



Universidad Católica de Temuco  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Ambiental

**DISEÑO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y  
APROVECHAMIENTO DE PURINES DE ORIGEN  
BOVINO**

**Tesis presentada a la  
Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Temuco  
Para Optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería.**

**YOHANA ELIZABETH GONZÁLEZ SEPÚLVEDA  
SEBASTIÁN OSVALDO SANDOVAL BASTIDA**

Temuco 2005

## COMISIÓN EXAMEN DE GRADO

Este Examen de Grado ha sido realizado en la Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad Católica de Temuco.

Presidente Comisión: .....

Oswaldo Rubilar Alarcón  
Decano de la Facultad de Ingeniería

Profesor Patrocinante: .....

Javier Quispe Curasi  
Doctor en Ingeniería Química, Escuela de Ingeniería Ambiental

Profesor Co-Patrocinante: .....

Cristián Herrera  
Ingeniero Ambiental, Escuela de Ingeniería Ambiental

Profesor Informante: .....

Francisco Encina Montoya  
Doctor en Ciencias Ambientales, Escuela de Ingeniería Ambiental

Secretario Académico de la Escuela: .....

Jimena Petit - Breuilh  
Doctor en Ingeniería Química, Escuela de Ingeniería Ambiental

Coordinador de Tesis: .....

Mario Ramírez Espinoza  
Master en Física, Doctor en Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería

*A DIOS*

*Y*

*A NUESTRAS FAMILIAS*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por haber preparado cada uno de los caminos que debí recorrer durante mi periodo de estudio en la Universidad, otorgándole a mis queridos padres, salud y fuerza necesaria para hacer realidad mis sueños.

Agradezco también a la familia Sandoval Bastida por el apoyo brindado durante momentos difíciles.

Agradezco a mi gran amor, Sebastián, por que en cada momento se mantuvo a mi lado, a pesar de disgustos y peleas, siempre con una sonrisa alivianaba cada situación difícil, haciendo más gratos los momentos de estudio y trabajo.

A nuestros queridos amigos Rodrigo Moreno, Fabián Ragnarsson y Rodrigo Rojo, que con sus simpatías nos incentivaban a seguir adelante.

A todas las personas que directa o indirectamente nos ayudaron en el desarrollo de nuestra tesis, profesores, compañeros, secretarias de la facultad.

Yohana González Sepúlveda.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco por sobre todo a mi familia que es el principal valuarte de mi vida y que me apoyo durante los periodos de desmotivación y que disfruto con mis logros.

Agradezco a Yohana por querer trabajar a mi lado, además por su gran entrega y motivación en el trabajo y por sobre todo por el gran amor que me entrego.

A Cristian Herrera, por su fundamental apoyo y buena voluntad en el trabajo y aclaración de dudas.

A los profesores Javier Quispe y Francisco Encina por el apoyo brindado y cooperación en el trabajo.

A mis amigos por comprenderme y apoyarme en las decisiones tomadas y por estar presentes en los momentos en que requerí ayuda.

A mi equipo de fútbol “La U”, por darme alegrías durante mi vida.

Sebastián Sandoval Bastida.

## INDICE DE MATERIAS

CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES GENERALES.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.2.1 ANTECEDENTES GENERALES DE LA EMPRESA.....	3
1.2.2 IMPACTOS MEDIO AMBIENTALES DEL RUBRO.....	4
1.3 OBJETIVOS.....	7
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	7
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
CAPITULO II.....	8
FUNDAMENTO TEORICO.....	8

2.1 ASPECTOS GENERALES DE LAS EMPRESAS PRODUCTORAS DE LECHE.....	8
2.2 AUDITORÍA DE LOS RESIDUOS .....	9
2.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS PURINES.....	10
2.2.2 COMPOSICIÓN DEL PURÍN.....	11
2.3 USO Y APLICACIÓN DE LOS PURINES.....	13
2.4 VALOR DE LOS NUTRIENTES CONTENIDOS EN LOS PURINES.....	15
2.5 PROBLEMAS MEDIOAMBIENTALES Y SANITARIOS ASOCIADO A LOS PURINES.....	16
2.6 LEGISLACIÓN APLICABLE A LAS EMPRESAS GANADERAS.....	18
2.6.1 NORMATIVA GENERAL.....	18
2.6.2 CONSIDERACIONES SOBRE DISTRIBUCION DE PURINES EN CULTIVOS Y PRADERAS.....	21

2.7 TRATAMIENTO APLICABLES A LOS PURINES.....	22
2.7.1 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA PURINES.....	23
2.7.1.1 DIGESTION ANAEROBIA.....	23
2.7.1.1.1 FUNDAMENTOS DE DEPURACION EN DIGESTORES ANAEROBIOS.....	25
2.7.1.1.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN DEGRADACION DE MATERIA ORGANICA EN LOS DIGESTORES ANAEROBIOS.....	29
2.7.1.1.3 EFICIENCIAS DE REMOCION DE CONTAMINANTES EN LOS DIGESTORES ANAEROBIOS.....	30
2.7.1.1.4 TIPOS DE REACTORES ANAEROBIOS.....	31
2.7.1.1.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIGESTORES ANAEROBIOS.....	35
2.7.1.2 LAGUNAS ANAEROBIAS.....	37

2.7.1.2.1	FUNDAMENTOS DE DEPURACIÓN EN LAGUNAS ANAEROBICAS.....	37
2.7.1.2.2	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DEGRADACION DE MATERIA ORGANICA EN EL TRATAMIENTO POR LAGUNAS ANAEROBICAS.....	40
2.7.1.2.3	EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE LAS LAGUNAS ANAEROBIAS.....	42
2.7.1.2.4	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS LAGUNAS ANAEROBIAS.....	42
2.7.1.3	LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS.....	45
2.7.1.3.2	FUNDAMENTOS DE DEPURACION EN LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS.....	48
2.7.1.3.3	FACTORES QUE INFLUYEN EN DEGRADACION DE LA MATERIA ORGANICA EN LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS.....	48
2.7.1.3.4	EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE LAS LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS.....	49

2.7.1.3.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS.....	50
CAPITULO IV.....	53
SISTEMAS DE TRATAMIENTO PROPUESTOS.....	53
4.1 ALTERNATIVA 1: SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	53
4.1.1 BALANCES DE MASA AL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	55
4.1.2 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA EL SISTEMA DE DIGESTION ANAEROBIA.....	65
4.2 ALTERNATIVA 2: SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS.....	70
4.2.1 BALANCES DE MASA AL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS .....	72
4.2.2 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA LAS LAGUNAS ANAERÓBICAS.....	74
4.3 ALTERNATIVA 3: SISTEMAS DE LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS.....	79

4.3.1	BALANCES DE MASA AL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS.....	81
1.3.2	PARÁMETROS DE DISEÑO PARA LAS LAGUNAS ANAERÓBICAS CUBIERTAS.....	82
	CAPITULO V.....	83
	EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LOS SISTEMAS PROPUESTOS.....	83
5.1	METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	83
5.2	EVALUACION DE LOS COSTOS DE INVERSION.....	85
	CAPITULO VI.....	90
	MATERIALES Y METODOS.....	90
4.1	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	90
4.2	METODOLOGÍA DE CÁLCULO.....	90
4.3	MATERIALES.....	92

CAPITULO VII.....	93
RESULTADOS.....	93
7.1 ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE PURINES GENERADOS EN EL FUNDO SANTA TERESA.....	93
7.2 RESULTADOS ASOCIADOS AL SISTEMA DE DIGESTION ANAEROBIA.....	95
7.2.1 BALANCES DE MATERIA EN EL SISTEMA DE DIGESTION ANAERÓBIA.....	95
7.2.2 BALANCE DE ENERGIA EN EL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAERÓBIA.....	99
7.2.3 DIMENSIONES DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	101
7.2.4 CALCULOS HIDRAULICO PARA EL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAERÓBIA.....	104

7.3 RESULTADOS ASOCIADOS AL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS.....	108
7.3.1 BALANCES DE MATERIA EN EL SISTEMA DE LAGUNAS ANAERÓBIAS.....	108
7.3.2 DIMENSIONES DEL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS.....	110
7.3.3 BALANCE HIDRAULICO DEL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS.....	112
7.4 RESULTADOS ASOCIADOS AL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS.....	112
7.4.1 BALANCES DE MATERIA EN EL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS.....	112
7.4.2 DIMENSIONES DEL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS.....	114
7.4.3 BALANCE HIDRAULICO DEL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS.....	114
CAPITULO VIII.....	115

8.1	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	115
8.2	EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAERÓBIA.....	116
8.2.1	AHORRO ECONÓMICO POR EL USO DE FERTILIZANTE PARA REGADÍO AL IMPLEMENTAR EL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	116
8.2.2	COSTOS DE INVERSIÓN DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	116
8.2.3	COSTOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAERÓBIA.....	120
8.3	EVALUACIÓN ECONOMICA DEL SISTEMA DE LAGUNAS ANAERÓBIAS.....	122
8.3.1	AHORRO ECONÓMICO POR EL USO DE FERTILIZANTE PARA REGADÍO AL IMPLEMENTAR EL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS.....	122
8.3.2	COSTOS DE INVERSIÓN DEL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS.....	122

8.3.3 COSTOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAERÓBIA.....	124
8.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS.....	126
8.4.1 AHORRO ECONÓMICO POR EL USO DE FERTILIZANTE PARA REGADÍO AL IMPLEMENTAR EL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS.....	126
8.4.2 COSTOS DE INVERSIÓN DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	126
8.4.3 COSTOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE LAGUNAS ANAERÓBIAS CUBIERTAS.....	128
CAPITULO IX.....	130
ANALISIS DE LOS RESULTADOS.....	130
9.1 DISCUSIONES.....	130
9.2 RECOMENDACIONES.....	135

9.3 CONCLUSIONES.....	137
BIBLIOGRAFÍA.....	142
ANEXOS.....	150

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama del proceso productivo del Fundo Santa Teresa.....	3
<b>Figura 2.</b> Generación de Purines en el Fundo Santa Teresa.....	6
<b>Figura 3.</b> Pozo Purineros del Fundo Santa Teresa.....	6
<b>Figura 4.</b> Diagrama típico de la industria ganadera. ....	9
<b>Figura 5.</b> Factores que influyen en la cantidad y composición del estiércol.....	12
<b>Figura 6.</b> Ciclo del Nitrógeno.....	15
<b>Figura 7.</b> Hidrólisis y fermentación. ....	28
<b>Figura 8.</b> Secuencia de Procesos en la Degradación Anaeróbica de la Materia Orgánica.....	39
<b>Figura 9.</b> Esquema de una laguna anaerobia con cubierta Flotante.....	46
<b>Figura 10.</b> Propuesta del sistema de tratamiento de digestión anaerobia.....	54
<b>Figura 11.</b> Diagrama de flujo del Sistema de Digestión Anaerobia.....	55

<b>Figura 12.</b> geometrías típicas de los canales abiertos.....	66
<b>Figura 13.</b> Propuesta del sistema de tratamiento por lagunaje anaerobio.....	71
<b>Figura 14.</b> Diagrama de Flujo del Sistema de Lagunas Anaerobias.....	72
<b>Figura 15.</b> Forma trapezoidal típica de las lagunas anaeróbicas.....	78
<b>Figura 16:</b> Propuesta del sistema de tratamiento de lagunas anaerobias cubiertas.....	80
<b>Figura 17.</b> Diagrama de Flujo del Sistema de Lagunas Anaerobias Cubiertas.....	81
<b>Figura 18.</b> Dimensiones de los digestores.....	102
<b>Figura 19.</b> Dimensiones del Tanque Final.....	103
<b>Figura 20.</b> Dimensiones del pozo de compost.....	101
<b>Figura 21.</b> Dimensiones del canal abierto.....	106

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla I</b> Características generales del estiércol por peso del animal.....	13
<b>Tabla I</b> Características generales del estiércol por peso del animal.....	16
<b>Tabla III.</b> Porcentajes de remoción de Digestores Anaeróbicos de mezcla completa, para diferentes contaminantes.....	31
<b>Tabla IV.</b> Tiempos de retención celular recomendados para el diseño de digestores de mezcla completa.....	31
<b>Tabla V.</b> Intervalos óptimos de temperatura y pH en las lagunas anaeróbicas.....	41
<b>Tabla VI.</b> Porcentajes de remoción de las lagunas anaerobias para diferentes contaminantes.....	42
<b>Tabla VII.</b> Relación de los porcentajes de remoción de DBO en función de la temperatura.....	44
<b>Tabla VII.</b> Porcentajes de remoción de las lagunas anaeróbicas cubiertas para diferentes contaminantes.....	49
<b>Tabla VIII.</b> Parámetros utilizados para calcular el caudal.....	94

<b>Tabla IX.</b> Estimaciones del caudal.....	95
<b>Tabla X.</b> Parámetros para el balance de masa en el digestor 1.....	96
<b>Tabla XI.</b> Resultados de los balances de flujo másico y volumétrico en el digestor.....	96
<b>Tabla XII.</b> Flujos volumétricos de cada digestor.....	97
<b>Tabla XIII.</b> Valores de remoción de contaminantes.....	97
<b>Tabla XIV.</b> Parámetros para el balance de masa en el tanque final.....	98
<b>Tabla XV.</b> Resultados del balance de flujo másico en el tanque final.....	98
<b>Tabla XVI.</b> Flujos volumétricos en el tanque final.....	98
<b>Tabla XVII.</b> Valores de remoción de contaminantes en el tanque final.....	99
<b>Tabla XVIII.</b> Parámetros utilizados para calcular las dimensiones de los digestores.....	101
<b>Tabla XIX.</b> Dimensiones de los digestores.....	101
<b>Tabla XX.</b> Dimensionamiento de los digestores.....	102

<b>Tabla XXI.</b> Dimensiones del Tanque final.....	103
<b>Tabla XXII.</b> Parámetros utilizados para determinar la potencia de la bomba purinera.....	107
<b>Tabla XXIII.</b> Parámetros para el balance de masa en la laguna anaerobia 1. ....	108
<b>Tabla XXIV.</b> Resultados del balance de flujo másico.....	108
<b>Tabla XXV.</b> Flujos volumétricos.....	109
<b>Tabla XXVI.</b> Valores de remoción de contaminantes.....	109
<b>Tabla XXVII.</b> Parámetros utilizados para el dimensionamiento de las lagunas anaerobias.....	110
<b>Tabla XXVIII.</b> Dimensiones de las lagunas anaerobias.....	111
<b>Tabla XXIX.</b> Dimensionamiento de cada laguna anaerobia.....	111
<b>Tabla XXX.</b> Parámetros para el balance de masa en la laguna cubierta1.....	112
<b>Tabla XXXI.</b> Resultados del balance de flujo másico.....	113

<b>Tabla XXXII.</b> Flujos volumétricos.....	113
<b>Tabla XXXIII.</b> Valores de remoción de contaminantes.....	113
<b>Tabla XXXIV.</b> Ahorro de la empresa al usar los purines para el regadío, después de tratarlos en el sistema de digestión anaerobia.....	116
<b>Tabla XXXV.</b> Costos de la construcción del canal abierto.....	117
<b>Tabla XXXVI.</b> Costos de construcción de los digestores anaerobios.....	117
<b>Tabla XXXVII.</b> Costos de equipos auxiliares y accesorios.....	118
<b>Tabla XXXVIII.</b> Costos de inversión para el tanque de almacenamiento.....	119
<b>Tabla XXXIX.</b> Costos de inversión del sistema de digestión anaerobia.....	120
<b>Tabla XL.</b> Costos de operación anual al implementar el sistema de digestión anaerobia.....	120
<b>Tabla XLI.</b> Flujo de caja sistema de digestión anaerobia.....	121
<b>Tabla XLII.</b> Ahorro de la empresa al usar los purines para el regadío, después de tratarlo en el sistema de lagunas anaerobias.....	122

<b>Tabla XLIII.</b> Costos de construcción de las lagunas anaerobias.....	123
<b>Tabla XLIV.</b> Costos de equipos auxiliares y accesorios del sistema de lagunas anaerobias.....	123
<b>Tabla XLV.</b> Costos asociados a la implementación del sistema de lagunas anaerobias.....	124
<b>Tabla XLVI.</b> Costos de operación anual al implementar el sistema de digestión.....	124
<b>Tabla XLVII.</b> Flujo de caja sistema de lagunas anaerobias.....	125
<b>Tabla XLVIII.</b> Ahorro de la empresa al usar los purines para el regadío, después de utilizar el sistema de lagunas anaerobias cubiertas.....	126
<b>Tabla XLIX.</b> Costos de construcción de las lagunas anaerobias cubiertas.....	127
<b>Tabla L.</b> Costos de equipos auxiliares y accesorios del sistema de lagunas anaerobias.....	127
<b>Tabla LI.</b> Costos asociados al sistema de lagunas anaerobias cubiertas.....	128
<b>Tabla LII.</b> Costos de operación anual al implementar el sistema de lagunas anaerobias cubiertas.....	128

**Tabla LIII.** Flujo de caja sistema de lagunas anaerobias cubiertas.....129

## RESUMEN

El presente proyecto nace de la necesidad de tratar los residuos de origen bovino (purines) que se generan en la lechería del Fundo Santa Teresa. Para ello se diseñaron tres sistemas de tratamiento, los cuales corresponden a procesos anaerobios.

El primer sistema de tratamiento corresponde a un sistema de digestión anaerobia, el cual se constituye de dos digestores anaerobios de  $184.12 \text{ m}^3$  cada uno y un tanque de almacenamiento final de  $378 \text{ m}^3$ . El segundo de lagunas anaerobias, el cual consta de dos lagunas anaerobias en paralelo de  $1506,48 \text{ m}^3$  cada una. El tercer sistema de tratamiento corresponde a un sistema de lagunas anaerobias cubiertas, el que presenta dos lagunas anaerobias cubiertas en paralelo de  $1506,48 \text{ m}^3$ .

Las alternativas propuestas permiten tratar y almacenar los purines, de tal manera que puedan ser aprovechados como fertilizante orgánico para el riego de praderas.

Al evaluar económicamente los sistemas de tratamiento se determinó que el VAN para el sistema de digestión anaerobia es igual a \$27.125.316,81, para el sistema de lagunas anaerobias el VAN es de \$50.079.820,78, y finalmente para el sistema de lagunas anaerobias cubiertas se obtuvo un VAN de \$ 45.853.115. A partir estos valores se puede concluir que el sistema de tratamiento económicamente más rentable es el de lagunas anaerobias. Pero tomando en consideración criterios de economía, imagen y ambientales se determinó que el sistema mas conveniente para ser implementado en el Fundo Santa Teresa es el de lagunas anaerobias cubiertas.

## ABSTRACT

The present project is born of the need to try the residuals of bovine origin that are generated in the dairy farm of Fundo Santa Teresa. For it there were designed it three systems of treatment, which correspond to anaerobic processes.

The first system of treatment corresponds to a system of anaerobic digestion, which is constitutes of two anaerobic digesters of  $184.12 \text{ m}^3$  each one and a tank of final storage of  $378 \text{ m}^3$ . The second of anaerobic lagoons, which consists of two anaerobic lagoons in parallel of  $1506,48 \text{ m}^3$  each one. The third system of treatment corresponds to a system of anaerobic lagoons covered, which presents two anaerobic lagoons covered in parallel of  $1506,48 \text{ m}^3$ .

The proposals alternatives allow to treat and to store the residuals of bovine origin in such a way, they could be taken advantage of as organic fertilizer for the irrigation of prairies.

On having evaluated economically the systems treatment one determined that the VAN for the system of anaerobic digestion is equal to \$27.125.316,81, for the system of anaerobic lagoons the VAN is of \$50.079.820,78, and finally the system of anaerobic lagoons covered obtained a VAN of \$45.823.115. Starting from the values one determined that the system of economically more profitable treatment is that of anaerobic lagoons. But taking in consideration economic crieteria, of image and

environmental one determined that the anaerobic most convenient system to be implemented in the dairy farm of Fundo Santa it is that of lagoons covered.

## **CAPITULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **1.1 ANTECEDENTES GENERALES**

Actualmente la cría y engorda de bovinos para la producción de carne y leche, esta ocasionando graves problemas medioambientales y sanitarios. En épocas anteriores, el medio ambiente era capaz de soportar la descarga de los residuos provenientes de la actividad ganadera, debido a que los sistemas de producción no eran tan intensos y generaban bajos volúmenes de residuos. Hoy en día surge una creciente preocupación por los efectos en el medio ambiente derivados del aumento en la productividad ganadera, dicha problemática a incentivado a que diferentes empresas del rubro hayan iniciado un proceso tendiente a mejorar su desempeño ambiental utilizando distintos sistemas de gestión ambiental.

En Chile, un instrumento de gestión ambiental complementario ha sido la Producción limpia y específicamente los Acuerdos de Producción Limpia (APL). El objetivo de la producción limpia es minimizar los residuos y/o descargas hacia el medio ambiente, reduciendo riesgos para la salud humana y ambiental, elevando simultáneamente la competitividad de las empresas (MAPL, 1998).

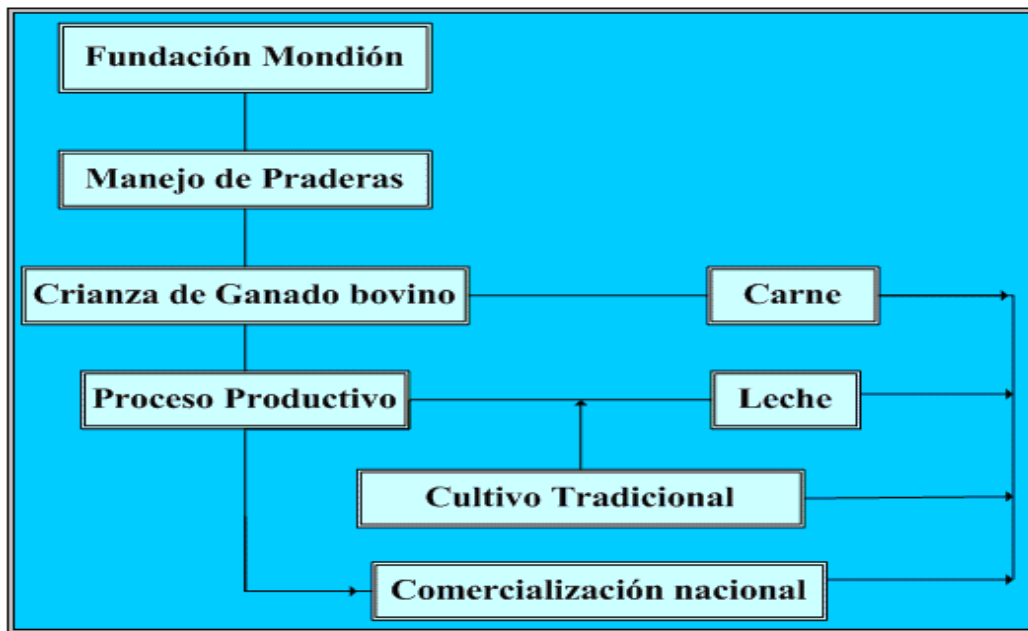
El principal residuo generado en las lecherías es el purín, que corresponde a la mezcla de excreta, orina, agua de lavado y restos de los constituyentes de camas como paja. Este residuo líquido se genera en el período de tiempo en que el ganado se encuentra en piso falso o en suelos de baja permeabilidad donde su escurrimiento laminar se encausa para ser transportado y/o almacenado y luego dispuesto en praderas. Si se aplica directamente al suelo tomando criterios ambientales y balances de masas a el N, DBO y oligoelementos entre la oferta (flujo de purines) y la demanda (cultivo presente) se esta en presencia de un sistema de tratamiento denominado Slow rate o tasa lenta. Existen además otros dos sistemas de tratamiento por aplicación directa al suelo: la infiltración rápida y riego superficial que requieren de una etapa previa de depuración, ya que la demanda de los cultivos y praderas es mucho menor que la oferta que existe de nutrientes en los purines, y deben disminuirse los parámetros o concentraciones cuando la superficie a aplicar no es suficiente, además la demanda de nutrientes de los cultivos no es la misma durante todo el año y se debe almacenar en épocas en que no se puede aplicar a praderas (tiempos de lluvias intensas o cuando existe suelo desnudo que es que generalmente en marzo, dependiendo del tipo de cultivo).

En las últimas décadas se han desarrollado una serie de tratamiento que permiten reducir algunas características indeseables de los purines, de manera tal que se pueda obtener un material estable, que pueda utilizarse como fertilizante y a la vez minimizar el riesgo de contaminación.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

### 1.2.1 ANTECEDENTES GENERALES DE LA EMPRESA

El Fundo de producción agrícola Fundación Gustavo Mondión Mary, ubicado en la comuna de Victoria (desde el año 1943) es una empresa regional que posee instalaciones dedicada a la producción de leche, crianza y engorda de bovino y agricultura tradicional (Figura 1), actividades que se desarrollan en una superficie de terreno de 1006 ha y que actualmente consta de una dotación de animales cercana a las 1000 cabezas de ganado bovino, de los cuales 250 son vacas lecheras. Estos productos se destinan actualmente a la demanda Nacional y para ello cuenta con tres galpones, un taller, un patio de alimentación, una bodega, una lechería, una oficina y siete casas habitación.



**Figura 1.** Diagrama del proceso productivo del Fundo Santa Teresa.

### **1.2.2 IMPACTOS MEDIO AMBIENTALES DEL RUBRO**

Dentro de los objetivos estratégicos del grupo agrícola se encuentra la exportación de carnes a la Comunidad Europea, para lo cual está certificado por PABCO (Predios Agrícolas Bajo Control oficial) y debe contar con la implementación de las normas EUREP GAP certificables. Por ello ha comenzado a preocuparse fuertemente por el cuidado y protección del medio ambiente. En la actualidad, las actividades agrícolas del Fundo no provocan alteraciones ni impactos ambientales relevantes producto de su emplazamiento. La exposición de comunidades humanas es relativamente baja y la convivencia con la fauna silvestre de la zona es equilibradamente armoniosa, dado que no existen incompatibilidades con la actividad productivas, además el predio no se encuentra ubicado cerca de áreas silvestres protegidas, ni de algún monumento cultural o centro turístico, si no que deslinda con la carretera Victoria – Curacautín por el norte, con el Predio Agrícola Sr. Enrique Mushtor por el sur, con Camino California (a Selvoscura) por el este y por Forestal Mininco en el oeste. No obstante, una de las principales deficiencias que presenta la empresa es el inadecuado manejo de los purines (Figura 2), ya que solo posee una laguna de acopio (Figura 3) que carece de un diseño para ser considerado como unidad de tratamiento, teniendo como consecuencia la generación de olores por la descomposición parcial de la materia orgánica y que además es un potencial contaminante de los cursos de agua subterráneos, al no contar con un revestimiento en el fondo y en los taludes, presentando además, un escape de emergencia por rebalse hacia un canal de aguas superficiales.

Los purines son acumulados durante dos años, para posteriormente disponerlos sobre praderas perennes, a través del riego superficial, sobre una superficie de 30 há. SAG recomienda disponerlos de esta forma, cuando los purines tienen una carga inferior a 400 Kg/ha\*año de nitrógeno.

La problemática se centra en la necesidad de tratar y acumular purines en épocas en que no es posible disponerlos sobre las praderas o cultivos por ejemplo; en épocas de lluvias intensa o cuando no existe demanda de nutrientes, disminuyendo además la presencia de vectores y olores desagradables, con el propósito de mantener el equilibrio natural que existe entre los cultivos y el suelo. Además el tratamiento permite evitar que se contaminen cursos superficiales aledaños.

Por este motivo en el presente proyecto se presentarán alternativas de tratamientos anaerobios para la depuración y almacenamiento de los purines provenientes de las salas de ordeño del Fundo Santa Teresa.

**Figura 2:** Generación de Purines en el Fundo Santa Teresa



**Figura 3:** Laguna de acopio del Fundo Santa Teresa.



## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un sistema de tratamiento y almacenamiento de Purines, para el fundo Santa Teresa de Fundación Gustavo Mondión Mary, que cumpla con la normativa ambiental vigente y permita obtener un efluente adecuado para reciclar la materia orgánica y nutrientes a través del riego de praderas y cultivos.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

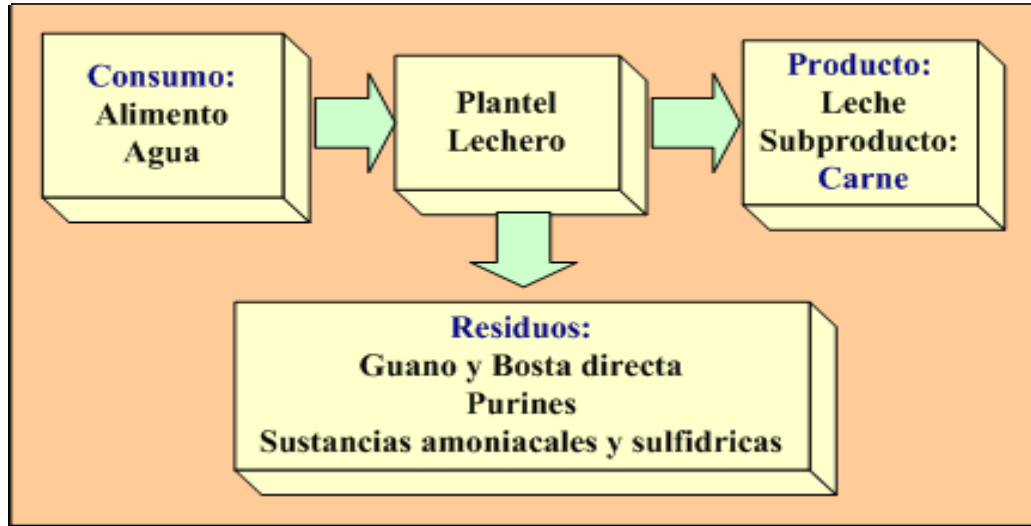
- 1) Realizar una Auditoría de Residuos enfocada a los purines que se originan en el Fundo Santa Teresa, además de realizar una caracterización físico-química de estos residuos.
- 2) Realizar un diseño a escala conceptual de tres sistemas de tratamiento de Purines.
- 3) Realizar una evaluación técnico económico de los sistemas diseñados.
- 4) Realizar la ingeniería de detalle del sistema de tratamiento elegido, incorporando las respectivas ubicaciones y planos.

## **CAPITULO II**

### **FUNDAMENTO TEORICO**

#### **2.1 ASPECTOS GENERALES DE LAS EMPRESAS PRODUCTORAS DE LECHE**

El proceso de ordeña se realiza en un espacio relativamente reducido generando una enorme cantidad de residuos sólidos, líquidos y gaseosos, de alto poder contaminante. La Figura 4 muestra el diagrama de flujo general para el desarrollo del proceso productivo del plantel lechero. En estas situaciones, el principal problema es la gran cantidad de residuos generados por los animales. La incorrecta gestión de estos residuos puede plantear serios problemas, tanto sanitarios para los animales y personas que trabajan en la explotación, como medioambientales, debido a la aparición de olores procedentes de sustancias amoniacales y sulfhídricas, aparición de plagas de insectos y roedores, presencia de determinadas bacterias, contaminación de suelos y aguas subterráneas, aparición de gases y, por supuesto, contaminación de los cauces donde son vertidos o de los acuíferos donde son filtrados (Revista Ambientum, 2002).



**Figura 4.** Diagrama típico de la industria ganadera. (Fuente MAPL, 1998)

## 2.2 AUDITORÍA DE LOS RESIDUOS

La auditoría ambiental constituye una de las herramientas que se utiliza para identificar las áreas ambientalmente críticas de un proceso, al mismo tiempo permite formular aquellas soluciones tecnológicas y de gestión que sean apropiadas para proteger el medio ambiente mediante un mejor control de las prácticas ambientales y la evaluación del cumplimiento de las políticas ambientales de la empresa, incluyendo los requerimientos legales.

Existen diferentes tipos de auditorías, sin embargo centraremos nuestra atención en la auditoría de residuos, ya que permite identificar y cuantificar las diferentes líneas residuales, evaluar las prácticas y procedimientos para su manejo y control, para buscar opciones que permitan reducir su generación (Zaror, 1998).

Los residuos agrícolas son la mayor fuente de residuos y de potencial contaminante en Europa y América, y dentro de éstos, los residuos ganaderos constituyen el principal problema ambiental (Hobson, 1990). La problemática asociada a la gestión de los residuos orgánicos de origen ganadero se debe, básicamente, a la separación progresiva de la explotación ganadera y la agrícola, de forma que la mayoría de las explotaciones no poseen una base territorial suficiente para reutilizar los residuos ganaderos. Esto, junto con el aumento del censo ganadero, la disminución de la superficie agrícola útil y el aumento de las dimensiones de las explotaciones ganaderas hace equiparable al sector ganadero con la industria, en cuanto a la problemática de gestión de residuos (Danés *et al.*, 1996).

Los residuos generados en la industria ganadera incluyendo la producción lechera, se puede describir según el estado en que se encuentren, dentro de los residuos sólidos se encuentran los animales muertos, la bosta directa generada en pastoreo, las camas calientes usadas en estabulación o “deep bedding”, los envases de insumos veterinarios y pesticidas, alambres de enfardo, polietileno de silos; dentro de los residuos líquidos están los purines, que se originan a partir de la dilución de los excrementos y la orina, que al descomponerse generan gases como bencenos, sulfatos, sustancias amoniacales, sulfhídricas y son el principal residuo generado por las empresas productoras de leche.

### **2.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS PURINES**

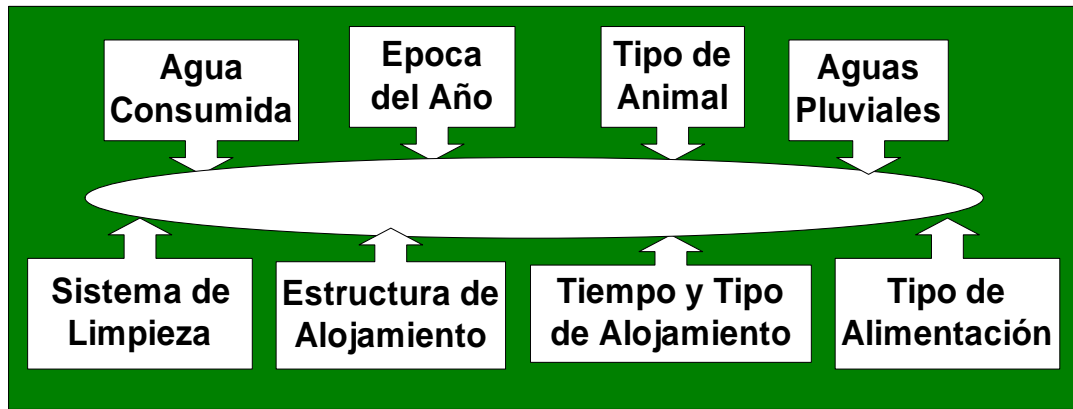
En esencia los Purines son excrementos de animales diluidos en agua que se emplean para realizar la limpieza de las lecherías y los patios de ordeña. Los excrementos se

barren, se recogen o se arrastran con agua para almacenarlos en grandes balsas o depósitos donde se guardan hasta que son usados, o bien hasta que su limitada capacidad de almacenamiento hace indispensable vaciarlos (Simpson, 1986).

### **2.2.2 COMPOSICIÓN DEL PURÍN**

Los purines tienen mayores porcentajes de potasio y nitrógeno y en menores valores a calcio, fósforo y magnesio, sin embargo la composición del purín es muy variable, ya que depende de muchos factores que están directamente relacionados con la cantidad de estiércol producido y de su composición. Estos factores son la clase y edad del animal, el tipo y cantidad de alimento consumido, el volumen de agua, el trabajo efectuado por el animal, entre otros (Millar, *et al* 1975) (Figura 5).

Una vaca lechera de buen nivel productivo entre 28 - 30 L/día, genera unos 40-60 kilos/día de estiércol, por lo tanto la cantidad de purines al agregar el agua necesaria para lavar se puede estimar considerando una relación de 1:1. Esto significa doblar el volumen total de estiércol generado por el animal (Pedraza, 2002).



**Figura 5.** Factores que influyen en la cantidad y composición del estiércol.

(Fuente: RESA, 2000).

El purín contiene valiosos nutrientes, que es posible proporcionar a las plantas cuando es incorporado al suelo. Según Thomson & Troeh (1998) los principales elementos que definen al purín son: DBO<sub>5</sub>, Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K). (Tabla I).

Del total de nutrientes contenidos en los purines, hay una fracción que es asimilable inmediatamente por las plantas, y otra que debe sufrir una descomposición para llegar a ser disponible en forma inorgánica. El nitrógeno de los purines existe en formas de nitrógeno orgánico, amoniacal, como nitritos y nitratos.

**Tabla I** Características generales del estiércol por peso del animal.

<b>Animal</b>	<b>Masa (kg)</b>	<b>Estiércol (kg/día)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (gr/día)</b>	<b>N (gr/día)</b>	<b>P (gr/día)</b>	<b>K (gr/día)</b>
<b>Ganado lechero</b>	67.95	5.436	117	27.18	10.41	21.74
	113.3	9.06	194	45.30	20.38	38
	226.5	18.12	389	90.60	37.4	76.5
	453	36.24	770	185.75	75.2	147
	634.2	50.74	1078	258.21	105	207
<b>Ganado de carne</b>	226.5	18.12	362	77.01	57.2	65.6
	453	36.24	724	154.02	133	130
	339.8	27.18	543	117.78	86	103.7
	566.6	45.30	906	194.79	144	169

Fuente: Jones (2003)

### 2.3 USO Y APLICACIÓN DE LOS PURINES

Los grandes volúmenes de purines diluidos (estiércol + orina + agua) pueden ser reutilizados dentro del predio como fuentes de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y agua, para la fertilización de los cultivos y praderas que constituyen la base forrajera en la alimentación del rebaño, (Pedraza,2002). Los purines deberían ser utilizados principalmente en cultivos para ensilajes, como maíz, cebada, remolachas forrajeras, etc. Estos cultivos realizan una gran extracción de nutrientes que no son devueltos por los animales en pastoreo y es necesario compensarlo a través de la fertilización o aplicación de purines (Dumont, 1998).

Según Thompson & Troeh (1998), la liberación de estos nutrientes ocurre con mayor

rapidez cuando el suelo proporciona condiciones de calor y humedad adecuadas para la descomposición microbiana. Por ello su aplicación al suelo es más efectiva en épocas calurosas y sobre cultivos exigentes de nitrógeno y potasio.

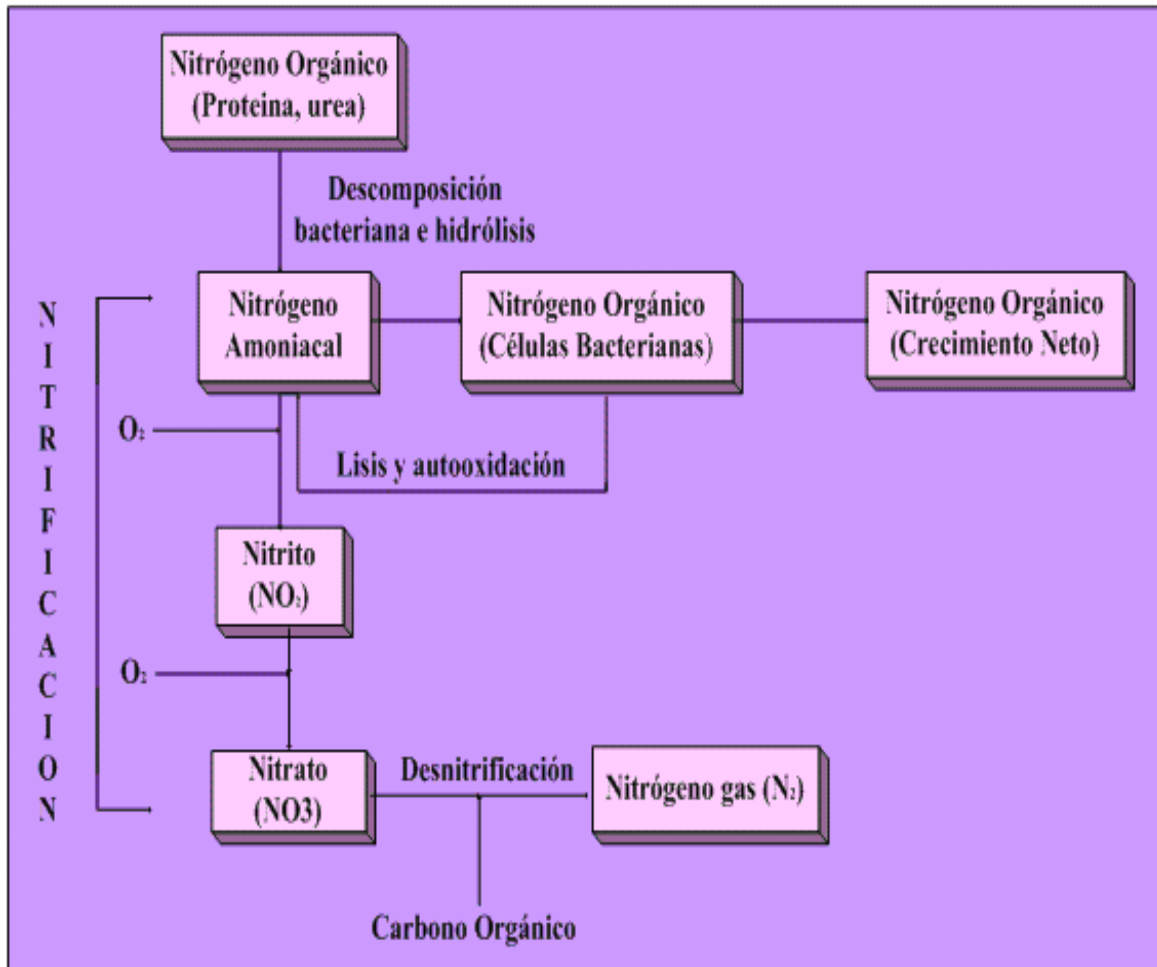
### **Nitrógeno en purines**

En los purines, el nitrógeno puede estar presente en múltiples formas, y son numerosas las transformaciones que puede sufrir en los procesos de tratamiento (Figura 5). Estas transformaciones permiten convertir el nitrógeno amoniacal en otros productos fácilmente separables del purín residual. Los dos mecanismos principales que intervienen en este proceso son la asimilación y la nitrificación – desnitrificación. Debido a que el nitrógeno es un nutriente, los microbios presentes en los procesos de tratamiento tenderán a asimilar el nitrógeno amoniacal y a incorporarlo a su masa celular. Una parte del nitrógeno amoniacal retornara al agua residual con la lisis y muerte de las células. En el proceso de nitrificación – desnitrificación, la eliminación de nitrógeno se consigue con dos etapas de conversión. En la primera, la nitrificación, se reduce la demanda de oxígeno del amoniaco mediante su conversión a nitrato. No obstante, en este paso, el nitrógeno apenas ha cambiado de forma y no se ha eliminado. En el segundo paso, la desnitrificación, el nitrato se convierte en producto gaseoso que es eliminado (Metcalf y Eddy, 1998).

### **Fósforo en purines**

El fósforo del purín proporciona una disponibilidad de este elemento mayor que el

proveniente de fertilizantes minerales, pero gran parte del valor del estiércol se pierde rápidamente por descomposición y lavado, por ello es necesario aprovechar en gran medida la cantidad de nutrientes que posee como un subproducto utilizado en la agricultura.



**Figura 6.** Ciclo del Nitrógeno. (Fuente: Metcalf y Eddy, 1998)

## 2.4 VALOR DE LOS NUTRIENTES CONTENIDOS EN LOS PURINES

Según CORFO (2001) los nutrientes contenidos en los purines presentan los siguientes beneficios económicos.

En la Tabla II, se indican los precios de los nutrientes contenidos en los purines de vacas lecheras.

**Tabla II.** Valor de los nutrientes en los purines.

<b>Nutriente</b>	<b>\$ ton Purín</b>
<b>N</b>	62.101
<b>P</b>	57.571
<b>K</b>	88.021

## **2.5 PROBLEMAS MEDIOAMBIENTALES Y SANITARIOS ASOCIADO A LOS PURINES**

Dumontt (2000), señala que el mal manejo de purines es actualmente uno de los procesos de la actividad agropecuaria que provoca mayor deterioro ambiental. Los purines por sus características físicas, químicas y biológicas, son potencialmente contaminantes afectando a los cursos de agua subterránea o superficial, aire y suelo; provocando turbidez, sedimentación, aumento de concentraciones de nutrientes, demanda biológica de oxígeno (DBO) y crecimiento excesivo de algas (Gutiérrez y Jara, 2003).

El aporte de residuos orgánicos sin compostar produce un incremento de nitrógeno en los suelos que lo reciben, este nitrógeno si se esparce en el campo sin haberse transformado anteriormente, sufre un proceso de mineralización bastante lento, por lo que solo una parte va ha ser utilizable de manera inmediata y el resto al cabo de bastante

tiempo (puede llegar a superar el año). De esta manera no todo el nitrógeno aportado a los suelos es extraíble por los cultivos, ya que importantes cantidades quedan en los suelos, y en ciertos estos casos pueden infiltrarse o quedar en los suelos para su posterior nitrificación.

El nitrógeno es uno de los elementos más dinámicos que se conocen, debido a su rápida transformación química y bioquímica en el suelo debido a factores como la temperatura y el oxígeno, los cuales facilitan la reacción de oxidación. Urquiaga & Zapata (2000) señalan que el fenómeno de la contaminación por nitratos se produce primero por una acumulación de este en el suelo, y luego tras su lixiviación por precipitaciones y el riego puede alcanzar las aguas subterráneas pudiendo causar daños al medio ambiente y a la salud del hombre.

Altas concentraciones de nitratos en aguas de bebida, ocasionan la enfermedad conocida como niños azules, llamada así por manifestarse con mayor frecuencia en niños de corta edad, generalmente en menores de 6 meses, ya que no han desarrollado completamente su tracto digestivo. Debido a esta enfermedad la hemoglobina de la sangre disminuye debido al aumento de la metahemoglobina, lo que causa disturbios en el transporte de oxígeno por la sangre (Urquiaga y Zapata, 2000).

Otro gran problema de los purines es que experimentan una serie de fermentaciones anaeróbicas con desprendimiento de gases tóxicos y de malos olores, lo que da lugar a problemas de tipo sanitario en el interior de los alojamientos, y a problemas de contaminación en el exterior. De los gases desprendidos por el estiércol fluido, algunos

son más ligeros que el aire y se evacuan mediante una buena ventilación, mientras que otros son más pesados y quedan sobre la masa semifluida del canal, pudiendo ocasionar trastornos a los animales que permanecen acostados. La concentración de gases tóxicos es muy alta cuando se remueve el estiércol fluido. Un defecto muy frecuente en los alojamientos de ganado es la deficiente ventilación. En tiempos de frío, el ganadero, con un criterio equivocado, cierra las ventanas y chimeneas de admisión y salida de aire (Fuentes, 1992). Como consecuencia de la deficiente ventilación, la atmósfera se satura de humedad y de gases tóxicos, que favorecen el desarrollo de las infecciones respiratorias. A su vez, las formas gaseosas de nitrógeno como amoníaco, producto de la volatilización y los óxidos gaseosos, como  $N_2O$  y  $NO$  producidos por desnitrificación contribuyen al efecto invernadero y cambios climáticos.

## **2.6 LEGISLACIÓN APLICABLE A LAS EMPRESAS GANADERAS**

### **2.6.1 NORMATIVA GENERAL**

Actualmente no existe normativa que señale explícitamente el deber de tratar los purines, sin embargo, su acumulación y disposición puede provocar daños a los suelos o los cursos superficiales y subterráneos, con lo cual se infringen algunas normas de la legislación chilena, esto incentiva indirectamente a que las empresas agropecuarias implementen algún sistema de tratamiento para tratarlos. A continuación se describen las principales normas y decretos relacionados con esta actividad.

- **Decreto Ley N° 3.557** de 1980 del Ministerio de Agricultura, que establece Disposiciones sobre Protección del Suelo, Agua y Aire. Este decreto establece los requerimientos que deben tener los envases de fertilizantes que son utilizados en la agricultura, para que no existan errores en las compras de los distintos productos, debiendo utilizarse aquellos que no causen daño al medio ambiente y sean asimilados correctamente por los cultivos.
- **D.F.L. N° 725** de 1967 del Ministerio de Salud, Código Sanitario. Diario Oficial, 31.01.1968. Artículos 71, 72, 73 y 75.
- **Norma Chilena Oficial NCh.1.333**, Requisitos de Calidad de Agua para Diferentes Usos.
- **Decreto Supremo N° 351** de 1992 del Ministerio de Obras Públicas. Diario Oficial, 17.02.1998. “Reglamento para la Neutralización y Depuración de los Residuos Líquidos Industriales a que se refiere la Ley N° 3.133”. Modificado por el Decreto Supremo N° 1.172/98.
- **Decreto con fuerza de ley N°294**. Establece funciones y estructuras del ministerio de agricultura. Ministerio de hacienda. Diario Oficial del 5 de abril de 1960.
- **Decreto Supremo N° 90/01**. Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Se debe tener especial cuidado en el destino de las

descargas del agua tratada, la cual solo puede ser depositada a los cursos superficiales cercanos con concentraciones inferiores a las que establece la norma.

- **Norma NCh 1.333/Of. 87.** Requisitos de Calidad de Agua para Diferentes Usos. Esta norma es directamente aplicable a todos los predios.
- **D.S. 46/2002.** Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas. Esta norma, en el artículo 2 establece que no es aplicable a las labores de riego, se debe cuidar el rebalse de los sistemas de tratamiento o almacenamiento, y todo tipo de escurrimiento superficial que pueda ser potencial contaminante de los cursos superficiales.
- **Decreto Supremo N° 745/92, art. 16.** Prohibición de Descarga de Residuos en Cursos de Agua. Esta prohibición de descarga de residuos en cursos de agua, esta contenida en uno de los principales decretos que deben ser considerados y evaluados durante el desarrollo de este proyecto, ya que una de los problemas que presenta el Fundo Santa Teresa es el rebalse de los purines hacia cursos de agua superficiales, y por ende se encuentra infringiendo la ley
- **Ley 19.300** "Bases Generales del Medio Ambiente". Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Diario Oficial, 09.04.94. La Ley de Bases del medio ambiente reconoce el derecho de las personas de vivir en un ambiente libre de contaminación, por lo que cualquier tipo de empresa debe respetar el derecho de

las personas, incluyendo las pequeñas y medianas empresas, evitando la contaminación y degradación del medio ambiente.

- **Decreto Supremo N° 30** de 1997 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

### **2.6.2 CONSIDERACIONES SOBRE DISTRIBUCION DE PURINES EN CULTIVOS Y PRADERAS.**

El Instituto de Investigación Agropecuario (INIA) ha establecido algunas consideraciones generales para el almacenamiento y disposición de purines, las cuales a pesar de no estar normadas oficialmente es necesario tener presente (Dumontt, 1998)

- Las dosis de purines no deben ser superiores a 150000 litros por ha.
- Ubicar el sistema de tratamiento al menos a 50 metros de la lechería.
- Ubicar el sistema de tratamiento al menos a 300 metros de lugares habitados.
- No aplicar purines en lugares cercanos a animales.
- No aplicar purines en días ventosos.
- Evitar la aplicación en suelos con topografías de pendientes fuertes durante los periodos de lluvias intensas.
- Dejar una franja de protección de 10 metros para los fosos secundarios del predio.

- Dejar una franja de 20 metros sin aplicación en fosos principales del predio, cursos de agua, limite con lo vecinos y caminos públicos.

## **2.7 TRATAMIENTO APLICABLES A LOS PURINES**

Los purines pueden considerarse de manera similar al agua residual domestica, con una carga orgánica (DBO) de 15 a 80 veces mayor y alta generación de lodos, donde el tratamiento y eliminación de los residuos animales es más complicado por su naturaleza y por los grandes volúmenes en son generados.

Para el tratamiento de los purines es posible utilizar tanto los sistemas anaerobios como aerobios, sin embargo, según Lusk (2002) el aumento de la materia orgánica no permite mantener las condiciones aeróbicas durante las épocas de invierno, lo que implica al menos seis a ocho semanas para estabilizar los sistemas aeróbicos durante la primavera, tiempo durante el cual la generación de olores es un problema significativo, que es casi imposible de eliminar.

El purín por si solo o mezclado con agua durante la limpieza de los alojamientos generalmente se encuentra con una concentración demasiado alta para ser descompuesto aeróbicamente en una estructura de tratamiento o almacenamiento de estiércol, debido a que el oxigeno no se puede disolver lo suficientemente rápido para soportar las bacterias aeróbicas. Por lo tanto, el estiércol se descompone secuencialmente en grupos de bacterias anaeróbicas (Vives, 2003).

Además Loehr (1965) también establece que el tratamiento y eliminación de los residuos orgánicos animales (ganado) es complicado por su naturaleza y por el volumen a manejar. Sin embargo observo que el tratamiento anaerobio por lagunaje ofrece una posibilidad para tratar grandes cantidades de purines que se originan en las estabulaciones del ganado en terrenos cerrados. Además Loehr informó en 1974 que cuando las concentraciones de componentes orgánicos exceden de 4000 mg/L en lo que se refiere a la Demanda Química de oxígeno, los métodos anaerobios son más baratos que los métodos aerobios. En este ámbito Kiely, (1999) reafirma lo planteado por los Lusk (2002), Vives, (2003), y Loehr, (1965), establecen que para el tratamiento de residuos agrícolas ganadero el uso de sistemas anaerobios, sobre todo el de digestión son los procesos unitarios que más han contribuido a la reducción de la contaminación agrícola.

A continuación se describe los sistemas de tratamiento de purines, que serán diseñados y evaluados durante el desarrollo del proyecto, estos sistemas permitirán además su almacenamiento durante largos periodos de tiempo según su diseño, estos son: digestión anaerobia de mezcla completa, lagunas anaeróbicas y lagunas anaeróbicas con cubierta flotante.

## **2.7.1 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA PURINES**

### **2.7.1.1 DIGESTION ANAEROBIA**

El proceso unitario de tratamiento de digestión anaerobia se emplea en todo el mundo

para la depuración de aguas residuales y fangos procedentes de la industria, la agricultura y de origen urbano (Kiely, 1999).

Utilizando el proceso de digestión anaerobia es posible convertir gran cantidad y variedad de como desechos residuos vegetales, estiércol, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industria químicas, en subproductos útiles.

En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aerobio (Muñoz *et al.*, 1987). La digestión anaeróbica es uno de los procesos más utilizados, para el tratamiento de purines, en el que la materia orgánica es transformada biológicamente, bajo condiciones anaeróbicas, en metano y Dióxido de carbono (biogás), (Metcalf y Eddy, 1998).

Además de esta corriente gaseosa, se produce también una suspensión acuosa de materiales sólidos (lodos), en los que se encuentran los componentes más difíciles de degradar, la mayor parte del nitrógeno y el fósforo y la totalidad de los elementos minerales (K, Ca, Mg, etc).

El gas producido puede ser recogido y utilizado como combustible. El fango final estabilizado, que se extrae no es putrescible, y su contenido en organismos patógenos es nulo o muy bajo. Esta conversión biológica del sustrato complejo, en el que se encuentra materia orgánica en suspensión o disuelta, se realiza a través de una serie de reacciones bioquímicas que transcurren tanto consecutiva como simultáneamente. Este proceso

biológico natural, es realizado por grupos o comunidades de bacterias en recipientes cerrados (reactores).

Generalmente después del digestor anaerobio se incorpora una laguna de almacenamiento, en la cual se acumula el efluente tratado en el digestor (Vives, 2003). La permanencia de las aguas en la laguna de almacenamiento proporciona un tratamiento adicional al purín, debido a que en ella disminuye el contenido de nitrógeno y otros nutrientes de las aguas. Se debe descartar que el efluente proveniente del digestor, posea una carga orgánica muy baja, lo que implica que la laguna deja de tener actividad microbiana de descomposición o es escasa, con lo que los sólidos que salen del digestor solo tienden a decantar.

#### **2.7.1.1.1 FUNDAMENTOS DE LA DEPURACION EN DIGESTORES ANAEROBIOS**

Las etapas diferenciadas que constituyen el proceso de la digestión anaerobia son tres, la primera corresponde a la etapa hidrolítica, la segunda es la etapa fermentativa o acidogénica y la tercera es la etapa metanogénica (Kiely, 1999) (Figura 6).

##### **Etapas Hidrolítica y Fermentativa:**

En esta etapa (hidrolítica) un amplio grupo de microorganismos hidrolíticos actúan sobre los polímeros orgánicos u otros materiales complejos despolimerizándolos enzimáticamente en los correspondientes monómeros o fragmentos más sencillos.

Posteriormente estos compuestos experimentan un proceso de fermentación que origina diferentes ácidos orgánicos. Esta etapa resulta indispensable para lograr la ruptura de los biopolímeros complejos en polímeros solubles o monómeros, puesto que los microorganismos que realizan la depuración solamente son capaces de actuar sobre materia orgánica disuelta.

La etapa hidrolítica puede ser la etapa limitante de la velocidad del proceso global, sobre todo tratando residuos con alto contenido en sólidos. Incluso en casos donde las fases acidogénicas o metanogénicas son consideradas como pasos limitantes, la hidrólisis puede afectar el conjunto del proceso (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991). El grado de hidrólisis y la velocidad del proceso depende de muchos factores, entre otros del pH, de la temperatura, de la concentración de biomasa hidrolítica, del tipo de materia orgánica particulada (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991), y del tamaño de partícula (Hills y Nakano, 1984).

La tasa de hidrólisis, en general, aumenta con la temperatura (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991; Siegrist *et al.*, 1993; Veeken y Hamelers, 1999), independientemente del compuesto que se trate.

### **Bacterias**

En esta etapa encontramos bacterias anaerobias facultativas como las enterobacterias, bacterias aerotolerantes como las bacterias del ácido láctico, y bacterias anaerobias estrictas como: *Clostridium*, *Propionibacterium*, *Selenomona*.

### **Etapa Acetogénica o Deshidrogenación:**

En esta etapa los compuestos generados en la etapa anterior, se degradan con producción de CO<sub>2</sub>, e hidrógeno, que son los sustratos de las bacterias metanogénicas. La acumulación de H<sub>2</sub> inhibe la acetogénesis, se acumulan ácidos grasos, se inhiben las metanogénicas. Se acumulan más ácidos grasos y disminuye el pH (sistema inestable). En la etapa acetogénica actúan dos tipos de microorganismos que producen acetato: las bacterias homoacetogénicas: estas se caracterizan por la formación de acetato como único metabolito y las bacterias acetogénicas: metabolizan los productos terminales de la etapa acetogénica (productoras obligadas de H<sub>2</sub>) Necesitan asociarse estrechamente a microorganismos consumidores de hidrógeno.

### **Etapa Metanogénica:**

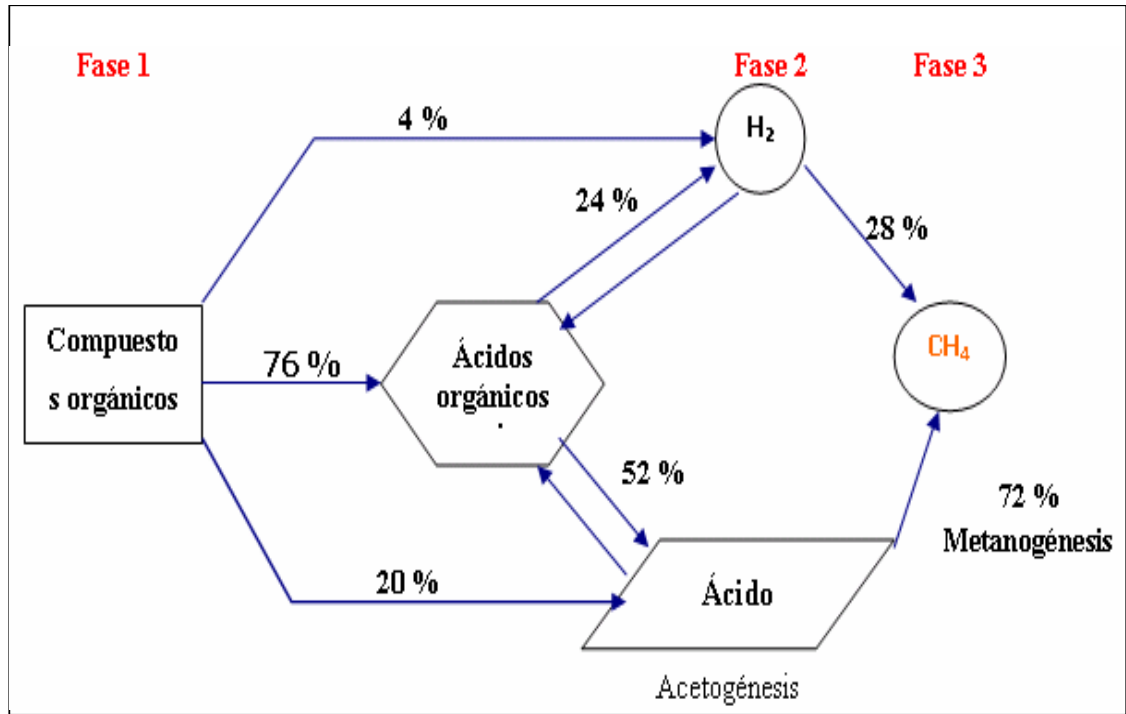
Esta es la única etapa estrictamente anaerobia, y en ella, las bacterias metanogénicas son las responsables de la formación de metano a partir de sustratos mono carbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente. Este es un proceso lento, constituyendo la etapa limitante del proceso de degradación anaerobia.

### **Bacterias**

Las bacterias metanogénicas pertenecen al reino de las arqueobacterias. De acuerdo a los sustratos que pueden degradar se dividen en: Hidrogenotróficos, capaces de producir metano a partir de hidrógeno y anhídrido carbónico, Aceticlásticos, producen metano y anhídrido carbónico a partir de acetato, Metilótrofos, metabolizan compuestos como

metilaminas y metilsulfuros.

Los géneros de metanobacterias hidrogenofílicas más frecuentes en reactores anaerobios son: *Methanobacterium*, *Methanospirillum*, y *Methanobrevibacter*.



**Figura 7.** Hidrólisis y fermentación. (Fuente: Hills y Nakano, 1984)

Durante formación de biogás también participan las Bacterias Sulfato Reductoras las que toman los compuestos de azufre y los reducen usando las mismas materias primas que las bacterias metanogénicas. Si hay muchos compuestos con azufre no se obtiene CH<sub>4</sub> porque es más rápida su oxidación.

### **2.7.1.1.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN DEGRADACION DE MATERIA ORGANICA EN LOS DIGESTORES ANAEROBIOS**

#### **Temperatura**

Uno de los principales factores que influye en la eficiencia de los digestores anaerobios es la temperatura de funcionamiento. Para que un digestor anaerobio trabaje adecuadamente es necesario mantener una temperatura óptima entre 30-37°C lo que implica un gasto por la incorporación de energía. La que se suministra generalmente a través de un termorreactor o un intercambiador de calor (Metcalf y Eddy, 1998). Cuando el digestor no se encuentra dentro del intervalo de temperatura, es necesario, aumentar el tiempo de retención hidráulico, de tal manera que logren desarrollarse las tres etapas que permiten la depuración eficiente de la materia orgánica.

La producción de biogás, en ausencia de inhibidores, aumenta con la temperatura, puesto que aumenta la tasa de crecimiento de los microorganismos; temperaturas más bajas implican tiempos de retención más largos, y por tanto mayores volúmenes de reactor. La tasa de hidrólisis también aumenta con la temperatura (Veeken y Hamelers, 1999).

#### **PH**

El pH en los digestores anaerobios se relaciona con la actividad realizada por las bacterias, el pH normalmente se encuentra entre 6-8, con un valor próximo a 7 para la actividad óptima. Los ácidos grasos disminuyen la alcalinidad a menos que la

alcalinidad bicarbonatada sea suficiente para neutralizar dichos ácidos.

El bicarbonato se forma a partir de  $\text{CO}_2$ , iones bicarbonato,  $\text{HCO}_3^-$ , es importante que haya suficiente alcalinidad todo el tiempo, para mantener una amortiguación suficiente.

Los microorganismos anaerobios necesitan un pH en torno a la neutralidad para su correcto desarrollo, aunque permiten cierta oscilación (Clark y Speece, 1989). Parece ser que el pH afecta fundamentalmente a la actividad enzimática de los microorganismos, mediante: cambios de estado de los grupos ionizables de las enzimas como el carboxil y amino; alteración de los componentes no ionizables del sistema, como por ejemplo el sustrato; y desnaturalización de la estructura proteica de las enzimas. Para que el proceso se desarrolle de forma satisfactoria, el pH debe estar en torno a la neutralidad, presentando problemas graves si el pH baja por debajo de 6 o sube por encima de 8,3 (Lay *et al.*, 1997). Sin embargo, el proceso de inhibición parece ser completamente reversible, aunque el tiempo de recuperación depende de la duración de la alteración.

#### **2.7.1.1.3 EFICIENCIAS DE REMOCION DE CONTAMINANTES EN LOS DIGESTORES ANAEROBIOS**

En la Tabla III se indican los porcentajes de remoción (para 35°C) para diferentes parámetros presentes en los purines.

**Tabla III.** Porcentajes de remoción de Digestores Anaeróbicos de mezcla completa, para diferentes contaminantes

Parámetro	Remoción %
DBO5	70 - 90
Nitrógeno	62-82
Fósforo	50-76
K	10-20

(Fuente: Vives, 2003)

A continuación en la Tabla IV se muestran los tiempos de retención hidráulico para digestores de mezcla completa.

**Tabla IV.** Tiempos de retención celular recomendados para el diseño de digestores de mezcla completa

Temperatura de Funcionamiento ° C	Tiempo de retención hidráulico, (días)	Tiempo de retención recomendado, (días)
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10

(Fuente: Metcalf y Eddy, 1998)

#### 2.7.1.1.4 TIPOS DE REACTORES ANAEROBIOS

Existen diferentes formas de clasificar los reactores anaerobios, siendo la principal la que los divide de acuerdo a la carga que pueden trabajar.

A continuación se describe los principales reactores anaerobios utilizados en el tratamiento de purines.

### **Digestión convencional**

El proceso de digestión convencional se suele llevar a cabo en una única fase. Las funciones de digestión, espesado de fangos y formación de sobre nadantes, se lleva a cabo de forma simultánea. El fango crudo se introduce en la zona en la que el fango esta siendo digerido activamente y en la que se esta liberando gas. El fango se calienta por medio de un intercambiador de calor externo. Conforme el gas asciende hacia la superficie, arrastra partículas de fango y otros materiales, tales como grasas y aceites y a cabo formando una capa de espumas (Mefcald y Eddy, 1998).

Como resultado de la digestión, el fango se estratifica formando una capa de sobrenadante por encima del fango digerido, y experimenta un aumento de la mineralización. Como consecuencia de la estratificación y de la ausencia de mezcla completa, se utiliza menos del 50% del volumen del digestor convencional y solo se utiliza en instalaciones pequeñas.

### **Digestión de una fase y alta carga**

Este proceso difiere del proceso convencional de una fase en que la carga de sólidos es mucho mayor. El fango se mezcla íntimamente mediante recirculación de gas, mezcladores mecánicos, bombeo o mezcladores con tubos de aspiración y se calienta

para conseguir optimizar la velocidad de digestión. A excepción de las mayores cargas y del mejor mezclado, entre el digestor primario de un proceso convencional de dos etapas, y un digestor de una fase y alta carga, solo existen algunas diferencias. Los equipos de mezclado deben tener mayor capacidad; y en caso de digestores de alta carga el tanque deberá ser mas profundo, para favorecer el proceso de mezcla completa (Mefcald y Eddy, 1998).

El bombeo de fango al digestor se debe llevar a cabo de forma continua o temporalizada en ciclos de 30 minutos a 2 horas de duración, a fin de mantener condiciones constantes en el interior del reactor. El fango que entra desplaza el fango digerido hasta un tanque de almacenamiento. Debido a que no se produce una separación del sobrenadante, y a que los sólidos se reducen en un 45-50% por liberarse en forma de gas, el fango digerido suele tener una concentración del orden de la mitad de la de los fangos crudos. Los digestores pueden tener cubiertas fijas o flotantes. Algunas o todas las cubiertas flotantes pueden ser, a su vez, campanas de recogida de gas, lo cual permite disponer de un volumen de almacenamiento de gas independiente o un depósito de almacenamiento de gas adicional. Alternativamente, el gas se puede almacenar en una campana de gas independiente o en un depósito de almacenamiento a presión.

### **Digestión en dos fases**

En muchas ocasiones un digestor de alta carga se combina en serie con un segundo tanque de digestión. En este proceso, el primer tanque se utiliza para la digestión, y se equipa con dispositivos y concentración del fango digerido y para la formación de un

sobrenadante relativamente clarificado. En muchas ocasiones ambos tanques se construyen idénticos, de forma que cualquiera de ellos puede ser el tanque primario. En otros casos, el segundo de los tanques puede ser abierto, no calentado o una laguna de fango. Los estanques pueden tener cubiertas fijas o flotantes al igual que en la digestión de una etapa, (Mefcald y Eddy, 1998)

Las ventajas que aporta este proceso de dos fases, comparándolas con el de una sola, se resumen a continuación:

- El primer reactor actuará de amortiguador a la llegada de algún golpe de carga del afluente, aportando gran seguridad y estabilidad al sistema; también este reactor eliminará el oxígeno disuelto del afluente, por lo que la eficacia en el segundo reactor será óptima.
- Permite conseguir un biogás de mayor riqueza en metano, lo que repercute en el balance económico.
- Puede conseguirse un aumento cinético de la hidrólisis por agitación en el primer reactor, y evitar la pérdida de microorganismos de esta primera etapa intercalando un decantador y bomba, para retornar éstos a su origen.
- Este sistema admite una mayor flexibilidad en variaciones de carga, pH y temperatura, a la vez que ofrece mayores facilidades en la actuación, seguimiento y control del proceso.

### **2.7.1.1.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIGESTORES ANAEROBIOS**

#### **Ventajas de un Digestor Anaerobio**

##### **a) Producción de Energía**

Por la acción de las bacterias metanogénicas, gran parte del contenido orgánico de las aguas se transforma en gas metano; teóricamente 1 Kg. de la DQO eliminada produce 350 litros de metano a 35°C. Este combustible posee un elevado poder energético utilizable.

##### **b) Producción de Fangos**

Por quedar convertida la mayor parte de la materia orgánica, en el proceso anaerobio, en biogás, el sólido restante queda bien estabilizado y utilizable previa deshidratación.

##### **c) Proceso Exterior**

Como los reactores se construyen en ambientes cerrados, la producción de malos olores es baja en el proceso anaerobio, comparado con los olores desagradables que se desprenden en el sistema donde la depuración se realiza en espacios abiertos. Según RAS (2000) los digestores cerrados deben ubicarse a distancia mínima de 500 metros de las urbanizaciones.

## **Desventajas del Proceso Anaerobio**

### **a) Puesta en Marcha**

Debido a la baja velocidad de crecimiento de los microorganismos, en el proceso Anaeróbico la puesta en marcha de este tratamiento es lenta.

### **b) Temperatura**

El tratamiento anaerobio a temperatura ambiente resulta demasiado lento, lo que supone un aporte externo de energía, ya que requiere temperaturas de, al menos, 35 °C, para que la actividad de las bacterias sea óptima.

### **c) Costos**

Los costos asociados a la construcción de los digestores anaerobios son altos, comparado con sistemas no convencionales de tratamiento, principalmente por que necesita de un sistema integrado, para proporcionar un tratamiento completo y adecuado a los purines, además necesita la instalación de dispositivos que permitan, calentar los purines hasta una temperatura adecuada, y la instalación de un sistema de recolección y acumulación del gas, para su posterior uso o quema.

Los costos de operación y mantención no son tan altos, solo requiere personal capacitado, para que realicen las labores de mantención, que por lo general no son muy

frecuentes.

### **2.7.1.2 LAGUNAS ANAEROBIAS**

La depuración en estas lagunas ocurre por la acción de bacterias anaeróbicas. En estas lagunas, como consecuencia de la elevada carga orgánica y el largo periodo de retención del agua residual, el contenido en oxígeno disuelto se mantiene muy bajo o nulo durante todo el año. El objetivo perseguido es retener la mayor parte posible de los sólidos, que pasan a incorporarse a la capa de fangos acumulados. Las lagunas anaeróbicas operan en serie con lagunas facultativas y de oxidación, para asegurar que el efluente final de la planta depuradora va a poseer una calidad adecuada durante todo el año (Moreno, 1991). Además las lagunas anaeróbicas suelen operar en paralelo, es decir, dividiendo el afluente en varias partes, que alimentan a cada una de las lagunas, para posteriormente reunir nuevamente el afluente y dirigirlo al resto de la instalación. El sistema en paralelo permite además, paralizar una o varias de ellas para efectuar labores de limpieza sin que ello afecte la marcha global de la depuración.

#### **2.7.1.2.1 FUNDAMENTOS DE DEPURACIÓN EN LAGUNAS ANAEROBIAS**

Como su nombre lo indica, en las lagunas anaeróbicas se produce la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. En estas condiciones, la estabilización tiene lugar mediante las etapas siguientes según Middlebrooks *et al.* (1982):

### **a) Hidrólisis**

Este término indica la conversión de compuestos orgánicos complejos e insolubles en otros compuestos más sencillos y solubles en agua. Esta etapa es fundamental para suministrar los compuestos orgánicos necesarios para la estabilización anaeróbica en forma que pueden ser utilizados por las bacterias responsables de las dos etapas siguientes.

### **b) Formación de ácidos**

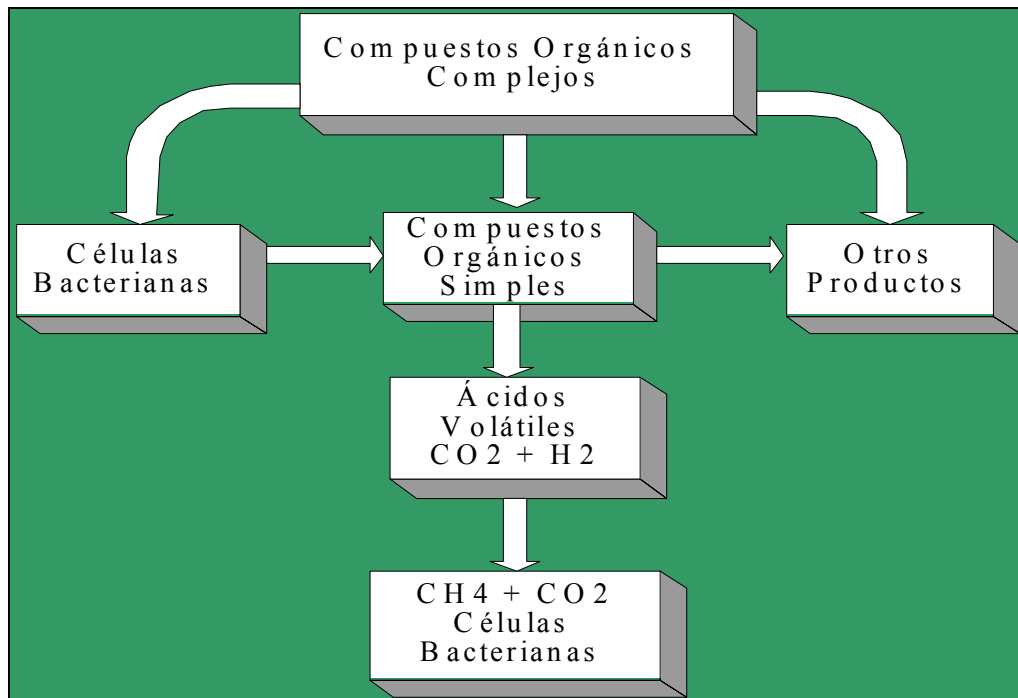
Los compuestos orgánicos sencillos generados en la etapa anterior son utilizados por las bacterias generadoras de ácidos. Como resultado se produce su conversión en ácidos orgánicos volátiles, fundamentalmente en ácido acético, propiónico, butírico. Esta etapa la pueden llevar a cabo bacterias anaeróbicas o facultativas.

### **c) Formación de Metano**

En la Figura 7 se muestra una representación secuencial de la digestión anaeróbica de compuestos orgánicos. Una vez que se han formado estos ácidos orgánicos, una nueva categoría de bacteria entra en acción, y los utiliza para convertirlos finalmente en metano y dióxido de carbono. El metano es un gas estable, que forma parte en poca cantidad de la composición normal de la atmósfera. La liberación de estos gases es responsable de la aparición de las burbujas, que son un síntoma de buen funcionamiento en las lagunas anaerobias. Esta fase de la depuración anaeróbica es fundamentalmente

para conseguir la eliminación de materia orgánica, ya que los productos finales no contribuyen a la DBO<sub>5</sub> o DQO del medio.

A diferencia de lo que ocurre con la fase acidogénica, su metabolismo es más lento y además, son mucho más sensibles a distintas condiciones ambientales (Moreno, 1991). Se estima que para valores de pH inferiores a 6.8 la actividad metanogénica comienza a presentar problemas y que por debajo de pH 6.2 se detiene completamente (Middlebrooks *et al*, 1982). Cuando esto ocurre se liberan no sólo ácidos orgánicos que pueden tener olores desagradables, sino otros compuestos como ácido sulfhídrico (SH<sub>2</sub>), mercaptanos o escatol, que son los responsables principales de los olores que indican funcionamiento deficiente en las lagunas anaeróbicas.



**Figura 8.** Secuencia de Procesos en Degradación Anaeróbica de Materia Orgánica.

(Fuente: Moreno 1991)

### **2.7.1.2.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DEGRADACION DE MATERIA ORGANICA EN EL TRATAMIENTO POR LAGUNAS ANAEROBICAS**

#### **a) Tiempo de retención Hidráulico.**

Si las lagunas operan con tiempos de retención muy pequeños, solo las fases hidrolíticas y acidogénicas tienen tiempo para desarrollarse, pero no la de la formación de metano, que es más lenta y por lo tanto se producirán olores y se obtendrá una eliminación muy baja de la materia orgánica. Por otra parte, si la carga es escasa y el tiempo de retención es elevado, comienzan a desarrollarse algas en la superficie, y el oxígeno producido da lugar a la muerte de las bacterias metanógenas, también con el resultado de desarrollo de olores desagradables. Por lo tanto, las lagunas anaeróbicas requieren un mantenimiento adecuado para preservar en todo momento el equilibrio entre las fases responsables de la depuración.

#### **b) Temperatura**

Otro factor que influye en el comportamiento de las lagunas anaeróbicas es la temperatura, con un intervalo óptimo de crecimiento entre 30-35°C. Por lo tanto, las lagunas anaerobias presentan una actividad muy superior durante el verano, lo que puede comprobarse fácilmente observando la cantidad de burbujas que aparecen en superficie en a las distintas épocas del año.

**c) pH**

La actividad metabólica de los microorganismos depende también de los niveles de pH del medio, en las lagunas anaerobias el pH debe variar entre 6.8-7.4, aunque se han entrado lagunas anaerobias que funcionan incluso a pH extremos de 6.2-7.8.

En la Tabla V, aparecen los intervalos óptimos y extremos para la fermentación anaeróbica de la materia orgánica.

**Tabla V.** Intervalos óptimos de temperatura y pH en las lagunas anaeróbicas.

<b>Variable</b>	<b>Optimo</b>	<b>Extremo</b>
Temperatura	30-35°C	10-40°C
PH	6.8-7.4	6.2-7.8

(Fuente: Middlebrooks et al, 1982)

A pesar de los factores que afectan la eficiencia de las lagunas anaeróbicas estas no son difíciles de operar siempre que se respeten los intervalos de carga o tiempo de residencia fijados.

Los factores fundamentales que hay que tener en cuenta al diseñar una laguna anaeróbica son: la conservación del calor, sedimentación de la materia en suspensión y almacenamiento de fangos.

### 2.7.1.2.3 EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE LAS LAGUNAS ANAEROBIAS

Las lagunas anaerobias pueden lograr altas eficiencias en la remoción de los contaminantes (Tabla VI), sin embargo el efecto de la temperatura es el factor más difícil de controlar.

**Tabla VI.** Porcentajes de remoción de las lagunas anaerobias para diferentes contaminantes

Parámetro	% Remoción
DBO <sub>5</sub>	50-60
Nitrógeno	0-15
Fósforo	0-5
Sólidos Volátiles	50-65

(Fuente: Vives, 2003)

### 2.7.1.2.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS LAGUNAS ANAEROBIAS

#### 1) Ventaja de una laguna Anaerobia

##### a) Almacenamiento

Las lagunas anaerobias permiten almacenar grandes volúmenes de aguas y de lodos, durante largos periodos de tiempo sin alterar su funcionamiento.

## **b) Profundidad**

Normalmente las lagunas anaerobias se construyen muy profundas, alcanzando hasta los 10 metros de profundidad, ya que facilita la mantención de las condiciones anaerobias en casi toda su superficie. Esta característica disminuye los costos de construcción, ya que utiliza una menor cantidad de terrenos, para lograr un determinado nivel de remoción.

## **2) Desventajas de las lagunas anaerobias**

### **a) Tiempo de Retención Hidráulico**

Las lagunas anaerobias como se indicó en secciones anteriores, necesitan largos periodos de retención hidráulico, para que se logre desarrollar las etapas de hidrólisis, acidogénesis y la formación de metano. Según Metcalf y Eddy (1998), el periodo de retención necesario para la depuración en lagunas anaerobias varía entre 20-50 días.

### **b) Temperatura**

La temperatura afecta notablemente las eficiencias obtenidas en las lagunas anaerobias, (Tabla VII). Por lo que es indispensable mantener las condiciones adecuadas de temperatura dentro de las lagunas.

**Tabla VII.** Relación de los porcentajes de remoción de DBO en función de la temperatura

Temperatura °C	Remoción DBO, %
10-15	30-40
15-20	40-50
20-25	50-60
25-30	60-70

(Fuente: RAS, 2000)

### **b) Generación de Olores**

Las lagunas Anaerobias, son potenciales generadores de desagradables olores. Para mantener un sistema de tratamiento anaeróbico que estabilice correctamente el residuo orgánico, deben hallarse en estado de equilibrio dinámico los microorganismos formadores de ácidos y metano, es decir, las reacciones deben producirse continua y sucesivamente, ya que el funcionamiento anormal de una de ellas, dará lugar al mal funcionamiento global del proceso. Esta desventaja a veces condiciona su construcción, por lo deben instalarse a más de 1000 metros de urbanizaciones (RAS, 2000).

### **c) Costos**

Los costos asociados a las lagunas anaerobias son relativamente bajos, sin embargo, esta inversión depende de diferentes factores, como son los grandes volúmenes a tratar y su acumulación, influye también el tipo y las características de los suelos, su capacidad de infiltración, la profundidad de las napas, el clima (temperatura ambiental,

precipitaciones intensas y acumuladas), entre otros. Estos factores son los que encarecen la construcción del sistema. Los mayores costos son función de la etapa de construcción de los sistemas, donde debe realizarse un trabajo con ingeniería de detalle, para no alterar los medios ecológicos. Los costos de mantención y operación, están relacionados con las obras de limpieza de las lagunas. Otros costos que pueden encarecer la construcción de las lagunas son los sistemas de agitación, estos dependen de que tan sofisticados sean, ya que existen desde sistemas de agitación mecánica hasta sistemas de recirculación de biogás.

### **2.7.1.3 LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS**

Este tipo de lagunas según Tchobanoglous y Shoroeder. (1985) es muy utilizada para el tratamiento de los desechos animales que se a desarrollado como una variación del proceso de digestión ya que funciona como un digestor anaerobio que cambia la calidad y carácter del estiércol.

Una laguna cubierta es una planta del tratamiento de pequeña escala donde se deposita estiércol que normalmente se diluye con agua del lavado de las lecherías y lluvia. Estas lagunas, el estiércol se licua parcialmente y estabiliza por la acción bacteriana (Fost. y Fulhage, 2000). Las lagunas cubiertas consisten básicamente en la implementación de una laguna anaerobia, tapada e impermeabilizada con polietileno de alta densidad, para evitar la erosión causada por la turbulencia interna que generan los agitadores, o bien, como un tanque de fermentación, ya sea de concreto u otro material. La cubierta de polietileno es colocada sobre flotadores, que permiten recuperar el gas, que se puede

utilizar para la producción de energía (Figura 8).



Según Winter (2002), estos digestores se han implementado actualmente en varios países desarrollados especialmente en los Estados Unidos y Canadá, ya que son sistema que permiten el tratamiento de desechos ganaderos y requieren de muy poco mantenimiento. Las lagunas cubiertas como un reactor anaerobio poseen las características siguientes:

**a) Proporciones de Carga Orgánicas Bajas.**

Los fangos orgánico obtenidos al finalizar la depuración en las lagunas cubiertas normalmente son muy bajos, desde los 0.048 a 0.096 Kg lodos/m<sup>3</sup> de sólidos volátiles al día (ASAE, 2000), comparado con los digestores anaerobios que va desde 2.7 a 17 Kg volumen de lodo digerido/m<sup>3</sup> de sólidos volátiles al día (La Colina, 1984).

### **b) Fluctuación de Temperatura del Funcionamiento**

A diferencia de los digestores anaerobios tradicionales que casi siempre se operan en condiciones mesófilas constante o temperaturas termofílicas, las lagunas cubiertas funcionan a temperaturas variables, dependiendo de la profundidad del líquido y de la temperatura ambiente (Safley y Westerman, 1992, ab).

### **c) Superficie de Lagunas Descubiertas**

Las lagunas anaerobias descubiertas normalmente tienen un área superficial mayor, por lo que se inhibe la reacción anaeróbica en las capas más altas donde incluso las cantidades pequeñas de oxígeno molecular pueden ser tóxicas a las bacterias metanogénicas. Además, algunas sustancias orgánicas volátiles, como los ácidos grasos volátiles que son productos intermedios de la digestión anaerobia, son emitidas a la atmósfera lo que genera problemas de olor.

### **d) Recuperación del Biogás**

El propósito principal de la instalación de cubiertas en el pasado era la prevención de emisiones de olor, sin embargo, actualmente de le ha dado otros usos, que incluyen las mejoras en el tratamiento anaerobio y el potencial para la colección del biogás.

El Safley y Westerman (1989) establecen que las uso de cubiertas flotantes sobre las lagunas anaerobias permite la recuperación de biogás en la superficie de las lagunas.

Ellos encontraron que la producción de biogás, se puede realizarse incluso a temperaturas de 13 -15°C. La USEPA reconoce que las lagunas cubiertas con recuperación del metano son una solución para los productores ganaderos y mantiene un equilibrio con el crecimiento industrial y el medio ambiente. (USEPA, 1995).

#### **2.7.1.3.2 FUNDAMENTOS DE DEPURACION EN LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS**

La depuración en este tipo de lagunas se realiza de manera similar a un digestor anaerobio (ver sección 2.7.1.1.1), ya que se llevan a cabo las etapas las tres etapas de digestión: la etapa hidrolítica, la etapa fermentativa o acidogénica y la etapa metanogénica (Kiely, 1999).

#### **2.7.1.3.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN DEGRADACION DE MATERIA ORGANICA EN LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS**

Como las lagunas anaerobias cubiertas son una modificación de los digestores anaerobios, los factores que afectan la eficiencia en la degradación de la materia orgánica en este tipo de lagunas corresponden a los mismos factores que influyen en la eficiencia en los digestores anaerobios (2.7.1.1.2).

#### 2.7.1.3.4 EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE LAS LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS

Se considera que los porcentajes de remoción en las lagunas anaerobias cubiertas también dependen de la temperatura de funcionamiento, sin embargo por el gran volumen en que son diseñados, aunque se utilice un sistema para calentar los purines las eficiencias logradas no son tan elevadas como en los digestores anaerobios, pero con periodo adecuado de operación se logran eficiencias considerables. En la Tabla VII, se establecen los valores propuestos por Vives (2003) para una laguna anaerobia cubierta.

**Tabla VII.** Porcentajes de remoción de las lagunas anaeróbicas cubiertas para diferentes contaminantes.

Parámetro	% Remoción
DBO5	60
Nitrógeno	50
Fósforo	25
Sólidos Volátiles	60

(Fuente Vives, 2003)

Según Zhang (1985) se debe asumir que de los sólidos totales el 50% de los sólidos volátiles más todos los sólidos fijos se transforman en lodos.

### **2.7.1.3.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS**

#### **1) Ventajas de las Lagunas Anaerobias Cubiertas**

##### **a) Disminución de Olores**

Las lagunas cubiertas, minimizar la generación de olores, pues la actividad metabólica se realiza en un sistema cerrado. Mientras las cubiertas reducen significativamente las emisiones de olor, se mantienen también las condiciones adecuadas para que los microorganismos anaerobios puedan estabilizar la materia orgánica en el estiércol, ya que se previene la aeración natural en la superficie de las lagunas cubiertas.

##### **b) Temperatura**

La cubierta de polietileno atrapa también los rayos del sol en especial durante épocas de verano, minimizan el efecto de las caídas de temperaturas durante épocas frías. Este tipo de lagunas puede depurar la materia orgánica a temperaturas variables, sin embargo para obtener un mejor nivel de depuración, también es necesario controlar la temperatura de funcionamiento, con el uso de intercambiadores de calor o con termoreactores.

##### **d) Biogás**

Otra ventaja que presentan las lagunas cubiertas es la oportunidad de reducir emisiones

de gas del invernadero y de capturar el biogás, una fuente útil de la energía, en este sentido, dentro de las lagunas cubiertas ocurre un proceso de digestión que alcanza a desarrollar la etapa metanogénica, (Winter, 2002). El biogás es una fuente reanudable de la energía con consecuencias para el medio ambiente mucho más bajas que el combustible fósil convencional. La recuperación de biogás también proporciona ventajas rurales de la energía tales como ayuda distribuida de la generación y del voltaje. Cuando se capturan el biogás, puede ser utilizado para generar energía.

#### **e) Abono Digerido**

La fibra en abono digerido de la lechería se puede utilizar en la granja sobre los cultivos o para la venta al recuperar un fertilizante de alta calidad del suelo.

#### **f) Almacenamiento**

En estas lagunas, también se puede almacenar grandes volúmenes de aguas y lodos sin recurrir a otros sistemas posteriores de tratamiento o almacenaje,

#### **g) Costos**

El almacenamiento de aguas durante largos periodos de tiempo disminuye los costos de construcción en comparación con los digestores anaerobios.

## **2) Desventajas de las Lagunas Anaerobias Cubiertas**

### **a) Remoción**

Este tipo de sistema presenta menores porcentajes de remoción que los digestores.

### **b) Limpieza**

Al tener la cubierta es difícil realizar una buena limpieza, debido principalmente al escape de biogás por el retiro de la cubierta.

### **c) Fugas**

Por la naturaleza de los materiales de construcción de este tipo de sistema es más fácil el escape de biogás que en un digestor anaerobio.

## **CAPITULO IV**

### **SISTEMAS DE TRATAMIENTO PROPUESTOS**

#### **4.1 ALTERNATIVA 1: SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA**

Para la alternativa 1 el sistema cuenta con dos digestores anaerobios de mezcla completa en paralelo, utilizando el mismo biogás generado para la homogenización, por medio de un compresor. El flujo de biogás en exceso, pasará a través de un pozo de compost para minimizar la contaminación atmosférica por la generación de metano, ya que son gases que contribuyen a la destrucción de la capa de ozono.

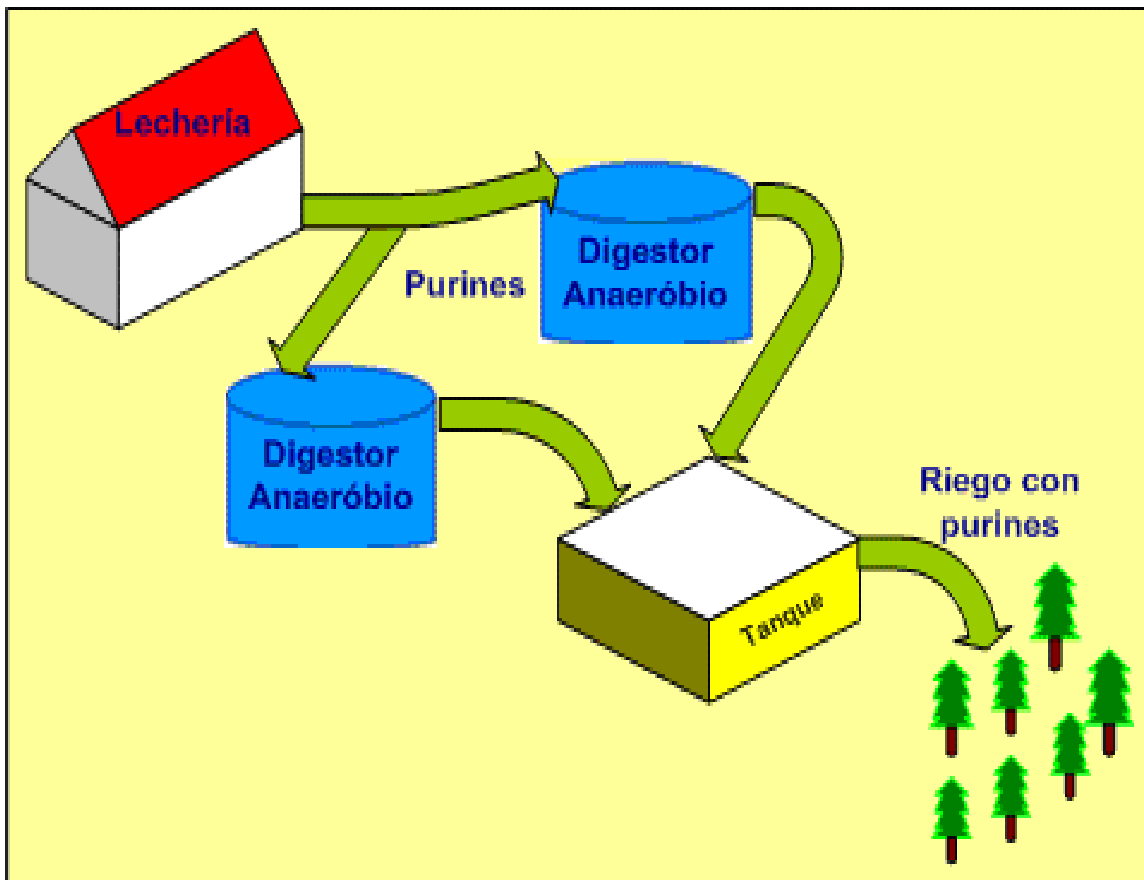
El propósito de este tipo de reactor es estabilizar los purines, hacerlos inofensivos en términos de olor y producción de vectores, transmisión de enfermedades, etc.

Para la alternativa propuesta, se utilizará un tanque de almacenamiento final, este tanque permitirá almacenar los purines durante un cierto periodo de tiempo. Luego del almacenamiento los purines serán utilizados para riego superficial sobre los cultivos y praderas de la empresa, de manera que se aprovechen los nutrientes que no serán removidos y de esta manera satisfacer la demanda de fósforo, nitrógeno y potasio de los vegetales.

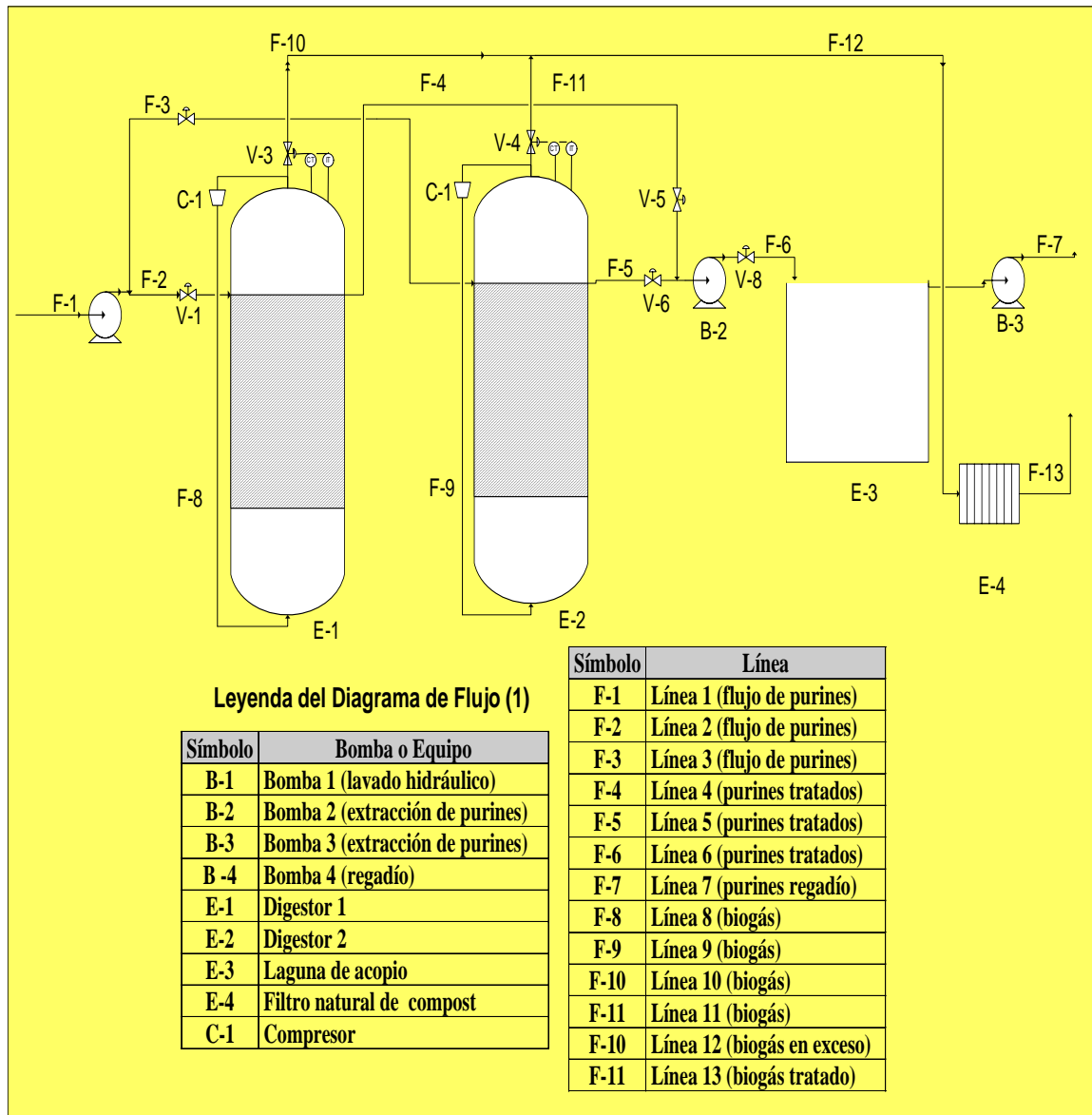
El sistema de tratamiento considera las siguientes etapas:

- Estabilización por digestión anaeróbica de mezcla completa en una etapa y en paralelo.
- Desaguado en un estanque de almacenamiento
- Riego praderas perennes.

En la Figura 9 se indica esquemáticamente las etapas contenidas en el sistema de digestión anaeróbica y en la Figura 10 se indica su diagrama de flujo.



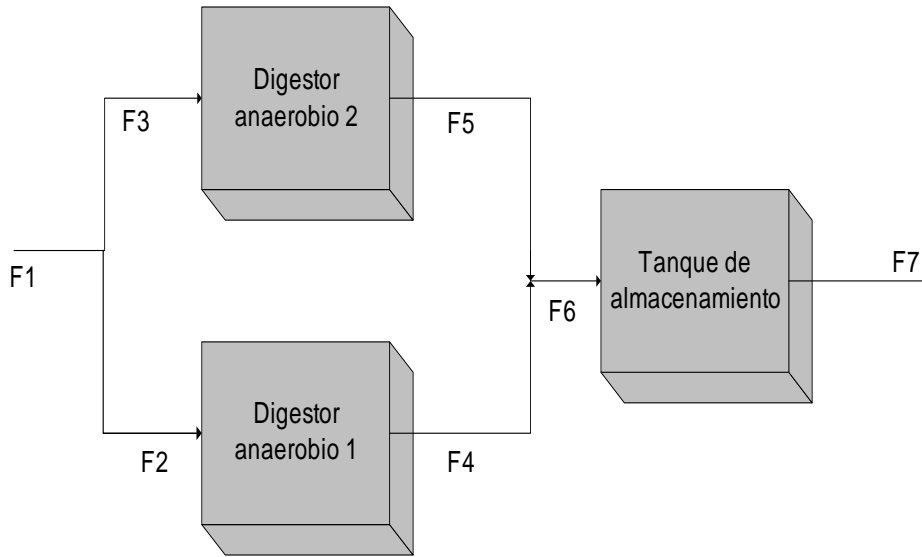
**Figura 10.** Propuesta del sistema de tratamiento de digestión anaerobia.



**Figura 11.** Diagrama de flujo del Sistema de Digestión Anaerobia

#### 4.1.1 BALANCES DE MASA AL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

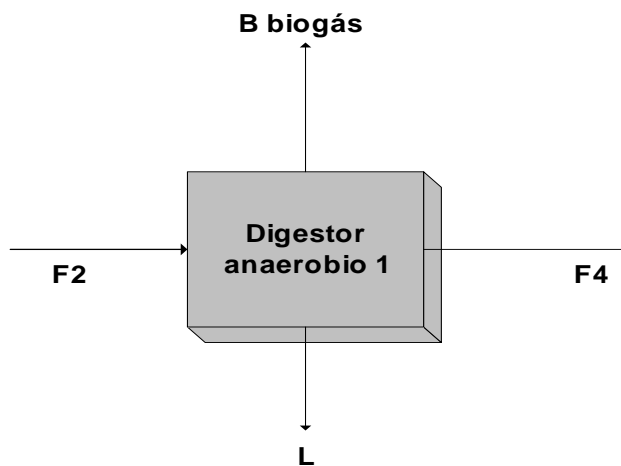
El balance de masa de realizara de acuerdo al siguiente diagrama.



### 1) Balance de masa en el digestor anaerobio

Suponiendo que el sistema parte desde la corriente  $F_1$ , la cual se divide en iguales proporciones hacia una corriente  $F_2$  y  $F_3$ .

A continuación se realizará el balance de masa para el digestor de la corriente  $F_2$ . Este presenta las mismas dimensiones que el segundo digestor.



**a) Balance de masa global al Digestor 1**

$$F_2 \cdot \rho_2 = F_4 \cdot \rho_4 + B + L \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

B : Flujo másico de biogás, kg/d

L : Producción de lodos, kg/d

Suponiendo densidades iguales se tiene que:

$$F_2 = F_4 + B + L \quad (\text{Ec. 2})$$

Los balances tanto para el digestor como para el tanque final serán para los principales parámetros medibles en purines, como son DQO, K, N total y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Sin embargo, las ecuaciones solo se realizarán para DQO, ya que los demás parámetros presentan ecuaciones de balance similares.

A continuación se presentan las ecuaciones de balance para DQO para el digestor anaerobio y para el tanque de almacenamiento final.

**b) Balance de DQO**

$$F_2 \cdot [DQO_2] = F_4 \cdot [DQO_4] + [DQO_B] + [DQO_L] \quad (\text{Ec. 3})$$

Pero como el biogás se recircula al digestor, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$F_2 \cdot [DQO_2] = F_3 \cdot [DQO_4] + [DQO_L] \quad (\text{Ec. 4})$$

### c) Determinación del Biogás Generado

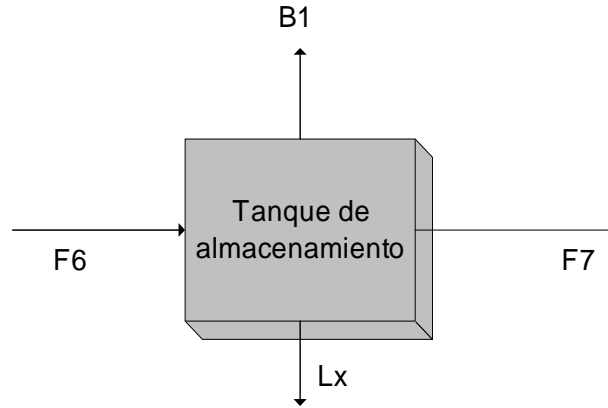
La determinación del biogás generado se realiza a partir del flujo másico de sustrato (kg DQO / d) que se va a biogás. Considerando que 350 ml de CH<sub>4</sub> seco (a T = 0° C, P = 1 atm) equivalen a 1 gramo de DBO, se puede generar una expresión adaptable a los cambios en las condiciones operacionales (Temperatura, presión, presión de vapor de agua en el gas).

### d) Eficiencia del Digestor

$$\xi = \left( \frac{DQO_2 - DQO_4}{DQO_2} \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

## 2) Tanque de Almacenamiento de Purines Final

En este caso se considerará el biogás solo para el balance general del tanque final, ya que este no será almacenado, pues se trata de un tanque abierto, por lo tanto el biogás se volatilizará.



**a) Balance Global al Tanque Final**

$$F_6 \cdot \rho_6 = F_7 \cdot \rho_7 + B_1 + Lx \quad (\text{Ec. 6})$$

Ahora considerando que las densidades continúan siendo las mismas, tenemos que:

$$F_6 = F_7 + B_1 + Lx \quad (\text{Ec. 7})$$

**b) Balance de DQO**

$$F_6 \cdot [DQO_6] = F_7 \cdot [DQO_7] + [DQO_{B1}] + [DQO_{Lx}] \quad (\text{Ec. 8})$$

**c) Balance y Eficiencia Global del Sistema**

$$\xi = \left( \frac{DQO_1 - DQO_7}{DQO_1} \right) \quad (\text{Ec. 9})$$

## Balance Hidráulico

A partir del diagrama de flujo de la planta y dimensionadas las distintas unidades que conforman esta, es posible realizar los cálculos hidráulicos. Estos cálculos se emplean para el dimensionamiento de los conductos y canales de conexión entre equipos.

En cualquier sistema de tuberías, además de la pérdida de carga por fricción a lo largo de aquellas, existen pérdidas menores o localizadas debido a la entrada o salida de tuberías, ensanchamiento o contracción brusca, curvas, codos, té, válvulas abiertas o parcialmente cerradas y ensanchamientos o contracciones graduales, entre otros.

El principal propósito es evaluar los cambios de presión que resultan del flujo incompresible en tuberías, ductos y sistemas de flujo.

Para la realización de balances es imprescindible contar con la ecuación de Bernoulli (Fuente: Fox, 1995)

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + Z_2 + hlt \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

$P_1$  y  $P_2$  son las presiones en la parte inicial y final del sistema.

$v_1$  y  $v_2$  son las velocidades en la parte inicial y final del sistema.

$Z_1$  y  $Z_2$  Son las alturas del estanque inicial y final.

$h_{it}$ , Perdidas de carga.

$g$  es la aceleración de gravedad.

Al realizar un balance hidráulico, se deben considerar diversos parámetros relacionados con las características del flujo, estos parámetros se describen a continuación.

El Número de Reynolds describe las características del flujo (laminar, transición o turbulento), este número se obtiene de la siguiente forma (Fuente: Streeter, 2000):

$$Re = \frac{\rho \cdot V_0 \cdot D}{\mu} \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

$V_0$ : Velocidad superficial del fluido, m/s

$\rho$  : Densidad del fluido, kg/m<sup>3</sup>

$D$ : Diámetro del conducto de transporte del fluido, m

$\mu$ : Viscosidad del fluido, N-s/m<sup>2</sup>

Para determinar el factor de rozamiento ( $f$ ), se debe considerar la rugosidad relativa de la tubería ( $e/D$ ), además del valor del número de Reynolds, con estos parámetros se puede obtener el factor de rozamiento a través del diagrama de Moody o e ecuaciones como la de Haaland, ecuación 12 (Fuente: Pérez, 1993).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left( \frac{6.9}{Re} + \frac{e/D}{3.7} \right)^{1.11} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

$f$ : factor de fricción (Adimensional).

$e/D$ : rugosidad (Adimensional).

La velocidad media ( $V_0$ ) del fluido en la tubería viene dada por:

$$V_0 = \frac{Q}{A'} = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

$Q$ : caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$A'$ : área tubería ( $\text{m}^2$ ).

Para determinar la pérdida de carga total se debe considerar la sumatoria de todas las pérdidas mayores y menores, de la siguiente forma (Fuente: Streeter, 2000):

$$h_{LT} = \sum h_l + \sum h_{lm} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

$h_{lt}$ : pérdidas de carga totales (m).

$h_l$ : pérdidas de carga mayores (m).

$h_{lm}$ : pérdidas de carga menores (m).

$$\frac{\Delta P}{\rho} + g\Delta Z + \frac{1}{2}[(v_2^2 - v_1^2)] = -h_B + h_{IT} \quad (\text{Ec. 15})$$

### **Pérdidas de la Bomba**

Para conocer la potencia hidráulica de las bombas en el sistema es preciso emplear la siguiente ecuación (Fuente: Streeter, 2000):

$$P = \frac{\gamma \cdot h_b \cdot Q}{\eta} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

P: Potencia de la bomba (Pascal) .

$\gamma$ : Peso específico del fluido ( $\text{Kg/m}^2\text{s}^2$ ).

$h_B$ : pérdidas de carga de la bomba (m).

$\eta$ : Eficiencia de la bomba (%)

### **Cálculo de la Pérdida de Carga.**

La pérdida de carga total,  $h_{IT}$ , se considera como la suma de las pérdidas mayores,  $h_l$ , debida a los efectos friccionantes en flujo completamente desarrollado en tubos de área constante, y pérdidas menores,  $h_{lm}$ , debidas a entradas, conectores, cambios de área, etc.

En consecuencia, se consideraran las pérdidas mayores y menores por separado.

**Pérdidas Mayores: Factor de Fricción.**

La ecuación de Bernoulli (Ec 15), puede emplearse para evaluar la pérdida de carga mayor. Para flujo completamente desarrollado a través de una tubería de área constante,  $h_{lm} = 0$  y  $(V_1^2/2g) = (V_2^2/2g)$ ; por lo que la ecuación de Bernoulli se reduce a:

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} = (Z_2 - Z_1) + h_f \quad (\text{Ec. 17})$$

En casos en que las tuberías se encuentran en forma horizontal,  $Z_2 = Z_1$ , por lo tanto:

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \frac{\Delta P}{\rho g} = h_f \quad (\text{Ec. 18})$$

De tal manera, la pérdida de carga mayor puede expresarse como la pérdida de presión para flujo completamente desarrollado a través de una tubería horizontal de área constante.

Puesto que la pérdida de carga representa la energía convertida por efectos friccionantes de mecánica en térmica, la pérdida de carga para flujo completamente desarrollado en un ducto de área constante depende sólo de los detalles del flujo a través del ducto. La pérdida de carga es independiente de la orientación de la tubería. Las pérdidas de carga mayores para flujo turbulento se calculan de la siguiente forma (Fuente: Streeter, 2000):

$$h_l = f \frac{L \cdot V_0^2}{2 \cdot D \cdot g} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde:

L es el largo de la tubería en metros

### **Pérdidas Menores**

El flujo en un sistema de tubería puede pasar por una variedad de conectores, codo, válvulas, o cambios abruptos en el área. Se encuentran cargas adicionales, fundamentalmente como resultado de la separación del flujo. La energía a la larga es disipada por la mezcla violenta en las zonas separadas. La pérdida de carga menor puede expresarse como (Fuente: Streeter, 2000):

$$h_{ml} = K' \cdot \frac{V_0^2}{2} \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde:

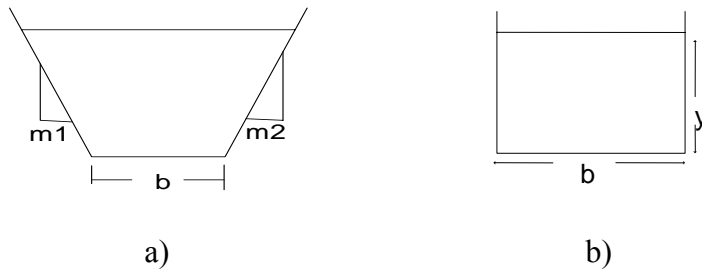
K' es coeficiente de pérdida por accesorio.

### **Cálculos en Canales Abiertos.**

Los purines a diferencia de otros fluidos se generan en los patios de animales y salas de ordeña. Por lo tanto canalizarlos hasta los sistemas de tratamiento generalmente resulta complejo, una forma de realizar el proceso de traslado es a través de canales abiertos.

En la siguiente Figura 11 se muestra las geometrías más comúnmente usadas para canales abiertos.

**Figura 12.** Geometrías típicas de canales abiertos. a) Geometría trapezoidal. b) Geometría cuadrada.



(Fuente Streeter, 2000)

Para la geometría cuadrada se tiene que:

$$A_x = b \cdot y \qquad y = \frac{b}{2} \qquad \text{(Ec. 21)}$$

Donde:

y es la profundidad del canal

b es el ancho del canal.

En tanto que para la geometría trapezoidal se tiene que (Fuente: Streeter, 2000):

$$A_x = b \cdot y + \frac{1}{2} \cdot y^2 (m_1 + m_2) \qquad \text{(Ec. 22)}$$

#### **4.1.2 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA EL SISTEMA DE DIGESTION ANAEROBIA**

##### **a) Digestores Anaerobios**

Para el dimensionamiento del digestor se considera una forma cilíndrica, y bajo tierra.

El Volumen puede estimarse con la ecuación 1(Fuente: Harmon, 2002).

$$V = Q \cdot TRH \quad (\text{Ec } 23)$$

Donde:

$V$  = Volumen ( $\text{m}^3$ )

$Q$  = Caudal ( $\text{m}^3/\text{día}$ )

TRH = Tiempo de retención hidráulico (d).

El volumen de fango se puede determinar en función de los sólidos suspendidos volátiles y el caudal (Fuente: Metcalf y Eddy, 1998) (Ec. 24)

$$V_f = \frac{STV \cdot Q}{\rho \cdot Y} \quad (\text{Ec. } 24)$$

Donde:

$SSV =$  Sólidos suspendidos Volátiles ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho =$  Densidad de los lodos ( $\text{kg/m}^3$ )

$Y =$  Coeficiente de producción máxima medida durante cualquier periodo finito de la fase de crecimiento exponencial, definido como la relación entre la masa de células formadas y la masa de sustrato consumido, masa/masa.

Otro parámetro de gran importancia es la carga volumétrica, la cual se calcula en base a la carga de DBO y el volumen. Este se determina a través de la siguiente ecuación (Fuente: Harmon, 2002):

$$Cv = \frac{DBO \cdot Q}{V} \quad (\text{Ec. 25})$$

Donde:

$Cv =$  Carga Volumétrica ( $\text{kg/m}^3 \cdot \text{d}$ )

$V =$  Volumen del Digestor ( $\text{m}^3$ )

Luego conociendo el volumen y la profundidad del digestor el diámetro viene dado por (Fuente: Maetcalf y Eddy, 1998):

$$D = \sqrt{\frac{V \cdot 4}{\pi \cdot H}} \quad (\text{Ec. 26})$$

Donde:

$D$  = Diámetro (m)

$H$  = Profundidad (m)

### **Producción de Metano**

Según el Department of Agricultural and Biosystems Engineering (2002) la cantidad de metano producido en el proceso de digestión del estiércol bovino corresponde 0.35 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por kilogramo de DBO removida (Ecuación 5) (Fuente: Harmon, 2002).

$$P(CH_4) = 0.35 \cdot (DBO_{en} - DBO_{sal}) \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde:

DBO<sub>en</sub> y DBO<sub>sal</sub> están en kg/d y los 0.35 en m<sup>3</sup>/kg

### **b) Tanque de Almacenamiento**

El volumen del tanque inicial y final y el de biogás se calcularán de la misma manera que el digestor anaerobio (Ec. 1), suponiendo que solo tendrán remoción de DBO y una producción despreciable de lodos, ya que solo tienen la función de almacenar.

El área de los tanques se calculara de la siguiente manera:

$$A = L \cdot W \quad (\text{Ec. 28})$$

Donde:

$L$  = largo del tanque.

$W$  = Ancho del tanque.

Ambos tanques tendrán una relación largo – ancho de 1:2.

$$L = 2W \quad (\text{Ec. 29})$$

### c) Pozo de Compost

El pozo de compost se diseñará de la misma forma que el tanque final.

## 4.2 ALTERNATIVA 2: SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS

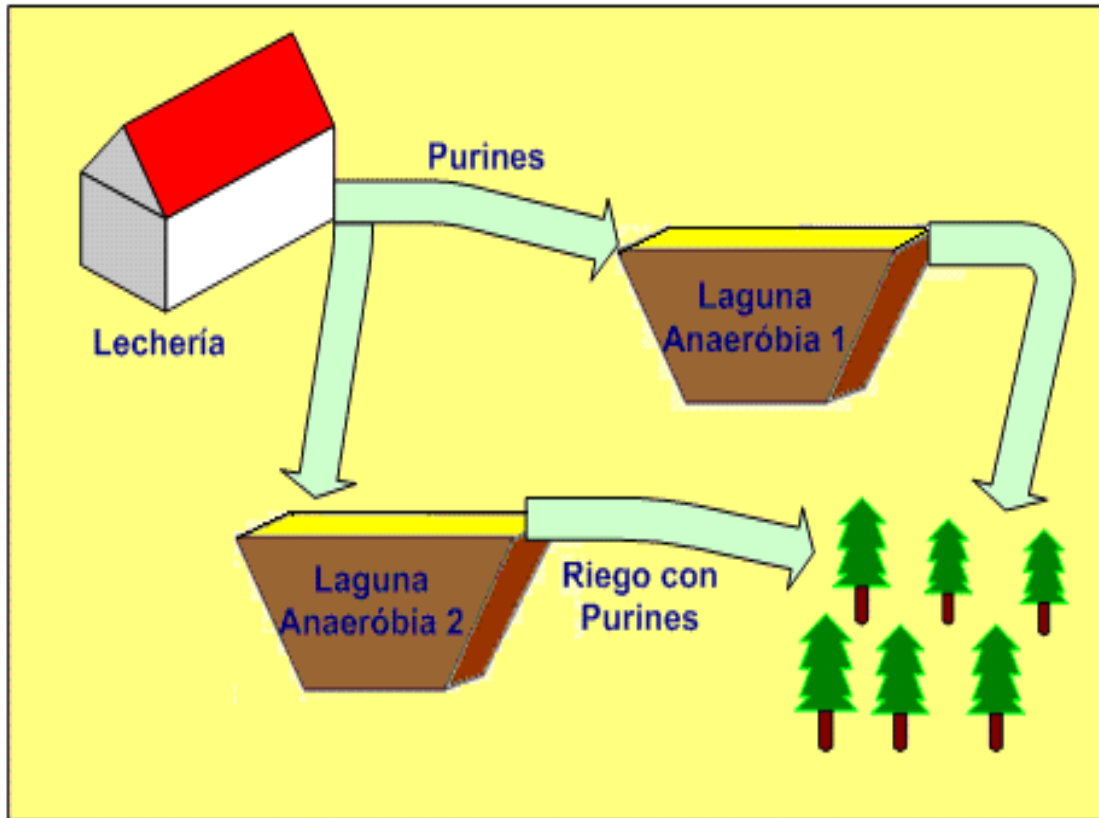
Para la alternativa 2 se propone un sistema de lagunas anaerobias en paralelo, para estabilizar los purines y al mismo tiempo almacenar los lodos por un periodo de tiempo de 12 años. Se espera una eficiencia aproximada de un 50% de remoción de  $DQO_5$ . Al igual que la primera alternativa de tratamiento, se almacenaran los purines, para luego utilizarlos como fertilizante orgánico de praderas.

El sistema de tratamiento considerará las siguientes etapas:

- Estabilización en lagunas anaeróbicas en paralelo.

- Riego de praderas perennes.

En la Figura 12 se indica esquemáticamente las etapas contenidas en el sistema de lagunas anaeróbicas y en la Figura 13 se representa su diagrama de flujo.



**Figura 13.** Propuesta del sistema de tratamiento por lagunaje anaerobio.

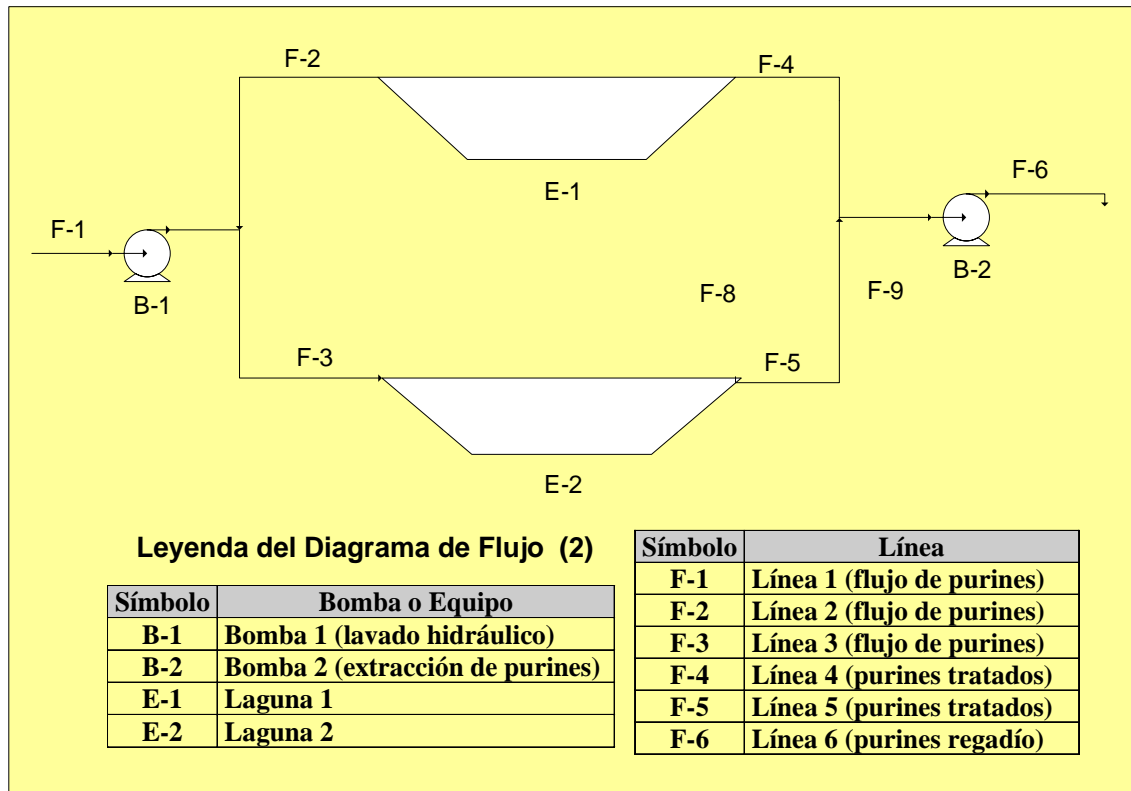
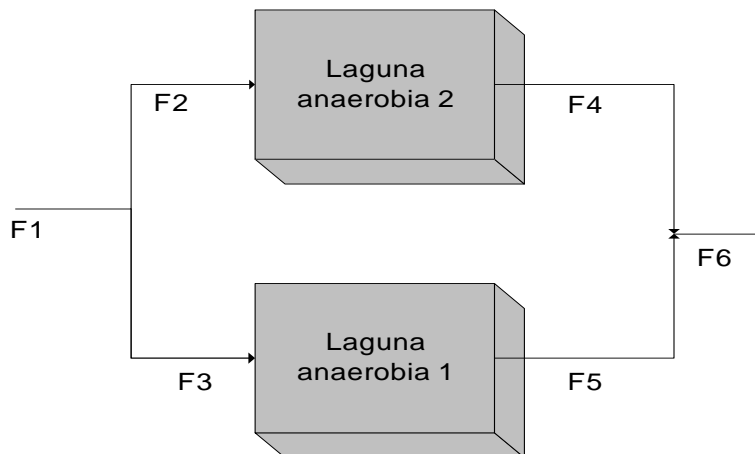


Figura 14. Diagrama de Flujo del Sistema de Lagunas Anaerobias

#### 4.2.1 BALANCES DE MASA AL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS

El balance de masa de realizara de acuerdo al siguiente diagrama

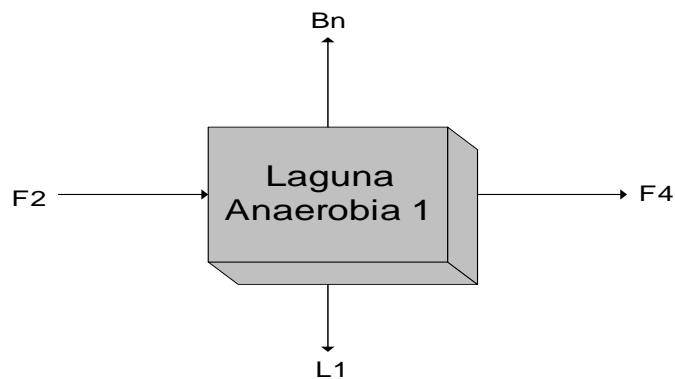


### 1) Balance de Masa Sistema de Lagunas Anaerobias

Suponiendo que el sistema parte de la corriente  $F_1$ , la cual se divide en iguales proporciones hacia una corriente  $F_2$  y  $F_4$ .

Al igual que para el sistema de digestión anaerobia, se realizara el balance para una de las lagunas, así mismo el balance de masa de los principales parámetros tendrá ecuaciones solo para la DQO.

#### a) Balance Laguna Anaerobia 1



$$F_2 \cdot \rho_2 = F_4 \cdot \rho_4 + L_1 + B_n \quad (\text{Ec. 30})$$

Donde:

$F_2$  y  $F_4$  = Flujos ( $\text{m}^3/\text{d}$ )

$\rho_2$  y  $\rho_4$  = densidades ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$B_n$  = Biogás ( $\text{kg}/\text{d}$ )

$L_1$  = Producción de lodos ( $\text{kg}/\text{d}$ )

**b) Balance de DQO**

$$F_2 \cdot [DQO_2] = F_4 \cdot [DQO_4] + DQO_{L1} \quad (\text{Ec. 31})$$

**c) Eficiencia de Remoción de la Laguna Anaerobia Cubierta 1**

$$\xi = \frac{DQO_2 - DQO_4}{DQO_2} \quad (\text{Ec. 32})$$

**4.2.2 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA LAS LAGUNAS ANAERÓBICAS**

Para determinar las dimensiones de la laguna anaeróbica se deben tener en cuenta los parámetros que se mencionan a continuación.

El nivel máximo operativo de una laguna anaeróbica depende del volumen requerido más la profundidad requerida. A continuación se presenta en el paso 1 y 2, la forma de calcular cada uno respectivamente.

**Paso 1.** El volumen requerido (VR):

$$VR = VMT + VP + VL \quad (\text{Ec. 33})$$

En donde:

VR = requerimiento de volumen de la laguna, m<sup>3</sup>

VMT = Volumen mínimo de tratamiento, m<sup>3</sup>

VP = Volumen de Purines para un periodo de tratamiento, m<sup>3</sup>

VL = Volumen de lodos acumulados sobre el periodo de tiempo entre la remoción de este, m<sup>3</sup>.

**Paso 1.1** El volumen mínimo de tratamiento (VMT) representa el volumen necesario para mantener la actividad biológica sustentable. Este valor puede ser determinado utilizando la siguiente ecuación (Fuente: Hermanson, 1991):

$$VMT = \frac{CS}{csv} \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde:

VMT = Volumen mínimo de tratamiento, m<sup>3</sup>

cs = Carga de Sólidos total diario (de todas las fuentes), Kg/día.

csv = Proporción de carga de los sólidos volátiles, Kg/m<sup>3</sup>/día

$$CS = 0.001 \cdot ST \cdot Fpd \quad (\text{Ec. 35})$$

Donde:

ST = Concentración de sólidos totales en mg/l.

Fpd = Flujo de purines diarios en m<sup>3</sup>/día.

**Paso 1.2.** El volumen de purines (VP) debe reflejar el volumen real del estiércol, del agua de desecho, del agua de lavado que no será reciclada, y el agua de la dilución

limpia que se agregó a la laguna durante el período de tratamiento (Fuente: Dickey, 1999).

$$VP = 1.05 \cdot Fp \cdot td \quad (\text{Ec. 36})$$

Donde:

VP = volumen de purines para un periodo de tratamiento, m<sup>3</sup>

Fp = Flujo mensual de purines en m<sup>3</sup>/mes.

td = Tiempo entre una descarga y otra, en meses.

**Paso 1.3.** El volumen de lodo (VL) puede ser determinado mediante la siguiente ecuación (Fuente: Hermanson, 1991):

$$VL = 0.207 \cdot Te \cdot Cs \quad (\text{Ec. 37})$$

Donde:

VL = Volumen de lodos, m<sup>3</sup>

Te = Tiempo de acumulación de lodos o tiempo necesario para la extracción de éstos, en años.

Cs = carga de sólidos total diario en kg/día.

**Paso 2.** Profundidad de la laguna. Si bien existe un rango entre 2,4 y 8,0 metros para la profundidad de una laguna, es recomendable la utilización de máximas profundidades. Se debe considerar al menos 1,0 metros de distancia entre el fondo de la laguna y la máxima altura de la napa subterránea. . Para predios con distancia a la altura máxima de

napa, menor a 9 m, la profundidad de la laguna se puede estimar con la siguiente ecuación (Fuente: Dickey, 1999):

$$P < Damm - 1 \quad (\text{Ec. 38})$$

Donde:

P = Profundidad de la laguna en m.

Damn = Distancia a la altura máxima de la napa en m.

**Paso 3.** Cálculo de la profundidad requerida (PR) para almacenar la precipitación máxima mensual menos la evaporación en la superficie de la laguna para el tiempo entre descarga que se le aplique a la laguna. Se le adicionará un borde libre de 30cm a esta profundidad como seguridad ante potenciales rebalces. (Fuente: Dickey, 1999)

$$PR = \frac{Ppr + (Ppm - Ev) \cdot td}{1000} + 0,3 \quad (\text{Ec. 39})$$

Donde:

PR = Profundidad requerida en m.

Ppr= Precipitación máxima requerida a un determinado tiempo de retorno (mm)

Ppm = Precipitación máxima mensual en mm.

Ev = Evaporación mensual en mm.

Td = tiempo de almacenamiento (entre una descarga y otra), en meses.

Es común utilizar lagunas de forma Trapezoidal (Figura 14), por ello a continuación se describe la metodología para obtener las dimensiones de una laguna para esta geometría.

**Paso 4.** Cálculo de las dimensiones de una laguna para una geometría predeterminada.

Las dimensiones se obtienen de la siguiente forma (Fuente: EPA, 2001):

$$A_s = L_s \cdot W_s \quad (\text{Ec. 40})$$

$$A_b = L_b \cdot W_b \quad (\text{Ec. 41})$$

Donde:

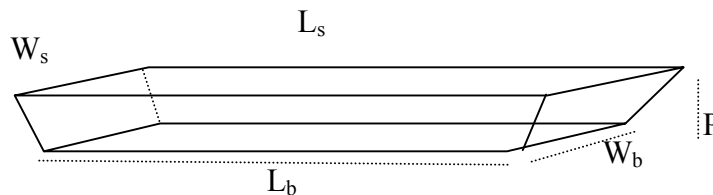
$A_s$  = área superficial de la laguna en  $m^2$ .

$A_b$  = área base de la laguna en  $m^2$ .

$L_s$  y  $L_b$  = largo superior e inferior respectivamente.

$W_s$  y  $W_b$  = ancho superior e inferior respectivamente.

**Figura 15.** Forma Trapezoidal típica de las lagunas anaeróbicas



La EPA (2001) recomienda una relación  $A_s/A_b$  de 1:2. Además según este mismo organismo, las Áreas se pueden determinar conociendo algunos anchos o largos típicos y usando la siguiente relación.

$$V = \frac{1}{2} \cdot P \cdot \left[ L_b \cdot W_b + L_s \cdot W_s + (L_b \cdot W_b \cdot L_s \cdot W_s)^{0.5} \right] \quad (\text{Ec. 42})$$

## **Balance Hidráulico**

En este sistema se utilizará canales abiertos como los utilizados en la sección del sistema de digestión anaerobia.

### **4.3 ALTERNATIVA 3: SISTEMAS DE LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS**

Para la alternativa 3 se propone lagunas anaerobias con cubiertas flotantes que permita variar el volumen de gas, disminuir el efecto del viento y las precipitaciones, permita mantener una temperatura adecuada en forma natural y además minimizara la producción de olores. Las lagunas anaerobias cubiertas se diseñaran de manera de simular un digestor anaerobio, pero contendrán un mayor volumen ya que permitirán almacenar los lodos por un tiempo aproximado de 12 años y un periodo de retención de 1 a 4 meses.

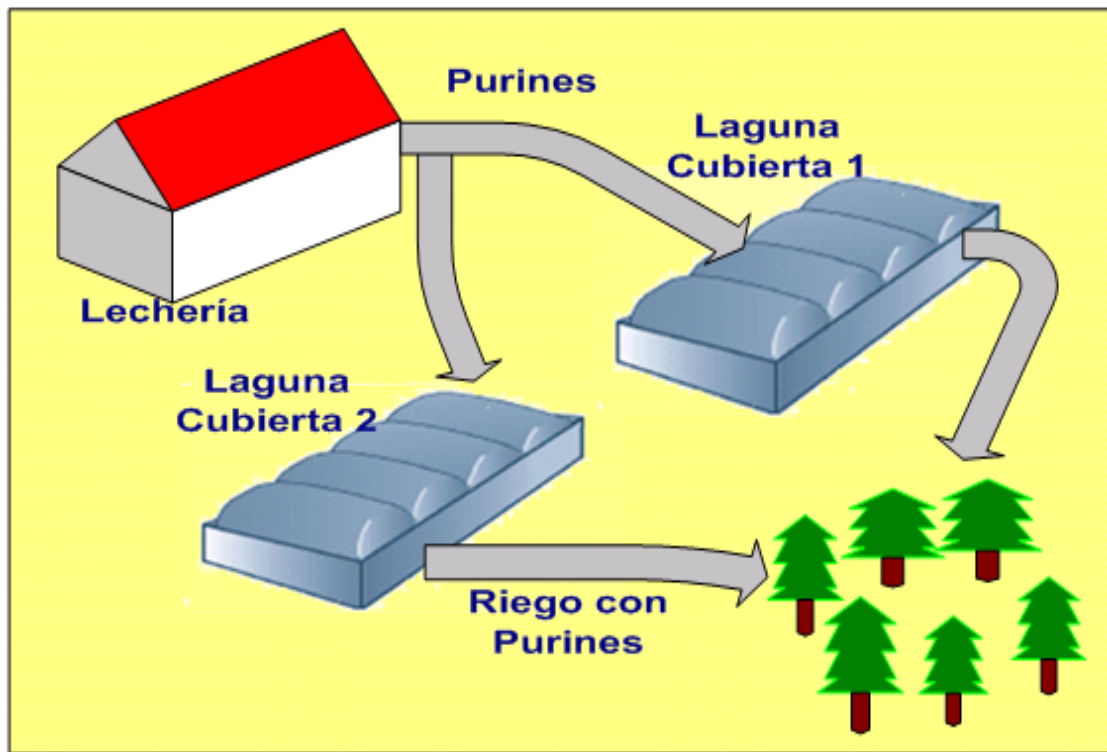
En este caso el biogás generado al igual que en el sistema de digestión anaerobia pasará a través de un pozo de compost, para su degradación natural.

El sistema de tratamiento considerará las siguientes etapas:

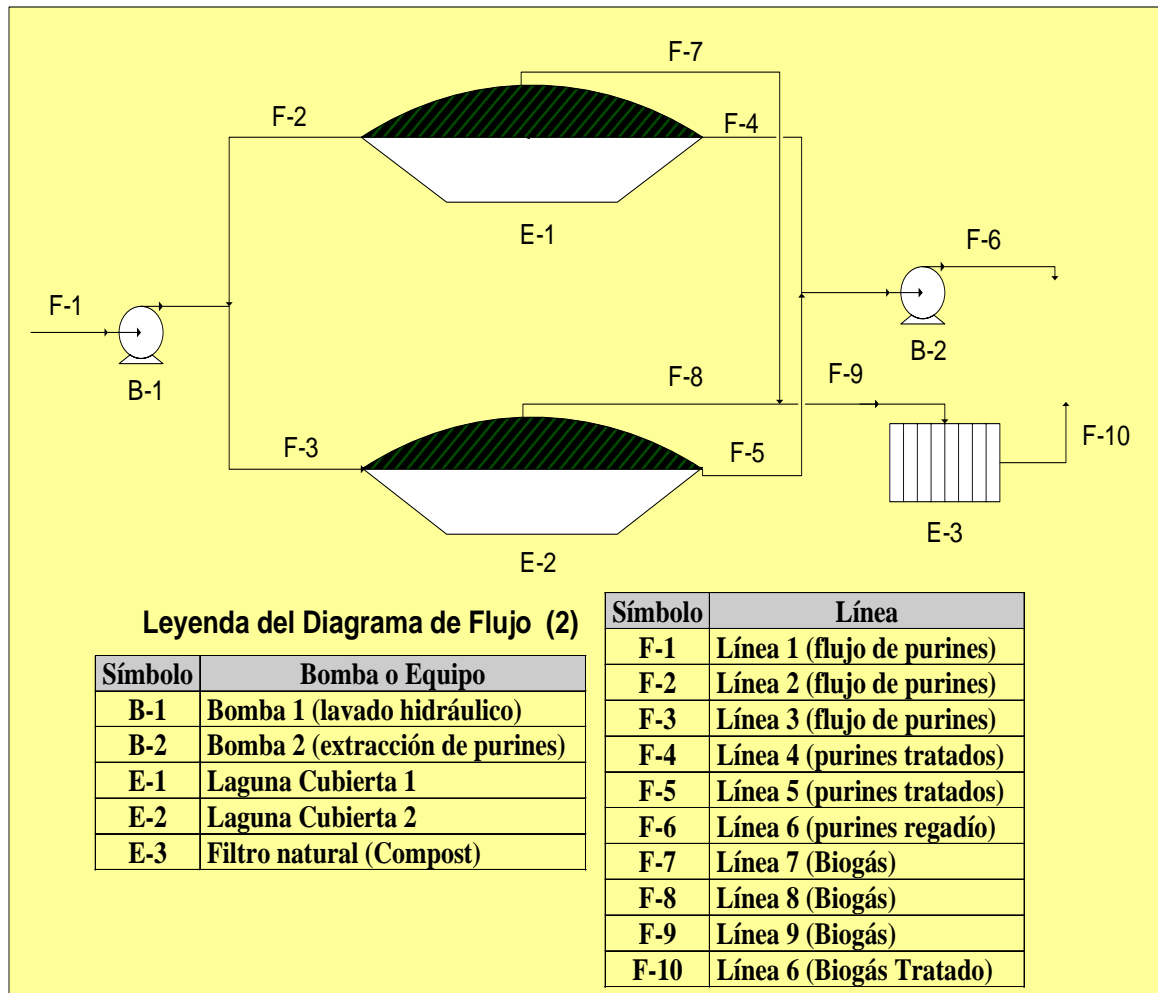
- Estabilización por lagunas anaerobias en paralelo con cubierta flotante.
- Riego de praderas perennes.

En la Figura 15 se indica esquemáticamente las etapas contenidas en el sistema de

lagunas anaeróbicas cubiertas y en la Figura 16 se representa su diagrama de flujo.



**Figura 16:** Propuesta del sistema de tratamiento de lagunas anaerobias cubiertas.



**Figura 17.** Diagrama de Flujo del Sistema de Lagunas Anaerobias Cubiertas

#### 4.3.1 BALANCES DE MASA AL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS.

Este sistema presenta los mismos balances que el sistema de lagunas anaerobias, por lo tanto solo no se presentaran las ecuaciones, solo los resultados (en el capítulo V).

#### **4.3.2 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA LAS LAGUNAS ANAERÓBICAS CUBIERTAS.**

Las lagunas anaerobias cubiertas serán diseñadas de manera similar a una laguna anaerobia sin cubrir, (sección 4.2.2), pero sin considerar las precipitaciones, la evaporación de bandeja, ni el borde libre. Se estimará el volumen de biogás generado ( $0.35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DBO}_5 \text{ Removida}$ ) para determinar el tamaño adecuado de la cubierta.

#### **RIEGO DE PRADERAS PERENNES CON PURINES TRATADOS**

Una vez realizado el tratamiento de los purines estos serán destinados para el riego de praderas perennes. Estos purines tendrán un contenido de nitrógeno, fósforo, DQO y potasio menor al que ingresa a los sistemas de tratamiento, lo que permitirá evitar problemas de contaminación de suelos y cursos fluviales por altas concentración de compuestos contaminantes que forman los elementos mencionados. Como se menciona en la justificación del proyecto, los sistemas de tratamiento tienen como principal función disminuir las concentraciones de contaminantes existentes en los purines, sin embargo, tienen otra importante función que es la de almacenamiento seguro de estos, para evitar problemas medioambientales derivados de su inadecuada disposición. Es por esto que el riego surge como una tercera función o objetivo del tratamiento. Puesto que a pesar que la normativa exige un mínimo de 400 kg Nitrógeno/ hectárea año en este caso el valor que se destinara a regadío será de alrededor de 100 a 200 Kg Nitrógeno/ha año, ya que se asignara una mayor importancia a evitar la contaminación por lo que se trabajara en estas menores concentraciones.

## CAPITULO V

### EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LOS SISTEMAS PROPUESTOS

#### 5.1 METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA

Existen diferentes metodologías que permiten determinar cual es la conveniencia de realizar un determinado proyecto de inversión, que se basan en el desarrollo de flujos de caja futuros proyectados. Según Sapag y Sapag (2000) la consideración de los flujos en el tiempo requiere de la determinación de una tasa de interés adecuada que represente la equivalencia de dos sumas de dinero en dos períodos diferentes. A continuación se describen los principales métodos que utilizan el concepto de flujo de caja descontado y que serán utilizados en el presente proyecto:

**a) Valor Actual Neto (VAN).**

Este criterio plantea que el proyecto se debe aceptar si el valor actual neto es igual o superior a cero, donde el VAN es la diferencia entre todos sus ingresos y egresos expresados en moneda actual (Ec. 43) (Fuente: Sapag y Sapag, 2000)

$$VAN = \frac{\sum_{i=1}^n FNO}{(1 + tc)^i} - I_0 \quad (\text{Ec. 43})$$

Donde:

$FNO$  = Flujos netos operacionales

$I_0$  = Inversión Inicial del proyecto.

$tc$  = \*Tasa de descuento

$n$  = Número de años de duración del proyecto

La tasa de descuento se obtiene utilizando la Ecuación 44. (Fuente: Sapag y Sapag, 2000)

$$tc = \frac{Cp}{I_0} \cdot i_1 + \frac{D}{I_0} \cdot i_2 \cdot (1 - t) \quad (\text{Ec. 44})$$

Donde:

$Cp$  = Capital propio

$D$  = Deuda

$t$  = Impuesto

$i_1$  = Interés del capital

$i_2$  = Interés de la deuda

#### **b) Tasa Interna de Retorno (TIR).**

El criterio de la tasa interna de retorno (TIR) evalúa el proyecto en función de una única tasa de rendimiento por período con la cual la totalidad de los beneficios actualizados son exactamente iguales a los desembolsos expresados en moneda actual, (Sapag y Sapag 2000), es decir es la tasa que hace al VAN del proyecto igual a cero (Ec. 45).

Como señalan Biertman y Smidt, la TIR “representa la tasa de interés más alta que un inversionista podría pagar sin perder dinero, si todos los fondos para el financiamiento de la inversión se tomaran prestados y el préstamo se pagara con las entradas en efectivo de la inversión de la inversión a medida que se fuese produciendo” (Fuente: Sapag y Sapag, 2000).

$$VAN = \frac{\sum_{i=1}^n FNO}{(1 + TIR)^i} = 0 \quad (\text{Ec. 45})$$

La tasa así calculada se compara con la tasa de descuento de la empresa. Si la TIR es igual o mayor que esta, el proyecto debe aceptarse y si es menor, debe rechazarse.

## 5.2 EVALUACION DE LOS COSTOS DE INVERSION

A continuación se describe los principales parámetros que se consideraron para determinar los costos de inversión de los sistemas de tratamiento propuestos. Los costos de inversión de un proyecto corresponde a la cantidad de dinero que se debe invertir para poder diseñar, construir y poner en marcha el proyecto.

### **Inversión Inicial**

Para la determinación Inicial total de los sistemas de tratamiento se utilizó el método de Lang y Chilton modificado (Baasel, 1980; Zamosa, 1983, citado en Contreras 2002), el cual predice los gastos totales de la empresa en función de los principales equipos

utilizados en el proceso.

Esta inversión se compone de dos valores:

- Costos Fijos
- Capital de Trabajo y Puesta en Marcha.

#### **a) Costos Fijos**

Los costos fijos o costos físicos totales incluyen aquellos costos tangibles e intangibles para la empresa. Estos se pueden diferenciar en Costos Físicos Directos y Costos Indirectos.

#### **i) Costos Físicos Directos**

Entre los costos físicos directos se encuentran equipos, instalaciones de equipos, instrumentación, edificación y terrenos, instalaciones auxiliares, entre otros. Estos costos están relacionados con la instalación de la planta.

#### **1.- Costos de equipos**

Los equipos se deben cotizar según las condiciones de diseño obtenidas. El costo real de los equipos importados se obtiene a partir del valor de estos en el país de origen (FOB).

## **2.- Instalación de equipos**

- Este costo se calcula como porcentaje del valor (FOB) para cada equipo. Este incluye costos de internalización en aduanas, fletes, seguros, y el transporte e instalaciones en la planta.
- Los costos de seguros y fletes se determinan en un 10% del costo FOB de cada equipo.
- El costo de instalación de los equipos se considera como una fracción del costo de los equipos sin instalar. Esta fracción es característica de cada equipo.

## **3.- Cañerías del proceso.**

Estos costos incluyen: válvulas, tuberías, fittings junto con la mano de obra e instalación. Si el proceso se clasifica del tipo fluido se tiene que le costo será de un 10% del costo de los equipos instalados.

## **4.- Instrumentación y Control**

Este costo depende obviamente del grado de control requerido, es decir, se estima en función de la importancia de un control automático en los diferentes equipos y procesos. Dentro de un rango de nivel de control alto, el costo de instrumentación y control puede considerarse igual a 15% del costo total de los equipos instalados.

## **ii) Costos Indirectos**

Los costos indirectos son aquellos que involucran costos intangibles y que toman en cuenta factores como el tamaño de la planta, contingencias varias y los costos de ingeniería y construcción. Estos costos no están relacionados con la instalación del sistema de tratamiento, sino más bien con asesorías y factores de seguridad para una correcta operación (Zamosa, 1983; Ulrich, 1986).

### **5.- Ingeniería y Construcción.**

Se estima que los costos serán aproximadamente un 25% de los costos físicos totales por concepto de diseño de construcción, comunicación, seguimientos de construcción y otros.

### **6.- Contingencia e Imprevistos**

Considera los costos involucrados por cambio en las líneas de proceso, equipos adicionales, accidentes de construcción y otros. Este costo varía de un 5 a un 15% de los costos físicos totales.

### **7.- Factor de tamaño**

El valor aconsejado límite entre una planta de tamaño pequeño y una de gran tamaño es un 5% del costo físico total.

### **b) Capital de Trabajo y Puesta en Marcha**

Incluyen los costos debido a los activos corrientes, necesarios para la operación normal del proceso y los costos de las pruebas de arranque de los equipos que deben hacerse para obtener un desarrollo óptimo. Se estima en un 15% de los costos fijos directos e indirectos.

## **CAPITULO VI**

### **MATERIALES Y METODOS**

#### **4.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

a) Se tomaron muestras puntuales de purines, los que se analizarán en los laboratorios de la Universidad Católica de Temuco.

b) Dichos análisis se realizaron bajo la Norma Chilena 2313 siendo evaluados los siguientes parámetros: DQO, ST, STV, N y P total.

c) Además en terreno se determinaron diversos parámetros como: T° y pH

d) El procedimiento utilizado en los análisis se expone en el anexo C

#### **4.2 METODOLOGÍA DE CÁLCULO**

- 1) Primero se realizó una estimación de la cantidad de purines generados por la empresa durante la ordeña de los animales, para ello se determinó, la masa de estiércol producida por el plantel lechero, en función del peso del animal (Jones, 2003) y la cantidad de agua utilizada para el lavado de la lechería. El caudal de agua se determinó en terreno, en el horario de ordeña de los animales.

- 2) Se realizó una caracterización del terreno destinado a la implementación del tratamiento, por medio de análisis de suelo, cálculo de la velocidad de infiltración y profundidad de la napa freática. El procedimiento utilizado en la etapa anterior se describe en el anexo D.
- 3) Posteriormente se procedió a establecer tres alternativas de tratamiento posibles de implementar considerando las necesidades de la empresa, como el volumen y periodo de almacenamiento de purines, entre otros.
- 4) Se determinaron los costos asociados a cada alternativa, utilizando la metodología propuesta por Lang y Chilton modificado (Bassel 1890; Gomosa 1983), que se describe en el capítulo V. Se realizaron además, cotizaciones de los materiales necesarios para la implementación de cada alternativa, en diferentes centros comerciales. Los resultados de cada VAN obtenido en las evaluaciones económicas de los tratamientos propuestos, eran el factor más importante para seleccionar el sistema a implementar.
- 5) Como etapa final se realizó el diseño a nivel de ingeniería, del sistema de tratamiento elegido en el paso anterior (4)

### **4.3 MATERIALES**

Los diversos materiales empleados en las diferentes experiencias experimentales que se realizaron en el laboratorio de la Facultad de ciencias de la Universidad Católica de Temuco, regidos mediante la norma chilena 2313 se detallan explícitamente en el Apéndice C.

En el Anexo D se detallan los materiales y la metodología utilizada en la caracterización del terreno.

## CAPITULO VII

### RESULTADOS

#### 7.1 ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE PURINES GENERADOS EN EL FUNDO SANTA TERESA

Para calcular el caudal se considera la cantidad de vacas que existen, para luego determinar la producción de estiércol por animal. Para tal determinación se sabe que en la Novena y Décima región el peso promedio por vaca es de 500kg y que producen 41kg de estiércol (fecas + orina) por día (cada una) (Dumontt, 1998). De acuerdo a esto para determinar la cantidad de estiércol que se produce en el Fundo Santa Teresa se debe ocupar la siguiente relación: (Fuente: Dumontt, 1998)

$$\frac{K_1 \cdot 41}{500} \quad (\text{Ec. 46})$$

Donde:

$K_1$  es el Peso por unidad animal.

Otro parámetro que influye en la determinación del caudal es el agua de lavado en cada periodo de ordeña. El cual es considerado en una relación 1:1 con la cantidad de estiércol.

También existe un parámetro que tiene mucha importancia, sobre todo en el Sur de Chile que son las precipitaciones, estas influyen directamente en el aumento del caudal. Para determinar la contribución de las precipitaciones en el caudal, es necesario conocer el área del patio de ordeña y las horas de ordeña, ya que es aquí donde el agua de lluvia se mezcla con el purín.

Los parámetros para calcular el caudal de purines generados en la empresa, son los siguientes (Tabla VIII).

**Tabla VIII.** Parámetros utilizados para calcular el caudal

<b>*Parámetro</b>	<b>Datos</b>
*N° de animales	400
Peso (Kg./animal)	600
Estiércol (Kg./día/animal)	49,2
Días ordeña	365
Horas de ordeña	6
Área patio ordeña (m <sup>2</sup> )	250
Kg. Estiércol/6h	12,3
pp. acumulada (mm)	3060

\*La cantidad de animales corresponde al crecimiento que pretende tener la empresa en un periodo aproximado de cinco años.

Ahora considerando que la densidad del purín es de 1026 kg/m<sup>3</sup> el valor del caudal es 11.7 m<sup>3</sup>/día (Tabla IX)

**Tabla. IX.** Estimaciones del caudal

<b>Parámetro</b>	<b>(m<sup>3</sup>/día)</b>
Purín sin diluir (orina + fecas)	4,8
**Agua de lavado	4,80
Agua lluvia	2,10
<b>Caudal</b>	<b>11,7</b>

\*\*El agua de lavado se obtuvo aforando la bomba y es de 4.8 m<sup>3</sup>/día.

## **7.2 RESULTADOS ASOCIADOS AL SISTEMA DE DIGESTION ANAEROBIA**

### **7.2.1 BALANCES DE MATERIA EN EL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAERÓBIA**

Para los balances se conoce que los Sólidos Totales presentes en los purines son igual a 9002.8 mg/lt, además la densidad de estos es de 1026 kg/m<sup>3</sup>. También es importante considerar que el porcentaje de remoción para los Sólidos totales es igual a 65% (Vives, 2003) en el caso de los digestores, para el tanque de almacenamiento final se supondrá que tiene 10% remoción de estos.

En la Tabla X se presentan los parámetros para el balance de masa en el digestor (1).

**Tabla X.** Parámetros para el balance de masa en el digestor 1

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente
Concentración de Potasio	[K]	1108.08	mg/lt	Dato Proyecto
Remoción de K	K	10	%	Vives, 2003
Demanda Química de oxígeno	[DQO]	8000	mg/lt	Dato Proyecto
Remoción de DQO	DQO	70	%	Vives, 2003
Nitrógeno total	[NKT]	1631.34	mg/lt	Dato proyecto
Remoción de nitrógeno total	NKT	62	%	Vives, 2003
Fósforo	[P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ]	615.6	mg/lt	Dato proyecto
Remoción de fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	50	%	Vives, 2003

En la Tabla XI se muestran los resultados del balance de flujo másico en el digestor.

**Tabla XI.** Resultados de los balances de flujo másico y volumétrico en el digestor.

Q (m <sup>3</sup> /día)	F. M. (Kg./d)	DQO <sub>e</sub> (kg./d)	DQO <sub>r</sub> (Kg./d)	DQO <sub>s</sub> (Kg./d)	CH <sub>4</sub> (Kg./d)	Biogás (kg./d)
5.85	6002.1	46.8	32.76	14.04	8.19	12.3

Nota: F.M. corresponde al Flujo másico de purines, DQO<sub>e</sub>, DQO<sub>r</sub> y DQO<sub>s</sub> corresponden a la entrada, remoción y salida de DQO respectivamente. Además la densidad de trabajo corresponde a 1026Kg./m<sup>3</sup>

En las Tablas XII y XIII se indican los balances de flujos volumétricos de entrada y salida de el digestor (1).

**Tabla XII.** Flujos volumétricos de cada digestor

Flujo	Símbolo	Valor	Unidad
De afluente	F <sub>2</sub>	5.85	m <sup>3</sup> /d
De efluente	F <sub>4</sub>	5.847	m <sup>3</sup> /d
De biogás	B	21.48	m <sup>3</sup> /d
De lodo	L	0.257	m <sup>3</sup> /día

**Tabla XIII.** Valores de remoción de contaminantes

Parámetro	Entrada	Salida	Unidad	Remoción
<b>DQO</b>	8000	2400	mg/lt	70%
<b>K</b>	1108.08	997.3	mg/lt	10%
<b>N total</b>	1631.34	619.9	mg/lt	62%
<b>Fósforo</b>	615.6	307.8	mg/lt	50%

El segundo digestor anaerobio tiene los mismos balances de masa que el digestor 1, ya que presenta la misma alimentación de purines y dimensiones.

En la Tabla XIV se presentan los parámetros para el balance de masa en el tanque final.

**Tabla XIV.** Parámetros para el balance de masa en el tanque final.

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
Concentración Potasio	[K]	997.3	mg/lt
Remoción de K	K	-	-
Demanda Química de oxígeno	[DQO]	2400	mg/lt
Remoción de la DQO	DQO	10	%
Nitrógeno total	[NKT]	619.9	mg/lt
Remoción de nitrógeno total	NKT	-	-
Fósforo	[P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ]	307.8	mg/lt
Remoción de fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-

En la Tabla XV se muestran los resultados del balance de flujo másico en el tanque Final.

**Tabla XV.** Resultados del balance de flujo másico en el tanque final

Q (m <sup>3</sup> /día)	F. M. (Kg./d)	DQO <sub>e</sub> (kg./d)	DQO <sub>r</sub> (Kg./d)	DQO <sub>s</sub> (Kg./d)	CH <sub>4</sub> (Kg./d)	Biogás (kg./d)
11.69	11993.94	37.44	3.74	33.7	0.94	1.4

En las Tablas XVI y XVII se proporcionan los balances de flujos volumétricos y de remoción de contaminantes respectivamente, en el tanque de almacenamiento final.

**Tabla XVI.** Flujos volumétricos en el tanque final

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
<b>Flujo Volumétrico</b>			
<b>De afluente</b>	F <sub>6</sub>	11.68	m <sup>3</sup> /d
<b>De efluente</b>	F <sub>7</sub>	11.68	m <sup>3</sup> /d
<b>De biogás</b>	B <sub>1</sub>	1.97	m <sup>3</sup> /d

**Tabla XVII.** Valores de remoción de contaminantes en el tanque final

<b>Concentración</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Unidad</b>	<b>Eficiencia</b>
<b>DQO</b>	2400	2160	mg/lt	10%
<b>K</b>	997.3	997.3	mg/lt	-
<b>N total</b>	619.9	619.9	mg/lt	-
<b>Fósforo</b>	307.8	307.8	mg/lt	-

Se consideró un sistema de digestión anaerobio de forma semicontinuo, ya que nueva se descargara por completo, siempre existirá al menos un 30% de carga de purines, para mantener las condiciones que requieren los microorganismos y no tener que hacer una nueva puesta en marcha.

## **RIEGO CON PURINES**

De acuerdo al balance de masa para este tipo de tratamiento la concentración de nitrógeno y fósforo para el riego de las praderas perennes, sería de 88.19 Kg/ha\*año y de 43.8 Kg/ha\*año respectivamente considerando que los purines se aplican a una superficie de 30 ha.

### **7.2.2 BALANCE DE ENERGIA EN EL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAERÓBIA**

A continuación se indican los principales resultados obtenidos del balance de energía en cada uno de los digestores.

La energía liberada durante la formación de metano, cuando los purines están dentro de los digestores es -1625,28 W, es decir -140.424.375 J/día (En el anexo A se describe detalladamente los cálculos para estos balances).

El calor de entrada de los purines (14°C) a los digestores es de 347910882,9 J/día y el de salida (35°C) es de 437803902 J/día. Realizando un balance global de energía en cada digestor, se obtiene la ecuación 47.

$$\sum wi * Cp * \Delta T_S - \sum wi * Cp * \Delta T_E + \Delta H_{Reacción} = 0 \quad (\text{Ec. 47})$$

Reemplazando los valores correspondientes en la ecuación 48, se observa que no se mantiene un equilibrio en el sistema, sin embargo se produce una ganancia de energía de 4482 W (387272546 j/día), esta energía se traduce en una acumulación de calor en los digestores, que se justifica porque los microorganismos presentes en los purines degrada la materia orgánica elevando la temperatura, acondicionando su propio medio para facilitar su metabolismo, esto implica que no es necesario implementar un sistema de calefacción en los digestores para mantener las condiciones óptimas de temperatura, si embargo se recomienda realizar la puesta en marcha de los equipos durante la época de verano, donde la temperatura de los purines son mayores a 14°C, para facilitar de esta manera, el acondicionamiento de los microorganismos.

La perdida total de calor en cada digestor es de 482,13 W.

### 7.2.3 DIMENSIONES DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

#### a) Dimensionamiento de los digestores anaerobios

A continuación se presentan los valores de los parámetros utilizados para el dimensionamiento de los digestores (Tabla XVIII).

**Tabla XVIII.** Parámetros utilizados para calcular las dimensiones de los digestores.

Parámetro	Unidad	Valor
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1026
TRH	días	25
Caudal (Q)	m <sup>3</sup> /día	11.7
Carga DQO	kg/día	5
Carga de sólidos	kg/día	9
Y *	mg SSV/mg DBO	0.3

\*Y : Obtenido del Department of Agricultural and Biosystems Engineering (2002) .

Ahora aplicando las ecuaciones para el cálculo del caudal y de dimensionamiento, tenemos que (Tabla XIX):

**Tabla XIX.** Dimensiones de los digestores

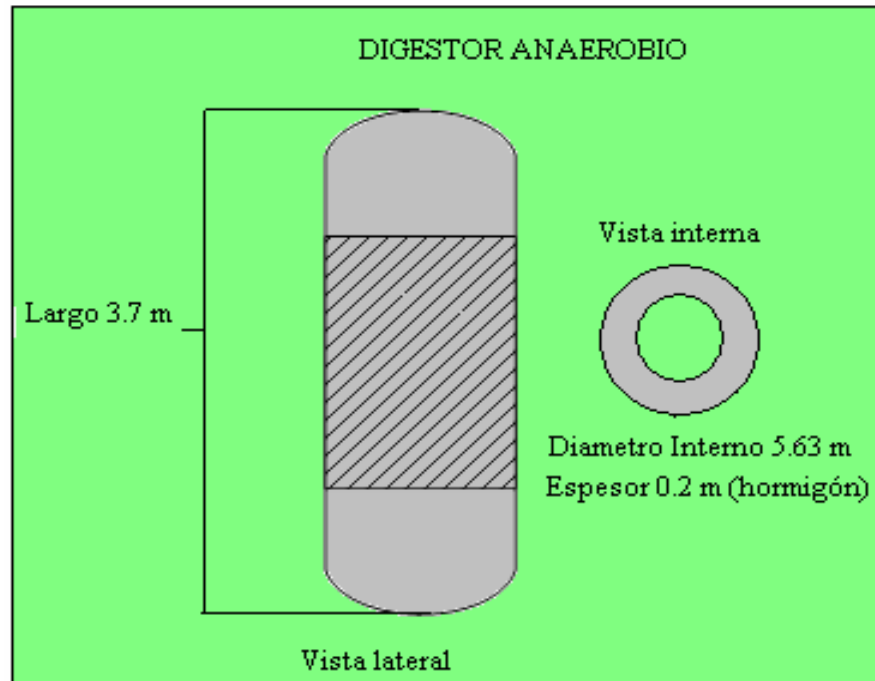
Parámetro	Unidad	Digestor 1	Digestor 2
<b>Volumen ***</b>	m <sup>3</sup>	184.12	184.12
<b>Carga Volumétrica</b>	kg/m <sup>3</sup> .d	187.04	187.04
<b>Volumen de fango, Vf</b>	m <sup>3</sup> /d	0.44	0.44

\*\*\* Aplicando un factor de seguridad de 26%, por que siempre permanecerá 1/4 de los purines dentro del digestor (Como inoculo)

En la Tabla XX y Figura 17 se indica el dimensionamiento de los digestores considerando una profundidad (H) de 3.7 m.

**Tabla XX.** Dimensionamiento de los digestores.

Dimensión	Digestor 1	Digestor 2
Volumen (m <sup>3</sup> )	184.12	184.12
Profundidad (m)	3.7	3.7
Diámetro (m)	5.63	5.63



**Figura 17.** Dimensiones de los digestores.

**b) Dimensionamiento del Tanque de almacenamiento final**

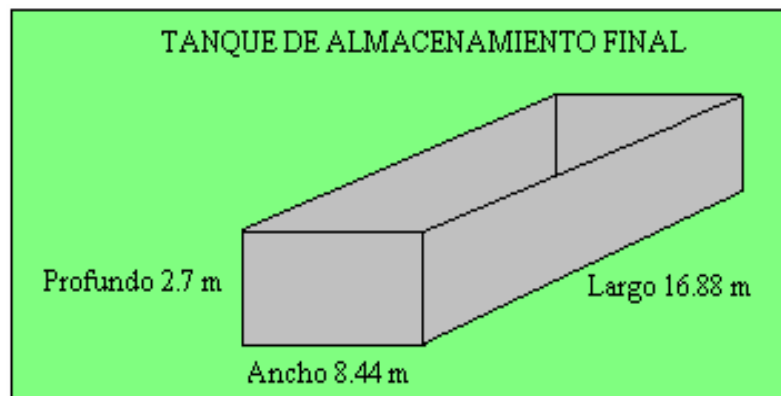
Utilizando una relación largo/ancho de 1:2 las dimensiones del tanque final son las

siguientes (Tabla XXI y Figura 18):

**Tabla XXI.** Dimensiones del Tanque final

Parámetro	Dimensión	Tanque final
Q	m <sup>3</sup> /d	11.68
TRH	d	30
Volumen	m <sup>3</sup>	378
Profundidad	m	2.7
Área	m <sup>2</sup>	142
Ancho	m	8.4
Largo	m	16.8

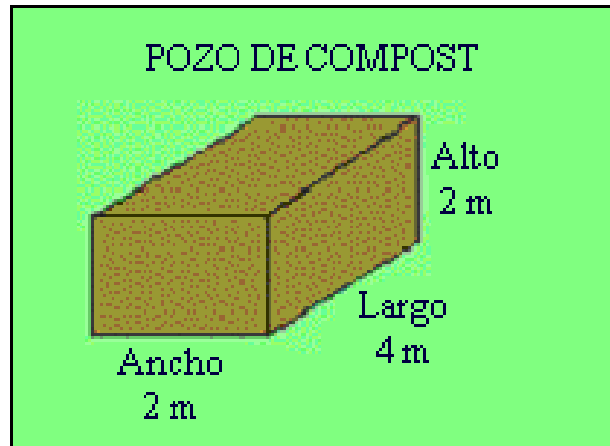
El tanque final permitirá acumular los purines durante las estaciones del año, en que no es posible aplicar purines sobre las praderas, como por ejemplo durante épocas de lluvias o cuando no exista demanda de nutrientes.



**Figura 19.** Dimensiones del Tanque Final

**b) Dimensionamiento del Pozo de compost.**

En la Figura 18 se indican las dimensiones del pozo de compost que degradará el biogás, con la finalidad de minimizar las emisiones de gases contaminantes como el metano.



**Figura 20.** Dimensiones del pozo de compost.

**7.2.4 CALCULOS HIDRAULICO PARA EL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA**

Para la alimentación de los digestores anaerobios se utilizarán canales abiertos, los cuales se diseñarán de forma rectangular (Como los señalados en el capítulo IV).

El diseño consta de un canal abierto mayor que recibirá los purines, para luego dividirse en dos canales de iguales dimensiones, cada uno de los cuales alimentará a un digestor (Figura 20).

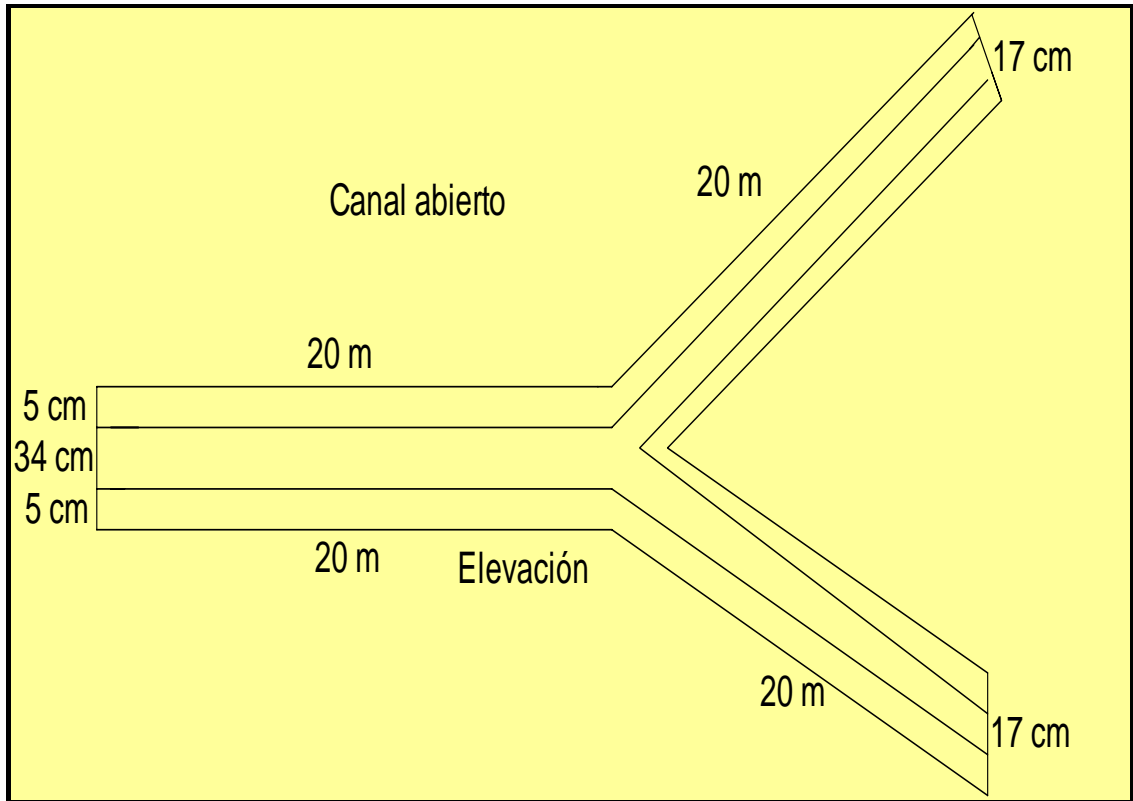
Las constantes consideradas son las siguientes:

- $n = 0.014$ , Concreto sin pulir
- $C_m = 1$  (SI)
- $S = 0.0001$  (Supuesto)
- $Q = 11.7 \text{ m}^3/\text{d} \approx 2.71\text{E-}4 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Utilizando estos valores, y considerando una geometría cuadrada las dimensiones del canal son las siguientes:

- $A_x = 0.058\text{m}$
- $b = 0.34 \text{ m}$
- $y = 0.17 \text{ m}$ .
- $L = 40 \text{ m}$

Las dimensiones anteriores corresponden a las del canal mayor. Por lo tanto cada los dos canales menores tendrán  $0.029 \text{ m}^2$  de área,  $0.17\text{m}$  de ancho y  $0.085\text{m}$  de profundidad.



**Figura 21.** Dimensiones del canal abierto.

Los cálculos hidráulicos de conductos cerrados se efectuarán entre los digestores anaerobios y el tanque de almacenamiento final a partir de las ecuaciones descritas en el capítulo IV. Para tal efecto, a continuación se presentan los valores de los principales parámetros (Tabla XXII) para determinar la potencia de la bomba que se va a utilizar.

**Tabla XXII.** Parámetros utilizados para determinar la potencia de la bomba purinera.

Parámetro	Unidad	Valor
Q	m <sup>3</sup> /d	0.022
D, tubería	m	0.11
L, tubería	m	5
$\mu^{**}$	N-s/m <sup>2</sup>	1.14E-3**
$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	1026
g	m/s <sup>2</sup>	9.81
V <sub>0</sub>	m/s	2.31
Re	-	3.11E+5
f	-	0.014
$\Delta Z$	m	1.4
hl	m	0.19***
h <sub>lm</sub>	m	4.55
H <sub>lt</sub>	m	4.69
h <sub>B</sub>	m	6.08

\* Este valor se obtuvo suponiendo que el vaciado total de cada digestor dura un periodo de 2.3 horas. \*\* Suponiendo que es la misma viscosidad del agua a 14°C. \*\*\* El Cálculo de las pérdidas menores se presenta en el Anexo B.

Suponiendo que todos los equipos presentan iguales presiones (manométricas) y que presentan un estado estacionario ( $V_1=V_2$ ).

De acuerdo a lo anterior y suponiendo una eficiencia de 75% de la bomba, la potencia de esta es igual a 1.797 KWH.  $\approx$  2.41 HP.

Por lo tanto cada digestor necesita una bomba de 2.5 HP para trasladar los purines hasta el tanque final.

## 7.3 RESULTADOS ASOCIADOS AL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS

### 7.3.1 BALANCES DE MATERIA EN EL SISTEMA DE LAGUNAS ANAERÓBIAS

En la Tabla XXIII se presentan los parámetros para el balance de masa en laguna anaerobia.

**Tabla XXIII.** Parámetros para el balance de masa en la laguna anaerobia 1.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente
Concentración de potasio.	[K]	1108.08	mg/lt	Dato proyecto
Remoción de K	K	10	%	Vives, 2003
Demanda Química de oxígeno	[DQO]	8000	mg/lt	Dato proyecto
Remoción de la DQO	DQO	50	%	Vives, 2003
Nitrógeno total	[NKT]	1631..34	mg/lt	Dato proyecto
Remoción de nitrógeno total	NKT	20	%	Vives, 2003
Fósforo	[P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ]	615.6	mg/lt	Dato proyecto
Remoción de fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	15	%	Vives, 2003

En la Tabla XXIV se muestran los resultados del balance de flujo másico para la laguna anaerobia 1.

**Tabla XXIV.** Resultados del balance de flujo másico

Q (m <sup>3</sup> /día)	F. M. (Kg./d)	DQO <sub>e</sub> (kg./d)	DQO <sub>r</sub> (Kg./d)	DQO <sub>s</sub> (Kg./d)	CH <sub>4</sub> (Kg./d)	Biogás (kg./d)
5.85	6002.1	46.8	23.4	23.4	5.85	8.7

En las Tablas XXV y XXVI se proporcionan los balances de flujos volumétricos y de remoción de contaminantes respectivamente.

**Tabla XXV.** Flujos volumétricos

Flujo Volumétrico	Símbolo	Valor	Unidad
De afluente	F <sub>2</sub>	5.85	m <sup>3</sup> /d
De efluente	F <sub>4</sub>	5.847	m <sup>3</sup> /d
De biogás generado	B <sub>1</sub>	12.3	m <sup>3</sup> /d
De Lodo	L <sub>1</sub>	0.13	m <sup>3</sup> /d

**Tabla XXVI.** Valores de remoción de contaminantes

Parámetro	Entrada	Salida	Unidad	Eficiencia (%)
DQO	8000	4000	mg/lt	50
K	1108.08	997.3	mg/lt	10
N total	1631.34	1305.1	mg/lt	20
Fósforo	615.6	523.3	mg/lt	15

### b) Balance de Masa Laguna Anaerobia 2

Para la laguna anaerobia 2, el balance de masa es el mismo que para la 1, ya que el flujo inicial se divide en cantidades iguales hacia ambas lagunas.

### RIEGO CON PURINES

De acuerdo al balance de masa para este tipo de tratamiento la concentración de nitrógeno y fósforo para el riego de las praderas perennes, sería de 185.67 Kg/ha\*año y de 74.41 Kg/ha\*año respectivamente considerando que los purines se aplican a una

superficie de 30 ha.

### 7.3.2 DIMENSIONES DEL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS

En el caso de las lagunas anaerobias el caudal se dividirá en dos, por lo tanto el caudal para cada laguna es de 5.85 m<sup>3</sup>/día. Además ambas lagunas tendrán las mismas dimensiones, por lo que los cálculos se realizarán para una sola laguna.

Para el dimensionamiento de este sistema, no se considerará el borde libre ni tampoco la profundidad requerida, ya que con el tiempo de residencia de tres meses no existe llenado total de las lagunas, más bien siempre quedará un porcentaje sin cubrir. Además el caudal se estimó considerando 400 vacas, sin embargo, esta cifra durante los primeros años no sobrepasará los 300, por lo tanto el caudal será menor.

A continuación se presentan los valores de los parámetros utilizados para el dimensionamiento de las lagunas anaerobias (Tabla XXVII).

**Tabla XXVII.** Parámetros utilizados para el dimensionamiento de las lagunas anaerobias.

Parámetro	Unidad	Valor
<i>CS</i>	kg/día	52.66
<i>CSV</i>	kg/m <sup>3</sup> /día	0.06
<i>ST</i>	mg/l	9002
<i>Fpd</i>	m <sup>3</sup> /día	5.85
<i>Fp</i>	m <sup>3</sup> /mes	175.5
<i>td</i>	meses	3
<i>Te</i>	años	12

Ahora utilizando las ecuaciones 33, 34, 35 y 37 se obtienen los siguientes valores contenidos en la Tabla XXVIII

**Tabla XXVIII.** Dimensiones de las lagunas anaerobias

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Laguna 1</b>	<b>Laguna 2</b>
<i>VMT</i>	m <sup>3</sup>	822.84	822.84
<i>VL</i>	m <sup>3</sup>	130.81	130.81
<i>VP</i>	m <sup>3</sup>	552.83	552.83
<i>VR</i>	m <sup>3</sup>	1506.48	1506.48
PR	m	1.03	1.03

Las dimensiones que tendrá cada laguna serán las siguientes (Tabla XXIX)

**Tabla XXIX.** Dimensionamiento de cada laguna anaerobia.

<b>Dimensión</b>	<b>Unidad</b>	<b>Laguna 1</b>	<b>Laguna 2</b>
V	m <sup>3</sup>	1506.48	1506.48
<i>A<sub>s</sub></i>	m <sup>2</sup>	638.85	638.85
<i>A<sub>b</sub></i>	m <sup>2</sup>	159.57	159.57
<i>L<sub>b</sub></i>	m	17.87	17.87
<i>L<sub>s</sub></i>	m	35.75	35.75
<i>W<sub>s</sub></i>	m	17.87	17.87
<i>W<sub>b</sub></i>	m	8.93	8.93
P	m	2.7	2.7

\* La profundidad de la napa esta a 3.7 m, por lo tanto se considera 1 metro sobre esta.

### 7.3.3 BALANCE HIDRAULICO DEL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS

Para la implementación de este sistema se propone utilizar un canal abierto con las mismas características que los digestores anaerobios y se utilizará una bomba de 0.5 Hp para el lavado de los patios de ordeña.

### 7.4 RESULTADOS ASOCIADOS AL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS

#### 7.4.1 BALANCES DE MATERIA EN EL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS

En la Tabla XXX se presentan los parámetros para el balance de masa en laguna cubierta 1.

**Tabla XXX.** Parámetros para el balance de masa en la laguna cubierta1.

Tabla de valores de balances de masa	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente
Concentración de potasio.	[K]	1108.08	g/lt	Dato proyecto
Remoción de K	K	10	%	Vives, 2003
Demanda Química de oxígeno	[DQO]	8000	g/lt	Dato proyecto
Remoción de la DQO	DQO	60	%	Vives, 2003
Nitrógeno total	[NKT]	1631.34	mg/lt	Dato proyecto
Remoción de nitrógeno total	NKT	50	%	Vives, 2003
Fósforo	[P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ]	615.6	mg/lt	Dato proyecto
Remoción de fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	25	%	Vives, 2003

En la Tabla XXXI se muestran los resultados del balance de flujo másico para la laguna cubierta 1.

**Tabla XXXI.** Resultados del balance de flujo másico

<b>Q</b> (m <sup>3</sup> /día)	<b>F. M.</b> (Kg./d)	<b>DQO<sub>e</sub></b> (kg./d)	<b>DQO<sub>r</sub></b> (Kg./d)	<b>DQO<sub>s</sub></b> (Kg./d)	<b>CH<sub>4</sub></b> (Kg./d)	<b>Biogás</b> (kg./d)
5.85	6002.1	46.8	28.08	18.72	7.02	10.53

En las Tablas XXXII y XXXIII se proporcionan los balances de flujos volumétricos y de remoción de contaminantes respectivamente.

**Tabla XXXII.** Flujos volumétricos

<b>Parámetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Flujo Volumétrico</b>			
<b>De afluente</b>	F <sub>2</sub>	5.85	m <sup>3</sup> /d
<b>De efluente</b>	F <sub>4</sub>	5.84	m <sup>3</sup> /d
<b>De biogás generado</b>	B <sub>1</sub>	14.7	m <sup>3</sup> /d
<b>De Lodo</b>	L <sub>1</sub>	0.13	m <sup>3</sup> /d

**Tabla XXXIII.** Valores de remoción de contaminantes

<b>Parámetro</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Unidad</b>	<b>Eficiencia</b>
<b>DQO</b>	8000	3200	mg/lt	60
<b>K</b>	1108.08	997.92	mg/lt	10
<b>N total</b>	1631.34	815.67	mg/lt	50
<b>Fósforo</b>	615.6	461.7	mg/lt	25

## **RIEGO CON PURINES**

De acuerdo al balance de masa para este tipo de tratamiento la concentración de nitrógeno y fósforo para el riego de las praderas perennes, sería de 116.1 Kg/ha\*año y de 65.7 Kg/ha\*año respectivamente considerando que los purines se aplican a una superficie de 30 ha.

### **7.4.2 DIMENSIONES DEL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS**

El resultado del dimensionamiento de estas lagunas es igual al obtenido en las lagunas anaerobias, sin embargo, en este caso no se considera profundidad requerida, ya que las precipitaciones no inciden en el volumen de las lagunas.

### **7.4.3 BALANCE HIDRAULICO DEL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS**

Para la implementación de este sistema se propone utilizar un canal abierto con las mismas características que los digestores anaerobios y se utilizará una bomba de 0.5 Hp para el lavado de los patios de ordeña.

## **CAPITULO VIII**

### **8.1 EVALUACIÓN ECONÓMICA**

Para realizar la evaluación económica de los sistemas propuestos se consideraron diversos factores dentro de cada flujo de caja, entre ellos los costos de inversión de cada alternativa, el ahorro en multas por el incumplimiento del D. S. 90, los que ascienden a 30 UTA, los ahorros por el uso de los nutrientes contenidos en los purines para el regadío, además de los costo de operación relacionados con los consumos de electricidad de las bombas (se considera \$40 KWH) y los salarios de los operadores, estos últimos tendrán un aumento del 3% cada año. Se incluyeron además los costos en ingeniería, las contingencias y puesta en marcha.

Para el desarrollo de los distintos flujos de caja se consideró una tasa de descuento de 12% recomendada por Dumontt (1998), para determinar el van en este tipo de proyectos, y se evaluó para un periodo de 12 años.

## 8.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN

### ANAERÓBIA

#### 8.2.1 AHORRO ECONÓMICO POR EL USO DE FERTILIZANTE PARA REGADÍO AL IMPLEMENTAR EL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

El ahorro por el uso de los purines para regadío al implementar el sistema de digestión anaerobia se indica en la Tabla XXXIV. Este ahorro se obtuvo considerando el precio por tonelada de fertilizante orgánico expuesto en la sección 2.4.

**Tabla XXXIV.** Ahorro de la empresa al usar los purines para el regadío, después de tratarlos en el sistema de digestión anaerobia.

<b>Nutriente</b>	<b>Producción (Ton/año)</b>	<b>Ahorro (\$)</b>
<b>Fósforo</b>	1,31333643	75610,0916
<b>Nitrógeno</b>	2,08820492	129679,614
<b>Potasio</b>	4,25521003	374547,842
<b>Total Ahorro</b>		<b>579837,548</b>

#### 8.2.2 COSTOS DE INVERSIÓN DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

A continuación se indican los costos de inversión asociados al sistema de digestión anaeróbica (Tabla XXXV, XXXVI, XXXVII, XXXVIII y XXXIX).

**Tabla XXXV.** Costos de la construcción del canal abierto.

<b>Canal abierto</b>	<b>Total compra</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Total (\$)</b>
Hormigón	54	m <sup>2</sup>	760	54	m <sup>2</sup>	41.000
Mano de obra	4.3	día	7020	4.3	día	30.000
<b>Total</b>						<b>71.000</b>

**Tabla XXXVI.** Costos de construcción de los digestores anaerobios

<b>Digestores</b>	<b>Total compra</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Total (\$)</b>
Excavación y moldeaje Digestores	300	m <sup>3</sup>	25000	25	horas	625.000
Hormigón armado (construido)	261.8	m <sup>2</sup>	50.000	130.9	m <sup>3</sup>	13.090.000
<b>Total</b>						<b>13.715.000</b>

**Tabla XXXVII.** Costos de equipos auxiliares y accesorios del sistema de digestión anaerobia.

Equipos y accesorios	Total compra	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Unidad	Valor Total (\$)
**Excavación pozo compost	3.38	m <sup>3</sup>	*9000	0.28	horas	3.000
*Compresor (1.5 HP)	1	HP	129000			129.000
Tubería PVC (110mm)		Línea	17500	3		52.500
Manómetro		2	2700			5.400
Termostato		2	3000			6.000
Tubería Galvanizada (1 in)		Línea	17970	3		52.770
Bomba (2,5 HP)	1	HP				557.000
Bomba 0.5 HP	1	HP				50.000
Válvulas (Galvanizada y PVC)	-	-	-	-	-	30.000
Accesorios (Galvanizado y PVC)	-	-	-	-	-	46.825
<b>Total</b>						<b>932.525</b>

\*Compresor para 25 lts y 9 Bar. \*\* El compost tendrá un valor \$ 0 ya que se utilizará el compost que se produce en la misma empresa a partir del guano generado en las camas calientes.

El tanque de almacenamiento final presenta los siguientes costos de inversión (Tabla XXXIX).

**Tabla XXXIII.** Costos de inversión para el tanque de almacenamiento.

<b>Digestores</b>	<b>Total compra</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor total (\$)</b>
Excavación y moldeaje	385	m <sup>3</sup>	15000	32	horas	480.000
Hormigón (Construido)	142.4	m <sup>2</sup>	24.000	385	m <sup>3</sup>	3.417.600
Tubería PVC (110mm)	1	Línea	17.500	1	-	17.500
Válvulas y accesorios	-	-	-	-	-	3.400
<b>Total</b>						<b>3.918.500</b>

La inversión total para la implementación del sistema de digestión anaerobia es de \$18.687.025, incluyendo la capacitación del operador (\$50.000).

Según el método de Lang y Chilton para determinar los costos de inversión adecuadamente se deben incluir diferentes factores que encarecen su implementación, pero que deben considerarse para estimar adecuadamente la inversión real de un proyecto. En la Tabla XXXIX se indican otros costos asociados a la implementación del sistema de digestión anaerobia.

**Tabla XXXIX.** Costos de inversión del sistema de digestión anaerobia

<b>Costos</b>	<b>Valor (\$)</b>
Ingeniería	4671756,6
Contingencias e imprevistos	934351,6
Capital de trabajo y Puesta en marcha	237429,2
<b>Total</b>	<b>5843536,7</b>

Los costos reales por la implementación del sistema corresponden a \$ 24.530.562

### 8.2.3 COSTOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAERÓBIA

**Tabla XL.** Costos de operación anual al implementar el sistema de digestión anaeróbica.

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor U. (\$)</b>	<b>\$ Valor</b>
Energía (anual)	KWH	571,53	40	22861,1
Sueldo operador (1 <sup>er</sup> año)	mes	12	130.000	1560000
<b>Total</b>				<b>1582861,1</b>

En la Tabla XLI indica el flujo de caja para el sistema de digestión anaeróbica.

**Tabla XLI.** Flujo de caja sistema de digestión anaerobia.

<b>Año</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Fertilizante</b>		580178,56	615530,83	615530,83	615530,83	615530,83	615530,83
<b>Ahorro Multas</b>		10908000	10908000	10908000	10908000	10908000	10908000
<b>Costos de operación</b>		-1582861,1	-1607485,8	-1632849,31	-1658973,7	-1685881,8	-1713597,2
<b>Depreciación bombas</b>		-50583,33	-50583,33	-50583,33	-50583,33	-50583,33	-50583,33
<b>Utilidad bruta</b>		9854734,13	9865461,67	9840098,192	9813973,81	9787065,7	9759350,35
<b>Impuestos</b>		-1478210,12	-1479819,3	-1476014,73	-1472096,1	-1468059,9	-1463902,6
<b>Utilidad neta</b>		8376524,011	8385642,42	8364083,463	8341877,74	8319005,85	8295447,8
<b>depreciación maquinaria</b>		50583,33	50583,33	50583,33	50583,33	50583,33	50583,33
<b>Flujo caja</b>		<b>8427107,341</b>	<b>8436225,75</b>	<b>8414666,793</b>	<b>8392461,07</b>	<b>8369589,18</b>	<b>8346031,13</b>

<b>Año</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>Fertilizante</b>		580178,56	615530,83	615530,83	615530,83	615530,83	615530,83
<b>Ahorro Multas</b>		10908000	10908000	10908000	10908000	10908000	10908000
<b>Costos de operación</b>		-1742144	-1771547,2	-1801832,5	-1833026,4	-1865156,1	-1898249,6
<b>Depreciación bombas</b>		-50583,33	-50583,33	-50583,33	-50583,33	-50583,33	-50583,33
<b>Utilidad bruta</b>		9730803,53	9701400,31	9636338,44	9639921,12	9607791,43	9574697,85
<b>Impuestos</b>		-1459620,5	-1455210	-1445450,8	-1445988,2	-1441168,7	-1436204,7
<b>Utilidad neta</b>		8271183	8246190,27	8190887,67	8193932,96	8166622,72	8138493,17
<b>depreciación maquinaria</b>		50583,33	50583,33	50583,33	50583,33	50583,33	50583,33
<b>Terreno</b>	-100.000						
<b>Obras físicas</b>	-24.530.562						
<b>Flujo caja</b>	<b>-24630562</b>	<b>8321766,33</b>	<b>8296773,6</b>	<b>8241471</b>	<b>8244516,29</b>	<b>8217206,05</b>	<b>8189076,5</b>
<b>VAN 12 %</b>	<b>27.125.316,81</b>						
<b>TIR</b>	<b>33%</b>						

### **8.3 EVALUACIÓN ECONOMICA DEL SISTEMA DE LAGUNAS ANAERÓBIAS**

#### **8.3.1 AHORRO ECONÓMICO POR EL USO DE FERTILIZANTE PARA REGADÍO AL IMPLEMENTAR EL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS**

El ahorro por el uso de los purines para regadío al implementar el sistema de lagunas anaerobia se indica en la Tabla XLII. Este se obtuvo utilizando los datos de CORFO (20001) de la sección 2.4.

**Tabla XLII.** Ahorro de la empresa al usar los purines para el regadío, después de tratarlo en el sistema de lagunas anaerobias.

<b>Nutriente</b>	<b>Producción (Ton/año)</b>	<b>Ahorro año (\$)</b>
Fósforo	2,23	128383,33
Nitrógeno	5.57	216111,48
Potasio	4,26	374969,46
<b>Total Ahorro</b>		<b>848897,30</b>

(Fuente propia)

#### **8.3.2 COSTOS DE INVERSIÓN DEL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS.**

A continuación se indican los costos de inversión asociados al sistema de lagunas anaerobias (Tabla XLIII, XLIV y XLV).

Los costos de la construcción del canal abierto tienen el mismo valor que en los digestores anaerobios (\$71.000)

**Tabla XLIII.** Costos de construcción de las lagunas anaerobias

<b>Digestores</b>	<b>Total compra</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Total (\$)</b>
Excavación y moldeaje Digestores	301296	m <sup>3</sup>	20000	251.08	horas	5.021.600
Polietileno 1.5 mm	1100	m <sup>2</sup>	2168	1100	m <sup>2</sup>	2.384.800
Mano de obra	100	h/d	7.020			702000
<b>Total</b>						<b>8.108.400</b>

**Tabla XLIV.** Costos de equipos auxiliares y accesorios del sistema de lagunas anaerobias.

<b>Equipos y accesorios</b>	<b>Total compra</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Total (\$)</b>
Tubería PVC (110mm)		Línea	17.500	1		17.500
Accesorios ( PVC)	-	-	-	-	-	5400
Bomba 0.5 HP	1	HP				50000
<b>Total</b>						<b>72.900</b>

La inversión total para la implementación del sistema de lagunas anaerobias es de \$8.181.300

**Tabla XLV.** Costos asociados a la implementación del sistema de lagunas anaerobias.

<b>Costos</b>	<b>Valor (\$)</b>
Ingeniería	2.045.325
Contingencias e imprevistos	409065
Capital de trabajo y Puesta en marcha	216408,27
<b>Total</b>	<b>2.670.798</b>

Los costos reales por la implementación del sistema corresponden a \$ 10.852.098

### 8.3.3 COSTOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAERÓBIA

**Tabla XLVI.** Costos de operación anual al implementar el sistema de digestión anaerobia.

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor U. (\$)</b>	<b>\$ Valor</b>
Energía Bombas (anual)	KWH	68,05	40	2721,85
Sueldo operador (1 <sup>er</sup> año)	mes	12	120.000	1.440.000
<b>Total</b>				<b>1.442.721.85</b>

En la Tabla XLVII indica el flujo de caja para el sistema de lagunas anaerobias.

**Tabla XLVII.** Flujo de caja sistema de lagunas anaeróbicas.

<b>Año</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Fertilizante (Ahorro)</b>		849255,36	849255,36	849255,36	849255,36	849255,36	849255,36
<b>Ahorro Multas</b>		10908000	10908000	10908000	10908000	10908000	10908000
<b>Costos Operación</b>		-122.722	-126321,85	-130029,85	-133849,09	-137782,91	-141834,74
<b>Depreciación bombas</b>		-4167	-4167	-4167	-4167	-4167	-4167
<b>Utilidad bruta</b>		11630366,51	11626766,5	11623058,5	11619239,3	11615305,5	11611253,6
<b>Impuestos</b>		-1744554,977	-1744015	-1743458,8	-1742885,9	-1742295,8	-1741688
<b>Utilidad neta</b>		9885811,534	9882751,53	9879599,73	9876353,38	9873009,64	9869565,58
<b>depreciación maquinaria</b>		4167	4167	4167	4167	4167	4167
<b>Flujo caja</b>		<b>9889978,534</b>	<b>9886918,53</b>	<b>9883766,73</b>	<b>9880520,38</b>	<b>9877176,64</b>	<b>9873732,58</b>

<b>Año</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>Fertilizante (Ahorro)</b>		849255,36	849255,36	849255,36	849255,36	849255,36	849255,36
<b>Ahorro Multas</b>		10908000	10908000	10908000	10908000	10908000	10908000
<b>Costos Operación</b>		-146008,12	-150306,71	-154734,26	-159294,63	-163991,81	-168829,91
<b>Depreciación bombas</b>		-4167	-4167	-4167	-4167	-4167	-4167
<b>Utilidad bruta</b>		11607080,2	11602781,6	11598354,1	11593793,7	11589096,5	11584258,4
<b>Impuestos</b>		-1741062	-1740417,2	-1739753,1	-1739069,1	-1738364,5	-1737638,8
<b>Utilidad neta</b>		9866018,2	9862364,4	9858600,99	9854724,67	9850732,06	9846619,68
<b>depreciación maquinaria</b>		4167	4167	4167	4167	4167	4167
<b>Terreno</b>	-243553,80						
<b>Obras físicas</b>	-10.852.098						
<b>Flujo caja</b>	<b>-11095651,80</b>	<b>9870185,2</b>	<b>9866531,4</b>	<b>9862767,99</b>	<b>9858891,67</b>	<b>9854899,06</b>	<b>9850786,68</b>
<b>VAN 12 %</b>	<b>50.079.820,78</b>						
<b>TIR</b>	<b>89%</b>						

## 8.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS

### 8.4.1 AHORRO ECONÓMICO POR EL USO DE FERTILIZANTE PARA REGADÍO AL IMPLEMENTAR EL SISTEMA DE LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS

El ahorro por el uso de los purines para regadío en el caso del sistema de lagunas anaeróbica cubiertas se indica en la Tabla XLVIII.

**Tabla XLVIII.** Ahorro de la empresa al usar los purines para el regadío, después de utilizar el sistema de lagunas anaeróbicas cubiertas.

Nutriente	Producción (Ton/año)	Ahorro (\$)
Fósforo	1,97	113414,87
Nitrógeno	3,48	216111,48
Potasio	4,26	374969,46
<b>Total Ahorro</b>		<b>704495,81</b>

### 8.4.2 COSTOS DE INVERSIÓN DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.

A continuación se indican los costos de inversión asociados al sistema de lagunas anaeróbica Cubiertas (Tabla XLIX, L, LI).

Los costos de la construcción del canal abierto corresponden a los mismos que el sistema de digestión anaerobia (\$71.000).

**Tabla XLIX.** Costos de construcción de las lagunas anaerobias cubiertas.

<b>Digestores</b>	<b>Total compra</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Total (\$)</b>
Excavación y moldeaje	301296	m <sup>3</sup>	20000	251.08	horas	5.021.600
Polietileno (1 5mm)	2000	m <sup>2</sup>	2168	20000	m <sup>2</sup>	4.336.000
Mano de obra	200	h/d	7.020			1.404.000
<b>Total</b>						<b>10.761.600</b>

**Tabla L.** Costos de equipos auxiliares y accesorios del sistema de lagunas anaerobias.

<b>Equipos y accesorios</b>	<b>Total compra</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Total (\$)</b>
**Excavación pozo compost	3.38	m <sup>3</sup>	*10000	0.3	horas	3000
Tubería (PVC 110mm )	3	Línea	17500	1	-	52500
Tubería Galvanizada (1 in)		Línea	172470	21	-	362.040
Válvulas	-	-	-	-	-	15000
Accesorios	-	-	-	-	-	79.132
Bomba 0.5 HP	1	HP	-	-	-	50.000
<b>Total</b>						<b>561.672</b>

La inversión total para la implementación del sistema de lagunas anaerobias cubiertas es de \$ 11.394.272

En la Tabla LI se indican otros costos asociados a la implementación del sistema de lagunas anaerobias cubiertas.

**Tabla LI.** Costos asociados al sistema de lagunas anaerobias cubiertas

<b>Costos</b>	<b>Valor (\$)</b>
Ingeniería	2.848.568
Contingencias e imprevistos	569.714
Capital de trabajo y Puesta en marcha	136.731
<b>Total</b>	<b>3.555.013</b>

Los costos reales por la implementación del sistema corresponden a \$ 14.316.613

### **8.4.3 COSTOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE LAGUNAS ANAERÓBIAS CUBIERTAS**

**Tabla LII.** Costos de operación anual al implementar el sistema de lagunas anaeróbias cubiertas.

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor U. (\$)</b>	<b>\$ Valor</b>
Energía Bombas (anual)	KWH	68,046	40	2721,85
Sueldo operador (1 <sup>er</sup> año)	mes	12	120.000	1.440.000
<b>Total</b>				<b>1.442.722</b>

En la Tabla LIII indica el flujo de caja para el sistema de lagunas anaerobias cubiertas.

**Tabla LIII.** Flujo de caja sistema de lagunas anaerobias cubiertas.

<b>Año</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Fertilizante (Ahorro)</b>		704495,81	704495,81	704495,81	704495,81	704495,81	704495,81
<b>Ahorro Multas</b>		10908000	10908000	10908000	10908000	10908000	10908000
<b>Costos de operación</b>		-122721,8494	-126321,8494	-130029,8494	-133849,0894	-137782,907	-141834,7383
<b>Depreciación bombas</b>		-4167	-4167	-4167	-4167	-4167	-4167
<b>Utilidad bruta</b>		11485606,96	11482006,96	11478298,96	11474479,72	11470545,9	11466494,07
<b>Impuestos</b>		-1722841,044	-1722301,044	-1721744,844	-1721171,958	-1720581,89	-1719974,111
<b>Utilidad neta</b>		9762765,917	9759705,917	9756554,117	9753307,763	9749964,018	9746519,961
<b>depreciación maquinaria</b>		4167	4167	4167	4167	4167	4167
<b>Flujo caja</b>		<b>9.766.933</b>	<b>9.763.873</b>	<b>9.760.721</b>	<b>9.757.475</b>	<b>9.754.131</b>	<b>9.750.687</b>

<b>Año</b>		<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>Fertilizante (Ahorro)</b>		704495,81	704495,81	704495,81	704495,81	704495,81	704495,81
<b>Ahorro Multas</b>		10908000	10908000	10908000	10908000	10908000	10908000
<b>Costos de operación</b>		-146008,1249	-150306,7132	-154734,251	-159294,6314	-163991,81	-168829,91
<b>Depreciación bombas</b>		-4167	-4167	-4167	-4167	-4167	-4167
<b>Utilidad bruta</b>		11462320,69	11458022,1	11453594,55	11449034,18	11444337	11439498,9
<b>Impuestos</b>		-1719348,103	-1718703,315	-1718039,183	-1717355,127	-1716650,54	-1715924,8
<b>Utilidad neta</b>		9742972,582	9739318,782	9735555,368	9731679,052	9727686,446	9723574,06
<b>depreciación maquinaria</b>		4167	4167	4167	4167	4167	4167
<b>Terreno</b>	-243554						
<b>Obras físicas</b>	-14.316.613						
<b>Flujo caja</b>	-14560167	<b>9747140</b>	<b>9743486</b>	<b>9739722</b>	<b>9735846</b>	<b>9731853</b>	<b>9727741</b>
<b>VAN 12 %</b>	<b>45.853.115</b>						
<b>TIR</b>	<b>67%</b>						

## **CAPITULO IX**

### **ANALISIS DE LOS RESULTADOS**

#### **9.1 DISCUSIONES**

El retiro de los purines debe realizarse periódicamente para evitar su acumulación, descomposición y generación de olores en el corral. Se recomienda un mínimo de dos lavados por día, si se utiliza agua, o dos arrastres por día si se realiza en seco (CORFO, 2001). En el caso del fundo Santa teresa el lavado de los patios de ordeña se realiza una vez al día, sin embargo al no tener una buena canalización y un sistema de tratamiento adecuado, existe un esparcimiento de los purines, lo que genera olores por la descomposición de estos.

Según el INIA (1998) al no estar normada la disposición de purines la construcción de pozos de almacenamiento es la primera solución a los problemas que estos provocan. Sin embargo, esto es solo una solución provisoria, ya que evita que los purines escurran hacia cursos superficiales, pero muchas veces no evita que existan infiltraciones hacia napas subterráneas. Por otro lado, cuando estos pozos están impermeabilizados, existe una mejora sustancial en lo referido a contaminación de cursos superficiales y subterráneos, pero el problema de olores persiste.

Para el tratamiento de los purines es posible utilizar tanto los sistemas anaerobios como aerobios, sin embargo, según Lusk (2002) el aumento de la materia orgánica no permite

mantener las condiciones aeróbicas durante las épocas de invierno, lo que implica al menos seis a ocho semanas para estabilizar los sistemas aeróbicos durante la primavera, tiempo durante el cual la generación de olores es un problema significativo, que es casi imposible de eliminar. En este ámbito Kiely, (1999) reafirma lo planteado por los Lusk (2002), Vives, (2003).y Loehr, (1965) y establece que para el tratamiento de residuos agrícolas ganadero el uso de sistemas anaerobios, sobre todo el de digestión son los procesos unitarios que más han contribuido a la reducción de la contaminación agrícola.

El 100% de las lecherías del Sur de Chile que almacena sus purines los realiza en pozos, los cuales son de tierra o de concreto (INIA, 1998). Es por esto que la implementación de cual quiera de los tres sistemas propuestos seria una innovación en el tratamiento de los purines.

Conocer y manejar los elementos que determinan el resultado económico de una inversión es una de las tantas obligaciones que un empresario debe asumir para tener éxito en su empresa, cualquiera sea su tipo (Ponce, 1998). En las empresas del rubro agropecuario la utilización de purines como fertilizante o mejorador de suelos permite obtener ingresos adicionales mediante su comercialización en sectores que presentan gran interés por este subproducto (CORFO, 2001). La valorización económica de estos va ha depender del tratamiento que se les aplique y de la extensión de terreno donde se envíe.

Para el diseño de los sistemas de tratamiento fue imprescindible conocer la pluviometria de la zona, ya que esta incide de forma directa en el caudal de purines.

### **Alternativas propuestas**

Los sistemas diseñados se realizaron considerando un caudal de 11.7 m<sup>3</sup>/ día, el cual corresponde a 400 vacas (Cantidad esperada a los 7 años), sin embargo, esta cifra durante los primeros años (3) no sobrepasará las 300 vacas, por lo que el caudal será menor, es por esto que los factores de seguridad en el caso de los digestores son solo de un 26% y que ni el borde libre ni la profundidad requerida fueron consideradas en las lagunas anaerobias para que no exista un sobre dimensionamiento de los sistemas. Con esto se evitan mayores costos de construcción e implementación.

Los digestores anaerobios están diseñados para trabajar de forma semi continua, por lo tanto nunca se descargarán completamente, siempre existirá una cantidad de purines en su interior que no debe ser inferior a un cuarto de su capacidad total. A pesar de esto el sistema de digestión anaerobia se diseñó suponiendo que todo el contenido de purines de los digestores se descarga al tanque de almacenamiento final, de tal manera que en cualquier caso de emergencia en que los digestores se tengan que vaciar, el tanque de almacenamiento final tenga la capacidad para recibir toda la carga.

La utilización de un sistema de digestión anaerobia permite una reducción importante de los principales contaminantes, que para el caso de DQO puede llegar al 80% (Vives 2001), además entrega ventajas importantes como la reducción de los olores y el almacenamiento del biogás. Sin embargo, presenta algunos inconvenientes importantes, como el menor almacenamiento en comparación con sistemas de lagunaje tanto cubierto como descubierto, además necesita mantener condiciones de temperatura para el

funcionamiento óptimo.

La principal diferencia que existe entre los digestores anaeróbicos y las lagunas anaerobias cubiertas es el sistema de calefacción y de mezcla completa que se utiliza en los primeros, para mantener temperaturas adecuadas (35°C), y una reacción homogénea, lo que mejora la eficiencia de proceso.

Un factor que encarece los costos en la construcción e implementación de un sistema de digestores anaerobios es la aplicación de calor, la cual según Mefcalf y Eddy (1998) puede ser aplicada interna o externamente. Sin embargo el balance de energía aplicado a los digestores anaerobios del proyecto demostró que se produce una ganancia de energía de 4000 W, esta energía se traduce en una acumulación de calor en los digestores, que se justifica porque los microorganismos presentes en los purines degradan la materia orgánica elevando la temperatura, acondicionando su propio medio para facilitar su metabolismo, esto implica que no es necesario implementar un sistema de calefacción en los digestores para mantener las condiciones óptimas de temperatura.

Si bien es cierto el sistema de lagunas anaerobias cubiertas y el sistema de lagunas anaerobias presentan muchas similitudes en su diseño y funcionamiento, existen algunas diferencias fundamentales. Una de las principales diferencias es la mayor reducción de olores por parte de las lagunas anaerobias cubiertas, además la cubierta a las lagunas permite que las precipitaciones no impacten directamente al contenido de estas, lo cual evita que exista una dilución de los purines y por ende una reducción en los nutrientes. Otra diferencia que presentan es que las lagunas cubiertas necesitan un sistema de evacuación del biogás, cuando este ya presenta un gran volumen, lo que hace más

complejo su construcción en comparación con las lagunas anaerobias.

El sistema de lagunas anaerobias es el que entrega un mayor ahorro por concepto de fertilizantes, debido a que en este caso la cantidad de fertilizantes esta relacionado directamente con los porcentajes de remoción de contaminantes que tenga el sistema. Sin embargo la elección del sistema debe hacerse a través de un análisis de multicriterios, el cual integre criterios ambientales, de costo y de imagen. Tomando en cuenta esto el sistema de lagunas anaerobias es el más barato de implementar, pero presenta debilidades comparativas con los demás sistemas, sobre todo en el aspecto ambiental, por la mayor generación de olores y contaminantes atmosféricos.

El sistema de digestión es el que presenta un mayor costo, por ende tiene un mayor periodo de recuperación de la inversión, el cual es de tres años. Sin embargo, tiene la posibilidad de poder aprovechar el biogás, el cual según Vives (2001) es una potencial fuente de energía eléctrica.

Al comparar el VAN obtenido en los sistemas de tratamiento se observa que solo existe una diferencia de \$4.226.705 entre los sistemas de lagunas anaerobias y el de lagunas anaerobias cubiertas siendo el de lagunas anaerobias el mas rentable económicamente. Sin embargo, si se toma en cuenta otros aspectos de ambos tratamientos, como son la generación de olores, el porcentaje de remoción y la disminución de emisiones de sustancias sulfurosas al medio ambiente se puede señalar que el sistema de lagunas anaerobias cubiertas presenta marcadas ventajas.

El VAN obtenido de los sistemas de lagunas cubiertas y descubiertas es de 40% y 45% (respectivamente) mayor que el que se obtiene del de digestión anaerobia. Esto se debe principalmente a la inversión inicial, que para el sistema de digestión anaerobia es un 40% mayor, debido a que la construcción con hormigón es más compleja y por ende más costosa que la implementación de geomembranas.

Con respecto al riego de praderas perennes, los tres sistemas de tratamiento entregan diferentes concentraciones de elementos nutritivos para el suelo (nitrógeno y fósforo), sin embargo, el sistema de lagunas anaerobias disminuye en menor medida su concentración, entregando 185.7 Kg/ha\*año de Nitrógeno y 74.4 Kg/ha\*año de Fósforo; lo que se traduce en un mayor aprovechamiento de nutrientes para el suelo. A pesar que esta es una gran ventaja comparativa con los demás sistemas, no es la que prima para tomar una decisión a implementar, ya que los principales objetivos propuestos para el proyecto son tratar y almacenar los purines.

## **9.2 RECOMENDACIONES**

El piso desde donde se captan los purines hasta los sistemas de tratamiento se recomienda que sea de cemento para que no exista una mezcla de sólidos u otro tipo de partículas con el flujo de purines y por que con este tipo de suelo se facilita la limpieza, reduciendo el agua de lavado y evitando la infiltración al subsuelo.

Se recomienda que se realice un lavado de los patios y salas de ordeña luego de cada ordeña, para que no existan pérdidas de los nutrientes por volatilización. Y para que se tenga una limpieza continúa.

No se deben vaciar completamente los digestores anaerobios, como mínimo se debe dejar un cuarto de la capacidad total, de esta manera se mantienen las condiciones dentro de estos y se evita tener que realizar una nueva puesta en marcha.

La construcción del sistema de lagunas anaerobias debe estar acompañada de un cercado, el cual evite el acercamiento de animales.

### 9.3 CONCLUSIONES

- La mayor producción por parte de las empresas agropecuarias y las mayores exigencias de los mercados, sobre todos los extranjeros, hacen necesario que se implementen tecnologías limpias, dentro de las cuales tiene un rol fundamental el tratamiento de los residuos.
- La construcción de un sistema de tratamiento de purines le permite al Fundo Santa Teresa tener un adecuado almacenamiento de estos, evita posibles multas por contaminación de cursos superficiales y subterráneos, mejora su imagen como empresa y le permite disminuir la contaminación tanto de suelos y aire.
- No existe una normativa que señale explícitamente el deber de tratar los purines, sin embargo, su acumulación y disposición puede provocar daños a los suelos o cursos superficiales y subterráneos, con lo cual se infringen otras normas (Decreto Ley N° 3.557, D.S 90 y D.S. 46), esto provoca que se tenga que construir sistemas de tratamiento.
- Los purines poseen propiedades específicas que permiten su utilización sobre los suelos, contribuyendo a satisfacer la demanda de las praderas y cultivos, otorgando diferentes nutrientes como nitrógeno, fósforo potasio, entre otros.
- Los tratamientos aplicables a los purines, corresponden a los anaeróbicos, debido

a que los purines presentan altas concentraciones de DQO y Sólidos totales.

### **Sistema de Digestión Anaerobia**

- El sistema de digestión anaerobia presentara dos digestores de  $184.12 \text{ m}^3$  cada uno y un tanque de almacenamiento final de  $378 \text{ m}^3$ .
- Es necesario poner en marcha el sistema durante el periodo de verano, para poder lograr un acondicionamiento de los microorganismos, ya que en esta temporada las temperaturas son más elevadas (sobre  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ).
- No se necesitan equipos de intercambio de calor en los digestores, ya que con el espesor de hormigón se mantiene el calor liberado en las reacciones exotérmicas de los microorganismos anaerobios produciendo una ganancia de energía igual a  $4000 \text{ W}$ .

### **Lagunas Anaerobias**

- Ambas lagunas Tendrán un volumen igual a  $1506.48 \text{ m}^3$ , que les permitirá almacenar los purines durante tres meses.
- Debido a los volúmenes que presentan ambas lagunas pueden almacenar los purines por un periodo mayor al estimado sin que exista un renvalse. A pesar de

esto es recomendable que no se sobre pase los tres meses de tiempo de retención hidráulico, para no tener problemas de olores o pérdidas de concentración de los nutrientes.

- Las lagunas anaerobias por sus grandes volúmenes permiten almacenar los purines en épocas en que no es posible utilizar los purines sobre los suelos, durante el invierno o cuando existe suelo desnudo. Además permiten almacenar lodos durante 12 años.
- Este sistema es el de más fácil mantención, ya que solo requiere de un operador para el lavado de patios y bombear los purines para el riego.

### **Lagunas anaerobias cubiertas**

- Las lagunas anaerobias presentan los mismos volúmenes de almacenamiento de las lagunas anaerobias, sin embargo, permiten la reducción de los olores y evitan la dilución de los purines por las precipitaciones.
- El biogás generado en las lagunas anaerobias cubiertas será enviado a un pozo de compost, por lo tanto este servirá de filtro biológico y disminuirá las emisiones de metano y otros gases contaminantes a la atmósfera.

- Estas lagunas presentan una cubierta móvil de polietileno de 1.5 mm, la cual permite almacenar el biogás.

### **Aspectos Económicos**

- Los mayores costos en la construcción del sistema de digestión anaerobia están asociados al hormigón. Por su parte para los sistemas de lagunaje los mayores costos se asocian a la geomembrana (polietileno de alta densidad).
- El sistema de digestión entrega una ganancia de \$579837,548 anuales por fertilizantes, el sistema de lagunas cubiertas \$704495,81 y el sistema de lagunas anaerobias \$ 848897,30. Por lo tanto el sistema de lagunas anaerobias es el que permite un mayor ahorro por fertilizantes.
- El sistema que requiere un mayor costo en construcción y operación es el de digestión anaerobia, el cual requiere de una inversión total de \$24.630.562.
- Por otra parte el sistema que requiere una menor inversión es el sistema de lagunas anaerobias, con \$11.095.651,80.
- Al evaluar los sistemas de tratamiento durante un periodo de 12 años se obtiene un VAN igual a \$27.125.316,81 para el sistema de digestión anaerobia, \$50.079.820,78 para el sistema de lagunas anaerobias y \$45.853.115 para el

sistema de lagunas anaerobias cubiertas. Por lo tanto la alternativa económicamente más rentable es el de lagunas anaerobias.

- Los sistemas de lagunaje anaerobio y cubiertas entregan un 45% y 40% respectivamente más de ganancia que el sistema de digestión anaerobia.
- El sistema de digestión anaerobia tiene una recuperación de la inversión al cabo del tercer año de la implementación. En cambio los sistemas de lagunas anaerobias y lagunas cubiertas recuperan la inversión inicial al cabo del primer año.
- Al comparar los tres sistemas de tratamiento, se observa claramente que la implementación del sistema de lagunas anaerobias es el que presenta mayores ventajas en términos de economía para la empresa, ya que permite un mayor ahorro al utilizar los purines sobre el suelo, además los costos de operación e inversión son menores, sin embargo, provoca serios impacto ambientales sobre la capa de ozono, debido a la volatilización del metano y dióxido de carbono, por ello se propone implementar el sistema de lagunas anaerobias cubiertas, ya que presenta una inversión similar, lo mismo ocurre con los costos de operación y además disminuye la contaminación atmosférica.

## BIBLIOGRAFÍA

ASAE. ASAS Normas, 2000, 47, SEP 403.3, el Plan de Albuferas Anaerobio para la Dirección de Pérdida Animal, la Sociedad americana de Ingenieros agrícolas, St. Joseph, MI.

Biertman % Smidt, 1977. Citado por Sapag N. y Sapag R., (2000). El Presupuesto de Bienes de Capital, Fondo de Cultura Económica, México.

Clark, R.H., Speece, R.E. 1989. The pH tolerance of anaerobic digestion. Advanced water pollution research. Int. Conf. 5<sup>th</sup>.

Contreras M. Andre, 2002. Diseño de una unidad básica de tratamiento de aguas residuales para comunidades mapuches. Trabajo de título Ing. de Ejecución en Química. Universidad católica de Temuco.

CORFO, 2001. Guia y Manejo de Buenas Prácticas para el Sector Lechero de la zona central. Chile.

Danés, R., Molina, V., Prats, I.L., Álamos, M., Boixadera, J., Torres, E., 1996. Manual de gestión de purines para la reutilización agrícola. Editado por la Generalitat de Cataluña. Barcelona.

Dickey, 1999. Sludge Management for Anaerobic Lagoons and Runoff Holding Ponds.

University of Nebraska, Institute of Agriculture and Natural Resources. United States.

Dumontt C., 1995. Producción, manejo e impacto ambiental de purines. Boletín Técnico. INIA. Remehue, 226.

Dumontt, J. C., Bortola. Meollo (eds).1998. Planificación Predial Económica, Técnica y Ambiental de Purines. Seminario Taller. Instituto de investigación Agropecuaria. Centro regional de Investigación Remehue Osor . Serie Remehue Número 78.

Dumontt C., 2000. Impacto ambiental de la Actividad Ganadera. Revista Tierra Adentro. (Nº32).

EPA, 2001. Cost Methodology Report for Beef and Dairy Animal Feeding Operations. Engineering and Analysis Division Office of Science and Technology U.S. Environmental Protection Agency Washington, D.C. 20460.

Fuentes. 1992. Construcciones para la agricultura y la ganadería. Sexta Edición. Mundi-Prensa, Madrid.

Fost. L. P and Fulhage D, 2000. Anaerobic Lagoons for Storage/Treatment of Livestock Manure. Natural Resources Conservation Service. Department of Agricultural Engineering. Universidad de Missouri,

Fox, Robert W. 1995. Introducción a la Mecánica de fluidos. Segunda Edición. Edit. McGraw – Hill.

Gutierrez C. y Jara C, 2003. Simulación del nitrógeno lixiviado a partir de la aplicación de purines de cerdo como fertilizante orgánico. Tesis (Lic. en Ciencias de la Ingeniería), Universidad Católica de Temuco.

Hanish, 1985. B. Mechanical Water treatment. Informal handout. IHE, DE, elft.

Hartmon Jay, 2002. Department of Agricultural and Biosystems Engineering. “Design approach based on reactor analysis”. Iowa State Univerdity.

Hart, S.A. and M. E, 1965. Turner. Lagoons for livestock manure, J Water Pollution Control Federacion 37.

Hermanson , 1991. Livestock Manure Lagoons Protect Water quality. Washington State University Extension. United States.

Hills, D.J., Nakano, K. 1984. Effects of particle size on anaerobic digestion of tomato solid wastes. Agricultural Wastes. Vol. 10.

Himmenblau, 2002. Principios básicos y cálculos en Ingeniería Química. Sexta edición. Edit. Pearson. Educación de México; S.A.

Hobson, P.N. 1990. “The treatment of agricultural wastes”, En Anaerobic digestion: a waste treatment technology. Editado por Wheatley, A. Critical reports on applied chemistry. Vol. 31, 1990.

Jones and Alan L, 2003. Sutton And Operation Off Livestock. “Waste lagoons” Animal Sciences, Tardue University, IDE -120.

Kiely, Gerard, 1999. Ingeniería Ambiental. Ingeniería Ambiental, Fundamentos, Entornos, tecnologías y Sistemas de Gestión. Editorial McGraw-Hill/Interamericana de España.

La Colina, D., 1984. La Productividad del metano de los tipos animales mayores, las Transacciones del ASAE, Vol. 27, No. 2.

Lay, J.J., Li, Y.Y., Noike, T. 1997. Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion. Water Research, vol. 31 (10).

Loehr, R . C., 1965. “Effluent quality from anaerobic lagoons treating feedlot wastes”, J Water Poll, Control Fed, 39, 384.

Loehr, R. C. 1974. La Dirección Desechada agrícola, la Prensa Académica, Inc., Nueva York.

Lusk Phil, 2002. La Recuperación del Metano de Abonos Animales. El Registro Actual de Oportunidades. Departamento de Información de Energía en EE.UU,

MAPL, 1998. Manual de auditoria de producción Limpia. Proyecto de Desarrollo de Instituciones del Medio Ambiente, Chile

Metcalf y Eddy, 1998. Ingeniería de las aguas Residuales. Editorial McGraw-Hill Interamericana de España, S.A.U.

Middlebrooks, E.J., C.H. Middlebrooks, J.H. Reynolds, G.Z. Watters, S.C. Reed y D. B. George, 1982. Wastewater Stabilization Lagoon Design, Performance and Upgrading. Macmillan Pub. Co., Nueva York.

Millar C., Turk L y Foth H, 1975. Fundamentos de la Ciencia del Suelo, Primera Edición, Editorial Centro Regional de Ayuda Técnica, México.

Moreno M. D, 1991. Depuración por lagunaje de aguas residuales. Manual de operadores. MOPT. Madrid.

Muñoz Valero, J.A., Ortiz Cañavate, J., Vázquez Minguela, J, 1987. Técnica y aplicaciones agrícolas de la biometanización. Serie Técnica- Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Madrid.

Pavlostathis, S.G., Giraldo-Gómez, E, 1991. Kinetics of anaerobic treatment: a critical review. Critical reviews in environmental control. Vol. 21 (5,6).

Pedraza, 2002. Tattersall, Revista on line. Edición175. <http://www.tattersall.cl/revista/gerac.htm>.

Pérez, 1993. Tesis de post- Grado “Dimensionamiento óptimo de redes de distribución de aguas ramificadas considerando los elementos de regulación”. Universidad Politécnica de valencia Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. España.

RAS, 2000 Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Sección II. Tratamiento de Aguas Residuales República de Colombia Ministerio de desarrollo Económico, Dirección de Agua potable y Saneamiento Básico, Bogota D.C.

RESA. Nuevas tecnologías en el tratamiento de purines, 2000.  
[www.resa.bcn.com/ges\\_pla.htm](http://www.resa.bcn.com/ges_pla.htm).

Sapag N. & Sapag R., 2000. Preparación y Evaluación de Proyectos. Cuarta Edición. Editorial McGraw Hill/ Interamericana de Chile LTDA. Chile.

Siegrist, H., Renggli, D.,Gujer, W, 1993. Mathematical modelling of anaerobic mesophilic sewage sludge treatment. Water Science and Technology. Vol. 27.

Simpson K, 1986. Abonos y Estiércoles. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza

Streeter, Wylie, 2000. Mecánica de los fluidos. Octava edición. Edid. McGraw – Hill, México.

Revista Ambientum, 2002. Edición octubre.

[http://www.ambientum.com/revista/2002\\_31/TRTMNTPRNS1.asp](http://www.ambientum.com/revista/2002_31/TRTMNTPRNS1.asp)

Safley, L. M., el Jr & Westerman, P. W, 1989.. Recuperación de Biogás en Lagunas anaerobias, las Basuras Biológicas, Vol. 27.

Safley, L. M., el Jr & Westerman, P. W., 1992a. La influencia de la Temperatura en Lagunas Anaerobias cubiertas, la Tecnología de Bioresource, Vol. 41.

Safley, L.M. y Westerman, P.W. La actuación del Estiércol de Lechería en las Lagunas Anaerobias Cubiertas, la Tecnología de Bioresource, Vol. 42, 1992b.

Sapag N. y Sapag R., 2000. Preparación y Evaluación de Proyectos. Cuarta Edición. Editorial McGraw Hill/ Interamericana de Chile LTDA. Chile.

Tchobanoglous, G. y Shoroeder, 1985. Water Quality: characteristics Modeling, Modification, Addison-Wesley, Reading, MA.

Thompson L. y Troeh F,1988. Los Suelos y su fertilidad. Cuarta Edición. Editorial Reverté, S.A. Barcelona.

Urquiaga y Zapata, 2003. Perdidas de nitrógeno del sistema suelo-plantas. Departamento de recursos Naturales y Medio Ambiente. Serie Simposios y Compendios. INIA. Remehue, vol 8

USEPA, 2000. United States Environmental Protection Agency Fact Sheet – AgSTAR Digest, EA 430-F-00-012, <http://www.epa.gov/agstar>.

Veeken, A., Hamelers, B. 1999. Effect of temperature on hydrolysis rates of selectes biowaste components. Bioresource technology. Vol. 29.

Vives C, 2003. Presentación y argumentación de un Sistema de tratamiento de cerdo por fermentación anaeróbica con recuperación de gas en Agrosuper. Gestión Ambiental,

Winter, 1985. Managing Manure with Biogas Recovery Systems Improved Performance at Competitive Costs. Office of Air and Radiation (6202J). [www.epa.gov](http://www.epa.gov). 2002.

Zhang R, Lorimor J y Melvin S. W., 1985. Design and Management of Anaerobic Lagoons in Iowa for Animal Manure Storage and Treatment Functions of anaerobic lagoons. Extensión agrícola e ingenieros del bio- sistemas.

# ANEXOS

**ANEXO A**

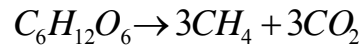
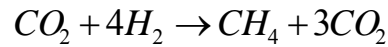
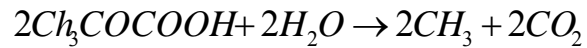
**BALANCE DE ENERGÍA EN EL**

**SISTEMA DE DIGESTIÓN**

**ANAEROBIA**

### Balance de energía Digestores

Para poder estimar cual es la necesidad de calor que se debe aplicar a cada digestor, primero se debe conocer cual es la generación de energía que producen los microorganismos (actividad exotérmica), para ello se supone que a partir de la oxidación de una molécula de glucosa se producen tres moléculas de CH<sub>4</sub>



$$\Delta H = \sum ni^* \Delta H_{productos} - \sum ni^* \Delta H_{reactantes}$$

A partir de estas reacciones se estima que la energía liberada por la degradación de una molécula de glucosa es -823000 (J/gmol) (Tabla 1)

**Tabla 1.** Valores de  $\hat{\Delta H}$  que determinan el  $\hat{\Delta H}_{Reacción}$  en la formación de metano.

Compuesto	$\hat{\Delta H}(kJ/mol)$	Moles	$\hat{\Delta H}(kJ)$
CH <sub>4</sub>	-98	3	-1479
CO <sub>2</sub>	-493	3	-294
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	-950	1	-950
$\hat{\Delta H}_{Reacción} (kJ)$			-823

Considerando además que el balance de energía en los digestores esta dado por la siguiente ecuación:

$$\sum wi * Cp * \Delta T_S - \sum wi * Cp * \Delta T_E + \Delta H_{Reacción} = 0$$

Donde:

$w_i$  = Flujo másico (mol/día)

$C_p$  = Capacidad calorífica (J/gmol\*°K\*),

$\Delta H_{Reacción}$  = Entalpía de reacción (J/día)

La diferencia entre el calor que ingresa al sistema y el calor de salida, se calcula utilizando los  $C_p$  de mezcla de los componentes de entrada y salida.

Metcalf & Eddy (1998) establecen que existen perdidas de calor a través del fondo, de la cubierta y a través de las paredes del digestor, las que deben ser menores al calor que se acumulada dentro de este. Para ello el calor transferido por el sistema se calcula

conociendo el área de la sección transversal, la diferencia de temperatura y el coeficiente de conductividad que depende del material de construcción.

$$Q_1 = A * U * (\Delta T)$$

Donde:

$Q_1$  = pérdida de calor

$A$  = el área de sección transversal

$U$  = el Coeficiente de conductividad

$\Delta T$  = la diferencia de temperatura

Según el Department of Agricultural and Biosystems Engineering (2002) se producen 0.35 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por kg de DQO removida lo indica que en nuestro caso se utilizan alrededor de 170,625 moléculas de glucosa para producir 8.19 (kg/día) de metano, liberando -1625,282118 W, es decir -140.424.375 J/día.

Posteriormente, se obtiene la diferencia de calor que se produce con los flujos de entrada y la salida de los purines, después de ser tratados dentro de los digestores.

La Tabla 2 indica los valores del calor y los g/mol de los diferentes flujos molares que ingresan (purín a 14°C) y salen (purín a 35°C y biogás) de cada digestor.

**Tabla 2.** Temperatura, Cp y energía de los diferentes flujos molares en los digestores.

Parámetro	T(°C)	Cp (J/gmol*°C)	gmol/día	(J/día)
<b>Purin</b>	14	74,59	333165	347910882,9
<b>Purines(liq.)</b>	35	75,1	333087,22	875519763,6
<b>CH4</b>	35	36,23	52,5	66572,63
<b>CO2</b>	35	37,55	7,95	10454,26
<b>H2S</b>	35	34,05	1,24	1,47
<b>Agua, (gas)</b>	35	33,71	9,33	11011,93
<b>**Biogas</b>	35	36,1922	71,02	88040,29

\*\*Componentes del Biogás CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S y Agua (g).

Cp obtenidos del Incropera (1999)

Reemplazando los valores correspondientes de entrada y salida de los purines además de la entalpía de reacción, se obtiene un valor de 4482 W, (387272546) (j/día).

Se consideró además, las pérdidas de calor que se producen a través de las paredes de los digestores, ya que el calor tiende a disiparse a aquellas áreas de menor temperatura.

Las pérdidas de calor se calculan con los siguientes supuestos:

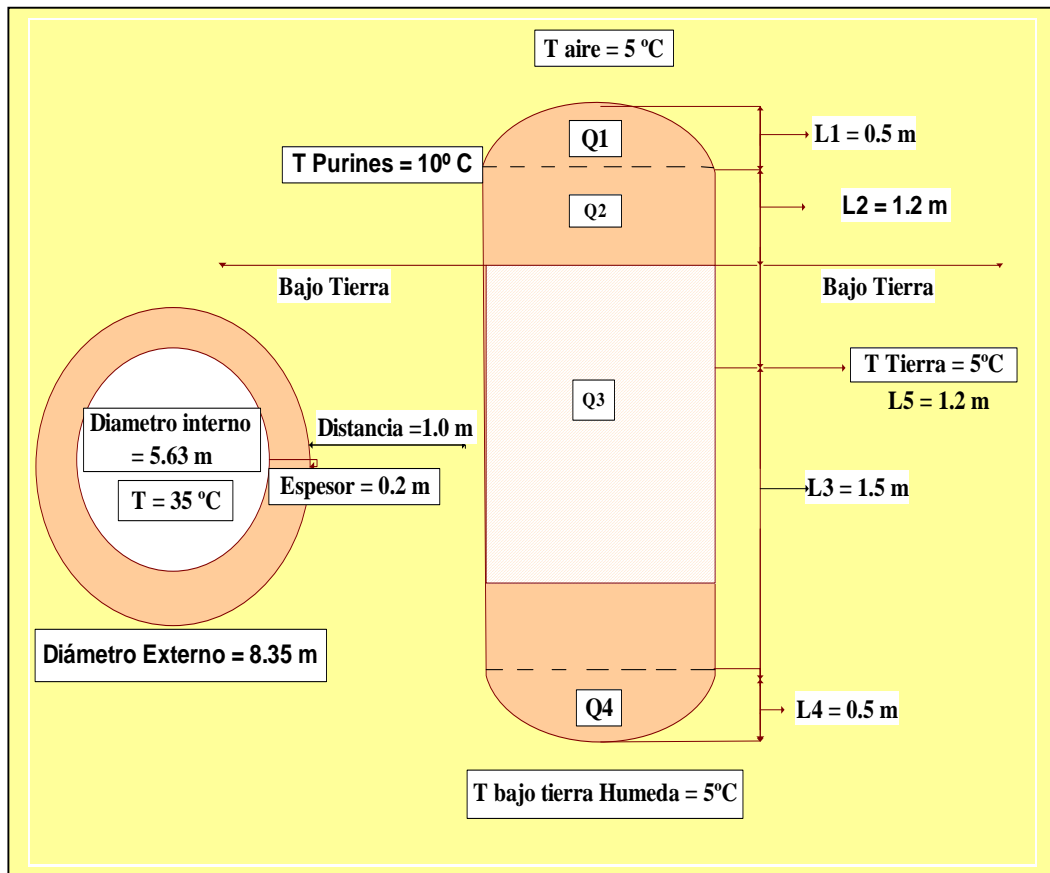
- Digestores son de forma cilíndrica de posición vertical.
- Enterrados 2 metros bajo tierra y 1.7 metros sobre la superficie.
- Las constantes de transferencia son  $k_1$  (hormigón) 1 (W/m\*°K),  $k_2$  (aire) 0.02454 (W/m\*°K), y  $h$  0.52 (W/m<sup>2</sup>\*°K)
- Las dimensiones de los digestores son las contenidas en el anexo.

En la Tabla 3 Se indican las pérdidas de calor que se producen en cada digestor

**Tabla 3.** Perdidas de calor a través de las paredes, fondo y cubierta del digestor.

Zonas	Calor
1	3.34
2	16.65
3	456.4
4	5.74
<b>Q<sub>1</sub> Total</b>	<b>482.13</b>

**Figura 1.** Dimensiones y supuestos utilizados en el cálculo de transferencias de calor del digestor anaeróbico.



## **ANEXO B**

# **CONSTANTES DE LAS PERIDAS MENORES EN EL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA**

## Pérdidas Menores

En la Tabla 1 se indican las constantes utilizadas para determinar las pérdidas menores en el sistema de digestión anaerobia.

**Tabla 1.** Constantes (K) de las válvulas y accesorios contenidos en el sistema de digestión anaeróbica.

Singularidad	K	cantidad
Te (línea)	0.9	2
Válvula de compuerta abierta	0.19	1
Contracción brusca	0.32	0.5
Expansión brusca	0.56	0.5
Codo 90°	0.9	3
$\Sigma K$ (m)	4.55	1

**APÉNDICE C:**

**MATERIALES Y**

**METODOLOGÍA DE LOS**

**ENSAYOS EXPERIMENTALES**

## **DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA CARACTERIZAR LAS AGUAS RESIDUALES.**

### **DETERMINACIÓN DE PH**

Este método se basa en la determinación de la actividad de los iones hidronio por medición potenciométrica, empleando un electrodo de vidrio y uno de referencia, previa calibración del instrumento con una solución de pH estándar

#### **a) Reactivos necesarios**

- Agua destilada o desmineralizada libre de óxidos de Carbono y con una conductividad menor a 3  $\mu\text{mho}$ .
- Solución estándar de pH

#### **b) Aparatos necesarios**

- Medidor de pH: Consiste en un potenciómetro con electrodo indicador, un electrodo de referencia y un dispositivo compensador de  $T^\circ$ , con precisión y reproducibilidad de 0.1 unidades de pH en el rango de 0 a 14
- Vasos de polietileno
- Agitador, agitadores magnéticos con bases de teflón

**c) Procedimiento de calibración del instrumento**

- Las soluciones que se utilizan para el almacenamiento de electrodos generalmente son soluciones con conductividad mayor a 4000  $\mu\text{mho}$  son adecuadas.
- Antes de usar, se sacan los electrodos de la solución de almacenamiento y se enjuagan con agua destilada.
- Se deben seca los electrodos con un papel suave y sumergirse en una solución estándar de pH inicial para ajustar el pH isopotencial.
- Seleccionar un segundo estándar de pH distante no más de dos unidades de pH del esperado para la muestra.
- Ajustar a la misma temperatura, el estándar de pH, la muestra puede tener la temperatura ambiente (por ejemplo: 25°C).
- Remover los electrodos del primer estándar de pH a la temperatura del análisis.
- Posteriormente sacar los electrodos de la solución estándar de pH y lavarlos con agua destilada y secarlos.

**d) Procedimiento de análisis de la muestra**

- Introducir los electrodos en la muestra manteniendo una agitación constante.
- Registrar el valor de pH obtenida cuándo se alcanza una lectura aceptable.

## **DETERMINACIÓN DE TEMPERATURA**

El método consiste en la medición de la temperatura de una muestra por medio de termómetro, la medición deberá efectuarse en el lugar de toma de muestra evitando las posibles alteraciones provocadas por el medio ambiente.

### **a) Aparatos utilizados**

- Termómetro de Hg y digital.

### **b) Procedimiento**

- Sumergir el termómetro en el agua y se registrar la temperatura de equilibrio.
- Durante la medición se debe evitar influencias externas cómo por ejemplo la luz solar directa.

## **DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES**

Este método se basa en filtrar una muestra bien homogenizada a través de un filtro tarado, de fibra de vidrio estándar y secar el residuo retenido hasta masa constante, a 103°C-105°C. El aumento de masa del filtro representa el contenido de sólidos suspendidos totales.

**a) Aparatos**

- Estufas de secado, regulable a  $104^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ -
- Aparato para filtración por membrana
- Filtro de fibra de vidrio, de  $15\ \mu\text{m}$
- Balanza analítica, de sensibilidad igual o mayor a 0.1 mg.
- Desecador
- Plancha de Aluminio
- Pinzas
- Probeta

**b) Procedimiento para la preparación del disco de filtro de vidrio**

- Colocar el disco en el aparato de filtración y aplicar vacío, luego lavar con tres porciones de 20 ml de agua destilada.
- Continuar la succión para remover totalmente el agua, y así descargar el agua de lavado.
- Sacar con pinzas el filtro del aparato de filtración y colocar sobre una plancha de aluminio de acero inoxidable que sirve como soporte. Luego secar el filtro en la estufa a  $103^{\circ}\text{C}$ - $105^{\circ}\text{C}$ .
- Enfriar en el desecador y pesar. Registrar la masa B.
- Repetir el procedimiento de secar y enfriar, hasta obtener una masa constante. hasta enfriar, hasta obtener una mas constante.

**c) Procedimiento de selección del filtro y tamaño de la muestra**

- El volumen de la muestra debe ser tal, que el residuo seco obtenido tenga una masa entre 2.5mg y 200mg.

**d) Procedimiento de Análisis**

- Colocar el filtro preparado en el aparato de filtración y aplicar vacío.
- Humedecer el filtro con una pequeña porción de agua destilada.
- Filtrar un volumen de muestra homogenizada a través del filtro de fibra de vidrio.
- Lavar el tubo con tres porciones sucesivas de 10 ml de agua destilada y luego continuar con la succión por aproximadamente 3 minutos después que la filtración se complete.
- Sacar el filtro con pinzas del aparato de filtración y colocar sobre una plancha de Aluminio.
- Secar el filtro por una hora en la estufa a 103°C-105°C.
- Enfriar en el desecador y pesar. Registrar la masa A.
- Repetir el procedimiento de secar y enfriar hasta una masa constante.

**e) Expresión de resultados.**

$$\text{Sólidos suspendidos, mg/L} = \frac{(A - B) * 1000}{V}$$

En que A = masa del filtro mas el residuo seco, mg.

B = masa del filtro, mg.

V = volumen de muestra utilizada.

## **DETERMINACION ESPECTROFOTOMETRICA DEL FOSFORO**

### **a) Reactivos**

- Solución de molibdeno-vanadato
- Solución de stok de fósforo
- Solución estándar de fósforo

### **b) Procedimiento de análisis de la muestra**

- Transferir 25 ml de la muestra en un matraz erlenmeyer. Por lo general es necesario diluir la muestra en 50 ml. En cuyo caso se debe añadir a la muestra 5ml de la solución de molibdeno-vanadato.
- Dejar reposar por 2 min.
- Luego medir la absorbancia a 400nm. El blanco, debe prepararse con 10 ml de agua destilada mas 5 ml de la solución de molibdeno-vanadato, y debe colocarse en la celda de la muestra.
- Determinar la concentración mediante la interpolación en la curva de calibración.

## **ETERMINACIÓN DE NITROGENO TOTAL**

En presencia de ácido sulfúrico, sulfato de potasio y sulfato de cobre como catalizador, el nitrógeno amino de varias sustancias orgánicas es convertido a sulfato de amonio  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . El amonio libre y el nitrógeno amoniacal también son convertidos a  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ .

Durante la digestión se forma un complejo aminocúprico, el cual es descompuesto por adición de tiosulfato de sodio. Después de la descomposición, el amoniaco es destilado desde un medio alcalino y absorbido en una solución de ácido sulfúrico.

El amoniaco es determinado potenciométricamente con electrodo selectivo.

### **a) Reactivos**

- Agua destilada libre de óxidos de Carbono y con una conductividad menor a  $3 \mu\text{mho}$ .
- Reactivo N - 1k
- Reactivo N – 2k
- Reactivo N-3k

### **b) Materiales**

- Microcuchara azul raza
- Cubetas con tapa roscada
- Soporte para cubetas

- Pipetas 10 ml
- Aparato de digestión
- Termorreactor
- Espectrofotómetro

## **Procedimiento**

### **a) Preparación de la Disgregación.**

- Colocar 10 ml de muestra (diluida si es necesario, para aguas residuales de alta carga, generalmente se utiliza una relación 1:100) en las cubetas.
- Agregar a las cubetas una microcucharada azul raza de reactivo N – 1k.
- Calentar la muestra contenida en la cubeta, en el termorreactor (precalentado) durante una hora a 120 °C.
- Dejar enfriar a temperatura ambiente, la cubeta cerrada, en el soporte para cubetas (no refrigerar con agua fría).

### **b) Preparación de la muestra de medición**

- Colocar 1.5 ml de muestra disgregada y enfriada (en caso de haber turbidez o precipitados se debe usar sobrenadante)
- Se debe agregar una microcucharada azul raza con reactivo N –3k.
- Cerrar y agitar la cubeta vigorosamente mediante la pipeta sobre el reactivo en la

pared interna de la cubeta de reacción (se debe tener cuidado porque la cubeta se calienta)

- Dejar la cubeta caliente durante 10 minutos (no refrigerar con agua fría)
- Finalmente después de los 10 minutos se debe colocar la cubeta en el espectrofotómetro y se realiza la lectura de Nitrógeno total a una longitud de onda de 525 nm.

### **c) Determinación del nitrógeno en las muestras.**

Para determinar la cantidad de nitrógeno que tienen las muestras se debe considerar el factor de dilución.

$$C * F = C_N$$

Donde C corresponde a la concentración de lectura de la muestra

F es el factor de dilución.

$C_N$  es la concentración de la muestra

### **DETERMINACION DE DQO**

Este método se basa en la oxidación de la materia orgánica por el dicromato en medio de ácido sulfúrico, con lo cual el carbono es convertido en  $CO_2$  y el hidrógeno en agua. La cuantificación se realiza por colorimetría.

### **Reactivo y soluciones.**

- Agua para análisis, clase 2 según NCh 426/2.
- Dicromato de potasio, p.a.
- Sulfato demercurio, p.a.
- Sulfato de plata
- Ácido sulfurico, 98%
- Ftalato acido potasio
- Soluciones de digestión I
- Soluciones de digestión II
- Soluciones de digestión III
- Reactivo ácido sulfurico-sulfato de plata
- Solucion stock de Ftalato de potasio
- Solución estandar de Ftalato de potasio
- Solucion diluida de Ftalato de potasio

### **Aparatos y Equipos**

- Tubos de reacción
- Estufa de secado Espectrofotómetro
- Cubetas
- Mecropipeta

### **Preparación de Digestión**

- Colocar la muestra de agua en los tubos de reacción (5ml de muestra)
- Colocar los tubos en estufa o digestor y calentar 150°C por 2h.
- Enfriar los tubos a temperatura ambiente.

### **Procedimiento**

- Posteriormente colocar una porción de la digestión en una cubeta de medición.
- Medir la absorbancia a 600 nm. en el espectrofotómetro, contra un blanco de reactivo y confeccionar la curva de calibración.
- Calcular la DQO a partir de la curva de calibración preparada.

**APENDICE D**

**MATERIALES Y METODOLOGÍA**

**PARA CARACTERIZAR EL**

**TERRENO**

## **DETERMINACIÓN DE PROFUNDIDAD DE LAS NAPAS FREÁTICAS**

Para determinar la profundidad de las napas freáticas se debe realizar diferentes mediciones (excavaciones) en el terreno destinado para la implementación del sistema de tratamiento, para determinar a que distancia se encuentra el nivel del agua.

### **Materiales**

- Palas
- Equipo de trabajo
- Huincha Métrica

### **Procedimiento**

Utilizar las palas para excavar los hoyo profundos, hasta alcanzar el nivel freático, posteriormente utilizar la huincha métrica para medir la profundidad de las napas freáticas.

## **DETERMINACIÓN DE LA INFILTRACIÓN**

Para determinar la infiltración del terreno, se debe realizar diferentes mediciones (en terreno) de la velocidad con que el agua infiltra una determinada profundidad, para ello es necesario hacer, excavaciones de al menos 30 centímetros.

### **Materiales**

- Pala
- Equipo de trabajo
- Huincha Métrica y Cronómetro
- Agua

### **Procedimiento**

Con las palas realizar los diferentes hoyos (al menos 3), con un volumen establecido (utilizar la huincha), luego se satura el suelo y se le agrega el agua sobre los pequeño pozos, y con el cronómetro determinar el tiempo que transcurre en infiltrar el agua en el terreno.

## **APENDICE E**

### **MEMORIA DE CÁLCULO**

### **INGENIERIA DE DETALLE**

## MEMORIA DE CÁLCULO INGENIERIA DE DETALLE PARA LAS LAGUNAS ANAEROBIAS CUBIERTAS.

La ingeniería de detalle se efectuara solo para las lagunas anaerobias cubiertas, por ser las mas rentables técnicamente.

### **Cálculo de las dimensiones de la laguna anaerobia cubierta.**

A partir de la ecuación 42 (que se muestra a continuación) se calcularon las dimensiones de las lagunas anaerobias cubiertas.

$$V = \frac{1}{2} \cdot P \cdot \left[ L_b \cdot W_b + L_s \cdot W_s + (L_b \cdot W_b \cdot L_s \cdot W_s)^{0.5} \right]$$

Luego, conociendo el VMT (volumen mínimo de tratamiento), el cual corresponde a 1507 m<sup>3</sup>, la profundidad P de 2.7 m y considerando una relación 1:2 entre el área superficial y de la base se obtienen las dimensiones de la laguna.

$$1507 = \frac{1}{2} \cdot 2.7 \cdot \left[ L_b \cdot W_b + L_s \cdot W_s + (L_b \cdot W_b \cdot L_s \cdot W_s)^{0.5} \right]$$

Ahora como existen cuatro incógnitas se deben iterar los valores para obtener el volumen deseado. A partir de esta iteración se obtienen los siguientes valores (Ver Plano de detalle):

Dimensión	Unidad	Laguna 1	Laguna 2
$L_b$	m	17.87	17.87
$L_s$	m	35.75	35.75
$W_s$	m	17.87	17.87
$W_b$	m	8.93	8.93
P	m	2.7	2.7

### Cálculo canal abierto

El cálculo del canal abierto se hizo considerando las siguientes constantes:

- $n = 0.014$ , Concreto sin pulir
- $C_m = 1$  (SI)
- $S = 0.0001$  (Supuesto)
- $Q = 11.7 \text{ m}^3/\text{d} \approx 2.71\text{E-}4 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Luego se considero una forma rectangular y utilizando la ecuación 21 se obtuvieron los siguientes resultados:

$$A_x = b \cdot y + \frac{1}{2} \cdot y^2 (m_1 + m_2)$$

- $A_x = 0.058\text{m}$
- $b = 0.34\text{ m}$
- $y = 0.17\text{ m}$ .
- $L = 40\text{ m}$

El largo se estimo en 40 m para lograr un espacio suficiente entre ambas lagunas.

Además es preciso señalar que los canales abiertos se conectarán a u tuberías de PVC de 110 mm a la entrada de cada laguna (Ver Plano de detalle).

La cañería de PVC tendrá un largo de 6 m dentro de la laguna para que la descarga se realice de forma mas optima.

### **Recirculación de biogás**

La recirculación se biogás se efectuara a través de una cañería galvanizada de 1 pulgada, la cual cubrirá todo el contorno de las lagunas (Ver Plano de detalle).

### **Material de construcción**

La laguna se construirá de polietileno de alta densidad 1.5 mm de espesor. Este mismo espesor tendrá la cubierta (Ver Plano de detalle).

El polietileno se enterrara, dejando un espesor de 0.5m de borde.