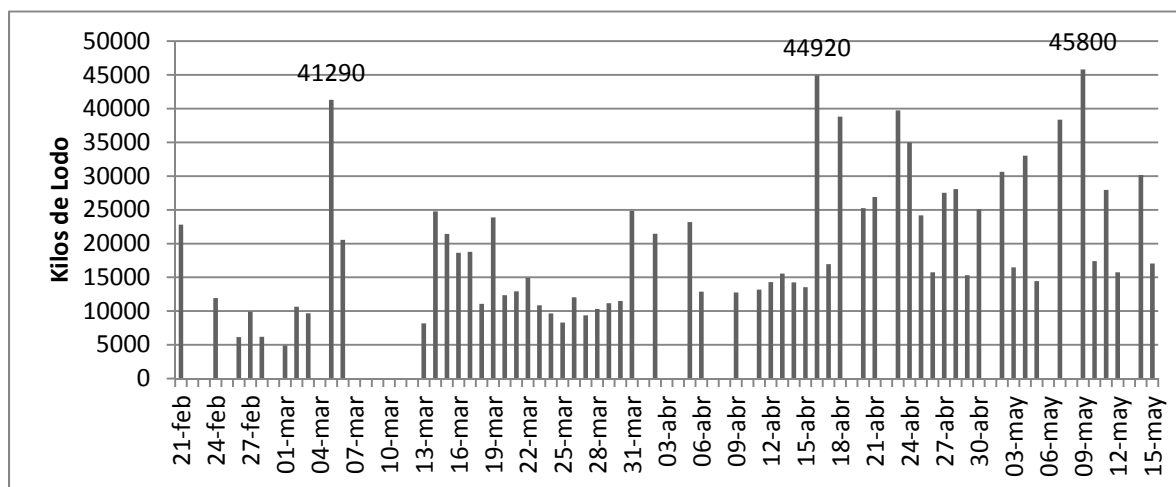


Figura 6. Registros de generación diaria de lodo, año 2007.

Fuente: Empresa

El año 2008 fue el período en el que se generó la mayor cantidad de lodo, registrando un total anual de 5.490 toneladas, aproximadamente cuadruplicando y triplicando los totales anuales registrados para el año 2007 y 2009 respectivamente. El período de generación fue de 281 días, comenzó el día 15 de febrero y finalizó el día 21 de noviembre, existiendo en este período 185 días de purga de lodo.

El mes de mayor generación de lodo fue marzo, período donde se alcanzó aproximadamente el 37% del total anual de lodo generado por la planta. Los días de mayor purga fueron los días 10 y 12 de marzo, donde se generó 272 y 292 toneladas de lodo respectivamente. Respecto a los tiempos transcurridos entre purgas de lodo, en el año 2008 solo en una ocasión hubo 6 días sin generación de lodo; el resto del tiempo, las purgas ocurren generalmente cada 2 a 3 días. Lo indicado anteriormente se muestra en la figura 7.

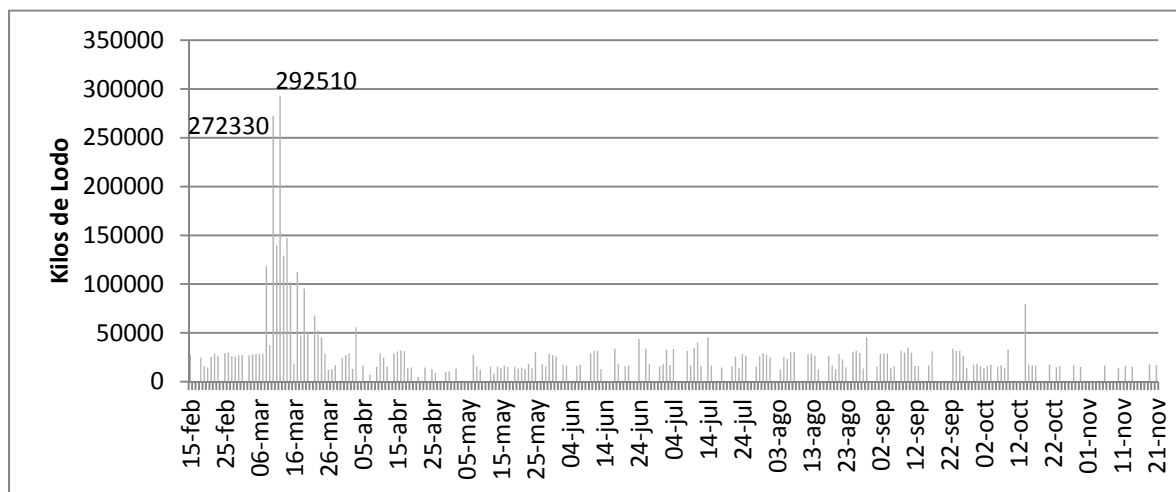


Figura 7. Registros de generación diaria de lodo, año 2008.

Fuente: Empresa.

En el año 2009, se registró un total anual de generación de lodo de 1.629 toneladas, generados en un periodo de 230 días, comenzando el día 6 de febrero y finalizando el día 22 de septiembre; en estos meses hubo 104 días de purga. El tiempo transcurrido entre purgas, aumenta este año respecto a los anteriores, llegó en dos ocasiones a los 10 días, los meses de agosto y septiembre, siendo generalmente el período entre purgas entre 3 a 5 días. El mes de mayor generación corresponde al mes de marzo, donde se generó el 25% del total anual del lodo generado este año; este mismo mes se alcanzan las mayores generaciones diarias de lodo los días 11 y 14 de marzo, generándose 39 y 41 toneladas de lodo respectivamente. Lo indicado anteriormente se muestra en la figura 8.

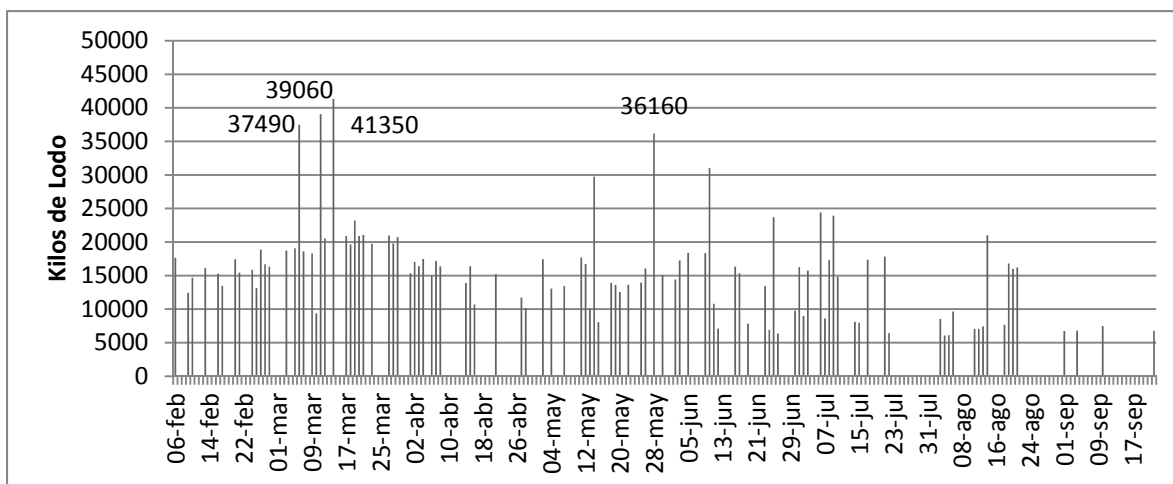


Figura 8. Registros de generación diaria de lodo, año 2009.

Fuente: Empresa

En la figura 9, se muestran las grandes diferencias de generación total mensual de lodo, en los años 2007, 2008 y 2009; siendo el mes de marzo del año 2008, el mes con el mayor registro de toneladas de lodo purgadas desde el tratamiento secundario de aguas. Respecto a similitudes entre los tres períodos registrados, en los meses de diciembre y enero, no se registran purgas de lodo; y los meses de marzo, abril y mayo, son los períodos en los que hay mayor actividad de la planta de lodos activados, por lo que se generan las mayores cantidades de este residuo.

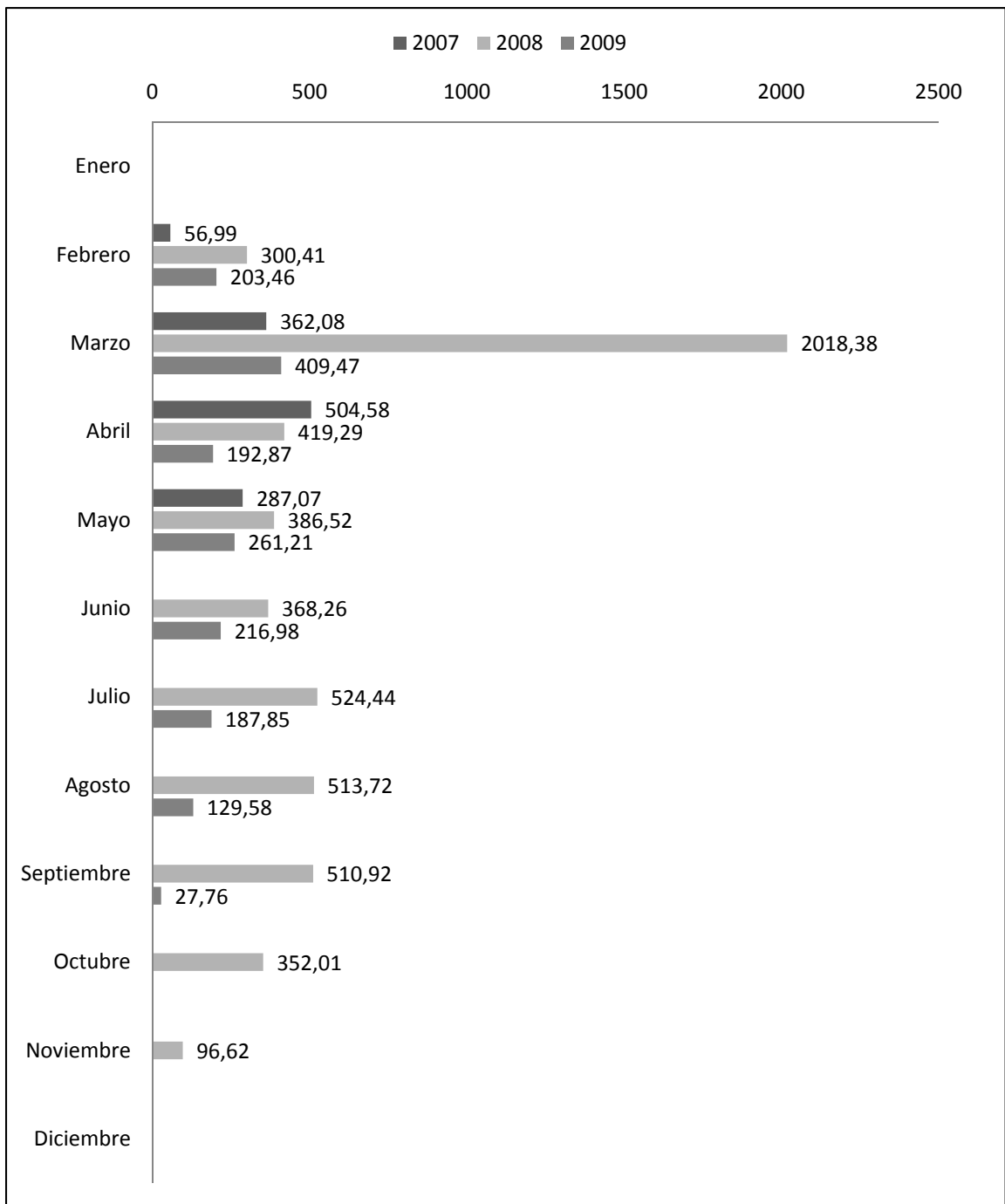


Figura 9. Registros de generación diaria de lodo, en toneladas, para los años 2007, 2008 y 2009.

Fuente: Empresa.

### **3 ESTUDIO TÉCNICO**

#### **3.1 Elección de la Alternativa Tecnológica**

Como se mencionó anteriormente, en el capítulo 1.2.2., existen bastantes métodos de tratamiento de biosólidos, y la elección de uno de estos, depende finalmente del uso que uno quiera dar al subproducto que se genere y la normativa que regula el proyecto.

Para elegir la alternativa tecnológica, en este estudio se favorecieron tratamientos que disminuyeran efectivamente el volumen de los lodos, y que generaran subproductos útiles para la Empresa. Debido a estas razones se seleccionó la digestión anaeróbica como método de tratamiento, ya que disminuye en un 77% el volumen de biosólidos a tratar, y sumado a esto se genera biogás, elemento que puede usarse como sustituto de combustibles fósiles y un medio para vender bonos de carbono; además se obtiene un material orgánico que puede mejorar la producción agrícola de los campos de la Empresa y disminuir los costos asociados a fertilizantes.

#### **3.2 Descripción de la Tecnología Propuesta**

Se sugiere que la digestión anaeróbica de los lodos secundarios generados en la Empresa, sea realizada por medio de un digestor de alta carga. La justificación de esto, es debido a la alta cantidad de lodo generado en la Empresa durante algunos meses, lo que implicaría construir muchos digestores de baja carga para tratar el lodo generado, debido a que no puede introducirse una gran cantidad de carga orgánica al digestor, y los periodos de residencia del lodo dentro de éste, son extensos, ya que el sustrato no se calienta ni mezcla, aumentando los períodos en los que ocurre la digestión anaeróbica. El detalle de esto se indica en el cuadro 4.

Sumado a esto, dentro de los digestores de baja carga se produce una estratificación, como consecuencia de la ausencia de mezclado, y debido a esto, solo se utiliza aproximadamente un 50% del volumen de digester convencional. A causa de esta ineficiencia, este tipo de digester solo se utiliza en plantas de tratamiento pequeñas. (Metcalf y Eddy, 2003)

A diferencia del digester de baja carga, un digester de alta carga se caracteriza por calentar y mezclar completamente el lodo para optimizar la velocidad de digestión y aumentar la carga orgánica que ingresa al digester. Generalmente, el porcentaje de sólidos volátiles se reduce entre un 50% a un 60%. Este tipo de digester requiere de una alimentación regular, antes o después de purgar una cantidad equivalente de lodo digerido, a la que ingresara. (Metcalf y Eddy, 2003)

Cuadro 4 Criterios de Diseño Típicos para Digestores de Alta Carga y Convencionales.

<b>Parámetro</b>	<b>Convencional</b>	<b>Alta Carga</b>
Tiempo de Retención de Sólidos (días)	30-60	10-20
Alimentación del Digester (kg SV/m <sup>3</sup> *día)	0,64-1,6	2,4- 6,41

Fuente: Qasim, 1985

Debido a la experiencia acumulada de digestión de lodos en el país y en el extranjero, y los datos de diseño expuestos en la cuadro 4, en este estudio se evaluará la digestión de alta carga de lodos, debido a que es un proceso más eficiente de tratamiento, y dados los volúmenes de generación de lodos en la Empresa, se estima que es la mejor opción por utilizar.

### 3.2.1 Temperatura de Funcionamiento

Las temperaturas y tiempos de retención hidráulicos más eficientes se determinarán en función a estudios realizados por Bolzonella *et.al* (2005), realizados en cuatro plantas de tratamientos de aguas, ubicadas en Italia, las cuales utilizan el sistema de lodos activados para tratar las aguas servidas sin un sistema de tratamiento primario anterior, y para estabilizar los lodos, utilizan digestores anaeróbicos, alimentados únicamente con lodos activados.

La diferencia de la realidad de la Empresa con las plantas de tratamiento mencionadas, además de su tamaño, es la concentración de sólidos totales del lodo, siendo mucho mayor en la primera. Los lodos estudiados tienen una concentración de 2,6% a 3,9% de sólidos totales, en comparación al 24,6% de sólidos totales presentes en los lodos de la Empresa. Este factor es beneficioso para el proceso, según estudios anteriores de los mismos autores, que han confirmado que alimentar el digestor con lodos muy diluidos es una de las principales causas de un desarrollo inadecuado del proceso de digestión.

Los datos entregados del funcionamiento de los digestores fueron mediciones realizadas durante 2 años, por lo que son bastante confiables. Según los resultados obtenidos, la combinación más efectiva de estos parámetros se da en un digestor que funcione a una temperatura de 37,6 °C para obtener una reducción de sólidos volátiles aproximado del 22% con un tiempo de retención hidráulico de 20 días. La reducción de sólidos volátiles es aproximada, debido a que depende de la cantidad de sólidos volátiles adicionados al digestor, pero de todas formas resultó ser la combinación óptima.

En el caso de este estudio, se considerará una temperatura de funcionamiento de **37 C°**.

### **3.2.2 Tiempo de Retención**

De acuerdo a estudios de Pezo (2009); el tiempo de retención óptimo de un biodigestor está dado por la siguiente fórmula:

$$\textit{Tiempo de retención} = -51,227 * \textit{Ln}(T^\circ) + 206,72$$

Donde T° corresponde a la temperatura medida en grados Celsius. De acuerdo a esta fórmula el tiempo de retención óptimo, considerando una temperatura de 37 grados Celsius, es de 21,7 días. Para este estudio, aproximará este valor a **22 días**.



### 3.3 Calidad del lodo como sustrato para la Digestión Anaeróbica

Se analizó la calidad del lodo como sustrato para la digestión anaeróbica mediante una comparación de la literatura especialista en el tema, con las mediciones realizadas por la Empresa a los lodos generados. Los valores recopilados de concentraciones estimulantes e inhibitorias, se encuentran en el cuadro 20 de Anexos. Las mediciones realizadas al lodo de la Empresa, se indican en los cuadros 15, 16, 17,18 y 19 de Anexos.

#### 3.3.1 Parámetros Químicos

Hay muchos elementos, orgánicos e inorgánicos, que pueden tener un efecto tóxico para la digestión anaeróbica. El término tóxico es relativo a la concentración en la que los elementos tienen efectos inhibitorios; estas concentraciones pueden variar desde una fracción de un mg/l a varios miles de mg/l. La figura 10 indica el efecto general de la adición de la mayoría de los elementos un sistema biológico.

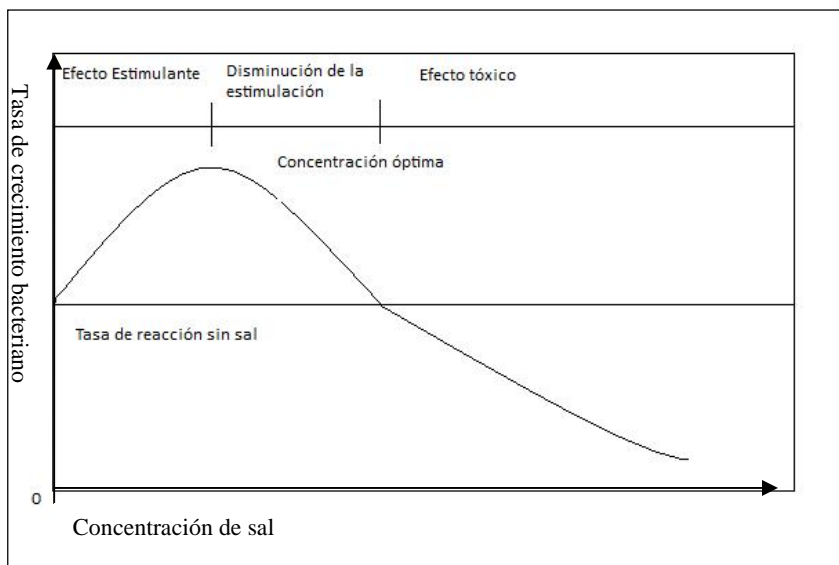


Figura 10. Efecto de la adición de elementos a un sistema biológico.

Fuente: Mc Carty, 1964

Los compuestos con un potencial efecto inhibitor pueden estar presentes en el sustrato que será ingresado al biodigestor o generarse durante la digestión anaerobia, y en el caso de este estudio, se analizarán sólo los compuestos presentes en el sustrato.

La presencia de un elemento en concentraciones tóxicas para los microorganismos involucrados en la digestión anaeróbica, se refleja en una menor tasa de crecimiento de los mismos, como se observa en la figura 10, pero no todos se ven afectados de la misma manera para un mismo compuesto. Esto es debido a que estos microorganismos, difieren en aspectos como su fisiología, necesidades nutricionales, cinética de crecimiento y la sensibilidad a factores ambientales a los que son expuestos. Así mismo, el grado de toxicidad de un compuesto, además de estar en función de su concentración, está influido por las relaciones de antagonismos<sup>1</sup> y de sinergismos<sup>2</sup> entre compuestos, la aclimatación<sup>3</sup> de las bacterias a concentraciones tóxicas de algún elemento, y factores ambientales como la temperatura y el pH en el que se está desarrollando la digestión anaeróbica. Por tanto, es sumamente complejo determinar el valor absoluto al que un compuesto actuará como un inhibidor. (Chen *et al.*, 2007)

A continuación, se analizarán algunos elementos químicos presentes en el lodo, determinando si la concentración en la que se encuentran podría afectar o estimular este proceso.

**3.3.1.1 Efecto tóxico de sales alcalinas (NA y K) y alcalinotérreas (Ca y Mg):** Estas cationes son necesarios para el crecimiento bacteriano por lo que a moderadas concentraciones estimulan el crecimiento, pero a concentraciones excesivas afectan a los microorganismos presentes en el reactor anaeróbico, disminuyendo la producción de biogás (Campos, 2001).

---

<sup>1</sup> Antagonismo: reducción de la toxicidad de un sustrato en presencia de otro (Campos, 2001).

<sup>2</sup> Sinergismo: aumento del efecto tóxico de una sustancia causada por la presencia de otra (Campos, 2001).

<sup>3</sup> Aclimatación: reorganización de los recursos metabólicos para superar las dificultades metabólicas producidas por un sustrato tóxico (Campos, 2001).

Cuando todos estos cationes están presentes en el sustrato, los efectos de estos se vuelven más complejos, debido a los efectos sinérgicos y antagónicos propios de cada elemento y a sus combinaciones. Estas relaciones están mostradas en el cuadro 5.

Cuadro 5. Relaciones de antagonismo entre sales alcalinas, alcalinotérreas y amonio.

<b>Elemento</b>	<b>Antagonistas</b>
Amonio	Sodio y amonio
Calcio	Sodio y potasio
Magnesio	Sodio y potasio
Potasio	Amonio, calcio, magnesio y sodio
Sodio	Amonio, potasio, calcio y magnesio.

Fuente: Mignone, 2005; Mc Carty, 1964 y Campos, 2001

**3.3.1.1.1 Sodio:** La presencia de bajas concentraciones de sodio es esencial para las bacterias metanogénicas, sin embargo, altas concentraciones de este catión inhiben la actividad de los microorganismos e interfiere con su metabolismo (Appels, 2008).

Según estudios de Bashir y Matin (2004), si los microorganismos son expuestos a altas concentraciones de sodio por un periodo largo de tiempo, estos pueden aclimatarse a este catión y su actividad metabólica no se ve muy afectada, sin embargo, existe un límite de tolerancia de estos microorganismos al cual no se pueden adaptar.

En el caso del lodo de la Empresa, el sodio presenta concentraciones superiores a las estimulantes, específicamente 1.530 ppm, pero ésta es significativamente menor a la concentración medianamente inhibitoria, por lo que no existiría una toxicidad por sodio.

**3.3.1.1.2 Potasio:** Altas concentraciones de potasio generan un efecto inhibitorio, especialmente para los microorganismos termofílicos; siendo su efecto inhibitorio el neutralizar el potencial de membrana<sup>4</sup> de los microorganismos anaerobios (Appels, 2008).

Los microorganismos anaeróbicos, al igual que en el caso del sodio, pueden aclimatarse a altas concentraciones de potasio, con un tiempo de exposición adecuado; sin embargo, más allá de ciertos umbrales de concentraciones, las bacterias no logran adecuarse al medio en que están expuestas (Appels, 2008).

En el caso del lodo de la Empresa, el potasio presenta concentraciones superiores a las estimulantes, pero menores a las inhibitorias, encontrándose en una concentración máxima de 6.635 ppm y un promedio de 4.959 ppm, por lo que no existiría una toxicidad por potasio.

**3.3.1.1.3 Magnesio y Calcio:** En el caso del magnesio, este metal registra una concentración máxima de 1.137 ppm, la cual está dentro de las catalogadas como moderadamente inhibitorias.

En lo referente al calcio, este se encuentra en una concentración máxima de 1.795 ppm, la cual está por debajo de las concentraciones moderadamente inhibitorias y muy superior a las estimulantes.

Finalmente, es posible afirmar que no se generara un efecto tóxico dentro del digestor a causa de las sales alcalino terreas, debido a que sólo una de ellas, el magnesio, se encuentra en concentraciones cercanas a las medianamente inhibitorias, y seguramente el proceso de digestión anaerobia no se verá afectado debido a los efectos de antagonismo descritos anteriormente entre estas sales.

---

<sup>4</sup> Potencial de membrana: voltaje producto de la diferencia de potencial eléctrico a un lado y otro de la membrana plasmática de una célula, este se genera debido a la distinta permeabilidad de la membrana plasmática a distintos iones. (Ciencia, 2004)

### 3.3.1.2 Efecto Tóxico de los Metales Pesados:

Las bacterias anaerobias, además de necesitar macronutrientes (N, P, K, S) para crecer adecuadamente, necesitan micronutrientes o factores estimulantes del proceso, los cuales, en cantidades muy pequeñas (trazas), son esenciales para un óptimo desarrollo de los microorganismos (Pereda *et al.*, 2007). Siendo algunos metales pesados como el hierro, níquel, cobre y zinc entre otros, micronutrientes necesarios para el crecimiento de las bacterias anaeróbicas. (Sánchez *et al.*, 1996)

La importancia de estas sales queda demostrada en el estudio de Zitomer *et al.* (2008), que demuestra que la presencia en adecuadas concentraciones de los micronutrientes níquel, cobalto y hierro, en digestores anaeróbicos a temperaturas termofílicas y mesofílicas, incrementan las tasas de producción de metano desde el 14% a un 50%.

A pesar de estos efectos positivos, altas concentraciones de estos metales causan toxicidad, pero ésta depende de la forma química en que los metales se presenten, ya que en su forma soluble son tóxicos en muy bajas concentraciones.

Altas concentraciones de metales pesados pueden ser toleradas por los microorganismos en función de la concentración de sulfuros presentes, ya que éste se combina con los metales pesados para formar las sales de sulfuro, las cuales son insolubles. Estas sales son bastante inertes y no afectan negativamente a los microorganismos. Cuando las concentraciones de sulfuros son bajas, solo pequeñas concentraciones de metales pesados pueden ser tolerados. Es importante destacar que los sulfuros por si solos son tóxicos para los microorganismos anaeróbicos, al igual que altas concentraciones de metales pesados; sin embargo su combinación forma sales insolubles que no perjudican la digestión anaerobia. (Mc Carty, 1964)

Además de la forma química en la cual están presentes los metales pesados y la presencia o ausencia de sulfuros, otros factores influyen en el efecto tóxico de estos. Uno de ellos es la forma de introducción del sustrato al reactor, siendo menos tóxicos en el caso de la alimentación gradual. (Campos, 2001). Esto se puede apreciar en el cuadro 6, donde se observa una notable diferencia entre los límites de toxicidad para todos los metales pesados, exceptuando en el caso del níquel y zinc.

Cuadro 6. Concentración límite de metales pesados en sistemas anaerobios.

Metal	Alimentación Gradual		Alimentación Brusca
	Concentración de Inhibición	Limite de Toxicidad	Limite de Toxicidad
		mg/l	
Cr (III)	130	260	<200
Cr (VI)	110	420	<180
Cu	40	70	<50
Ni	10	30	<30
Cd	-	>20	>10
Pb	340	>340	>250
Zn	400	600	<1700

Fuente: Campos, 2001.

Respecto al níquel, estudios de Ahring y Westermann (1983), afirman que este metal pesado es dos (2) a tres (3) veces más soluble que el cadmio y el cobre, por tanto, tiene un efecto inhibitorio mayor, debido a su solubilidad con el agua, respecto a los demás metales pesados. En el lodo este metal se encuentra en una concentración máxima de 137 ppm, la cual está por sobre las concentraciones inhibitorias.

En el caso del hierro, éste se encuentra en una concentración máxima de 2.245 ppm, que es inhibitoria para el proceso de digestión anaerobia, pero éste tiene una baja solubilidad según estudios de Chen *et al.* (2007), por lo que no tendría un efecto tóxico.

Referente al cromo, este se encuentra en concentraciones muy por debajo de las inhibitorias, registrando un máximo de 24,8 ppm su forma hexavalente puede ser tóxica para el sistema anaerobio, sin embargo este ion es normalmente reducido por la forma trivalente del cromo, la cual es relativamente insoluble a rangos de pH normales dentro del digestor, y por lo tanto, no es tóxica. (Mc Carty, 1964)

La concentración máxima de cobre es de 71,9 ppm y está dentro del rango fuertemente inhibitorio.

Los metales arsénico y cobalto, se encuentran en concentraciones medianamente inhibitorias, con concentraciones máximas de 1,14 ppm y <2 ppm respectivamente.

Los demás metales cadmio, plomo y zinc, se encuentran en concentraciones estimulantes del proceso.

Finalmente, es posible afirmar que es poco probable que se produzca toxicidad por metales pesados, ya que solo el cobre se encuentra en un rango inhibitorio, y seguramente, solo una fracción de esta concentración es soluble, y puede asociarse con los sulfuros presentes en el lodo y formar sales insolubles, que no generan toxicidad.

**3.3.1.3 Macronutrientes:** El proceso anaerobio tiene muy bajos requerimientos de nutrientes respecto a los procesos aeróbicos, debido principalmente a la baja producción de biomasa. Pero igualmente, es necesario suministrar nutrientes minerales, fuentes de carbono y energía, para un adecuado desarrollo de la digestión anaerobia. (Campos, 2001).

Respecto a las necesidades de carbono, están en función de las concentraciones de nitrógeno y fósforo disponible, según las relaciones mencionadas en el cuadro 7.

Cuadro 7. Relaciones de nutrientes necesarios para un adecuado crecimiento de las bacterias anaerobias.

Relación	Proporciones Adecuadas
C/N	15-30:1
C/P	75-113:1

Fuente: Campos, 2001.

Los resultados de laboratorio entregan un contenido de nitrógeno total de 36,1 g/kg, lo que corresponde a 36.100 ppm. Para convertir este valor a porcentaje se multiplica el contenido de nitrógeno medido en ppm por 0,0001; resultando un porcentaje de 3,61% de nitrógeno total.

Respecto al carbono, el porcentaje de sólidos volátiles es de 61,7% y dividiendo este valor por la constante 1,8 se obtiene que el porcentaje de carbono de la muestra, sea de 34,27%. (Mustin, 1987)

Finalmente, el porcentaje de carbono se divide respecto al de nitrógeno y resulta una relación carbono nitrógeno de 9,49. Por lo que es necesario adicionar material con altos porcentajes de carbono para mejorar estas relaciones.

El desbalance de nutrientes del lodo, es un factor limitante para el proceso de digestión anaeróbica. Una adecuada relación de carbono y nitrógeno está en el orden de 30-15:1, muy superior a la registrada en el lodo. Esta baja relación provoca acumulación de nitrógeno amoniacal y ácidos grasos, los cuales pueden inhibir el proceso de digestión anaerobia; por tanto, es necesario adicionar al lodo, materiales con altos contenidos de carbono. (Hong-Wei y Brune, 2006)

Es por esto, que se considerara la co-digestión en este proyecto, ya que al adicionar al digestor restos orgánicos en conjunto con el lodo proveniente de la planta de tratamiento de aguas, se mejorará la relación carbono-nitrógeno del lodo, mejorando el proceso de digestión anaeróbica y aumentando el rendimiento energético del digestor, gracias a la mayor producción de metano.

La materia orgánica que se adicionará al digestor provendrá de los residuos generados en la misma Empresa. La distribución porcentual de los principales residuos generados el año 2009, se indica en la figura 11.



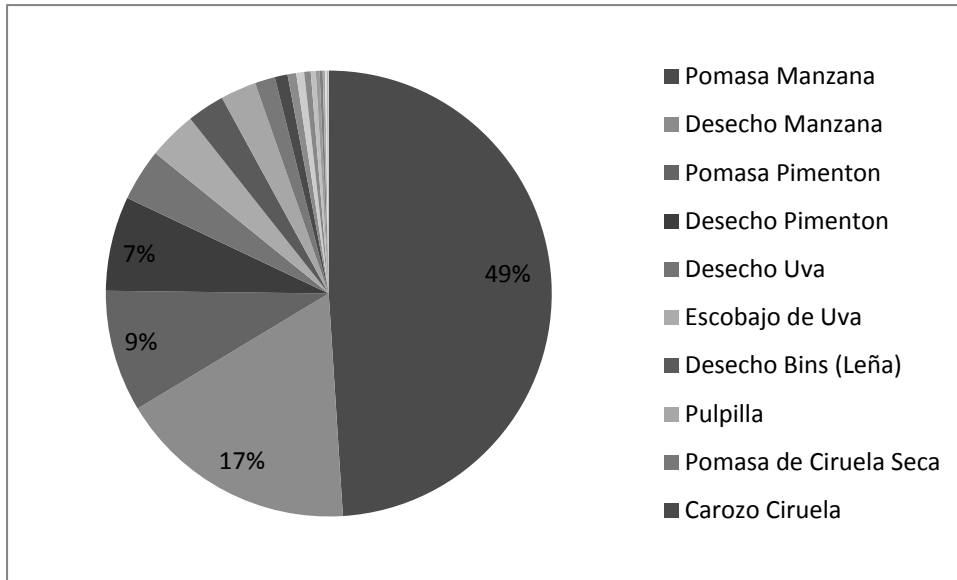


Figura 11. Distribución porcentual de los principales residuos generados en el año 2009.

Fuente: Empresa

Como se observa en la figura 11, el principal residuo generado en la Empresa es pomasa de manzana, que alcanza las 8.055 toneladas en el año 2009. Este residuo es generado en el proceso productivo del jugo de manzana y contiene restos de cáscara, semillas, pulpa y jugo de este fruto. De acuerdo a caracterizaciones químicas realizadas por Anrique y Viveros (2002) es un residuo pobre en proteínas, rico en fibra digestible y carbohidratos solubles; presenta un porcentaje de materia seca que varía desde un 14% a un 26%, y en base a esta materia seca, presenta porcentajes de fibra y proteína cruda de 14 a 23% y de 4 a 8%, respectivamente. De acuerdo a estas características, es posible afirmar que este residuo mejorará la relación carbono nitrógeno presente en el lodo.

### 3.3.2 Parámetros Biológicos

**3.3.2.1 Contenido Orgánico:** El lodo de la Empresa difiere de las caracterizaciones realizadas en la literatura para los lodos activados, respecto a los sólidos totales, excediendo bastante el rango promedio de este parámetro. Pero a pesar de esto, los parámetros orgánicos medidos corresponden a valores muy similares a los realizados en la planta de aguas servidas “La Farfana”. En la cuadro 8 se pueden apreciar estas diferencias.

Cuadro 8. Comparación entre las características del lodo de la Empresa con las encontradas en la literatura.

Características		Lodos Activados Típicos	La Farfana	El Trebal	Lodos de la Empresa
Sólidos Totales	Secos	0,83%-1,16%	25%	75%	24,6%
Sólidos Volátiles		59%-88%	59%	44%	61,7%

Fuente: Rámila y Rojas, 2008; Metcalf y Eddy, 2003

### 3.3.2.2 Actividad Microbiana

Respecto al contenido de patógenos, el lodo de la Empresa tiene concentraciones de bacterias que corresponden a las pedidas para un lodo clase A en el DS N° 123/2006.

- En el caso de los coliformes fecales, el lodo tiene una concentración de 5,1 NMP/g, y en el reglamento se establece, que este valor debe estar por debajo de 1000 NMP/g.
- Respecto a la *salmonella s.p.*, el lodo tiene una densidad <2 NMP/4g, y en el reglamento se establece un límite máximo de 3 NMP/4g.
- Referente a los huevos de helmintos, el lodo de la empresa no presenta registros de su presencia en ningún análisis realizado desde el año 2007 a 2009.

Estas mediciones facilitan la obtención de un lodo de clase A, ya que sólo se tendría que cumplir la reducción de sólidos volátiles exigida en el reglamento.

### 3.3.3 Parámetros Físicos

Los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas de la Empresa, tienen un color café marrón, y un olor a tierra húmeda, características que indican que aún no han comenzado a descomponerse. (Metcalf y Eddy, 2003)

Debido al contenido de agua de estos lodos, que según los análisis de laboratorio fluctúa entre un 90 a 75% de humedad, estos no escurren y pueden apalearse.

### 3.4 Dimensionamiento Digestor

De acuerdo a las recomendaciones de diseño de digestores anaeróbicos, elaboradas por Pezo (2009); la capacidad del digestor se calculará con el método del período de digestión, cuya fórmula es:

$$\text{Volumen del Digestor} = \frac{\text{Carga diaria (litros)} * \text{Tiempo de retención (días)} * 1,2}{1000}$$

La carga diaria se calculará como el flujo promedio de lodo generado. Para calcular el flujo promedio de lodo generado, se dividirá el flujo total mensual promedio más alto, por el promedio de días de purga, para este mismo mes. Como se puede observar en la figura 12, el total mensual promedio más alto corresponde a la media del mes de marzo, que alcanza las 930 toneladas; y el promedio de días de purga para este mes corresponde a 23 días, como se indica en la figura 13. La división de estos valores, da como resultado 40,4 toneladas promedio de generación, y dividiendo este valor por el promedio de densidad registrada para el lodo, que corresponde a 0,86 toneladas por metro cúbico, como indican los informes de composición fisicoquímica del lodo, mostradas en Anexos, cuadro 15.; da como resultado un flujo promedio de generación de 47 m<sup>3</sup>, lo que corresponde a 47.000 litros.

Ingresando este valor en la formula indicada, y considerando un tiempo de retención de 22 días, se llega a un volumen óptimo de digestor de 1240,8 m<sup>3</sup>; lo que se aproximará este valor a 1250 m<sup>3</sup>.

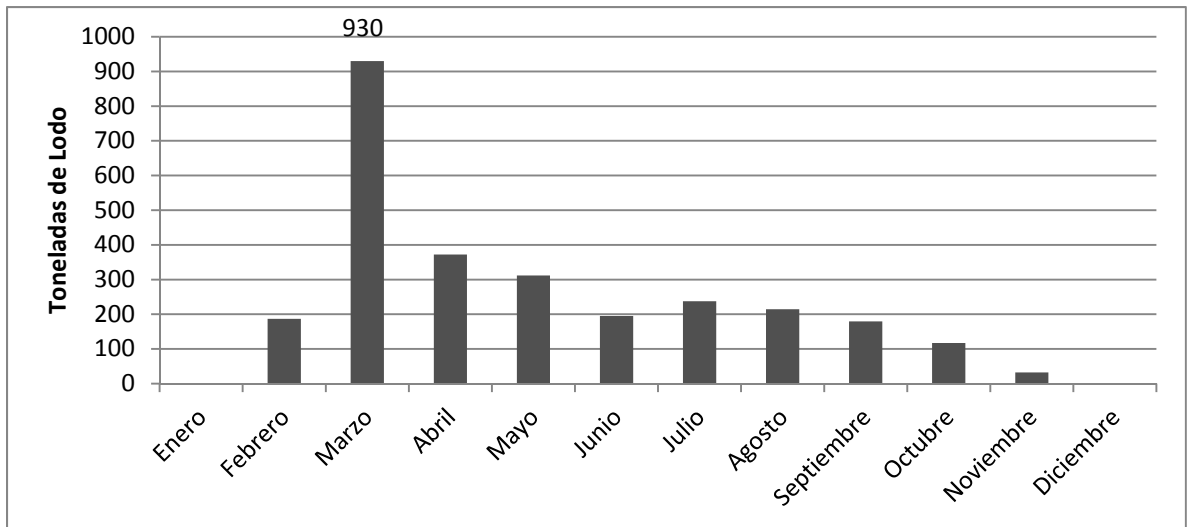


Figura 12. Promedio de generación mensual de lodo, en toneladas.

Fuente: Empresa.

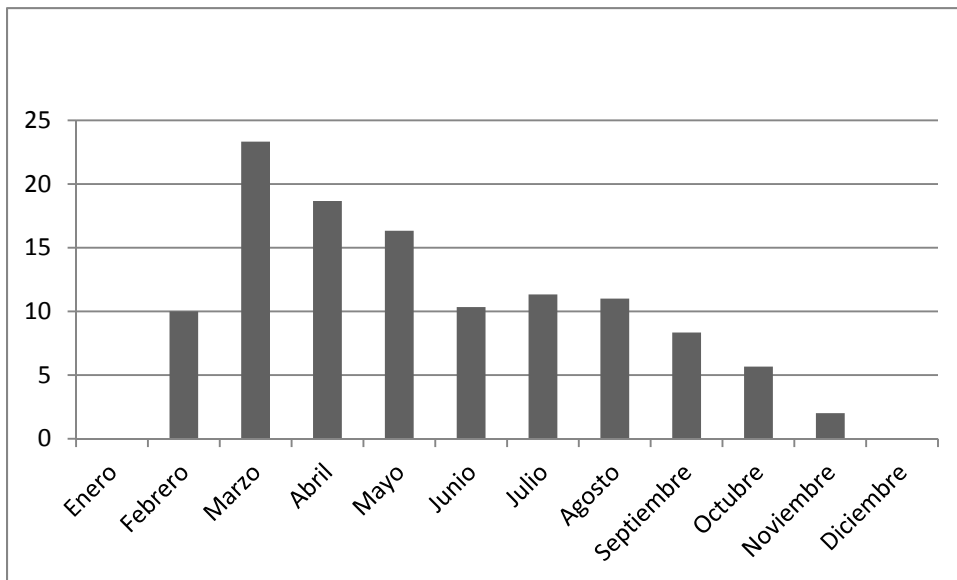


Figura 13. Promedio de días de purga de lodo, entre los años 2007, 2008 y 2009.

Fuente: Empresa.

### 3.5 Instalaciones

El equipo necesario y la ubicación de cada elemento, se indica en la figura 14. El equipamiento indicado se dispondrá, por razones de cercanía al punto de generación de residuos y al punto de utilización del biogás generado, en la ubicación indicada en la figura 15. Este terreno corresponde a 6,8 ha disponibles. En las que actualmente se plantan hortalizas.

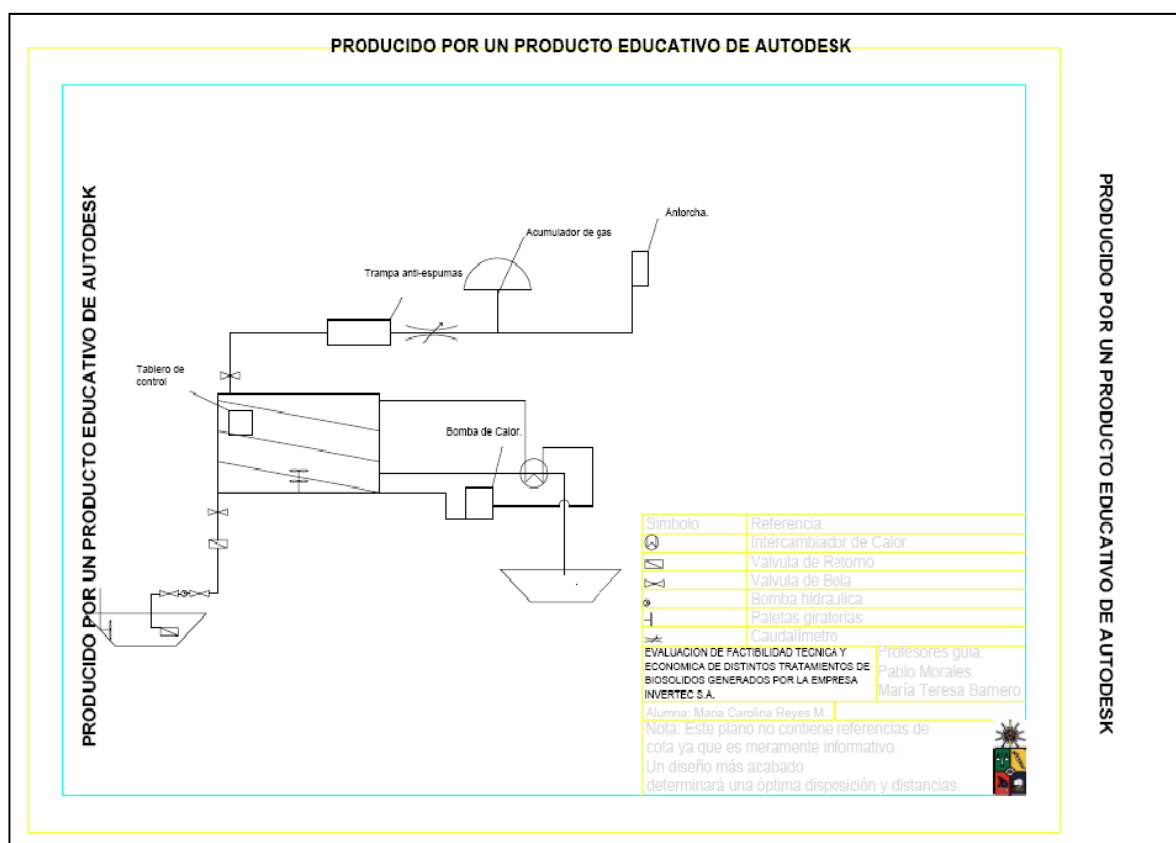


Figura 14. Equipamiento

Fuente: Basado en estudios de MINIMET, S.A.



Figura 15. Ubicación en la planta.

Fuente: Google Earth, 2011.

### 3.6 Resultados Esperados

Los resultados esperados del proceso se basarán en estudios realizados por Bolzonella *et.al* (2005) en cuatro plantas de tratamientos de agua, que utilizan la digestión anaeróbica a temperaturas mesofílicas como tratamiento de estabilización de lodos secundarios.

#### 3.6.1 Producción de biogás

Según las mediciones realizadas en los estudios de Bolzonella *et.al* (2005), se llegó a una tasa específica de producción de biogás por kilo de sólidos volátiles adicionados dentro del reactor de 0,07 a 0,18 m<sup>3</sup><sub>biogás</sub>/kg SV alimentado.

Esta variación está en función del tiempo de retención de sólidos en la planta de lodos activados. La relación entre el tiempo de retención hidráulica de la planta de lodos activos y la tasa de producción de biogás es inversamente proporcional; en otras palabras, a mayor tiempo de retención hidráulica del sistema de lodos activados es menor la tasa de producción de biogás.

Los tiempos de retención registrados en los estudios de Bolzonella *et.al* (2005) fluctuaron entre 8 a 35 días. En la Empresa se utiliza un tiempo de retención de sólidos cercano a 8 días, por lo que se espera que la tasa de producción de biogás sea a **0,18 m<sup>3</sup> biogas/kg SV alimentado**.

La estimación del biogás generado por la Empresa, se realizó con el dato anteriormente indicado, y el contenido de sólidos volátiles medido en los análisis realizados a los lodos generados, que alcanza el **61,7%**.

Los volúmenes de biogás que se estiman fueron generados los años 2007, 2008 y 2009 se encuentran indicados en la figura 16.

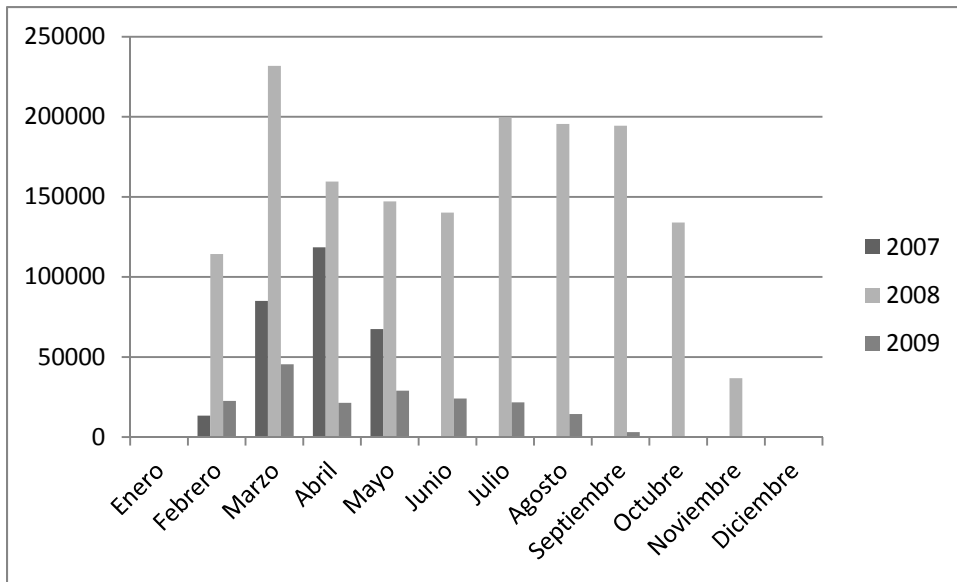


Figura 16. Estimación de producción de biogás.

Fuente: Cálculos basados en Bolzonella *et.al* (2005)

En un año promedio, calculado mediante el promedio de metros cúbicos generado para cada mes del año, con los datos de 2007, 2008 y 2009, se estima que se producirá un total anual de 673.251 metros cúbicos de biogás. El detalle de metros cúbicos de biogás generados durante un año promedio se muestra en la figura 17.



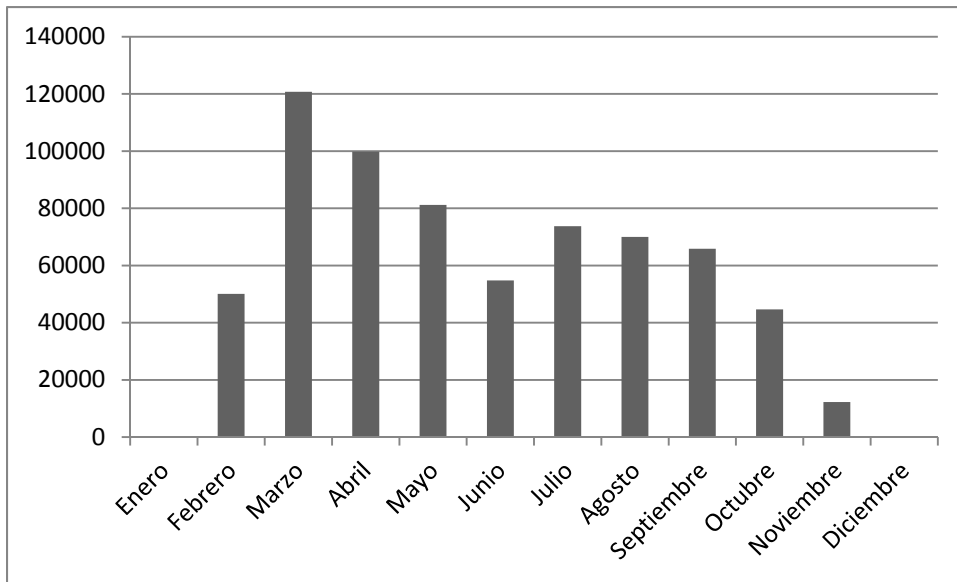


Figura 17. Promedio de metros cúbicos de biogás obtenido durante un año.

Fuente: Elaboración Propia

### 3.6.2 Producción de energía a partir de biogás

Un metro cúbico de biogás tiene un poder calorífico de 5.500 a 6.200 Kcal, según estudios de (Martina et al, 2006), en este estudio, se utilizará el valor medio que corresponde a 5.850 Kcal. El factor de conversión de calorías a BTU (unidad térmica británica) es:

- 1 BTU equivale a 252 calorías o 0,252 kilocalorías (Kcal)

Según esta conversión un metro cúbico de biogás, equivale a aproximadamente 23.214 BTU por metro cúbico. Según esto, se estimó la energía obtenida durante un año promedio, medida en BTU la cual se indica en la figura 18.

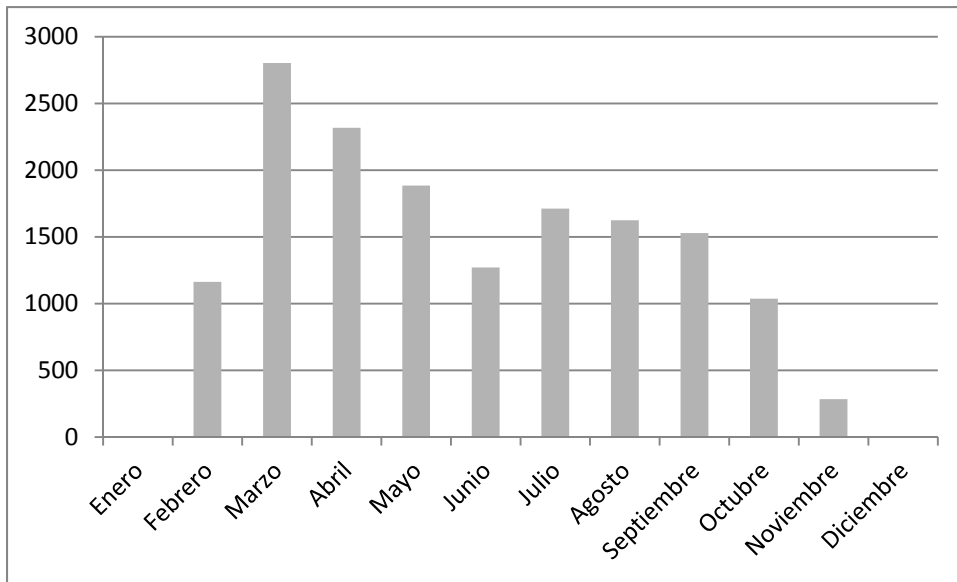


Figura 18. Variación de la energía obtenida durante un año promedio, medida en millones de BTU.

Fuente: Elaboración Propia

Por tanto, la energía total por concepto de biogás que se podría obtener en un año promedio son 15.629 millones de BTU.

### 3.6.3 Características del lodo obtenido luego de la digestión anaerobia

Estudios de Reynolds (1982, citado por Araya 1999) estiman que la reducción de sólidos volátiles esperado para este tipo de sustrato es de un 50% a 75%, bastante mayor a lo registrado en los estudios de Bolzonella *et.al* (2005) que registró un 22%. En el caso de los sólidos totales, el mismo autor menciona una reducción esperada de un 35% a 50%, por lo que se podría esperar que los resultados estén dentro de este rango o sean levemente menores.

### **3.7 Escenarios de utilización del biogás generado.**

#### **3.7.1 Escenario 1: Destrucción térmica del biogás**

El escenario 1 consiste en implementar una antorcha a continuación del biodigestor, con el fin de quemar el biogás generado, transformando el metano en otros gases, siendo el principal CO<sub>2</sub>.

El biogás generado, tiene un potencial de efecto invernadero 21 veces más potente que el dióxido de carbono (es decir, absorbe 21 veces más calor que el CO<sub>2</sub>), por lo tanto la quema del biogás, y su transformación a dióxido de carbono, es una alternativa viable tanto ambiental como económica, ya que a la vez de reducir el efecto invernadero del biogás, se pueden obtener ingresos por medio de la venta de bonos de carbono. La reacción de conversión es la siguiente:



#### **3.7.2 Escenario 2: Inyección de biogás a calderas existentes**

El escenario 2 consiste en transportar el biogás generado hasta la sala de calderas de la planta de jugos de Invertec S.A. por medio de cañerías. Una vez ahí, se procede a utilizarlo en una de las calderas de la planta, lo que implica transformar los quemadores de ésta.

Para realizar esta operación, es necesario contar con los siguientes equipos:

- Antorcha quemadora de biogás: ésta se utiliza por motivos de seguridad de la planta, debido a las variaciones de biogás generado. Un ejemplo de este equipo se muestra en la figura 19.



Figura 19 Antorcha implementada en la planta CCU Temuco.

Fuente: Producción Limpia MDL y Mercado de bonos de Carbono. (Urbina, 2009)

- Gasómetro: este instrumento permite la regulación del flujo de biogás que ingresa a la caldera. Un ejemplo de este equipo se muestra en la figura 20.



Figura 20. Gasómetro implementado en la planta CCU Temuco.

Fuente: Producción Limpia MDL y Mercado de bonos de Carbono. (Urbina, 2009)

- Booster: Sistema de bombas que permite impulsar el biogás desde la planta hasta las calderas. Un ejemplo de este equipo se muestra en la figura 21.



Figura 21. Sistema Booster implementado en la planta CCU Temuco.

Fuente: Producción Limpia MDL y Mercado de bonos de Carbono. (Urbina, 2009)

- Sistemas de medición de flujo de biogás y sistemas de control.

Los ingresos de esta propuesta vienen dados por el ahorro que implica, usar biogás en la caldera en vez de petróleo, y también la venta de bonos de carbono.

## 4 ESTUDIO FINANCIERO

### 4.1 Inversiones

Los costos estimados para el biodigestor anaeróbico, fueron obtenidos a través de una Empresa Minimet S.A. dedicada a proyectos de este tipo. Los costos tanto de los equipos necesarios para el funcionamiento del biodigestor, como su construcción se detallan en los cuadros 9 y 10. El total del costo del equipamiento necesario se detalla en el cuadro 11. El precio del dólar considerado fue de US\$480 pesos.

Cuadro 9. Costos estimados de equipos para un digestor de 1.250 metros cúbicos.

<b>Equipo</b>	<b>Costo Aproximado (US\$)</b>	<b>Unidades Necesarias</b>	<b>Costo Final (US\$)</b>
Agitador	52.083	1	52.083
Válvulas	260	7	1.823
Sistema de Calefacción	18.750	1	18.750
Válvula Biogás	1.042	3	3.125
Agitador 30 m <sup>3</sup>	6.250	1	6.250
Bombas	10.417	1	10.417
Intercambiador de Calor	8.333	1	8.333
Bomba de Calor	52.083	1	52.083
Antorcha de 70m <sup>3</sup> /hora	41.667	1	41.667
Total en Equipamiento (1)			194.531

Fuente: Basado en estudios de MINIMET, S.A.

Cuadro 10. Costos estimados de construcción de un digestor de 1.250 metros cúbicos.

<b>Elemento o Actividad</b>	<b>Metros Cúbicos</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Costo Final</b>
Excavación	840	8	6.650
Construcción Biodigestor	1.250	479	598.958
Relleno	240	5	1.100
Compactación	1.000	3	2.500
Hormigón	240	95	22.900
Instalación Faena	1	1.844	1.844
Total en Instalaciones			633.952
Mano de Obra (10% del costo de instalaciones)			63.395
Total en Construcción (2)			697.347

Fuente: Basado en estudios de MINIMET, S.A.

Cuadro 11. Costo final del biodigestor.

<b>Ítem</b>	<b>Costo</b>
Equipamiento (1)	194.531
Instalaciones (2)	697.347
Costo Total	891.879
Imprevistos (15% del costo total)	133.782
Costo Final Biodigestor	1.025.660

Fuente: Basado en estudios de MINIMET, S.A.

#### 4.1.1 Inversiones y Costos Anexos Escenario 1

A los costos indicados en el punto anterior, en el caso del escenario 1, se suman los siguientes, indicados en el cuadro 12:

Cuadro 12 . Costos estimados de equipos escenario 1.

<b>Equipo</b>	<b>Costo Aproximado (US\$)</b>
Antorcha	33.000
Estudio Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL)	45.000
Total Escenario 1	78.000

Fuente: Basado en estudio de Castañeda y Cuadra (2007).

#### 4.1.2 Inversiones y Costos Anexos Escenario 2

A los costos indicados en el punto anterior, en el caso del escenario 2, se suman los siguientes, indicados en el cuadro 13:

Cuadro 13. Costos estimados de equipos escenario 2.

<b>Equipo</b>	<b>Costo Aproximado (US\$)</b>
Antorcha	33.000
Estudio Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL)	45.000
Tuberías (1 km)	100.000
Modificación de quemador para caldera	42.081
Gasómetro de 780 m <sup>3</sup>	85.895
Booster de 380 m <sup>3</sup> /h	38.000
Sistema medición de flujo y presión	6.000
Sistema de control	10.000
Total Escenario 2	359.976

Fuente: Basado en estudio de Castañeda y Cuadra (2007).



## **4.2 Costos de Operación y Mantenimiento**

Respecto a los costos de mantención, estos corresponden aproximadamente al 2% del costo total de en equipamiento básico y los equipos respectivos de cada escenario.

La operación de este biodigestor necesita de cuatro operarios, se estima un sueldo por operario de US\$417 dólares, lo que implica un costo anual de US\$20.016 dólares anuales.

## **4.3 Ingresos**

### **4.3.1 Ingresos por venta de bonos de carbono.**

Se estima que el porcentaje de metano que contendrá el biogás generado será de un 60% según estudios de Ramírez *et al.* (2010), quienes evaluaron este porcentaje mediante la experimentación en laboratorio de digestión anaeróbica de lodos secundarios en condiciones mesófilas. Con este dato, podemos inferir la cantidad de metano que será generado en un año promedio. Este dato está indicado en la figura 22. Se calcula que el total de metano generado en un año promedio, serán 403.951 metros cúbicos.

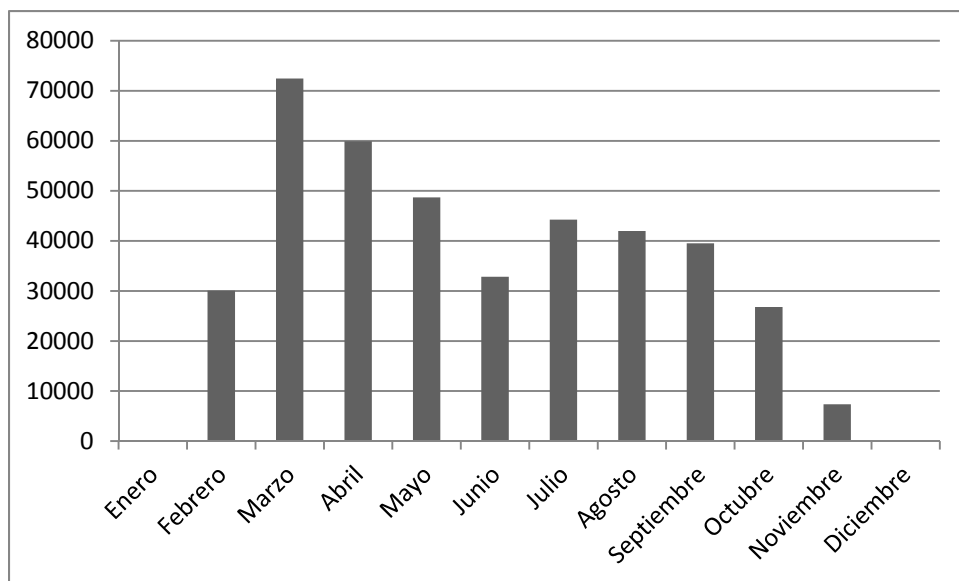


Figura 22. Metros cúbicos de metano generado en un año promedio, por medio de la digestión anaeróbica de lodos secundarios en la Empresa Invertec S.A.

Fuente: Basado en estudios de Ramírez *et al.* (2010).

El metano, tiene una densidad de 0,717 kg/m<sup>3</sup>, por tanto, los 403.951 de metros cúbicos de metano, que se estima se generaran en un año, equivalen a 290 toneladas de metano.

El metano, absorbe 21 veces más calor que el CO<sub>2</sub>. Esta relación es usada como referencia en el mercado de los MDL ya que permite estimar las toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> que se podrían reducir, al quemar metano. Es así que, por medio de esta relación, podríamos estimar que al quemar las 290 toneladas de metano, que se generarán hipotéticamente en un año promedio, equivalen a quemar aproximadamente 6.090 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.

Se estima que el precio de transacción de una tonelada de carbono equivalente, valdrá 7 dólares, basándonos en el estudio de caso de Castañeda y Cuadra (2007). Por tanto, en un año se podrían obtener US\$42.630 dólares americanos.

### **4.3.2 Ingresos por sustitución de combustible**

El combustible utilizado en las calderas de Invertec S.A. es petróleo número 6. Este combustible contiene una energía de 155.900 BTU por galón. Esto corresponde a 41.184 BTU por litro de combustible. (The Engineering Toolbox, 2011).

Como se especifica en el capítulo 3.6.2 por concepto de biogás, existe una energía disponible anual de 15.629 millones BTU. Esto equivaldría, según el dato anterior a 379.488 litros de petróleo número 6.

El promedio del costo de petróleo número 6 el año 2008, fueron 300 pesos por litro, o su equivalente US\$0,625 dólares americanos. Utilizando este valor como referencia, por sustitución de combustible, se podrían ahorrar aproximadamente US\$237.180 dólares.

### **4.3.3 Ingresos por ahorro en la disposición del lodo en un relleno sanitario.**

De acuerdo a la información entregada por la Empresa, se estima que el costo de disponer el lodo en el relleno sanitario, incluido el transporte de este, es de 0,0125 dólares por kilo de lodo. Considerando los 6.062.049 kilos de lodo promedio generados en un año, se gasta en un año promedio US\$75.776 dólares en disponerlos en un monorrelleno sanitario.

### **4.3.4 Ingresos por generación de abono.**

La digestión anaeróbica, genera un sustrato con características beneficiosas para el suelo, que aporta nutrientes y mejora las características físicas del suelo.

De acuerdo a lo investigado, como se indica en el punto 3.1 la digestión anaeróbica reduce en un 77% el volumen de los lodos a tratar, por lo que aproximadamente un 23% de lo ingresado al digestor se convertirá en abono.

De acuerdo a los estudios de GESCAM S.A. (2009) el precio para el año 2009 de este subproducto de la digestión anaerobia es aproximadamente 46,7 dólares por tonelada de biosólido estabilizado generado, el cual es similar al precio del compost.

Con estos parámetros, podemos estimar que para un año promedio, se podrían generar 1.394 toneladas de biosólido estabilizado, lo que ahorraría un total de US\$65.112 dólares. Según la futura normativa de manejo de lodos D.S. N°123/2006 este sería apto para la disposición en campos agrícolas ya que cumpliría los parámetros establecidos para un lodo clase A, como se indica en el punto 5.1.3.

#### **4.4 Evaluación de las Alternativas Propuestas**

Para evaluar cual de los dos escenarios era el más rentable de implementar en la Empresa, se procedió a realizar un flujo de caja puro, basado en las recomendaciones realizadas por Sapag y Sapag (1991). Para realizarlo se utilizaron los siguientes supuestos:

- La Empresa Invertec, tendrá un crecimiento anual de un 3%, por tanto, la generación de biogás y lodo por parte de la Empresa, crecerá en igual magnitud.
- La depreciación de los equipos necesarios para implementar cada escenario propuesto será de un 10%.
- La tasa de descuento utilizada será de un 12%.
- El impuesto que se considerará para la empresa es de un 17%, debido a que calza en un impuesto de 1° categoría.
- El precio del litro de petróleo se mantendrá constante en US\$0,625 dólares.

Este flujo de caja se realizará en un horizonte de 10 años. El instrumento de evaluación que se utilizará es el valor actual neto (VNA). El cual mide el aporte económico de un proyecto a sus inversionistas, reflejando el excedente o pérdida de dinero, una vez recuperada la inversión y el costo de oportunidad de los recursos usados.

El flujo de caja del primer escenario, se indica en el cuadro 14.

Cuadro 14 Flujo de Caja Escenario 1.

(Continúa)

Año	0	1	2	3	4	5
<b>Ingresos</b>						
<b><u>Bonos de carbono (BC)</u></b>						
Ton. CO <sub>2</sub> Equivalente Reducidas		6.082	6.265	6.453	6.646	6.846
Precio Ton. CO <sub>2</sub> Equivalente (\$/ton)		7	7	7	7	7
<b>Ingresos por BC (US\$)</b>		42.576	43.853	45.169	46.524	47.920
<b><u>Ahorro de Disposición Final</u></b>						
Kilos de Lodo Generado		6.062.049	6.243.910	6.431.228	6.624.165	6.822.890
Precio Transporte y Disposición (US\$)		0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
<b>Ingresos por Ahorro en Disposición Final (US\$)</b>		75.776	78.049	80.390	82.802	85.286
<b><u>Generación de Abono</u></b>						
Toneladas Abono Generado		1.394	1.436	1.479	1.524	1.569
Precio abono (US\$)		47	47	47	47	47
<b>Ingresos (US\$)</b>		65.112	67.066	69.078	71.150	73.285
<b>Total Ingresos (US\$)</b>		183.464	188.968	194.637	200.476	206.490
<b><u>Costos</u></b>						
Operación (US\$)		20.016	20.016	20.016	20.016	20.016
Mantenimiento (US\$)		21.173	21.173	21.173	21.173	21.173
Auditorias (US\$)		5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
<b>Total de Costos (US\$)</b>		46.189	46.189	46.189	46.189	46.189
<b><u>Depreciación</u></b>						
Depreciación (US\$)		105.866	105.866	105.866	105.866	105.866
<b>Utilidad Bruta (US\$)</b>		31.409	36.913	42.582	48.421	54.435
Impuesto (17%)		5.340	6.275	7.239	8.232	9.254
<b>Utilidad Neta (US\$)</b>		26.070	30.638	35.343	40.190	45.181
Depreciación (US\$)		105.866	105.866	105.866	105.866	105.866
<b><u>Inversiones</u></b>						
<b>Total Inversiones (US\$)</b>		1.070.660				
<b>FCL (US\$)</b>		-	131.936	136.504	141.209	146.056
		1.070.660				151.047
<b>Tasa de Descuento</b>		12%				
<b>VAN (US\$)</b>		-	225.751			

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 14. Flujo de Caja Escenario 1. (Continuación)

Año	6	7	8	9	10
<b>Ingresos</b>					
<b><u>Bonos de carbono (BC)</u></b>					
Ton. CO <sub>2</sub> Equivalente Reducidas	7.051	7.263	7.480	7.705	7.936
Precio Ton. CO <sub>2</sub> Equivalente (\$/ton)	7	7	7	7	7
<b>Ingresos por BC (US\$)</b>	<b>49.357</b>	<b>50.838</b>	<b>52.363</b>	<b>53.934</b>	<b>55.552</b>
<b><u>Ahorro de Disposición Final</u></b>					
Kilos de Lodo Generado	7.027.57	7.238.40	7.455.55	7.679.22	7.909.59
	6	4	6	2	9
Precio Transporte y Disposición (US\$)	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
<b>Ingresos por Ahorro en Disposición Final (US\$)</b>	<b>87.845</b>	<b>90.480</b>	<b>93.194</b>	<b>95.990</b>	<b>98.870</b>
<b><u>Generación de Abono</u></b>					
Toneladas Abono Generado	1.616	1.665	1.715	1.766	1.819
Precio abono (US\$)	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7
<b>Ingresos (US\$)</b>	<b>75.483</b>	<b>77.748</b>	<b>80.080</b>	<b>82.483</b>	<b>84.957</b>
<b>Total Ingresos (US\$)</b>	<b>212.685</b>	<b>219.066</b>	<b>225.638</b>	<b>232.407</b>	<b>239.379</b>
<b>Costos</b>					
Operación (US\$)	20.016	20.016	20.016	20.016	20.016
Mantenimiento (US\$)	21.173	21.173	21.173	21.173	21.173
Auditorias (US\$)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
<b>Total de Costos (US\$)</b>	<b>46.189</b>	<b>46.189</b>	<b>46.189</b>	<b>46.189</b>	<b>46.189</b>
<b>Depreciación</b>					
Depreciación (US\$)	105.866	105.866	105.866	105.866	105.866
<b>Utilidad Bruta (US\$)</b>	<b>60.630</b>	<b>67.011</b>	<b>73.583</b>	<b>80.352</b>	<b>87.324</b>
Impuesto (17%)	10.307	11.392	12.509	13.660	14.845
<b>Utilidad Neta (US\$)</b>	<b>50.323</b>	<b>55.619</b>	<b>61.074</b>	<b>66.692</b>	<b>72.479</b>
Depreciación (US\$)	105.866	105.866	105.866	105.866	105.866
<b>Inversiones</b>					
<b>Total Inversiones (US\$)</b>					
<b>FCL (US\$)</b>	<b>156.189</b>	<b>161.485</b>	<b>166.940</b>	<b>172.558</b>	<b>178.345</b>
<b>Tasa de Descuento</b>					
<b>VAN (US\$)</b>					

Fuente: Elaboración Propia.

En este escenario, los ingresos están dados por la venta de bonos de carbono, ahorro en disposición final y generación de abono. El ingreso más significativo es el ahorro en disposición final, con un 41,3% de los ingresos totales. Le sigue la generación de abono y ventas de bonos de carbono con un 35,4% y 23,2% respectivamente.

De las inversiones, la principal es el equipamiento básico, que corresponde al 96% de la inversión. De los costos, el principal es la mantención del equipamiento básico, que corresponde al 45,8% de los costos totales.

El flujo de caja de este escenario entrega un VAN negativo, que alcanza a - US\$ 225.751 dólares.

El periodo de retorno de la inversión indica que esta será recuperada en el año 8.

El flujo de caja del segundo escenario, se indica en el cuadro 15.

Cuadro 15. Flujo de Caja Escenario 2.

(Continúa)

Año	0	1	2	3	4	5
<b>Ingresos</b>						
<b><u>Sustitución de Combustible</u></b>						
Litros de Petróleo Equivalentes	379.488	390.873	402.599	414.677	427.117	
Precio Litro. Petróleo (US\$)	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625
<b>Ingresos (US\$)</b>	<b>237.180</b>	<b>244.296</b>	<b>251.625</b>	<b>259.173</b>	<b>266.948</b>	
<b><u>Bonos de carbono</u></b>						
Ton. CO <sub>2</sub> Equivalente Reducidas	6.082	6.265	6.453	6.646	6.846	
Precio Ton. CO <sub>2</sub> Equivalente (\$/ton)	7	7	7	7	7	
<b>Ingresos (US\$)</b>	<b>42.576</b>	<b>43.853</b>	<b>45.169</b>	<b>46.524</b>	<b>47.920</b>	
<b><u>Ahorro de Disposición Final</u></b>						
Kilos de Lodo Generado	6.062.049	6.243.910	6.431.228	6.624.165	6.822.890	
Precio Transporte y Disposición (US\$)	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
<b>Ingresos (US\$)</b>	<b>75.776</b>	<b>78.049</b>	<b>80.390</b>	<b>82.802</b>	<b>85.286</b>	
<b><u>Generación de Abono</u></b>						
Toneladas Abono Generado	1.394	1.436	1.479	1.524	1.569	
Precio abono (US\$)	47	47	47	47	47	
<b>Ingresos (US\$)</b>	<b>65.112</b>	<b>67.066</b>	<b>69.078</b>	<b>71.150</b>	<b>73.285</b>	
<b>Total Ingresos (US\$)</b>	<b>420.644</b>	<b>433.264</b>	<b>446.262</b>	<b>459.649</b>	<b>473.439</b>	
<b><u>Costos</u></b>						
Operación (US\$)	20.016	20.016	20.016	20.016	20.016	20.016
Mantenimiento (US\$)	26.813	26.813	26.813	26.813	26.813	26.813
Auditorias (US\$)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
<b>Total de Costos (US\$)</b>	<b>51.829</b>	<b>51.829</b>	<b>51.829</b>	<b>51.829</b>	<b>51.829</b>	<b>51.829</b>
<b><u>Depreciación</u></b>						
Depreciación (-) (US\$)	134.064	134.064	134.064	134.064	134.064	134.064
<b>Utilidad Bruta (US\$)</b>	<b>234.752</b>	<b>247.371</b>	<b>260.369</b>	<b>273.757</b>	<b>287.546</b>	
Impuesto (17%) (US\$)	39.908	42.053	44.263	46.539	48.883	
<b>Utilidad Neta (US\$)</b>	<b>194.844</b>	<b>205.318</b>	<b>216.106</b>	<b>227.218</b>	<b>238.663</b>	
Depreciación (+) (US\$)	134.064	134.064	134.064	134.064	134.064	134.064
<b><u>Inversiones</u></b>						
<b>Total Inversiones (US\$)</b>	<b>1.385.636</b>					
<b>FCL (US\$)</b>	<b>-</b>	<b>328.908</b>	<b>339.382</b>	<b>350.170</b>	<b>361.282</b>	<b>372.727</b>
	<b>1.385.636</b>					
<b>Tasa de Descuento</b>	<b>12%</b>					
<b>VAN (US\$)</b>	<b>700.768</b>					

Fuente: Elaboración Propia



Cuadro 15. Flujo de Caja Escenario 2.

(Continuación)

Año	6	7	8	9	10
<b>Ingresos</b>					
<b><u>Sustitución de Combustible</u></b>					
Litros de Petróleo Equivalentes	439.931	453.129	466.723	480.725	495.146
Precio Litro. Petróleo (US\$)	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625
<b>Ingresos (US\$)</b>	<b>274.957</b>	<b>283.206</b>	<b>291.702</b>	<b>300.453</b>	<b>309.466</b>
<b><u>Bonos de carbono</u></b>					
Ton. CO <sub>2</sub> Equivalente Reducidas	7.051	7.263	7.480	7.705	7.936
Precio Ton. CO <sub>2</sub> Equivalente (\$/ton)	7	7	7	7	7
<b>Ingresos (US\$)</b>	<b>49.357</b>	<b>50.838</b>	<b>52.363</b>	<b>53.934</b>	<b>55.552</b>
<b><u>Ahorro de Disposición Final</u></b>					
Kilos de Lodo Generado	7.027.576	7.238.404	7.455.556	7.679.222	7.909.599
Precio Transporte y Disposición (US\$)	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
<b>Ingresos (US\$)</b>	<b>87.845</b>	<b>90.480</b>	<b>93.194</b>	<b>95.990</b>	<b>98.870</b>
<b><u>Generación de Abono</u></b>					
Toneladas Abono Generado	1.616	1.665	1.715	1.766	1.819
Precio abono (US\$)	47	47	47	47	47
<b>Ingresos (US\$)</b>	<b>75.483</b>	<b>77.748</b>	<b>80.080</b>	<b>82.483</b>	<b>84.957</b>
<b>Total Ingresos (US\$)</b>	<b>487.642</b>	<b>502.271</b>	<b>517.339</b>	<b>532.860</b>	<b>548.845</b>
<b>Costos</b>					
Operación (US\$)	20.016	20.016	20.016	20.016	20.016
Mantenimiento (US\$)	26.813	26.813	26.813	26.813	26.813
Auditorias (US\$)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
<b>Total de Costos (US\$)</b>	<b>51.829</b>	<b>51.829</b>	<b>51.829</b>	<b>51.829</b>	<b>51.829</b>
<b>Depreciación</b>					
Depreciación (-) (US\$)	134.064	134.064	134.064	134.064	134.064
<b>Utilidad Bruta (US\$)</b>	<b>301.749</b>	<b>316.379</b>	<b>331.447</b>	<b>346.967</b>	<b>362.953</b>
Impuesto (17%) (US\$)	51.297	53.784	56.346	58.984	61.702
<b>Utilidad Neta (US\$)</b>	<b>250.452</b>	<b>262.594</b>	<b>275.101</b>	<b>287.983</b>	<b>301.251</b>
Depreciación (+) (US\$)	134.064	134.064	134.064	134.064	134.064
<b>Inversiones</b>					
<b>Total Inversiones (US\$)</b>					
<b>FCL (US\$)</b>	<b>384.516</b>	<b>396.658</b>	<b>409.164</b>	<b>422.046</b>	<b>435.314</b>
<b>Tasa de Descuento</b>					
<b>VAN (US\$)</b>					

Fuente: Elaboración Propia

En este escenario, los ingresos están dados por la venta de bonos de carbono, ahorro en disposición final, generación de abono y sustitución de combustible fósil. El ingreso más importante es el ahorro de combustible fósil producto de la sustitución. Este alcanza el 56% de los ingresos totales. El segundo ingreso más importante es el ahorro en disposición final, que alcanza el 18% de los ingresos totales.

De las inversiones, la principal es el equipamiento básico, que corresponde al 74% de la inversión. De los costos, el principal es la mantención del equipamiento básico, que corresponde al 51,7% de los costos totales.

El flujo de caja de este escenario entrega un VAN positivo, que alcanza los US\$ 700.768 dólares. El periodo de recuperación de la inversión es en el año 5.

De acuerdo al indicador VAN, el segundo escenario propuesto generaría beneficios económicos para la Empresa, a pesar que significa una inversión mayor y los costos de mantención también son más elevados. Esto se debe principalmente al gran ahorro en el uso de combustibles fósiles.

## 5 ESTUDIO AMBIENTAL Y LEGAL

Este capítulo se basa en los proyectos que han ingresado al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental SEIA los últimos años, que trabajan de alguna forma con biogás. Actualmente han ingresado 12 proyectos; 3 de ellos están en proceso de calificación, 1 no ha sido admitido a calificación y el resto han sido aprobados. Todos estos han sido ingresados como Declaración de Impacto Ambiental.

### 5.1 Consideraciones Legales

#### 5.1.1 Normativas

A continuación, se realiza un compendio de normativas legales que se deberían cumplir para el adecuado funcionamiento del proyecto descrito en este trabajo:

- Código Sanitario. D.F.L. 725/67 Actualizado por el D.S. 553 de 1990: En los artículos 80 y 81 se especifica que el Ministerio de Salud, tiene la facultad de autorizar y vigilar el funcionamiento de todo lugar destinado a la acumulación de residuos sólidos.
- Decreto Ley 1.289 de 1975. Ministerio del Interior. Ley Orgánica de Municipalidades.: En el artículo 24 se establece que es deber del departamento de obras municipales aplicar normas legales y técnicas para prevenir el deterioro ambiental.
- Ley 19.300 de 1994. Ley de Bases Generales de Medio Ambiente: Regula qué actividades son susceptibles de causar un impacto ambiental, y según esto, califica cuales deben someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. En el caso de este proyecto, es necesario pasar por esta evaluación.
- D.S. N°95. Ministerio Secretaría General de la Presidencia: Especifica detalladamente los proyectos que deben ingresar al SEIA.

- D.S. N° 144. Ministerio de Salud: En este decreto supremo se establecen normas para evitar emanaciones o contaminantes de cualquier naturaleza, en niveles que afecten la salud y medio ambiente.
- D.S. N° 146. Ministerio Secretaría General de la Presidencia: Regula los niveles de ruido. Esta norma es válida tanto para la etapa de construcción como operación del proyecto.
- D.S. N°594. Ministerio de Salud: Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo.
- D.S. N° 1.164. Ministerio de Obras Públicas: Establece medidas de seguridad que deben adoptarse en el almacenamiento de sustancias inflamables que se encuentren en estado sólido, líquido o gaseoso.
- D.S. N° 222/96. Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción. Modificado por el D.S. N° 78/98 Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción: Reglamento de instalaciones interiores de gas.

### **5.1.2 Autorizaciones y Permisos**

Para que la planta de biogás pueda entrar en funcionamiento, se requiere de una serie de permisos y autorizaciones, los cuales son descritos a continuación:

- Inscripción de la instalación de gas combustible: Un instalador autorizado debe inscribir el proyecto de gas combustible en la Superintendencia de Electricidad y Combustibles antes de que la planta entre en funcionamiento.
- Artículo 90 del D.S. N°95/01: Autorización sanitaria del servicio de salud local; se debe contar con esta autorización para acumular, tratar y disponer de manera final residuos orgánicos.
- Establecimiento de un contrato de prestación de servicios para el control de vectores sanitarios.

### 5.1.3 Futura normativa de manejo de lodos D.S. N°123/2006

El futuro D.S. N°123/2006, establece que se considera un lodo como estabilizado, cuando se haya reducido en un 38% en contenido de sólidos volátiles presentes en el lodo crudo. Esta condición se cumple en la digestión anaerobia, ya que según estudios de Roberts *et. al* (1999), los porcentajes de reducción de sólidos totales varían entre un 35% a 45% y los sólidos volátiles en un 50%, en estudios realizados digiriendo anaeróbicamente lodos activados en digestores de una etapa, a 35°C y con un período de retención de 20 días.

Otro aspecto que establece el Reglamento es el contenido de coliformes fecales, *salmonella s.p.* y huevos de helminto. Como se menciona en el punto 3.3.2.2. Los contenidos de estos patógenos en el lodo de la Empresa, son menores a los requeridos para clasificar a un lodo como clase A, en consecuencia, se obtendrá un lodo sin restricciones sanitarias para ser dispuesto en zonas agrícolas.

En el futuro D.S. N°123/2006, se establece que la digestión anaerobia debe tener un tiempo de retención mínima de 15 días para 35° hasta 37° Celsius. Estos parámetros se contemplan en el diseño del digestor.

Finalmente, en el futuro D.S. N°123/2006, se establecieron concentraciones de metales máximas para la disposición de lodos en el suelo indicadas en el cuadro 16. Como se observa en la figura 23, las concentraciones medidas en los lodos de la Empresa, son significativamente menores a los máximos establecidos en la Reglamento, por lo que no existirían problemas para su aplicación en el suelo.

Cuadro 16. Concentración de metales pesados permitida en lodos, definido en el DS N° 123/2006.

<b>Metal pesado</b>	<b>Aplicación en suelos con severas limitaciones<sup>5</sup> o en suelos forestales mg/kg</b>	<b>Aplicación en suelos degradados</b>
Arsénico	20	40
Cadmio	8	40
Cobre	1000	1200
Cromo	-	-
Mercurio	10	20
Níquel	80	420
Plomo	300	400
Selenio	50	100
Zinc	2000	2800

Fuente: Futuro D.S. N° 123/2006.

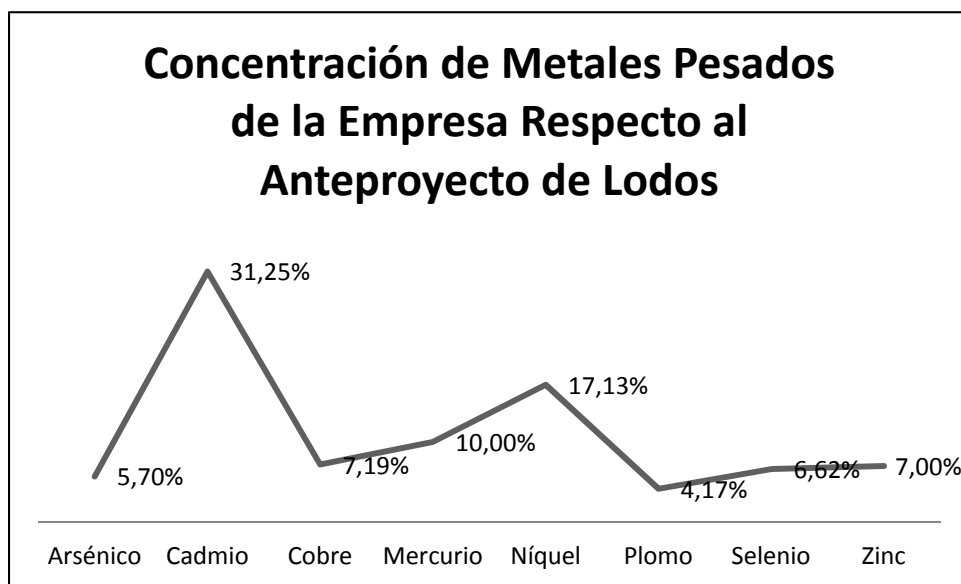


Figura 23. Porcentaje de concentración de metales pesados en los lodos de la Empresa, respecto a los valores máximos de concentración para aplicación en suelos con severas limitaciones o forestales, definidos por el futuro D.S. N° 123/2006.

Fuente: Basado en D.S. N° 123/2006.

<sup>5</sup> Limitaciones referentes a la aptitud frutal natural

## **5.2 Consideraciones Ambientales**

A pesar que la implementación de la digestión anaerobia como etapa primordial de un adecuado manejo de residuos dentro de la Empresa, genera importantes beneficios ambientales, como es la recuperación de propiedades agrícolas del lodo y captura de uno de los gases de efecto invernadero más importantes, también provoca impactos negativos para el medio en donde será emplazado.

Dentro de los efectos más relevantes de la operación de este tipo de proyectos son las emisiones a la atmósfera, y en algunas ocasiones, la emisión de olores molestos, lo que presenta uno de los principales inconvenientes cuando existen viviendas en las cercanías de las instalaciones, como es el caso de Invertec.

### **5.2.1 Impactos ambientales causados en la etapa de construcción del proyecto**

Los impactos que se generarán en la etapa de construcción del proyecto son los siguientes:

- Emisión de contaminantes propios del movimiento tanto de maquinarias pesadas como uso de automóviles. Las principales emisiones de este tipo son gases de combustión y material particulado.
- Movimientos y acopio de tierra y escombros. La principal emisión es material particulado.
- Generación de residuos sólidos domésticos (papeles, cartones, etc.), material de escarpe (material de excavación sobrante) residuos sólidos de construcción no peligrosos (madera, pvc, partes de hormigón, etc.) y residuos sólidos peligrosos (envases de aceites, lubricantes, etc.).
- Emisión de ruido
- Congestión de las vías.

### **5.2.2 Impactos ambientales causados en la etapa de operación del proyecto**

- Emisiones a la atmósfera por quema de biogás (tanto en la antorcha como en la caldera). Al realizar esta acción se emiten principalmente CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y PM<sub>10</sub>.
- Emisión de polvo y gases de combustión por transporte, almacenamiento y manejo de biomasa.
- Ruido.
- Posibles olores.
- Generación de residuos sólidos domésticos (papeles, cartones, plásticos, etc.), residuos industriales no peligrosos (alambres, piezas metálicas, etc.) y residuos industriales peligrosos (envases de aceites, lubricantes, etc.)



## 6 CONCLUSIONES

Respecto a la generación de lodos en la Empresa, ésta sigue patrones comunes en los tres años registrados, no siguiendo una generación continua durante el año, por lo que se sugiere que los meses en que no se genere lodo, que son los meses de diciembre y enero, este se complemente con otros residuos generados en la Empresa, que son restos de frutas y verduras, restos de poda, papeles y cartón.

Para tratar estos lodos, se concluyó que la alternativa más viable es la digestión anaeróbica, la cual genera subproductos que pueden ser reincorporados en el proceso productivo de la Empresa. Sumado a esto, se reduce significativamente el volumen del residuo, y la disposición final de éste, puede realizarse en los mismos campos de la Empresa ya que tiene un valor agronómico que aumenta el rendimiento de las especies que se cultivan actualmente.

Respecto a la calidad del lodo como sustrato para la digestión anaeróbica, ésta se evaluó de acuerdo a parámetros, físicos, químicos y biológicos. En todos los parámetros medidos el lodo generado en la planta resultó ser un sustrato adecuado para el biodigestor por implementar.

Este proyecto, debería entrar como una Declaración de Impacto Ambiental (DIA), en el Sistema de Impacto Ambiental (SIA), de acuerdo a otros proyectos similares evaluados. Si bien se generan impactos ambientales negativos, propios de la construcción y operación de un proceso productivo industrial, estos no se comparan a los beneficios ambientales obtenidos. Respecto a las consideraciones legales, se deberán cumplir las normativas propias de la construcción de un proyecto de gran envergadura. Al evaluar las características del lodo generado en la Empresa, con la futura normativa de manejo de lodos D.S. N°123/2006, este ya cumple con gran parte de las condiciones necesarias para considerarlo como un lodo apto para ser dispuesto en terrenos agrícolas.

Para aprovechar los subproductos obtenidos de la digestión anaeróbica, se estudian dos escenarios; el primero consta de instalar una chimenea con el fin de obtener bonos de carbono por la quema de metano, y el segundo escenario, implementar nuevos quemadores en una de las calderas existentes en la planta, con el fin de utilizar el biogás como combustible y así ahorrar en consumo de petróleo N°6, sumado a la venta de bonos de carbono, ahorro en disposición final y generación de abono. Se realizó un estudio financiero de ambas alternativas, y evaluando un flujo de caja puro, se concluyó que el segundo escenario es rentable de implementar por la Empresa, debido principalmente al gran ahorro en consumo de combustibles fósiles, producto de la utilización de metano en las calderas pertenecientes a las instalaciones de producción de jugo de frutas y verduras, llamada Invertec Natural Juice.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

Aguilera, S.M. y M. Rodríguez. 2005. Desarrollo de Prácticas Sustentables de Reciclaje de Biosólidos en Plantaciones Forestales. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 171pp.

Ahring, B. K. and P. Westermann. 1983. Toxicity of heavy metals to thermophilic anaerobic digestion. *Eur. J. Appl Microbiol Biotechnol* 17: 365-370.

Álvarez, A. 2009. Agroindustria chilena: las temporeras y el empleo precario. *Red Global América Latina*. 8 pp.

Anrique, R. y M.P. Riveros. Efecto del ensilado sobre la composición química y degradabilidad ruminal de la pomasa de manzana. *Archivos de Medicina Veterinaria* 34 (2).

Appels, L., J. Baeyens, J. Degrève and R. Dewil. 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science* 34: 755-781.

Baraño, P.A. y L.A. Tapia. 2004. Tratamiento de Aguas Servidas: Situación en Chile. *Ciencia y Trabajo*. Jul-Sept: 111-117.

Bashir, B.H. and A. Matin. 2004. Sodium toxicity control by the use of magnesium in an anaerobic reactor. *Journal of Applied Sciences & Environmental Management* 8(1): 17-21.

Bolzonella D., P. Pavan, P. Battistoni y F. Cecchi. 2005. Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge: influence of the solid retention time in the wastewater treatment process. *Process Biochemistry* 40: 1453-1460.

Bravo, J. 2010. Chile y el mercado mundial de la fruta industrializada. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias ODEPA. Ministerio de Agricultura.

Campos, A.E. 2001. Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. Tesis Doctorado en Ingeniería Agronómica. Universidad de Lleida. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Lleida, España. 394p.

Castañeda J.R. y C.E. Cuadra. 2007. Alternativas de uso de biogás en la industria compañía cerveceras unidas planta CCU Chile, Santiago. Tesis de magister en economía energética. Universidad Técnica Federico Santa María. Departamento de Mecánica. Santiago. Chile. 163 pp.

Chen Y., J. Cheng and K. Creamer. 2007. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology* 99: 4044-4064.

Ciencia. 2004. Potencial de membrana. Disponible en: <http://www.ciencia.net/VerArticulo/?idTitulo=Potencial%20de%20membrana> Leído el 4 de mayo de 2009.

CONAMA, 1998. Guía para el control y prevención de la contaminación industrial. Industria procesadora de frutas y hortalizas. Disponible en: [http://www.sinia.cl/1292/articles-39923\\_recurso\\_1.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-39923_recurso_1.pdf) Leído el 17 de octubre de 2010.

DS N° 123/2006. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Reglamento para el Manejo de Lodos Generados en Plantas de Tratamientos de Aguas Servidas. En revisión.

GESCAM. 2009. Biogás a partir de residuos orgánicos. Centro de tratamiento de residuos sólidos orgánicos. Disponible en [http://www.ingenieros.cl/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=62](http://www.ingenieros.cl/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=62) Leído el 13-03-2011.

Google Earth, 2011.

Hong-Wei, Y. y D. Brune. 2006. Anaerobic Co-digestion of Algal Sludge and Waste Paper to Produce Methane. *Bioresource Technology* 98. 130-134.

Mahamud, M., A. Gutiérrez y H. Sastre. 1996. Biosólidos generados en la depuración de aguas. *Métodos de tratamiento. Ingeniería del Agua* 3: 45-54.

Mc Carty, P. L. 1964. *Anaerobic Waste Treatment Fundamentals*. *Public Works* 95: 91-94.

Memoria Anual Invertec. 2008. Invertec Foods S.A. Disponible en: [http://www.invertec.cl/pdf/foods/fds\\_08.pdf](http://www.invertec.cl/pdf/foods/fds_08.pdf). Leído el 09-02-2011.

Mena, M. P. 2002. Avances en el marco legal para el uso y disposición de biosólidos en Chile: Efectos. En: Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México. Octubre 27-31, 2002.

Metcalf & Eddy, Inc. 1996. *Wastewater Engineering*. 4<sup>a</sup> ed. Volumen 1. McGraw-Hill. Estados Unidos 752 pp.

Metcalf & Eddy, Inc. 2003. *Wastewater Engineering*. 4<sup>a</sup> ed. Volumen 2. McGraw-Hill. Estados Unidos 1771 pp.

Mignone, N. 2005. Biological inhibition/toxicity control in municipal anaerobic digestion facilities. Alabama Water & Pollution Control Association. Disponible en: <http://www.awpca.net/Biological%20Inhibition.pdf> Leído el 27 de abril de 2009

Moncayo, G. 2008. Biodigestores. Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás. Aqualimpia Beratende Ingenieure. Berlín, Alemania. 700p.

Mustin, M. 1987. Le compost, gestion de la matière organique. Ed. Francois Dubusc, Paris, 954 p.

Pereda, I., R. Irusta y D. Oliva. 2007. Uso de los residuos sólidos mineros de la extracción del níquel como estimulantes de la producción de biogás. Ingeniería Mecánica 10: 57-61.

Pezo, D.A. 2009. Plan de negocios para el desarrollo de plantas de biogás en la industria nacional con fines energéticos. Tesis optar al título de ingeniería civil industrial. Universidad Técnica Federico Santa María. Departamento de Industrias. Santiago, Chile.

Qasim, Syed. 1985. Wastewater Treatment Plants. Planning, Design and Operation. CRS Press. Nueva York, Estados Unidos. 1099 pp.

Ramila, J.I. y S.I. Rojas. 2008. Alternativas de Uso y Disposición de Biosólidos y su Impacto en Tarifas de Agua. Tesis para optar al título de Ingeniería Comercial. Universidad de Chile. Facultad de Economía y Negocios. Escuela de Economía y Administración. Santiago, Chile. 166 pp

Ramírez, M., N. Rincón, I. Araujo, A. Díaz y J. Mata. 2010. Estabilización anaerobia mesofílica y termofílica de lodos activados provenientes de la industria cervecera. Ciencia e Ingeniería Neogranadina 20 (1): 5-21.

Reynolds, K. 2002. Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamérica. Identificación del Problema. Agua Latinoamérica. Sept-Oct: 1-4.

Robert, R., S. Le y C.F. Forster. 2009. A thermophilic/mesophilic dual digestion system for treating waste activated sludge. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 74: 445-450.

Sánchez, J.M., L. Valle, F. Rodríguez, M.A. Moriñigo y J.J. Borrego. 1996. Inhibition of methanogenesis by several heavy metals using pure cultures. *Letters in Applied Microbiology* 23: 439-444.

Sapag, N. y R. Sapag. 1991. *Preparación y Evaluación de Proyectos*. McGraw-Hill Interamericana de México. 385 p.

The Engineering Toolbox. 2011. Fuel Oil and Combustion Values. Disponible en: [http://www.engineeringtoolbox.com/fuel-oil-combustion-values-d\\_509.html](http://www.engineeringtoolbox.com/fuel-oil-combustion-values-d_509.html) Leído el 02-02-2011.

Urbina, Cristian. 2009. *Producción Limpia MDL y Mercado de bonos de Carbono*. Disponible en: <http://www.ingenieriaumayor.cl/informatica/w/wp-content/uploads/2010/06/Alternativas-uso-Biogas-UMAYOR.ppt> Leído el 28-01-2011

Yasuko, S. 2006. *Pre-tratamientos de lodos biológicos generados en los procesos de lodos activados para el aumento de su biodegradabilidad a través de hidrólisis enzimática, térmica y alcalina*. Tesis Doctor Ing. Quím. Florianópolis S-C, Universidad Federal de Santa Catarina. Departamento de Ingeniería Química e Ingeniería en Alimento, Brasil. 242 p.

Zitomer D.H., C.C. Johnson and R.E. Speece. 2008. Metal stimulation and municipal digester thermophilic/mesophilic activity. *Journal of Environmental Engineering* 134(1): 42-47.

## 8 ANEXOS

Cuadro 17. Mediciones físicas realizadas en lodos secundarios generados por la Empresa Invertec S.A.

Parámetro	Unidades	Resultado			
		1	2	3	4
Conductividad Eléctrica	dS/m	8	3,75	5,25	3,28
pH		8,2	6,1	5,18	5,1
Humedad	%	88,4	87,00	89,83	75,4
Densidad	m/v	0,89	0,88	0,82	

Fuente: Laboratorio externo.

Cuadro 18. Mediciones del contenido orgánico de los lodos secundarios generados por la Empresa Invertec S.A.

Parámetro	Unidades	Resultado			
		1	2	3	4
DQO	g/kg				853,3
Materia Orgánica	%				61,3
Relación C:N					9,9
Sólidos Volátiles	%				61,7
Sólidos Totales	%				24,6

Fuente: Laboratorio externo.



Cuadro 19. Mediciones del contenido de patógenos presentes en los lodos secundarios generados por la Empresa Invertec S.A.

Parámetro	Unidades	Resultado			
		1	2	3	4
CF A-1 (9s)	NMP/g				5,1
	NMP/100ml	3*10 <sup>4</sup>	3*10 <sup>4</sup>	2,4*10 <sup>5</sup>	
<i>Salmonella sp</i>	Presencia/Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	
	NMP/4g				<2
Huevos de Helminths	Huevos/10g				0

Fuente: Laboratorio externo.

Cuadro 20. Mediciones del contenido de nutrientes presentes en los lodos secundarios generados por la Empresa Invertec S.A.

Parámetro	Unidades	Resultado			
		1	2	3	4
Fósforo Disponible	mg/kg				157
Fósforo Olsen	mg/kg	1289	964	651	
Fósforo Total	%	1,11	0,36	0,33	
Nitrógeno	mg/kg	4233	1624	565	
Nitrógeno Amoniacal Disponible	mg/kg				618
Nitrógeno Amoniacal Total	g/kg				2,8
Nitrógeno Nitrato Disponible	mg/kg				3
Nitrógeno Nitrito Disponible	mg/kg				<0,1
Nitrógeno Total	%	5,25	4,01	3,84	
	g/kg				36,1

Fuente: Laboratorio externo.

Cuadro 21. Mediciones del contenido de metales presentes en los lodos secundarios generados por la Empresa Invertec S.A.

Parámetro	Unidades	Resultado			
		1	2	3	4
Arsénico	mg/kg	1,14	0,350	0,378	<2
Azufre	g/kg				<0,2
Boro	mg/kg	15,1	84,2	40,3	
Cadmio	mg/kg	< 2,3	< 2,5	0,08	<2
Calcio	mg/kg				1795
Cobalto	mg/kg				<2
Cobre Total	mg/kg	64,7	26,3	28,12	71,9
Cromo Total	mg/kg	22,7	24,8	13,8	14
Hierro Total	mg/kg				2245
Magnesio	mg/kg				1137
Mercurio	mg/kg	< 0,0125	< 0,0125	< 0,0124	<1
Molibdeno	mg/kg	2,45	3,49	< 0,124	
Níquel	mg/kg	13,7	13,3	9,35	
Plomo	mg/kg	< 11,3	< 12,5	9,32	3,1
Selenio	mg/kg	<0,025	<0,025	< 0,025	3,31
Sodio	mg/kg				1530
Zinc Total	mg/kg	140,00	37,00	44,27	31

Fuente: Laboratorio externo.

Cuadro 22. Concentraciones críticas para elementos inhibidores

(Continua)

Sustancia	Símbolo	Concentración estimulante (mg/l)	Concentración moderadamente inhibitoria (mg/l)	Concentración fuertemente inhibitoria (mg/l)
Sodio	Na <sup>+</sup>	350	3500-5500	8000
Potasio	K <sup>+</sup>	200-400	2500-4500	12000
Calcio	Ca <sup>2+</sup>	100-200	2500-4000	8000
Magnesio	Mg <sup>2+</sup>	75-150	1000-1500	3000
Amonio	NH <sup>4+</sup>	20-200 <sup>6</sup>	1500-3500 <sup>7</sup>	3000
Sulfuro	S <sup>-2</sup>	1-25	200	200

Fuente: Appels *et al.*, 2008; Campos, 2001 y Moncayo, 2008.<sup>6</sup> Concentraciones hasta 300mg/l no tienen efectos adversos (Mignone, 2005).<sup>7</sup> Concentraciones inhibitorias a pH 7,4 a 7,6 (Mignone, 2005).

Cuadro 23. Concentraciones críticas para elementos inhibidores (Continuación)

Cobre	Cu <sup>2+</sup>			50-70 0,5 a 1 <sup>8</sup>
Cromo	Cr <sup>6+</sup>		10	200-250 3 <sup>7</sup>
	Cr <sup>3+</sup>			180-240 2 <sup>7</sup>
Níquel	Ni <sup>2+</sup>	0,06 a 0,05		30 1 a 2 <sup>7</sup>
Zinc	Zn <sup>+2</sup>		400	0,5 a 17 600-1700
Arsenito y Arsenato	As <sup>+3</sup> y As <sup>+5</sup>		>0,7	0,5 a 0,17
Cadmio	Cd			10 0,01 a 0,02 <sup>7</sup>
Plomo	Pb			250
Cobalto	Co	0,03 a 0,06	0,5	20
Hierro	Fe	1,1	10	200
Zinc	Zn <sup>+2</sup>		400	0,5 a 1 <sup>7</sup> 600-1700
Arsenito y Arsenato	As <sup>+3</sup> y As <sup>+5</sup>		>0,7	0,5 a 0,1 <sup>7</sup>
Cadmio	Cd			10 0,01 a 0,02 <sup>7</sup>
Plomo	Pb			250
Cobalto	Co	0,03 a 0,06	0,5	20
Hierro	Fe	1,1	10	200

Fuente: Appels *et al.*, 2008; Campos, 2001 y Moncayo, 2008.

<sup>8</sup> Concentración en su forma soluble