



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE QUÍMICA

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS  
ALTERNATIVAS PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS  
GENERADOS EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES MUNICIPALES.

*TESIS*

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO

**PRESENTA**

**RAÚL ALBERTO FERES MAZARIEGOS**

**MÉXICO, D.F.**

**AÑO 2015**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: JOSÉ ANTONIO ORTÍZ RAMÍREZ  
**VOCAL:** Profesor: NÉSTOR NOÉ LÓPEZ CASTILLO  
**SECRETARIO:** Profesor: ALFONSO DURÁN MORENO  
**1° SUPLENTE:** Profesor: OSCAR DE ANDA AGUILAR  
**2° SUPLENTE:** Profesor: SERGIO ADRIÁN GARCÍA GONZÁLEZ

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO. CIUDAD UNIVERSITARIA. TORRE DE INGENIERÍA  
3ER PISO ALA SUR**

### **ASESOR DEL TEMA:**

**Dr. Alfonso Durán Moreno**

### **SUPERVISOR TÉCNICO:**

**M. en I. Beatriz García Villegas**

### **SUSTENTANTE:**

**Raúl Alberto Feres Mazariegos**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen .....	1
1 Introducción .....	2
1.1 Problemática.....	2
1.2 Objetivo general .....	3
1.3 Objetivos específicos.....	3
1.4 Alcances .....	3
1.5 Hipótesis.....	4
2 Antecedentes .....	5
2.1 Definiciones .....	5
2.2 Normatividad aplicable para la disposición de lodos en México .....	6
2.3 Producción de lodos en una planta de tratamiento de aguas .....	11
2.3.1 Naturaleza de los lodos residuales .....	12
2.4 Composición de los lodos residuales .....	13
2.4.1 Constituyentes específicos .....	14
2.4.2 Características físicas de los lodos.....	16
2.5 Cuantificación de lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas .....	16
2.5.1 Producción de lodos primarios.....	16
2.5.2 Lodos biológicos .....	19
2.5.2.1 Lodos activados .....	19
3 Tratamiento de lodos producto de una planta de tratamiento de aguas .....	23
3.1 Diagramas de flujo de procesamiento de lodos.....	25
3.2 Etapas en el tratamiento de lodos .....	27
3.2.1 Operaciones preliminares .....	27
3.2.2 Espesamiento .....	28
3.2.3 Estabilización.....	29
3.2.3.1 Digestión anaerobia .....	30
3.2.3.2 Digestión aerobia .....	37
3.2.3.3 Estabilización alcalina .....	42
3.2.4 Acondicionamiento .....	46
3.2.5 Deshidratación.....	47
3.2.6 Secado .....	49
3.2.7 Reducción térmica.....	49
3.2.8 Disposición .....	50

3.3	Análisis multicriterio .....	51
3.3.1	Definición .....	51
3.3.2	Proceso de toma de decisiones.....	51
4	Metodología .....	53
5	Caso de Estudio.....	56
6	Desarrollo.....	61
6.1	Simulación GPS-X.....	61
6.1.1	Simulación del clarificador primario .....	62
6.1.2	Simulación del reactor biológico. ....	64
6.1.3	Simulación del clarificador secundario.....	65
6.2	Diseño de los equipos de estabilización de lodos. ....	66
6.2.1	Digestión anaerobia.....	66
6.2.2	Digestión aerobia.....	68
6.2.3	Estabilización alcalina.....	70
6.3	Estimado de inversión a través del software Capdetworks®.....	71
6.3.1	Consideraciones generales. ....	71
6.3.2	Cálculo de costos para el proceso de digestión anaerobia.....	75
6.3.3	Cálculo de costos para el proceso de digestión aerobia.....	79
6.3.4	Cálculo de costos para el proceso de estabilización con cal .....	81
6.4	Análisis multicriterio .....	84
7	Resultados.....	89
7.1	Escenario 1.....	89
7.2	Escenario 2.....	91
7.3	Escenario 3.....	92
8	Análisis de resultados .....	95
8.1	Análisis de sensibilidad de criterios .....	96
8.1.1	Análisis de sensibilidad del Escenario 1 .....	97
8.1.2	Análisis de sensibilidad del Escenario 2 .....	99
8.1.3	Análisis de sensibilidad del Escenario 3 .....	101
9	Conclusiones .....	105
10	Bibliografía.....	107
11	Anexos .....	110

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Diagrama típico de una PTAN (Cardoso Vigueros & Ramírez González, 2012).....	12
Figura 2.	Diagrama de flujo general del tratamiento de lodos. (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).....	26
Figura 3.	Vista lateral e instalación típica de molinos de lodos (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).....	27
Figura 4.	Digestión anaerobia de alta tasa (U.S. EPA, 1979).....	32
Figura 5.	Digestión anaerobia de dos etapas (U.S. EPA, 1979).....	34
Figura 6.	Diagrama de flujo para el proceso de digestión aerobia. ....	39
Figura 7.	Proceso de toma de decisiones (Pérez, 2013).....	52
Figura 8.	Diagrama de bloques de las etapas desarrolladas durante el trabajo de tesis.....	55
Figura 9.	Esquema General de la Planta. ....	56
Figura 10.	Tren de Tratamiento de la PTAN.....	59
Figura 11.	Tren de tratamiento simulado en el software GPS-X. ....	61
Figura 12.	Actualización de los índices de costos. ....	73
Figura 13.	Caracterización de los lodos a tratar. ....	74
Figura 14.	Modelado del sistema de tratamiento de digestión anaerobia en Capdetworks®.....	75
Figura 15.	Parámetros de diseño del digester anaerobio alimentados a Capdetworks. ....	76
Figura 16.	Condiciones de temperatura del digester anaerobio alimentadas a Capdetworks. ....	77
Figura 17.	Dimensiones del digester anaerobio alimentadas a Capdetworks. ..	77
Figura 18.	Modelado del sistema de digestión aerobia en Capdetworks. ....	79
Figura 19.	Condiciones de operación del digester aerobio en Capdetworks.....	80
Figura 20.	Dimensiones del digester aerobio en Capdetworks. ....	80
Figura 21.	Esquema de manejo de lodos para la estabilización alcalina. ....	82
Figura 22.	Tabla de evaluación multicriterio introducida al software. ....	88
Figura 23.	Clasificación gráfica de las alternativas de estabilización de lodos a través de PROMETHEE I (Escenario 1).....	90
Figura 24.	Clasificación gráfica de las alternativas de estabilización de lodos a partir de PROMETHEE II (Escenario 1). ....	90
Figura 25.	Clasificación gráfica de las alternativas de estabilización de lodos a través de PROMETHEE I (Escenario 2).....	91
Figura 26.	Clasificación gráfica de las alternativas de estabilización de lodos a través de PROMETHEE II (Escenario 2).....	92

Figura 27.	Clasificación gráfica de las alternativas de estabilización de lodos a través de PROMETHEE I (Escenario 3).....	93
Figura 28.	Clasificación gráfica de las alternativas de estabilización de lodos a través de PROMETHEE II (Escenario 3).....	93
Figura 29.	Gráfica comparativa de la evaluación multicriterio de los tres escenarios propuestos. ....	94
Figura 30.	Gráfico de análisis de sensibilidad de los ponderados establecidos.	95
Figura 31.	Peso específico de los criterios en el Escenario 1. ....	97
Figura 32.	Análisis de sensibilidad de criterios técnicos (Escenario 1). ....	98
Figura 33.	Análisis de sensibilidad de criterios económicos (Escenario 1). ....	99
Figura 34.	Peso específico de los criterios en el Escenario 2. ....	100
Figura 35.	Análisis de sensibilidad de criterios técnicos (Escenario 2). ....	101
Figura 36.	Análisis de sensibilidad de criterios económicos (Escenario 2). ....	101
Figura 37.	Peso específico de los criterios en el Escenario 3. ....	102
Figura 38.	Análisis de sensibilidad de criterios técnicos (Escenario 3). ....	103
Figura 39.	Análisis de sensibilidad de criterios económicos (Escenario 3). ....	104
Figura 40.	Reducción de sólidos volátiles en un digestor aerobio.....	112
Figura 41.	Actualización de índices de costos.....	113

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003). .....	6
Tabla 2.	Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003). .....	7
Tabla 3.	Aprovechamiento de biosólidos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003). .....	7
Tabla 4.	Composición química y propiedades de lodo sin tratar y digeridos (Cardoso Vigueros & Ramírez González, 2012) .....	14
Tabla 5.	Concentraciones típicas de elementos en un lodo estabilizado y comparación con un fertilizante comercial (Cardoso Vigueros & Ramírez González, 2012) .....	15
Tabla 6.	Concentraciones de metales pesados en lodos en una planta típica de tratamiento de aguas (Cardoso Vigueros & Ramírez González, 2012) .....	15
Tabla 7.	Concentraciones típicas de diferentes tipos de lodos (Cardoso Vigueros & Ramírez González, 2012). .....	16
Tabla 8.	Cantidad de sólidos suspendidos y químicos removidos en un tanque hipotético de sedimentación primaria (Comisión Nacional del Agua, 2007) .....	18
Tabla 9.	Valores típicos de coeficientes para la estimación de la producción de lodos (Comisión Nacional del Agua, 2007). .....	20
Tabla 10.	Métodos de procesamiento de sólidos (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)	24
Tabla 11.	Métodos para espesamiento de lodos residuales. (Metcalf & Eddy, Inc., 2003). .....	29
Tabla 12.	Criterios de diseño típicos para dimensionamiento de digestores de lodo (Comisión Nacional del Agua, 2007) .....	35
Tabla 13.	Producción de biogás para diferentes compuestos en los lodos de aguas residuales (Comisión Nacional del Agua, 2007). .....	36
Tabla 14.	Resumen de criterios de diseño para digestores aerobios. (Comisión Nacional del Agua, 2007). .....	41
Tabla 15.	Dosis típicas de cal requerida para la estabilización de lodos (Metcalf & Eddy, Inc., 2003). .....	44
Tabla 16.	Densidad de bacterias en lodos crudos, digeridos anaerobios y estabilizados con cal (Comisión Nacional del Agua, 2007). .....	45
Tabla 17.	Niveles típicos de adición de polímero para acondicionamiento de lodos. (Metcalf & Eddy, Inc., 2003). .....	46
Tabla 18.	Comparación de las alternativas para la deshidratación de lodos (Metcalf & Eddy, Inc., 2003). .....	48

Tabla 19.	Datos de calidad de agua influente a la planta alimentados al software. .....	62
Tabla 20.	Parámetros físicos y operacionales del clarificador primario.....	63
Tabla 21.	Parámetros físicos y operacionales del reactor biológico.....	65
Tabla 22.	Parámetros físicos y operacionales del clarificador secundario. ....	65
Tabla 23.	Caracterización de lodos producidos por tren de tratamiento. ....	66
Tabla 24.	Criterios técnicos calculados para la digestión anaerobia.....	68
Tabla 25.	Criterios técnicos calculados para la digestión aerobia.....	69
Tabla 26.	Criterios técnicos calculados para la estabilización alcalina. ....	71
Tabla 27.	Parámetros de costos utilizados en el diseño de los equipos de estabilización (Comisión Nacional del Agua, 2007).....	72
Tabla 28.	Características del transporte de lodos al punto de disposición.....	74
Tabla 29.	Resultados de Capdetworks para la digestión anaerobia. ....	78
Tabla 30.	Indicadores de viabilidad económica para la digestión anaerobia. ..	78
Tabla 31.	Resultados de Capdetworks para la digestión aerobia. ....	81
Tabla 32.	Indicadores de viabilidad económica para la digestión aerobia. ....	81
Tabla 33.	Estimado de costos anuales para instalaciones de estabilización con cal (U.S. EPA, 1979). ....	81
Tabla 34.	Ajuste de capacidad de los costos para el proceso de estabilización alcalina. ....	82
Tabla 35.	Costos totales para el proceso de estabilización alcalina. ....	83
Tabla 36.	Indicadores de viabilidad económica para la estabilización alcalina.	83
Tabla 37.	Cuadro resumen de los criterios calculados para las alternativas de estabilización de lodos. ....	83
Tabla 38.	Definición de los criterios a evaluar en análisis multicriterio.....	84
Tabla 39.	Peso específico de los criterios a evaluar (Escenario 1).....	85
Tabla 40.	Peso específico de los criterios a evaluar (Escenario 2).....	86
Tabla 41.	Peso específico de los criterios a evaluar (Escenario 3).....	86
Tabla 42.	Resultados de evaluación de criterios (Escenario 1).....	89
Tabla 43.	Resultados de evaluación de criterios (Escenario 2).....	91
Tabla 44.	Resultados de evaluación de criterios (Escenario 3).....	92
Tabla 45.	Criterios de diseño para digestores aerobios.....	111
Tabla 46.	Actualización de índices de costos para la estimación de costos (Chemical Engineering, 2014).....	113
Tabla 47.	Flujos de efectivo para la digestión anaerobia. ....	114
Tabla 48.	Flujos de efectivo descontados para la digestión anaerobia. ....	115

## ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

CAE	Costo Anual Equivalente
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
DFP	Diagrama de Flujo de Proceso
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EPA	Environmental Protection Agency
$k_d$	Coefficiente de decaimiento endógeno
NMP	Número Más Probable
NOM	Norma Oficial Mexicana
PTAN	Planta de Tratamiento de Aguas Negras
$P_x$	Producción de lodos
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SHCP	Secretaría de Hacienda y Crédito Público
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica
TRS	Tiempo de Retención de Sólidos
USD	Dólares Estadounidenses
VPC	Valor Presente de los Costos
Y	Coefficiente de producción celular



## Resumen

En el presente trabajo, se planteó como objetivo proponer y evaluar técnica y económicamente las alternativas para el tratamiento de lodos generados en una planta de tratamiento de aguas negras. Dicho trabajo se justificó por la necesidad de brindar un tratamiento a los lodos producidos en la planta, ya que estos son considerados residuos peligrosos según lo establecido en la normatividad mexicana. Todo lo anterior es con la finalidad de que los lodos producidos reciban el tratamiento correspondiente y se pueda disponer de ellos sin generar un impacto al ambiente.

A partir de un software especializado de tratamiento de agua (GPS-X®) se estimó la cantidad de lodos producidos en la planta tomada como caso de estudio, y con base en los datos obtenidos en el programa se plantearon tres propuestas para la estabilización de los lodos.

Para este trabajo se analizaron tres alternativas: Digestión anaerobia, digestión aerobia y estabilización alcalina. Para cada una de las alternativas propuestas se realizó un diseño a nivel Ingeniería Conceptual con el fin de determinar cierto número de parámetros técnicos y económicos para poder comparar las alternativas y elegir la más viable.

A partir de una evaluación multicriterio se realizó la comparativa de las tres alternativas propuestas para el tratamiento de los lodos, planteando distintos escenarios en los cuales se variaron los pesos específicos de cada uno de los criterios de evaluación establecidos para determinar el impacto de los mismos en la toma de decisión de la mejor alternativa de tratamiento.

Analizando los escenarios propuestos a partir de un análisis de sensibilidad, se determinó como afecta la variación de los pesos específicos de los criterios sobre la evaluación de las alternativas, concluyendo con la selección de las mejores alternativas para la implementación del sistema de tratamiento de lodos que permite alcanzar los objetivos propuestos.

Finalmente se determinó que las alternativas más viables para el tratamiento de lodos son la digestión anaerobia y la estabilización alcalina. La decisión de la mejor alternativa dependerá del peso específico que se le dé a cada uno de los criterios.



## **1 Introducción**

Actualmente, los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales son considerados residuos peligrosos, de acuerdo a lo establecido en la norma NOM-052-SEMARNAT-2005.

Sin embargo, los lodos poseen características benéficas que pueden ser aprovechadas, como el contenido de nutrientes y materia orgánica. Esto permite que una vez tratados, los lodos sean aprovechados benéficamente como fertilizantes, mejoradores de suelos o cubiertas para rellenos sanitarios, según lo establecido en la NOM-004-SEMARNAT-2002.

### **1.1 Problemática**

Hoy en día, la necesidad de minimizar residuos, así como su disposición adecuada y segura son aspectos de suma importancia mundialmente, lo que ha llevado a la búsqueda de alternativas tecnológicas y cambios en las políticas de manejo, que permitan generar residuos no peligrosos y estables para su correcta disposición o aprovechamiento.

En México, el manejo de lodos residuales municipales e industriales es un aspecto descuidado y son pocas las plantas de tratamiento de aguas residuales que cuentan con un tratamiento de lodos, además, no existen cifras exactas referentes a la cantidad de lodos generados a nivel municipal e industrial (García, 2006). El principal problema del manejo de lodos en el país es el alto contenido microbiológico y la humedad que presentan (Barrios. J.A., 2000).

A pesar de esta problemática, gran parte de los lodos generados son descargados al drenaje o son desechados sin ningún tratamiento previo. Es por ello que se necesitan implementar sistemas para darle un correcto tratamiento y disposición a los lodos y biosólidos generados en las planta de tratamiento de aguas negras, y así estos puedan ser dispuestos sin generar un daño al medio ambiente.



## 1.2 Objetivo general

Plantear y evaluar alternativas de un sistema de tratamiento de lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas negras; mediante un estudio técnico-económico con el fin de seleccionar el escenario más viable.

## 1.3 Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico operativo de la planta de tratamiento de aguas negras a partir de un software especializado, para determinar la producción de lodos residuales y sus características.
- Proponer alternativas para el tratamiento de lodos considerando sus aspectos técnicos y económicos con el fin de determinar su viabilidad.
- Evaluar las alternativas propuestas mediante un programa de evaluación multicriterio que permita la selección de la mejor alternativa de tratamiento.

## 1.4 Alcances

- 1) Elaborar la simulación del tren de tratamiento de agua negra de la planta a partir del software GPS-X, para determinar la producción de lodos y obtener una caracterización de los mismos.
- 2) Realizar un estudio de factibilidad de la implementación de un sistema de tratamiento de lodos, los cuales se producen en una planta de tratamiento de aguas negras municipales (PTAN).
- 3) Establecer los criterios mínimos que se deben tomar en cuenta para la instalación de un sistema de tratamiento de lodos generados en una PTAN.
- 4) Elaborar un análisis de sensibilidad de los criterios evaluados en el análisis multicriterio para determinar el grado de afectación de cada uno en la toma de decisiones.



## 1.5 Hipótesis

Si se establece una evaluación multicriterio para determinar la mejor alternativa de estabilización de lodos, está puede arrojar dos alternativas como más viables; una en favorable en los aspectos técnicos y una en los aspectos económicos. Entonces, la decisión de la mejor alternativa de tratamiento de lodos dependerá del cliente al que se le desee implementar este sistema de tratamiento y este decidirá a qué criterios se le da un mayor peso específico.



## 2 Antecedentes

### 2.1 Definiciones

- Aguas residuales: Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, agropecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y, en general, de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003).
- Lodos: Son sólidos con un contenido variable de humedad, proveniente del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a un proceso de estabilización (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003).
- Biosólidos: Lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, puedan ser susceptibles de aprovechamiento (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003).
- Atracción de vectores: Es la característica de los lodos para atraer vectores como roedores, moscas, mosquitos u otros organismos capaces de transportar agentes infecciosos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003).
- Aprovechamiento: Es el uso de los biosólidos como mejoradores o acondicionadores de los suelos por su contenido de materia orgánica y nutrientes, o en cualquier actividad que represente un beneficio (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003).



## 2.2 Normatividad aplicable para la disposición de lodos en México

### - NOM-004-SEMARNAT-2002.

En la norma oficial mexicana “Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final” se encuentran las siguientes especificaciones:

- a) Las personas físicas o morales interesadas en llevar a cabo el aprovechamiento o disposición final de los lodos y biosólidos a los que se refiere la norma, deberá recabar la constancia de no peligrosidad de los mismos (SEMARNAT-07-007)
- b) Los generadores de lodos y biosólidos deben controlar la atracción de vectores, demostrando su efectividad. Para esto, se deben conservar los registros de control por lo menos durante los siguientes cinco años posteriores a su generación.
- c) Para efectos de la norma, los biosólidos se clasifican en tipo: excelente y bueno. Esta clasificación se asigna en función de su contenido de metales pesados, patógenos y parásitos.

En la Tabla 1 y Tabla 2 se muestran los límites máximos permisibles para metales pesados y patógenos respectivamente.

**Tabla 1. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003).**

Contaminante (Determinados de forma total)	Excelentes (mg/kg base seca)	Buenos (mg/kg base seca)
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500



**Tabla 2. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003).**

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales (NMP/g base seca)	<i>Salmonella spp.</i> (NMP/g base seca)	Huevos de helmintos/g base seca
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

Para el aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y clase (Tabla 1 y Tabla 2), el cual se especifica en la Tabla 3.

**Tabla 3. Aprovechamiento de biosólidos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003).**

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación. Los establecidos para clase B y C
Excelente o Bueno	B	Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación. Los establecidos para clase C.
Excelente o Bueno	C	Usos forestales Mejoramiento de suelos Usos agrícolas

De igual manera, en esta norma oficial se especifican opciones para reducir el contenido de patógenos en los lodos, esto con el fin de garantizar su calidad y posterior aprovechamiento. Las opciones especificadas son las siguientes:



- **Opción 1: Reducción en el contenido de sólidos volátiles.**

La atracción de vectores se reduce si la masa de sólidos volátiles en los biosólidos es reducida por lo menos un 38% durante su tratamiento. Este porcentaje es equivalente al conseguido mediante digestión aerobia o anaerobia más alguna reducción adicional que ocurra después de que los biosólidos salen de las instalaciones de estabilización, tales como el procesamiento en lechos de secado o mediante composteo.

- **Opción 2: Digestión adicional de los biosólidos digeridos anaerómicamente.**

Frecuentemente, los biosólidos son reciclados a través del tratamiento biológico de las aguas residuales o han pasado durante largos periodos por los sistemas de alcantarillado. Durante este tiempo, sufren una degradación biológica considerable. Si los biosólidos son tratados subsecuentemente mediante digestión anaerobia, su atracción de vectores será reducida adecuadamente.

- **Opción 3: Digestión adicional de los biosólidos digeridos aerómicamente.**

Esta opción es apropiada para los biosólidos digeridos aerómicamente que no cumplen con lo establecido en la Opción 1. Incluye a aquellos sólidos producidos por plantas de aireación extendida donde el tiempo mínimo de residencia para los biosólidos generalmente excede a 20 días.

Bajo esta opción, se considera que los biosólidos digeridos aerómicamente con 2% de sólidos o menos, han logrado la reducción de atracción de vectores si después de 30 días de digestión aerobia en pruebas de laboratorio a 20 °C, la reducción de sólidos volátiles es menos de 15%.

- **Opción 4: Procesos aerobios a más de 40 °C.**

Esta opción se aplica principalmente a los biosólidos composteados que contienen agentes abultadores orgánicos parcialmente descompuestos. Los biosólidos deben



ser tratados por 14 días como mínimo, tiempo durante el cual la temperatura siempre debe ser superior a las 40 °C.

- **Opción 5: Adición de materia alcalina.**

Se considera que los biosólidos reducen adecuadamente su atracción de vectores si se adiciona suficiente materia alcalina para lograr lo siguiente:

Elevar el pH por lo menos a 12, medido a 25 °C, sin la adición de más materia alcalina y mantener el pH por 2 horas.

Mantener un pH de al menos 11.5 sin la adición de más materia alcalina durante otras 22 horas.

Estas condiciones permiten garantizar que los biosólidos puedan ser almacenados por lo menos durante varios días en las instalaciones de tratamiento, transportados y posteriormente aplicados sin que el pH descienda a niveles en los que ocurre la putrefacción y se atraigan vectores.

- **Opción 6: Reducción en la humedad de biosólidos que no contienen sólidos sin estabilizar.**

Se considera que la atracción de vectores se reduce si los biosólidos no contienen sólidos sin estabilizar generados durante el tratamiento primario y su contenido de sólidos es de por lo menos 75% antes de ser mezclados con otros materiales. Por consiguiente, la reducción debe lograrse removiendo agua y no mediante la adición de materiales inertes.

Es importante que los sólidos no contengan materia sin estabilizar porque los residuos incluidos en los biosólidos pueden provocar la atracción de vectores.

- **Opción 7: Reducción en la humedad de biosólidos que contienen sólidos no estabilizados.**

Se considera que el potencial de atracción de vectores de los biosólidos se reduce adecuadamente si su contenido de sólidos se incrementa al 90% o más, sin importar la fuente de la que provengan. El incremento debe conseguirse a partir de la remoción de agua y no mediante la dilución con sólidos inertes. El secado hasta



este punto limita de manera importante la actividad biológica y destroza o descompone los compuestos volátiles que atraen vectores.

- **Opción 8: Tasa específica de absorción de oxígeno (TEAO) para biosólidos digeridos aeróbicamente.**

Frecuentemente, los biosólidos digeridos aeróbicamente son circulados a través de los procesos biológicos de tratamiento aerobio de las aguas residuales hasta por 30 días. En estos casos, los biosólidos que entran al digestor aerobio ya están parcialmente digeridos, lo cual dificulta cumplir con la Opción 1.

La Tasa Específica de Absorción de Oxígeno (TEAO) es la masa de oxígeno consumida por unidad de tiempo y por unidad de masa en peso seco de los sólidos totales de los biosólidos. La reducción en la atracción de vectores puede demostrarse si la TEAO de los biosólidos que son aplicados, determinada a 20 °C, es igual o menor de 1.5 mg de O<sub>2</sub>/h/g de sólidos totales (peso seco).

Esta prueba se basa en el hecho de que, si los biosólidos consumen muy poco oxígeno, su valor como fuente alimenticia para los microorganismos es muy baja como para atraerlos. Esta prueba solo es aplicable a los biosólidos aerobios.

- **Opción 9: Incorporación de biosólidos al suelo.**

Los biosólidos deben ser incorporados al suelo dentro de las 6 horas posteriores a su aplicación sobre el terreno. La incorporación se consigue arando o mediante algún otro método que mezcle los biosólidos con el suelo. Si los biosólidos son Clase A con respecto a patógenos, el tiempo entre la aplicación y el procesado no debe exceder de 8 horas.



### 2.3 Producción de lodos en una planta de tratamiento de aguas

Los elementos contaminantes separados del líquido a través de sedimentación o flotación durante el tratamiento de agua, independientemente de la naturaleza de estos contaminantes, será recolectada en una suspensión llamada “lodos” (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).

La característica en común de todos estos lodos es que producen un residuo que es todavía muy líquido (0.5-5% de sólidos suspendidos en la mayoría de los casos), el cual contendrá:

- Sólidos suspendidos que sedimentarán naturalmente
- Productos resultantes del uso de tratamientos químicos (floculación, neutralización, precipitación, etc.) Ej. Hidróxido de hierro o aluminio, otros hidróxidos metálicos, productos cristalinos como carbonatos, sulfatos de calcio, fosfatos de hierro, etc.
- Exceso de lodos biológicos producto de cualquier tratamiento biológico, que contienen exceso de biomasa y sólidos que no son biodegradables pero que han sido atrapados con los flóculos bacterianos.

Algunos lodos son inertes, pero incluso los lodos con un bajo contenido de materia orgánica y los lodos biológicos se convertirán en fermentables y desprenderán un mal olor después de cierto tiempo (mientras más alta sea la temperatura, dicho tiempo es menor). Por lo tanto, el lodo necesita ser “estabilizado”.

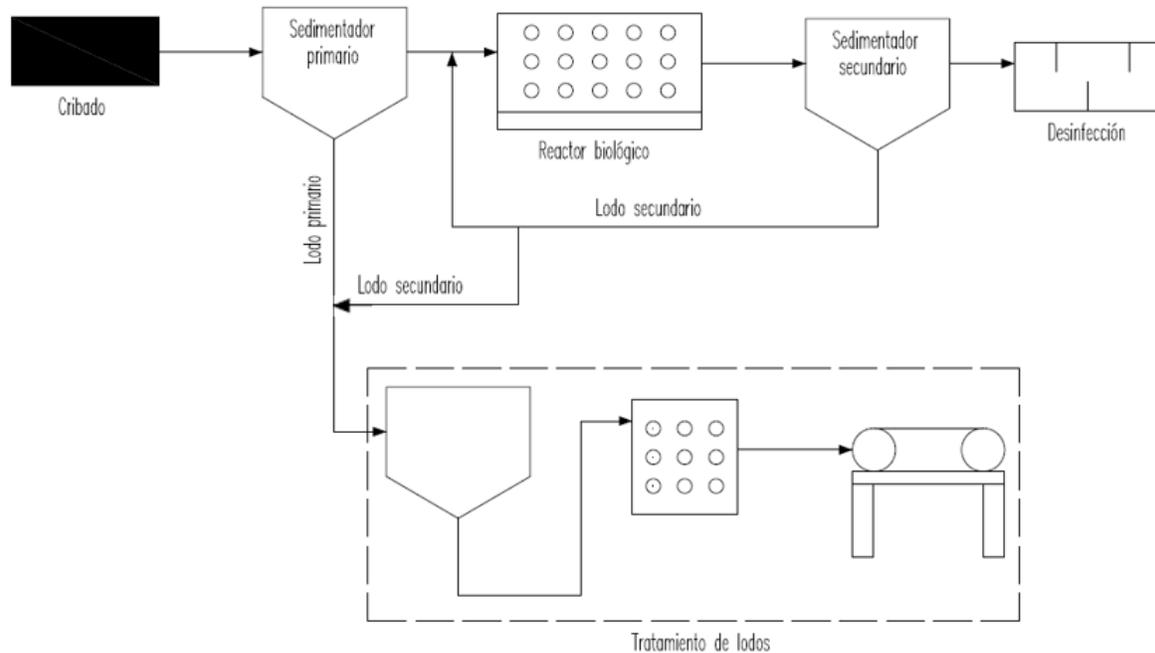
Todos los lodos necesitan un tratamiento específico para que sean reciclados, reutilizados o dispuestos en un ambiente natural. Este tratamiento consiste en concentrar/eliminar el agua (espesamiento seguido de deshidratación) y estabilización.

El tratamiento de lodos se ha convertido en un corolario inevitable que no puede ser separado del tratamiento de agua. Algunas veces, el tratamiento de lodos puede ser más costoso (costos de inversión y operación) que el mismo tratamiento de agua (Comisión Nacional del Agua, 2007).



### 2.3.1 Naturaleza de los lodos residuales

En la Figura 1 se muestra un diagrama típico de una planta de tratamiento secundario o biológico, en ella se distinguen las distintas unidades de proceso y se señalan las fuentes de lodos primarios y secundarios y el sistema de tratamiento de lodos.



**Figura 1. Diagrama típico de una PTAN (Cardoso Vigueros & Ramírez González, 2012)**

De acuerdo con el tren de tratamiento, los lodos generados son: primarios o secundarios. En otros procesos de tratamiento se pueden generar lodos químicos (Degrémont, 2007).

- **Lodos primarios:** Son aquellos que se extraen de los sedimentadores primarios. Consisten principalmente en arena fina, sólidos inorgánicos y sólidos orgánicos (Cardoso Vigueros & Ramírez González, 2012).
- **Lodos secundarios:** Son los lodos en exceso generados en el tratamiento secundario biológico. Los lodos secundarios consisten en lodos biológicos, resultado de la conversión de productos de desechos solubles de efluentes primarios y partículas que escapan al tratamiento primario. Los lodos secundarios son producidos por procesos de tratamiento biológico secundario, lodos activados, filtros rociadores y biodiscos entre otros.



Aunque pueden producirse muchas variaciones, todos los lodos secundarios resultan de un tratamiento biológico de aguas residuales (Cardoso Vigueros & Ramírez González, 2012).

- **Lodos mixtos:** Es la combinación de lodos primarios y secundarios, que tendrán propiedades aproximadamente proporcionales a la respectiva composición de cada tipo (Cardoso Vigueros & Ramírez González, 2012).
- **Lodos químicos:** Resultan cuando se agregan sales de aluminio o hierro y/o cal en tratamientos de agua residual para mejorar la remoción de los sólidos suspendidos o para precipitar algún elemento. Las variables que afectan las características de los lodos químicos son: la química del agua, pH, mezclado, tiempo de reacción y forma de floculación, entre otras (Cardoso Vigueros & Ramírez González, 2012).

#### 2.4 Composición de los lodos residuales

Muchos de los constituyentes químicos (Tabla 4), incluyendo nutrientes, son importantes para considerar el uso final de los lodos procesados y del líquido separado durante el proceso. La medida de pH, alcalinidad y contenido de ácidos orgánicos son parámetros importantes en el control del proceso de la digestión anaerobia. El contenido de metales pesados, pesticidas e hidrocarburos tienen que determinarse cuando se considera la incineración y la aplicación en suelos. El contenido de energía en lodos es importante si se contempla un proceso de reducción térmica.



**Tabla 4. Composición química y propiedades de lodo sin tratar, digeridos y secundarios crudos (Cardoso Vigueros & Ramírez González, 2012)**

Concepto	Lodos primarios sin tratar		Lodos primarios digeridos		Lodos secundarios crudos
	Rango	Típico	Rango	Típico	Rango
Sólidos totales secos (ST), %	5-9	6	2-5	4	0.8-1.2
Sólidos volátiles (% de ST)	60-80	65	30-60	40	59-88
Aceites y grasas (% de ST)					
Éter soluble	6-30	-	5-20	18	-
Extracto de éter	7-35	-	-	-	5-12
Proteínas (% de ST)	20-30	25	15-20	18	32-41
Nitrógeno (N, % de ST)	1.5-4	2.5	1.6-3.0	3	2.4-5.0
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , % de ST)	0.8-2.8	1.6	1.5-4.0	2.5	2.8-11
Potasio (K <sub>2</sub> O, % de ST)	0-1	0.4	0-3.0	1	0.5-0.7
Celulosa (% de ST)	8-15	10	8-15	10	-
Hierro (no como sulfato), %	2.0-4.0	2.5	3.0-8.0	4	-
Silicio (SiO <sub>2</sub> , % de ST)	15.0-20.0	-	10-20	-	-
pH	5.0-8.0	6	6.5-7.5	7	6.5-8.0
Alcalinidad (mg/L como CaCO <sub>3</sub> )	500-1500	600	2500-3500	3000	580-1100
Ácidos orgánicos (mg/L)	200-2000	500	100-600	200	1100-1700
Contenido de energía, (kJ <sub>ST</sub> /kg)	23000-29000	25000	9000-14000	12000	19000-23000

#### 2.4.1 Constituyentes específicos

Las características de los lodos que afectan su aptitud para la aplicación en suelos y usos benéficos, incluyen contenido orgánico, nutrientes, patógenos, metales pesados y orgánicos tóxicos. El valor fertilizante del lodo se basa, principalmente, en el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio. La Tabla 5 muestra las concentraciones típicas de estos elementos en un lodo estabilizado y los compara con los de un fertilizante comercial.



**Tabla 5. Concentraciones típicas de elementos en un lodo estabilizado y comparación con un fertilizante comercial (Cardoso Vigueros & Ramírez González, 2012)**

Producto	Nutrientes (%)		
	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
Fertilizantes	5	10	10
Lodos biológicos estabilizados	3.3	2.3	0.3

Los elementos traza en los lodos son aquellos elementos químicos que, en muy pequeñas cantidades, son esenciales para plantas y animales; algunos de dichos elementos, cuando están presentes en concentraciones mayores, se vuelven perjudiciales. Tal es el caso de los metales pesados, por ello, el contenido de estos últimos puede limitar la aplicación de lodos en el suelo.

Las concentraciones de metales pesados en un lodo digerido proveniente de una planta típica de aguas municipales se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6. Concentraciones de metales pesados en lodos en una planta típica de tratamiento de aguas (Cardoso Vigueros & Ramírez González, 2012)**

Metal	Sólidos secos (mg/kg)	
	Intervalo	Media
Arsénico	1.1-230	10
Cadmio	1-3,410	10
Cromo	10-99,000	500
Cobalto	11.3-2,490	30
Cobre	84-17,000	800
Estaño	2.6-329	14
Hierro	1,000-154,000	17,000
Plomo	16-26,000	500
Manganeso	32-9,870	260
Mercurio	0.6-54	6
Molibdeno	0.1-214	4
Níquel	2-5,300	80
Selenio	1.7-17.2	5
Zinc	101-49,000	1,700



## 2.4.2 Características físicas de los lodos

Los lodos de purga son una mezcla de sólidos sedimentables y agua, las concentraciones son variables dependiendo del tipo de lodo (primario, secundario, mixto o químico); la Tabla 7 presenta las concentraciones típicas de diferentes tipos de lodos.

**Tabla 7. Concentraciones típicas de diferentes tipos de lodos (Cardoso Vigueros & Ramírez González, 2012).**

Tipo de lodo	Concentración de sólidos % de sólidos (peso seco)	
	Intervalo	Concentración típica
Primario	5.0-9.0	6.0
Primario + purga de lodo activado	3.0-8.0	4.0
Primario + purga de filtro percolador	4.0-9.0	5.0
Primario avanzado (con cloruro férrico)	0.5-3.0	2.0
Primario avanzado (con cal en baja concentración)	2.0-8.0	4.0
Primario avanzado (con cal en alta concentración)	4.0-10.0	8.0
Lodo activado convencional (después de sedimentador primario)	0.5-1.5	0.8
Filtro percolador (después del sedimentador primario)	1.0-3.0	1.5
Disco biológico (después de sedimentación primaria)	1.0-3.0	1.5

Como se observa en la Tabla 7, la cantidad de sólidos es relativamente pequeña. Esto indica que el contenido de agua es muy alto, por lo que es necesario concentrar los sólidos antes de estabilizarlos; para ello se aplica el espesamiento.

## 2.5 Cuantificación de lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas

### 2.5.1 Producción de lodos primarios

La producción de lodo primario está generalmente en el ámbito de 100 a 300 mg/L. Para estimar la producción de lodo primario para determinada planta, se requiere calcular la cantidad de sólidos suspendidos totales (SST) que entran al tanque de sedimentación primaria y suponer una eficiencia de remoción. Cuando no hay disponibles datos específicos del sitio para los SST influentes, frecuentemente se



utilizan valores de 0.07 a 0.11 kg/cápita/d (Comisión Nacional del Agua, 2007). La eficiencia de remoción de SST en el tanque de sedimentación primaria normalmente es del orden de un 50 a un 65% (Comisión Nacional del Agua, 2007). La eficiencia de remoción en la sedimentación primaria depende, en gran parte, de la naturaleza de los sólidos. Se utiliza frecuentemente una eficiencia del 60%, asumiendo las siguientes consideraciones:

- El lodo es producido en el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico, sin mayor aportación de descargas industriales.
- El lodo no contiene coagulantes químicos ni floculantes.
- Ningún otro lodo ha sido agregado al influente de la planta.
- El lodo no contiene mayores corrientes colaterales del procesado de lodo.

Si existen datos disponibles sobre la concentración de sólidos suspendidos en el influente, dichos datos deben ser utilizados para el diseño. El uso de los registros de operación de tanques en servicio o pruebas de laboratorio pueden refinar los datos de eficiencia.

El "Método Estándar" de la prueba de peso seco para materia sedimentable bajo condiciones ideales estima la cantidad de lodo producido en un tanque de sedimentación ideal. La producción de lodo será ligeramente menor en un tanque verdadero de sedimentación (Comisión Nacional del Agua, 2007).

La cantidad de lodo extraído del tanque de sedimentación primaria se incrementa substancialmente cuando las corrientes colaterales del proceso de tratamiento de lodos son reciclados al tanque de sedimentación primaria. La cuantificación de los sólidos que entran y salen del clarificador primario por medio de todas las corrientes es una herramienta importante para estimar la producción de lodo primario, cuando los lodos reciclados y las corrientes colaterales contribuyen grandes cantidades de sólidos.

La cantidad de sólidos suspendidos y sólidos químicos removidos en un tanque de sedimentación primaria hipotético, que procesa agua residual, la cual ha sido tratada mediante la adición de cal, el sulfato de aluminio o cloruro férrico son estimados en la Tabla 8.



**Tabla 8. Cantidad de sólidos suspendidos y químicos removidos en un tanque hipotético de sedimentación primaria (Comisión Nacional del Agua, 2007)**

Tipo de Lodo	Sin adición de Químicos	Adición de químicos		
		Cal <sup>c</sup>	Alumbre <sup>d</sup>	Hierro <sup>e</sup>
Sólidos Suspendidos (kg/m <sup>3</sup> )	0.125	0.187	0.187	0.187
Sólidos Químicos (kg/m <sup>3</sup> )	-----	0.25	0.043	0.055
Producción Total de Lodos (kg/m <sup>3</sup> )	0.125	0.437	0.23	0.242

<sup>a</sup> Supone una concentración de 10 mg/L de fósforo influente como P, con el 80% removido mediante precipitación química.

<sup>b</sup> Supone una remoción del 50% de 250 mg/L de SST influente, en la sedimentación primaria.

<sup>c</sup> 125 mg/L de Ca(OH)<sub>2</sub> adicionado para elevar el pH a 9.5.

<sup>d</sup> 154 mg/L de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>•14H<sub>2</sub>O adicionado.

<sup>e</sup> 84 mg/L de FeCl<sub>3</sub> adicionado.

Nota: No supone la recirculación de corrientes colaterales. La producción de sólidos secundarios sería reducida de 0.10 kg/m<sup>3</sup> sin la adición de químicos; a 0.04 kg/m<sup>3</sup> con la adición de químicos en esta planta hipotética.

### Propiedades de concentración de lodos primarios

La mayoría de los lodos primarios pueden ser concentrados fácilmente dentro de los tanques de sedimentación. Se puede obtener una concentración de sólidos entre el cinco y seis por ciento, cuando el lodo es bombeado de tanques de sedimentación bien diseñados. Sin embargo, valores tanto mayores como inferiores son comunes.

Las condiciones que influyen sobre la concentración de lodos son:

- El agua residual no es desarenada antes de entrar a los tanques de sedimentación.
- Si el lodo contiene grandes cantidades de sólidos finos no volátiles, como limo, del influente pluvial, se puede lograr una concentración arriba del seis por ciento.
- Descargas de corrientes industriales.
- Si se mezclan lodos biológicos con la corriente de agua residual, generalmente resultará una concentración menor de lodo primario.



## 2.5.2 Lodos biológicos

Los lodos biológicos son producidos por procesos de tratamiento tales como lodos activados, filtros percoladores y biodiscos. Las cantidades y características de los lodos biológicos varían con las tasas metabólicas y de crecimiento de los diferentes microorganismos presentes en el lodo.

Las plantas con sedimentación primaria normalmente producen un lodo biológico bastante puro. La concentración y, por tanto, el volumen de lodo biológico purgado son afectados por el método de operación de los clarificadores. Los lodos biológicos generalmente son más difíciles de espesar y deshidratar, que el lodo primario y la mayoría de los lodos químicos (Comisión Nacional del Agua, 2007).

### 2.5.2.1 Lodos activados

Existen diferentes métodos para llevar a cabo el proceso de lodos activados: aireación extendida, zanja de oxidación, oxígeno puro, aireación mecánica, aireación por difusión, flujo en pistón, estabilización por contacto, mezcla completa, alimentación por etapas, lodo activado nitrificante, etc.

La cantidad de lodo activado purgado es afectada por dos parámetros: el peso seco y la concentración del lodo.

### Ecuaciones básicas de estimación de la producción de lodos

Las variables más importantes para predecir la producción de lodo activado purgado son la cantidad de orgánicos removidos en el proceso, la masa de microorganismos en el sistema, los sólidos suspendidos inertes en el influente al proceso biológico y la pérdida de sólidos suspendidos en el efluente.

Para la estimación de la producción de lodos se emplea la siguiente ecuación:

$$P_x = \frac{(Y)(S_r)}{[1+(k_d)(\theta_m)]} \quad (1)$$

Donde:

- $P_x$  = Producción neta de sólidos biológicos expresado como sólidos suspendidos volátiles (SSV), kg/día;
- $Y$  = Coeficiente de producción celular,  $\text{kg}_{\text{SSV}}/\text{kg}_{\text{DBO}}$ ;



**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS  
ALTERNATIVAS PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS  
EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES**

$S_r$  = Sustrato removido ( $DBO_5$ ), kg/día;

$k_d$  = Coeficiente de decaimiento endógeno, día<sup>-1</sup>;

$\theta_m$  = Edad del lodo, días;

Para usar la ecuación 1, es necesario obtener valores de  $Y$  y  $k_d$ . En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se resumen distintos valores reportados para estos parámetros.

**Tabla 9. Valores típicos de coeficientes para la estimación de la producción de lodos (Comisión Nacional del Agua, 2007).**

Coeficiente de producción celular $Y$ ( $kg_{SSV}/kg_{DBO}$ )	Coeficiente de decaimiento endógeno $k_d$ (día <sup>-1</sup> )	Tipo de Agua Residual	Escala de Planta	Aireación	Temperatura (°C)	Edad de Lodos (días)
0.5	0.055	Efl. Primario	Lab.	Aire	19-22	2.8-22
0.7	0.04	Efl. Primario	Piloto	Oxígeno	No esp.	1-4
0.67	0.06	Efl. Primario	Real	Aire	18-27	1.2-8
0.73	0.075	Efl. Primario	Piloto	Aire	10-16	1-12
0.94	0.14	Efl. Primario (Licores de desaguado)	Piloto	Aire	15-20	0.5-8
0.73	0.06	Efl. Primario	Piloto	Oxígeno	18-22	2.5-17
0.5	Despreciable	Efl. Primario	Piloto	Aire	0-7	Elevado
0.74	0.04	Efl. Primario (Industria)	Piloto	Oxígeno	17-25	2.1-5
1.57	0.07	Crudo desarenado	Piloto	Aire	15-20	0.6-3
1.825	0.2	Crudo desarenado	Lab.	Aire	4-20	1-3
0.65	0.043	Crudo desarenado	Lab.	Aire	20-21	11 y más
0.7	0.048	Crudo desarenado	Lab.	Aire	20-21	Elevado
0.54	0.014	Crudo desarenado	Real	Aire	No esp.	Elevado
1.1	0.09	Crudo	Real	Aire	No esp.	1.1-2.4



### **Efecto de la nitrificación en la producción de lodos**

La nitrificación consiste en la oxidación biológica del nitrógeno amoniacal y orgánico presente en el agua residual, a nitratos y nitritos. Estos procesos son operados con un alto valor de edad de lodo ( $\theta_m$ ) y una baja relación de alimento de microorganismos (F/M).

Comúnmente, los procesos de nitrificación son precedidos por procesos donde se disminuye el contenido de materia orgánica y sólidos en suspensión. Debido a esto, el lodo purgado en los procesos de nitrificación es mucho menor que en el proceso convencional de lodos activados.

En el caso de los procesos nitrificantes, existe un componente adicional en los lodos que debe tomarse en cuenta, el rendimiento neto de bacterias nitrificantes,  $Y_n$ . Este se puede estimar a razón de 0.15 kg<sub>SST</sub> por kg de nitrógeno total Kjeldahl removido (NTK). Este parámetro presenta variaciones con la temperatura, pH, oxígeno disuelto y tiempo de residencia celular. Sin embargo, se requieren mediciones de dicho parámetro para el diseño de instalaciones de lodo con estos procesos.

En procesos de nitrificación de una sola etapa, las cifras de producción de lodo también deben considerar los sólidos producidos por la oxidación de materia carbonosa, calculados a partir de la  $\theta_m$  y F/M correspondientes.

### **Efectos de la temperatura en la producción de lodos**

Los coeficientes de producción celular ( $Y$ ) y decaimiento endógeno ( $k_d$ ) están relacionados con la actividad biológica y, por consiguiente, varían con respecto a la temperatura del agua residual. Para determinar dicha variación, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Comúnmente, la temperatura del agua residual se encuentra en el rango de 15 °C a 22 °C, por lo que dentro de este rango no es necesario hacer correcciones por temperatura. Esta situación es considerada como el caso base.



ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS  
ALTERNATIVAS PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS  
EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

---

- Si la temperatura del agua residual se encuentra en el rango de 10 °C a 15 °C, se recomienda utilizar el mismo valor de  $k_d$  que en el caso base. Para el valor de  $Y$ , este se debe incrementar en un 26%.
- Cuando el agua residual se encuentra por debajo de los 10 °C, se debe esperar una mayor producción de lodo, pero esta cantidad no puede ser estimada con precisión debido a que existe muy poca información disponible. Para estas condiciones se requieren estudios a nivel planta piloto.
- Si la temperatura del agua residual excede los 22 °C, se pueden utilizar los mismos valores para los coeficientes que en el caso base. Cabe señalar que el diseño de los equipos puede resultar conservador (Comisión Nacional del Agua, 2007).



### **3 Tratamiento de lodos producto de una planta de tratamiento de aguas**

Los principales constituyentes eliminados en las plantas de tratamiento de agua incluyen basuras, arena, espumas y lodos. Los lodos resultantes de los procesos y operaciones de las plantas de tratamiento de aguas usualmente están en forma líquida o líquido-semisólido, con un contenido de sólidos entre 0.25 a 12% en peso, dependiendo de los procesos utilizados en el tratamiento de agua.

El lodo es, por mucho, el constituyente de mayor volumen eliminado en el tratamiento de agua; por lo que su procesamiento, reúso y disposición probablemente represente el problema más complejo al que se enfrentan los ingenieros en el tratamiento de aguas residuales.

El lodo está formado principalmente por las sustancias que le dan el carácter ofensivo al agua residual sin tratar; la porción de lodos producida en el tratamiento biológico está compuesta de materia orgánica contenida en el agua residual, y solo una pequeña fracción es materia sólida (Comisión Nacional del Agua, 2007).

Las operaciones utilizadas para el procesamiento de lodos son descritas en la Tabla 10.



**Tabla 10. Métodos de procesamiento de sólidos (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)**

Unidad de Operación, Unidad de Proceso o Método de tratamiento	Función
Bombeo	Transporte de lodos y biosólidos
Operaciones preliminares:	
Molido	Reducción de tamaño de partículas
Cribado	Remoción de materiales fibrosos
Desarenado	Remoción de arena
Mezclado	Homogenización de corrientes de lodo
Almacenamiento	Ecualización de flujo
Espesamiento:	
Espesamiento por gravedad	Reducción de volumen
Espesamiento por flotación	Reducción de volumen
Centrifugación	Reducción de volumen
Espesamiento con banda por gravedad	Reducción de volumen
Espesamiento con tambor rotatorio	Reducción de volumen
Estabilización:	
Estabilización alcalina	Estabilización
Digestión anaerobia	Estabilización, reducción de masa
Digestión aerobia	Estabilización, reducción de masa
Digestión aerobia autotérmica	Estabilización, reducción de masa
Composteo	Estabilización, recuperación de producto
Acondicionamiento:	
Acondicionamiento químico	Mejorar deshidratabilidad
Otros métodos de acondicionamiento	Mejorar deshidratabilidad
Deshidratación:	
Centrífuga	Reducción de volumen
Filtros banda	Reducción de volumen
Filtros prensa	Reducción de volumen
Camas de secado de lodos	Reducción de volumen
Carrizales	Almacenamiento, reducción de volumen
Lagunas	Almacenamiento, reducción de volumen
Secado térmico:	
Secadores directos	Reducción de volumen y peso
Secadores indirectos	Reducción de volumen y peso
Incineración:	
Incineradores de etapas múltiples	Reducción de volumen, recuperación de recursos
Incineradores de lecho fluidizado	Reducción de volumen
Coincineración con residuos sólidos	Reducción de volumen



### 3.1 Diagramas de flujo de procesamiento de lodos

En la Figura 2 se puede observar un diagrama de flujo general de los procesos y operaciones unitarias que conlleva el tratamiento de lodos residuales. Como se puede observar, existen miles de combinaciones para el tratamiento de lodos. En la práctica, el tratamiento comúnmente utilizado para el procesamiento de biosólidos involucra el tratamiento biológico.

Los espesadores pueden ser usados dependiendo de la fuente de la que provengan los lodos y del método de estabilización, deshidratación y disposición de los mismos. Después de la digestión biológica, cualquiera de los métodos mostrados puede ser usado para la deshidratación del lodo; la elección depende de la evaluación económica, los requisitos para su uso benéfico y las condiciones locales. En instancias donde no es usada la estabilización biológica, los lodos deshidratados son enviados a descomposición térmica (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).



ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS  
ALTERNATIVAS PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS  
EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

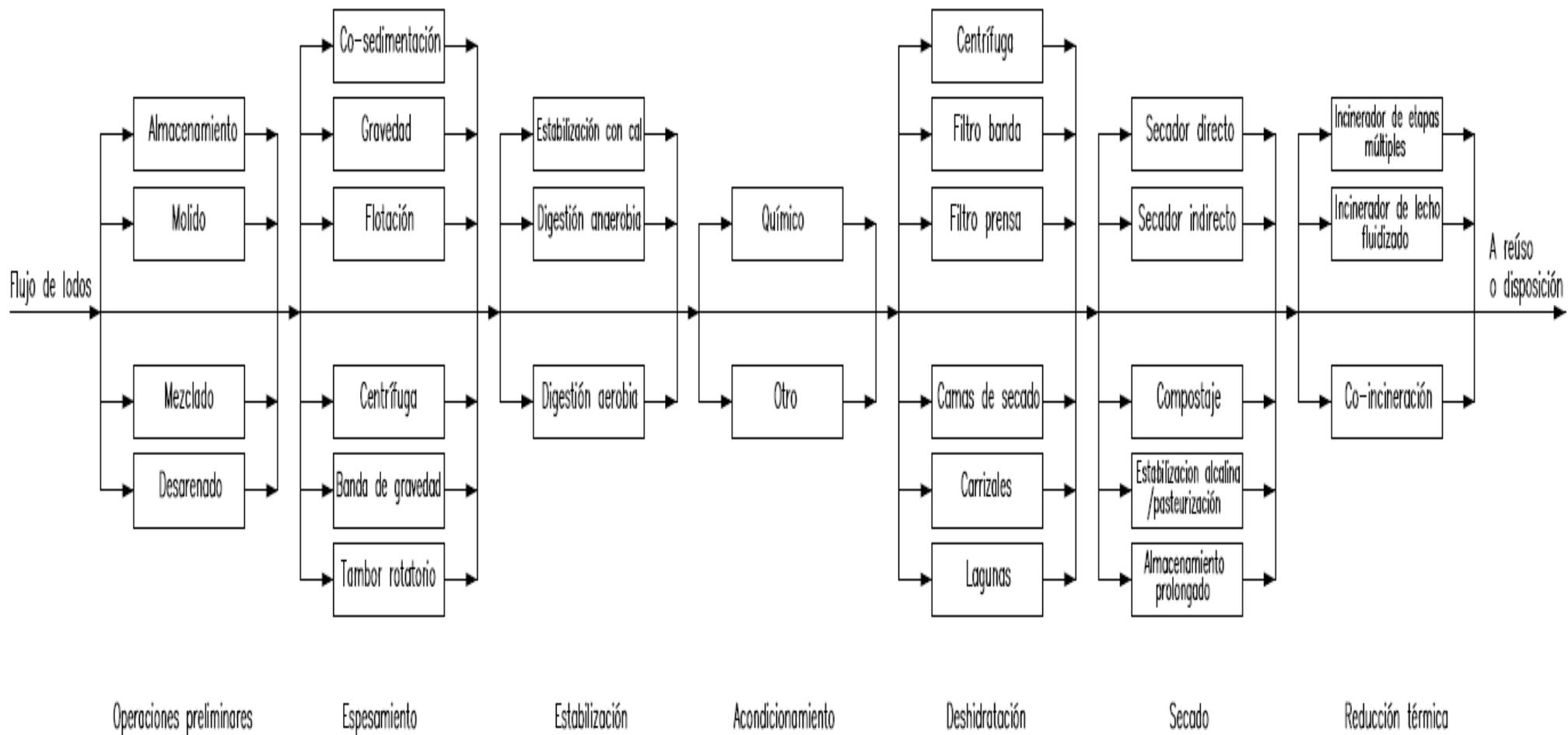


Figura 2. Diagrama de flujo general del tratamiento de lodos. (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)



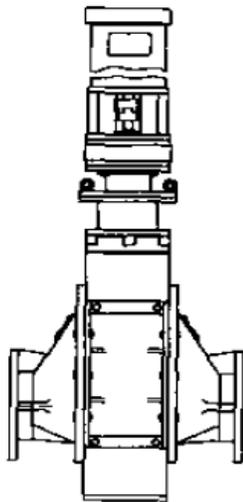
## 3.2 Etapas en el tratamiento de lodos

### 3.2.1 Operaciones preliminares

El molido, desarenado, mezclado y almacenamiento de sólidos y biosólidos son procesos necesarios para proporcionar una alimentación homogénea a las siguientes instalaciones del proceso de tratamiento.

#### Molido

El molido de lodos es un proceso en el cual la materia fibrosa contenida en el lodo es fragmentada en partículas más pequeñas para prevenir obstrucciones o atascamientos en equipos rotatorios posteriores. En la Figura 3 se muestra un molino típico para lodos (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).



**Figura 3. Vista lateral e instalación típica de molinos de lodos (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)**

#### Desarenado

En las plantas de tratamiento de agua en donde no se cuenta con las instalaciones para el desarenado previo a los tanques de sedimentación primaria, puede ser necesario el desarenado de la corriente de lodos para las siguientes etapas del tratamiento (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).



El método más efectivo para llevar a cabo el desarenado de lodos es a partir de la aplicación de fuerzas centrífugas en un sistema de flujo para lograr la remoción de arenas de la corriente de lodos. Esto se puede llevar a cabo a partir de ciclones.

### **Mezclado**

El lodo es producido en los tratamientos primarios, secundarios y avanzados de agua residual, por lo que la composición específica de cada uno de estos lodos puede llegar a variar dependiendo del tratamiento. Es necesario mezclar de manera uniforme las corrientes de lodo producidas en los distintos tratamientos con el fin de proveer una corriente de lodos homogénea y de composición constante a los tratamientos posteriores. Dar un mezclado a la corriente de lodos puede provocar tiempos de retención más cortos en sistemas como la deshidratación, tratamiento térmico o incineración.

### **3.2.2 Espesamiento**

El espesamiento es la etapa del tratamiento de lodos en la cual es reducido el volumen de la corriente de lodos extraída del tratamiento de aguas. Esta etapa es empleada para optimizar las siguientes etapas de acondicionamiento, estabilización y deshidratación; reduciendo los volúmenes requeridos de cada equipo, así como costos de operación (Degremont, 2007). El espesamiento es llevado a cabo a partir de medios físicos, incluyendo métodos como sedimentación por gravedad, flotación, centrifugación, etc. Los métodos típicos para llevar a cabo el espesamiento de los lodos son descritos en la Tabla 11.



**Tabla 11. Métodos para espesamiento de lodos residuales. (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).**

Método	Tipo de Lodo	Frecuencia de uso y éxito relativo
Gravedad	Primario crudo	Comúnmente usado con excelentes resultados
	Primario crudo y purga de lodos activados	A menudo usado. Para plantas pequeñas, con buenos resultados con concentraciones de lodo en el rango de 4 a 6%. Para plantas grandes, los resultados son marginales.
	Purga de lodos activados	Rara vez usado. Concentración pobre de sólidos (2 a 3%).
Flotación por aire disuelto	Primario crudo y purga de lodos activados	Algunos usos limitados, resultados parecidos al espesamiento por gravedad.
	Purga de lodos activados	Comúnmente usados, buenos resultados (3.5 a 5% de concentración de sólidos).
De canasta centrífuga	Purga de lodos activados	Usos limitados; excelentes resultados (8 a 10% de concentración de sólidos).
De tazón centrífugo	Purga de lodos activados	Aumentando; buenos resultados (4 a 6% de concentración de sólidos).
Filtro banda	Purga de lodos activados	Aumentando; buenos resultados (3 a 6% de concentración de sólidos).
Tambor rotatorio	Purga de lodos activados	Uso limitado; buenos resultados (5 a 9% de concentración de sólidos).

### 3.2.3 Estabilización

La estabilización de lodos consiste en la destrucción de células, con la consiguiente disminución del volumen de líquido o peso de sólidos a tratar en las operaciones siguientes del tratamiento.

Los lodos son estabilizados con el objetivo de reducir patógenos, eliminar olores ofensivos e inhibir el potencial de putrefacción. Algunos procedimientos para alcanzar dicho objetivo pueden resultar en cambios en las propiedades del lodo. La selección del método de estabilización de los lodos dependerá de la disposición final que se planea para los lodos.

Si se va a deshidratar e incinerar el lodo, normalmente no se emplea un procedimiento de estabilización (Comisión Nacional del Agua, 2007).



Principalmente, la estabilización de los lodos se puede llevar a cabo a partir de los siguientes métodos: Digestión anaerobia, digestión aerobia y estabilización alcalina.

### **3.2.3.1 Digestión anaerobia**

Degradación biológica de sustancias orgánicas complejas en ausencia de oxígeno libre. Durante estas reacciones, se libera energía y una gran parte de la materia orgánica en metano, dióxido de carbono y agua. Debido a que una pequeña cantidad de carbón y energía permanecen disponibles para sustentar futura actividad biológica, los sólidos restantes se vuelven estables (U.S. EPA, 1979).

El proceso anaerobio es controlado básicamente por las arqueas metanogénicas, debido a su lento crecimiento y sensibilidad a cambios ambientales. Por consiguiente, todo diseño exitoso deberá estar basado en las características especiales limitantes de estos microorganismos.

La digestión anaerobia ofrece varias ventajas sobre otros procesos de estabilización de lodos, entre las cuales se encuentran:

- Producción de metano, el cual puede ser aprovechado como fuente energética.
- Reducción de la masa total de lodo, a través de la conversión de materia orgánica principalmente a metano, dióxido de carbono y agua. Comúnmente, de 25 a 45% de los sólidos contenidos en el lodo son oxidados durante la digestión anaerobia. Esto puede reducir de manera considerable los costos por la disposición final de los lodos.
- Produce un residuo de lodos adecuado para su aprovechamiento como acondicionador de suelos. Los niveles de olores se reducen de manera importante mediante la digestión anaerobia (Comisión Nacional del Agua, 2007).
- Inactivación de patógenos. Los microorganismos productores de enfermedades en el lodo son destruidos durante el tiempo de retención relativamente largo, utilizado en el proceso de estabilización.

Las principales desventajas de este proceso son:



- Altos costos de inversión. Se requieren tanques de digestión muy grandes y cerrados, además, deben contar con sistemas para alimentación, calentamiento y mezclado del lodo.
- Susceptibilidad a trastornos. Los microorganismos que llevan a cabo la digestión son sensibles a cambios mínimos en su entorno.
- Produce corrientes colaterales de baja calidad. El sobrenadante de los digestores anaerobios frecuentemente tiene una alta demanda de oxígeno y elevada concentración de nitrógeno y sólidos suspendidos. La recirculación del sobrenadante al influente de la planta puede ocasionar trastornos en el tren de tratamiento de agua o producir una acumulación de partículas finas en la planta de tratamiento.
- Mantiene una tasa baja de crecimiento de las bacterias productoras de metano. Se requieren grandes reactores para contener el lodo en un rango de 15 a 30 días, para estabilizar los sólidos orgánicos en forma efectiva (Comisión Nacional del Agua, 2007).

### **Variaciones al proceso**

Debido a la experiencia que se ha obtenido en la operación de sistemas de estabilización de lodos, se han modificado algunas características del proceso original de operación del proceso, estas características han arrojado cuatro variaciones de la digestión anaerobia, las cuales son: Digestión de baja tasa, alta tasa, contacto y separación de fases.

En particular, los métodos de digestión por contacto y separación de fases no han sido empleados para la digestión de lodos en plantas a escalas reales, por lo que serán omitidos en este trabajo.

#### **- Digestión de baja tasa**

La digestión anaerobia de baja tasa es el proceso más simple y más antiguo que existe para la estabilización de lodos. Este proceso prácticamente consta de un tanque de almacenamiento para la digestión.



En este proceso, el lodo crudo es alimentado de manera intermitente. Poco después de haber sido alimentado se generan burbujas de metano, las cuales tienden a subir a la superficie, lo que provoca el mezclado dentro del reactor.

Debido a esto, el tanque se estratifica, formando tres zonas distintas: Una capa flotante de natas, un nivel intermedio de sobrenadante y una capa inferior de lodo. Básicamente, la descomposición del lodo se lleva a cabo en la parte inferior del reactor. El lodo estabilizado, que se acumula y espesa en el fondo del tanque, es extraído periódicamente desde el centro del piso. El sobrenadante es removido del costado del tanque y recirculado hacia el influente de la planta de tratamiento de aguas. Es gas que se acumula en la parte superior del reactor es extraído a través de la cubierta (Comisión Nacional del Agua, 2007).

#### - Digestión de alta tasa.

La digestión anaerobia de alta tasa se caracteriza por la adición de calentamiento, mezclado, espesamiento del lodo crudo y alimentación constante al proceso. Estos cuatro factores, ayudan a proveer un ambiente más estable y uniforme al proceso de digestión, lo cual es favorable para el proceso biológico. En la Figura 4 se muestran las características generales de este proceso.

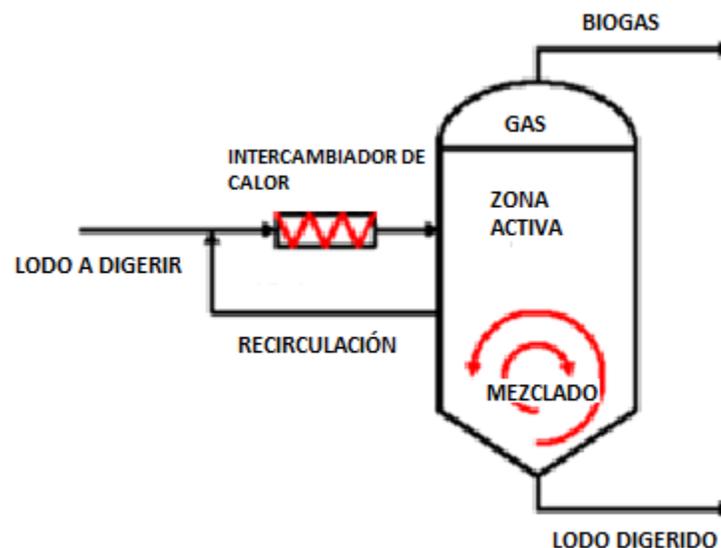


Figura 4. Digestión anaerobia de alta tasa (U.S. EPA, 1979)



a) Calentamiento

El contenido de estos digestores es calentado y mantenido a una temperatura constante en un rango de temperatura de 30 y 38 °C con una variación de  $\pm 0.6$  °C de la temperatura de diseño del reactor.

b) Mezclado

En estos reactores, el lodo es mezclado dentro del reactor para proporcionar un ambiente homogéneo a través de todo el reactor, evitando así la estratificación. Gracias a estos, todo el digestor está disponible para una descomposición activa de la corriente de lodos, aumentando así el tiempo de retención efectivo dentro del reactor.

c) Pre-espesamiento

El espesamiento de lodo crudo antes del proceso de estabilización permite la reducción del volumen requerido para el digestor anaerobio aproximadamente en un 75% (Comisión Nacional del Agua, 2007).

Hay, sin embargo, un punto en donde el pre-espesamiento de lodos puede ser contraproducente en el proceso de estabilización, debido a una sobre concentración del lodo influente. Como resultado de esto, se pueden presentar principalmente dos problemas en la operación del proceso:

Se vuelve más difícil mantener un mezclado homogéneo, debido a que la corriente de lodos está muy concentrada, y por consiguiente es más viscosa.

La concentración de químicos en el lodo puede alcanzar niveles que inhiban la actividad biológica en el reactor. Un lodo influente altamente espesado indica que el contenido del digestor será muy concentrado. Los compuestos que entran al digestor, tales como sales y metales pesados, y los productos finales de la digestión, como ácidos volátiles y sales de amoníaco, pueden alcanzar concentraciones tóxicas para las bacterias en el digestor (Comisión Nacional del Agua, 2007).



### - Digestión de dos etapas

Frecuentemente, un digester de alta tasa se encuentra en serie con un segundo digester. Normalmente este digester secundario es similar en diseño al digester primario, con excepción de que este segundo digester no cuenta con calentamiento ni mezclado. La función principal de este digester secundario es la de permitir la concentración por gravedad de los sólidos del lodo digerido y de decantación del sobrenadante. En la Figura 5 se muestran las características generales de este proceso.

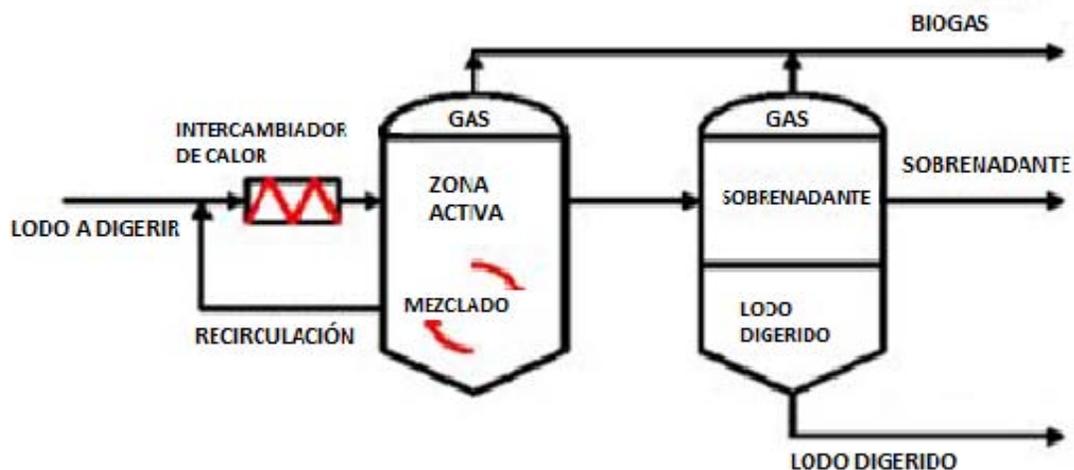


Figura 5. Digestión anaerobia de dos etapas (U.S. EPA, 1979).

### Dimensionamiento de digestores anaerobios.

El establecimiento del volumen del tanque de digestión es un paso crítico en el diseño de un sistema de digestión anaerobia. Primero, y de mayor importancia, el volumen del digester deberá ser suficiente para evitar que el proceso falle bajo todas las condiciones esperadas. La falla del proceso se define como la acumulación de ácidos volátiles y el cese de la producción de metano. Una vez que un digester se vuelve agrio, normalmente se lleva por lo menos un mes para volver a entrar en servicio. Mientras tanto, el lodo crudo se tiene que desviar a otros digestores, lo cual puede provocar una sobrecarga. Además, el lodo proveniente del digester agrio tiene un olor fuerte y nocivo, y por tanto, el almacenarlo y disponerlo se vuelve un problema (Comisión Nacional del Agua, 2007).



### - Criterios de carga

Tradicionalmente, los requerimientos de carga de un digester anaerobio han sido determinados de manera empírica. El más común de estos criterios es el volumen por persona servida. En la Tabla 12 se presentan valores típicos de diseño. Estos valores únicamente se emplean para la estimación inicial del volumen del digester, ya que estos valores suponen parámetros importantes como la carga por habitante, eficiencia de remoción de sólidos y facilidad de digestión de los lodos.

**Tabla 12. Criterios de diseño típicos para dimensionamiento de digestores de lodo (Comisión Nacional del Agua, 2007)**

Parámetro	Digestores de baja tasa	Digestores de alta tasa
Criterio de volumen (m <sup>3</sup> /hab)		
Lodo Primario	0.06-0.08	0.04
Lodo Primario + F. Biológico	0.11-0.14	0.08-0.09
Lodo Primario + Lodo Activado	0.11-0.17	0.08-0.11
Carga de sólidos (kg <sub>ssv</sub> /m <sup>3</sup> d)	0.64-1.60	2.40-6.40
Tiempo de retención de sólidos (días)	30-60	10-20

### - Tiempo de retención de sólidos.

Un parámetro clave en diseño de digestores anaerobios es el tiempo de retención de sólidos biológicos (TRS), el cual está definido como el tiempo en el que una unidad de masa biológica es retenida en el sistema. Operativamente, el TRS está definido como la masa total de sólidos en el sistema de tratamiento, dividida entre la cantidad de sólidos extraídos diariamente. En digestores que no cuentan con una recirculación, el TRS es igual al tiempo de retención hidráulica (TRH).

El TRS puede disminuir hasta un punto crítico (TRS<sub>c</sub>), por debajo del cual el proceso falla por completo. La temperatura tiene un efecto importante sobre el crecimiento de las bacterias y por consiguiente, provoca cambios entre el TRS y la eficiencia de operación del digester (Comisión Nacional del Agua, 2007).



## Eficiencia del proceso

### - Reducción de sólidos volátiles

La reducción de sólidos es uno de los principales objetivos del proceso de digestión anaerobia. No solo disminuye el potencial de putrefacción, además reduce la cantidad de sólidos enviados a disposición final. Normalmente se supone que la reducción de sólidos se da en la fracción volátil de los mismos; debido a esto, una medida de la eficiencia de los digestores anaerobios es a partir del porcentaje de reducción de sólidos volátiles. Generalmente, el porcentaje de destrucción de sólidos volátiles en un digestor anaerobio varía entre un 35 y 60% (Comisión Nacional del Agua, 2007).

Los parámetros operativos que afectan a la reducción de sólidos volátiles son el tiempo de retención de sólidos y la temperatura de operación del digestor anaerobio.

### - Producción de gas

Una ventaja particular de la digestión anaerobia sobre otros métodos de estabilización de lodos es la producción de gas de mediana energía como un subproducto. La generación de gas se da como resultado de la destrucción de los sólidos volátiles contenidos en los lodos. La producción de biogás específica para algunos de los principales componentes de los lodos se presenta en la Tabla 13.

**Tabla 13. Producción de biogás para diferentes compuestos en los lodos de aguas residuales (Comisión Nacional del Agua, 2007).**

Material	Producción Específica de gas (m <sup>3</sup> /kg destruido)	Contenido de CH <sub>4</sub> (%)
Aceites	1.12-1.43	3.86-4.49
Natas	0.87-1.00	4.36-4.67
Grasas	1.06	4.24
Fibras crudas	0.81	2.80-3.12
Proteína	0.75	4.55

La producción de gas para lodos municipales digeridos anaeróbicamente varía entre 0.75 y 1.1 m<sup>3</sup>/kg de sólidos volátiles destruidos.



Se ha determinado que el rango de temperaturas en el cual la conversión de sólidos es la más eficiente es entre los 34 y 64 °C. El TRS no tiene efecto alguno bajo la producción de biogás, siempre y cuando este parámetro esté excedido. Sin embargo, el aumentar el TRS provocará un aumento en la producción de biogás debido al aumento en la destrucción de sólidos volátiles.

### 3.2.3.2 Digestión aerobia

La digestión aerobia es un proceso de aireación prolongada (dotando al sistema de  $O_2$ ) para provocar el desarrollo de microorganismos aerobios hasta sobrepasar el periodo de síntesis de las células y llevar a cabo su auto-oxidación, reduciendo así el material celular (García, 2006).

La digestión aerobia de lodos municipales está basada en el principio de que, cuando existe insuficiente sustrato externo disponible, los microorganismos metabolizan su propia masa celular. En la operación real, la digestión aerobia involucra la oxidación directa de cualquier materia biodegradable y la oxidación del material celular microbiano por los microorganismos (Comisión Nacional del Agua, 2007).

Para los procesos de digestión aerobia diseñados y operados de manera adecuada, existen las siguientes ventajas:

- Costos de inversión menores a comparación de la digestión anaerobia.
- El proceso es relativamente fácil de operar en comparación con los sistemas anaerobios.
- No se generan malos olores.
- Se produce un sobrenadante con bajo contenido sólidos suspendidos,  $DBO_5$  y nitrógeno amoniacal.
- Reduce el número de patógenos a un nivel inferior al de diseño normal. Bajo un diseño de auto-calentado, muchos sistemas proporcionan un 100% de destrucción de patógenos.

De igual manera, los procesos de digestión aerobia presentan las siguientes desventajas:



- Normalmente se produce un lodo digerido con características muy pobres para la deshidratación mecánica.
- Los costos de operación de la planta son muy altos, debido al suministro de oxígeno que se debe proporcionar al proceso.
- Su funcionamiento puede variar significativamente por la temperatura de operación del proceso, la localización o los materiales del reactor.

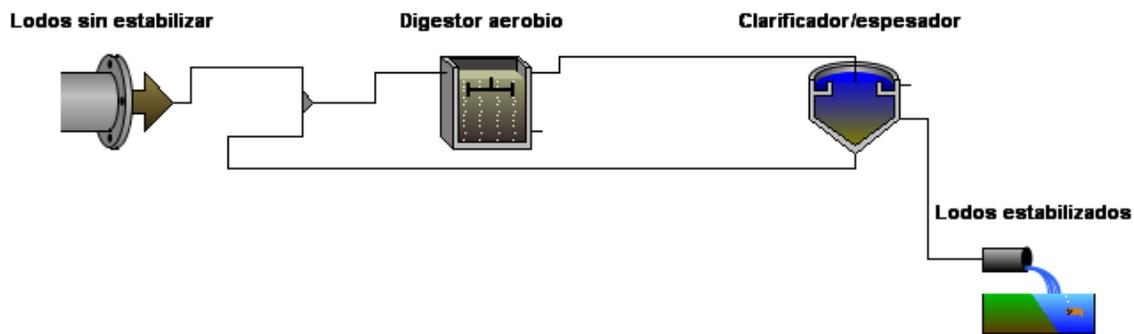
### **Variaciones del proceso.**

#### **- Operación convencional Semi-Batch.**

Originalmente, la digestión aerobia fue diseñada como un proceso parcialmente por lotes, y este concepto aún se aplica en muchas instalaciones de digestión de lodos. Los sólidos son bombeados directamente de los clarificadores al digester aerobio. Durante la operación de llenado, el lodo en digestión es aireado de forma continua. Una vez que el tanque se llena, la aireación se prolonga por dos o tres semanas para asegurar la estabilización de los lodos. Después, la aireación es detenida y los sólidos estabilizados se sedimentan. El líquido clarificado es decantado y los sólidos son removidos con una concentración del 2 al 4%. Cuando se ha removido la cantidad suficiente de lodo, el ciclo es repetido.

#### **- Operación convencional continua.**

El proceso de digestión aerobia convencional continuo se asemeja mucho al proceso de lodos activados que aparece en la Figura 6. Así como en el proceso parcialmente por lotes, los sólidos son bombeados directamente desde los clarificadores al digester aerobio. El aireador opera a un nivel fijo, y el efluente es conducido a un separador de sólidos-líquido. Los sólidos espesados y estabilizados pueden ser reciclados al tanque de digestión o removidos para continuar con su tratamiento.



**Figura 6. Diagrama de flujo para el proceso de digestión aerobia (U.S. EPA, 1979).**

#### - **Operación de manera auto-calentado**

En este proceso, el lodo de los clarificadores normalmente es sometido a un proceso de espesamiento para alimentar al digestor una corriente de sólidos con una concentración mayor al 4%. El calor liberado por la biodegradación de los sólidos es suficiente para elevar la temperatura de la corriente de lodo hasta los 60 °C. Las ventajas que se obtienen con esta forma de operación son:

Mayor tasa de destrucción de sólidos orgánicos, esto provoca una disminución en el volumen requerido; producción de lodo pasteurizado; menores requerimientos de oxígeno en comparación a la operación convencional, debido a que es menor la cantidad de bacterias que sobreviven a estas temperaturas; y por último, una mejor separación de la corriente sólido-líquido debido a una disminución de la viscosidad de la corriente.

#### **Consideraciones de diseño**

##### - **Temperatura**

Debido a que la mayoría de los digestores aerobios son abiertos, la temperatura del lodo depende de las condiciones climatológicas y esta puede variar ampliamente. Como en cualquier sistema biológico, las bajas temperaturas retrasan el proceso de digestión aerobia, mientras que las altas temperaturas lo aceleran.



Al considerar la temperatura sobre el diseño del sistema de digestión, éste se debe diseñar de tal manera que se minimicen las pérdidas de calor en el sistema. El diseño debe considerar el grado necesario de estabilización de lodo a la temperatura de operación mínima esperada y deberá suministrar los requerimientos de oxígeno a la temperatura máxima esperada.

#### - Reducción de sólidos

El objetivo fundamental de la digestión aerobia consiste en la reducción de sólidos contenidos en la corriente de lodos para su disposición final. La reducción de los sólidos en la digestión aerobia está determinado a partir de la siguiente reacción de primer orden:

$$dM/dt = -k_d M \quad (2)$$

Donde:

$dM/dt$  = Disminución de sólidos volátiles biodegradables por unidad de tiempo, (masa/tiempo);

$k_d$  = Constante de tasa de reacción, (tiempo<sup>-1</sup>);

$M$  = Concentración de sólidos volátiles biodegradables remanentes a un tiempo  $t$  en el digestor aerobio, (masa/volumen).

El tiempo especificado en la ecuación 5 corresponde a la edad del lodo o al tiempo de residencia de los sólidos en el reactor aerobio. Dependiendo de la forma de operación del digestor, el tiempo de retención de sólidos puede ser igual al tiempo de retención hidráulico del reactor.

#### - Requerimientos de oxígeno

Los lodos entrantes al digestor son representados a partir de la fórmula empírica  $C_5H_7NO_2$ . Durante el periodo de aireación del lodo en el digestor aerobio, se puede escribir la siguiente reacción para describir el proceso:



Sin embargo, debe indicarse que sólo del 75 al 80% de la materia celular puede realmente ser oxidado. El 25 o 20% restante lo constituyen los compuestos orgánicos y componentes inertes que no son biodegradables. El amoníaco



procedente de esta oxidación es seguidamente oxidado a nitrato al proseguir la digestión.

- **Mezclado**

El mezclado es requerido en un digester aerobio con el fin de mantener los sólidos en suspensión y conservar una mezcla homogénea para la aireación. Cualquiera de estos dos requerimientos que necesite la mayor cantidad de energía, es el que controla el proceso.

De acuerdo a estudios realizados en distintas plantas de tratamiento de lodos, se ha determinado que se requieren entre 13 y 106 kW/1000 m<sup>3</sup> de lodo.

En la Tabla 14 se resumen los criterios de diseño para la digestión aerobia.

**Tabla 14. Resumen de criterios de diseño para digestores aerobios.  
(Comisión Nacional del Agua, 2007).**

Criterio	Observaciones	
	Días	Temperatura del líquido (°C)
Tiempo de residencia de sólidos requerido (Destrucción de sólidos 40%)	108	4.4
	31	15.6
	18	26.7
Tiempo de residencia de sólidos requerido (Destrucción de sólidos 55%)	386	4.4
	109	15.6
	64	26.7
Requerimientos de Oxígeno	2.0 kg de oxígeno por kg de sólidos volátiles destruidos, cuando la temperatura del líquido es de 45 °C o menos. 1.45 kg de oxígeno por kg de sólidos volátiles destruidos cuando la temperatura es mayor a los 45 °C.	
Concentración máxima esperada de sólidos lograda con decantación	2.5-3.5% cuando se trata de lodo sin arena y no se le han agregado químicos.	
Potencia de Mezclado	En función de la geometría del tanque y el tipo aireador utilizado. Los valores varían entre 13.3 y 106.4 kW por m <sup>3</sup> .	



### 3.2.3.3 Estabilización alcalina

La estabilización alcalina es un proceso utilizado para eliminar las condiciones desfavorables de los lodos, empleando materia alcalina para convertir el lodo a condiciones inapropiadas para la supervivencia de los microorganismos. En este proceso de estabilización se adiciona cal al lodo sin tratar en cantidades suficientes para incrementar el pH a 12 o mayor (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).

El objetivo principal de este proceso es mejorar la facilidad de deshidratación de los lodos, pero a partir de estudios se observó que los niveles de olores y patógenos de los lodos se reducen con la adición de este reactivo.

A partir de estudios, en donde se logra la estabilización de los lodos a un pH de 10 a 11, se ha comprobado que los olores regresan durante el almacenamiento de los lodos. Para eliminar este inconveniente, se requiere la adición suficiente de cal para elevar y mantener el pH de los lodos a 12 por lo menos durante dos horas (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).

#### Aplicabilidad

La estabilización alcalina puede ser un método eficiente de estabilización de lodos cuando existen los siguientes requerimientos:

- Respaldo para instalaciones de estabilización existentes. Un sistema de estabilización con cal se puede arrancar o parar rápidamente, por lo que puede ser utilizado como respaldo cuando la cantidad de lodo exceda al flujo de diseño. De igual manera se puede utilizar este proceso cuando las instalaciones de estabilización se encuentren fuera de operación por mantenimiento.
- Manejo provisional de lodo. Los sistemas de estabilización con cal tienen costos de inversión bajos, por consiguiente, pueden ser factibles si se tienen planes de abandonar la planta.
- Expansión de las instalaciones existentes o construcción de nuevas instalaciones para mejorar el control de olores y patógenos. La estabilización con cal es particularmente aplicable para plantas pequeñas o cuando la



planta será cargada de manera periódica (Comisión Nacional del Agua, 2007).

En todos los casos se requiere un sitio adecuado para la disposición o reúso de los lodos estabilizados.

### **Ventajas y desventajas**

Las principales ventajas de estos procesos incluyen bajos costos de inversión y simplicidad en la operación. De igual manera, el lodo estabilizado es más fácil de deshidratar por medios mecánicos y es generalmente adecuado para aplicación a terrenos agrícolas o disposición en rellenos sanitarios.

Las desventajas constan en que a partir de la estabilización con cal no se logra una reducción de materia orgánica. Esto provoca dos impactos importantes.

- La adición de cal a los lodos crudos no los convierte en químicamente estables, ya que si el pH baja de 11, la descomposición biológica en el lodo se reanuda, produciendo malos olores.
- La cantidad de lodo para disposición no es reducida, como en los procesos de estabilización biológica. La masa de sólidos es incrementada debido a la adición de cal a los lodos y a la precipitación química que esto provoca. Debido a esto, los costos de transporte y disposición final de los lodos frecuentemente son mayores para los procesos de estabilización con cal.

### **Criterios de diseño**

Se deben considerar tres parámetros fundamentales para el diseño de los sistemas de estabilización con cal; pH, tiempo de contacto y dosis de cal.

#### **- pH y tiempo de contacto**

El objetivo principal de la estabilización con cal es el inhibir la descomposición bacteriana y la inactivación de los patógenos. El factor fundamental para llevar a cabo este proceso, además de la dosis de cal aplicada, es el pH. El objetivo de este proceso es mantener el pH arriba de 12 durante dos horas, con el fin de asegurar la destrucción de los patógenos y proporcionar la suficiente alcalinidad residual a la



corriente de lodos para que el pH no baje de 11 durante varios días, permitiendo así la disposición final de los lodos. Los criterios de diseño recomendados para lograr estos objetivos son:

- a) Tratar el lodo en estado líquido
- b) Llevar el pH a 12.5 mediante la adición de cal y mantenerlo arriba de 12.5 durante 30 minutos (esto mantiene el pH por arriba de 12 durante 2 horas).

**- Dosis de cal**

La cantidad requerida de cal para llevar a cabo la estabilización del lodo se determina a partir del tipo de lodo, su composición química y la concentración de sólidos.

En la Tabla 15 se encuentran los criterios típicos utilizados para el diseño de sistemas de estabilización con cal.

**Tabla 15. Dosis típicas de cal requerida para la estabilización de lodos  
(Metcalf & Eddy, Inc., 2003).**

Tipo de lodo	Concentración de sólidos (%)		Dosis de cal <sup>a</sup>			
			lb Ca(OH) <sub>2</sub> /ton sólidos secos		g Ca(OH) <sub>2</sub> /kg sólidos secos	
	Rango	Promedio	Rango	Promedio	Rango	Promedio
Primario	3-6	4.3	120-340	240	60-170	120
Lodos Activados	1-1.5	1.3	420-860	600	210-430	300
Digeridos anaeróbicamente	6-7	5.5	280-500	380	140-250	190
Sépticos	1-4.5	2.7	180-1020	400	90-510	200

<sup>a</sup> Cantidad de cal requerida para mantener el pH en 12 durante media hora.

Debido a que en la estabilización con cal no se destruyen los organismos necesarios para el crecimiento bacteriano, el lodo debe ser tratado con un exceso de cal o se debe disponer después de que el pH cae de manera significativa.



### Eficiencia del proceso

La estabilización con cal reduce olores y el potencial de putrefacción del lodo, reduce el nivel de organismos patógenos y modifica las características de deshidratación, sedimentación y químicas del lodo.

#### - Control de olores

El tratamiento con cal desodoriza el lodo mediante un aumento en el pH de la corriente, eliminando el crecimiento de los organismos encargados de la producción de gases malolientes. Se debe adicionar la suficiente cantidad de cal, debido a que cuando el pH del lodo disminuye de 11, la generación de olores se reanuda.

#### - Reducción de patógenos

Se pueden lograr reducciones importantes de patógenos contenidos en los lodos mediante la adición de cal. En la Tabla 16 se muestran estudios realizados en una planta de tratamiento de aguas en Ohio, E.U.A; en la cual se muestran los niveles de patógenos medidos en el lodo crudo y de igual manera, se muestran las calidades del lodo después del tratamiento con cal.

**Tabla 16. Densidad de bacterias en lodos crudos, digeridos anaerobios y estabilizados con cal (Comisión Nacional del Agua, 2007).**

Tipo de lodo	Densidad bacteriana (NMP/100 mL)				
	Coliformes totales	Coliformes fecales	Estreptococos fecales	Salmonella	Pseudomonas aeruginosa
<b>Crudo</b>					
Primario	2.90E+09	8.30E+08	3.9E+07	62	195
Purga Activado	8.30E+08	2.7E+07	1.0E+07	6	5.5E+03
Fosa séptica	2.90E+09	1.5E+07	6.7E+05	6	754
Digerido Anaerobio (Primario+Act.)	2.8E+07	1.5E+06	2.7E+05	6	42
<b>Estabilizado con cal</b>					
Primario	1.2E+05	5.9E+03	1.6E+04	< 3	< 3
Purga Activado	2.2E+03	1.6E+04	6.8E+03	< 3	13
Fosa séptica	2.1E+03	265.0	665.0	< 3	< 3
Digerido Anaerobio	18.0	18.0	8.6E+03	< 3	< 3



### 3.2.4 Acondicionamiento

Los lodos y biosólidos son acondicionados químicamente con la finalidad de mejorar sus características de deshidratación.

El uso de químicos para acondicionar el lodo para la deshidratación es económico debido a los rendimientos obtenidos y la gran flexibilidad del proceso. El acondicionamiento químico puede reducir la humedad entrante (90-99%) de la corriente de lodo hasta un 60-85%, dependiendo de la naturaleza y la composición química del lodo a tratar. El acondicionamiento químico es una operación que se aplica previo a la deshidratación mecánica en equipos como centrifugas, filtros banda o filtros prensa. Las sustancias químicas empleadas para este proceso son: cloruro férrico, cal, alumbre y polímeros orgánicos (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).

La adición de acondicionadores químicos a los lodos puede incrementar el contenido de sólidos secos. Los polímeros no aumentan la cantidad de sólidos, mientras que las sales de hierro y la cal pueden incrementar el contenido de sólidos en un 20-30%.

La dosis de químico que se tiene que adicionar a la corriente de lodos a tratar se determina a partir de pruebas de laboratorio. En la Tabla 17 se muestran los niveles típicos de adición de polímero para distintos tipos de lodo.

**Tabla 17. Niveles típicos de adición de polímero para acondicionamiento de lodos. (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)**

Tipo de lodo	Polímero (kg/ton sólidos secos)	
	Filtro prensa	Centrífuga
Primario	1-4	1-2.5
Primario y purga activado	2-8	2-5
Primario y filtros	2-8	---
Purga activado	4-10	5-8
Primario (digestión anaerobia)	2-5	3-5
Primario y activado (digestión anaerobia)	1.5-8.5	2-5
Primario y activado (digestión aerobia)	2-8	---



### 3.2.5 Deshidratación

La deshidratación es una operación unitaria utilizada para reducir la humedad contenida en el lodo por las siguientes razones:

- a) Los costos de transporte del lodo para la disposición final se vuelven sustancialmente más bajos cuando el volumen es reducido por la deshidratación.
- b) Generalmente, el lodo deshidratado es más fácil de manejar que el lodo espesado o líquido.
- c) La deshidratación normalmente es requerida previo a la incineración del lodo para incrementar su poder calorífico.
- d) En algunos casos, la deshidratación puede ser requerida para disminuir el olor y el factor de putrefacción de los lodos (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).

Los procesos de deshidratación comúnmente más usados son las centrifugas, filtros prensa, filtros banda, camas de secado y lagunas. Las ventajas y desventajas de los distintos métodos se presentan en la Tabla 18.



**Tabla 18. Comparación de las alternativas para la deshidratación de lodos  
(Metcalf & Eddy, Inc., 2003).**

<b>Método de Deshidratación</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Centrífuga	Facilidad de limpieza, contención de olores, arranque rápido, flexibilidad de paro. Produce lodos relativamente secos. Baja relación de costos de instalación-capacidad. Alta relación de capacidad instalada-área de construcción.	El desgaste de la carcasa es un potencial problema de mantenimiento. Requiere remoción de arenas y probablemente un molino en la corriente de alimentación de lodo. Requiere personal de mantenimiento altamente capacitado. El concentrado contiene una cantidad alta de sólidos.
Filtro banda	Bajos requerimientos energéticos. Costos de inversión y operación relativamente bajos. Mecánicamente menos complejo y más fácil de mantener. Los equipos de alta presión son capaces de producir lodos muy secos. Se requiere un esfuerzo mínimo para el paro del equipo.	Alto potencial de olor. Requiere un molino de lodo en la corriente de alimentación. El equipo es muy sensible a las características del lodo entrante. No es muy recomendable la operación automatizada.
Filtros prensa	Concentración de sólidos más alta en los lodos efluentes. Menor cantidad de sólidos suspendidos en el filtrado.	Operación batch. Costos de equipos elevados. Costos de operación altos. Requerimientos de soportes estructurales especiales. Se requiere de demasiada área para el equipo. Requiere de personal de mantenimiento altamente capacitado. Los sólidos adicionales producto de la adición de químico requieren disposición.
Camas de secado	Costo de inversión más bajo cuando la tierra está disponible. Requiere menos operadores y sin mucha experiencia. Menor consumo energético. Consumo de químicos bajo o nulo. Menos sensible a las variaciones del lodo. Mayor contenido de sólidos que en los métodos mecánicos	Requiere una gran cantidad de área (tierra). Requiere lodo estabilizado. El diseño debe considerar las condiciones climatológicas. La remoción del lodo deshidratado es complicada.
Lagunas	Bajo consumo energético. No hay consumo de químicos. La materia orgánica es estabilizada en etapas posteriores. Bajos costos de inversión en donde la tierra está disponible. No se necesita de tanta experiencia para su operación.	Problemas de olores y atracción de vectores. Contaminación de aguas subterráneas. La apariencia puede lucir antiestética. El diseño debe considerar las condiciones climatológicas.



### 3.2.6 Secado

El secado de lodos involucra la aplicación de calor para evaporar el agua y reducir la humedad contenida en el lodo, por debajo de la que se puede alcanzar por los métodos convencionales de deshidratación. Las ventajas del secado por calor incluyen la reducción de los costos de transporte, mayor reducción de patógenos, mejorar la capacidad de almacenamiento y comercialización (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).

La clasificación de los equipos de secado está basada en el método predominante de transferencia de calor a los sólidos húmedos. Estos métodos son convección, conducción y radiación.

#### - Convección

En los sistemas de convección (secado directo) el lodo húmedo tiene contacto directo con el mecanismo de transferencia de calor, generalmente gases a altas temperaturas.

#### - Conducción

En los sistemas de secado por conducción (secado indirecto), un muro de contención separa el lodo húmedo del medio de transferencia de calor, usualmente vapor o algún otro fluido caliente.

#### - Radiación

En los sistemas de secado por radiación, se provee energía radiante a través de lámparas infrarrojas, resistencias eléctricas o refractarias de gas, a partir de las cuáles se transfiere calor al lodo húmedo y se evapora el contenido de agua.

### 3.2.7 Reducción térmica

La incineración de lodos involucra la conversión total de los sólidos orgánicos a productos oxidados, principalmente dióxido de carbono, agua y cenizas. Las principales ventajas de la incineración son: Máxima disminución del volumen, disminuyendo así los requerimientos de disposición; destrucción de patógenos y



compuestos tóxicos y potencial recuperación de energía. Las desventajas que presentan estos procesos son: Altos costos de inversión y operación; requerimiento de personal altamente capacitado para la operación y mantenimiento de los equipos; los productos secundarios generados (emisiones a la atmósfera y cenizas) pueden provocar efectos adversos al ambiente y disposición de residuos, los cuales pueden ser clasificados como residuos peligrosos.

La incineración es usada comúnmente en plantas de mediana o gran escala, las cuales cuentan con opciones de disposición limitadas.

Los lodos que son procesados por incineración normalmente son lodos deshidratados o lodos sin tratar. Normalmente no es necesario que los lodos sean sometidos a un proceso de estabilización previo a la incineración. De hecho, el someterlos a un proceso de estabilización puede ser perjudicial para la incineración, debido a que la estabilización, en específico la digestión aerobia y anaerobia, disminuyen la cantidad de sólidos volátiles en los lodos, y consecuentemente, incrementan los requerimientos de combustible.

### **3.2.8 Disposición**

La aplicación de los lodos a tierra está definido como el esparcimiento de biosólidos sobre o debajo de la superficie del suelo. Los biosólidos pueden ser aplicados a:

- a) Tierra usada para agricultura
- b) Tierras forestales
- c) Suelos dañados
- d) Sitios dedicados a la disposición de tierra.

En cualquiera de estos casos, la aplicación de los lodos a tierra está diseñada con el objetivo de proveer tratamiento posterior a los biosólidos.



### **3.3 Análisis multicriterio**

#### **3.3.1 Definición**

Un análisis multicriterio, basado en criterios explícitos para evaluar varias alternativas, se utiliza siempre que un grupo de personas debe tomar una decisión importante en la que concurren distintos aspectos, complejos o controvertidos, fundamentalmente en las etapas de selección y evaluación de alternativas (Centros de Excelencia, s.f.).

#### **3.3.2 Proceso de toma de decisiones**

El proceso de toma de decisiones consiste en seleccionar una o varias alternativas o cursos de acción, bajo el criterio de minimizar los riesgos de pérdidas financieras (Vallín, 2001).

El proceso de toma de decisiones es realizado por diferentes participantes, los cuales juegan diferentes papeles en el proceso para facilitar el desarrollo de sus etapas. Los participantes son:

- 1) Decisor: Individuo o grupo de individuos que toma la decisión final, y generalmente, el propietario del problema.
- 2) Analista de sistemas: Es el participante que modela el caso de estudio y es quien hace las recomendaciones relativas rumbo a la selección final. El analista no expresa opiniones personales, sino que se limita a recoger las opiniones del decisor.
- 3) Otros actores: Personas que pueden participar en la determinación de las ventajas y desventajas de las alternativas propuestas. Generalmente son expertos en la materia del caso de estudio.



En la Figura 7 se ejemplifica el proceso de toma de decisiones descrito anteriormente.



Figura 7. Proceso de toma de decisiones (Pérez, 2013).



#### 4 Metodología

La metodología llevada a cabo durante este trabajo tiene por objetivo la determinación de la mejor alternativa para la estabilización de lodos producidos durante el tratamiento de aguas negras municipales.

Como se especificó anteriormente, los lodos están considerados como un residuo peligroso según la norma oficial mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, por lo que estos tienen que recibir un tratamiento específico antes de ser reusados, desechados o dispuesto en algún sitio destinado.

En el caso estudiado durante este trabajo no se cuenta con equipos específicos para el tratamiento de lodos, por lo que se realizó una comparativa de distintas operaciones unitarias para dar un adecuado tratamiento a los lodos producidos.

Para cumplir con dicho objetivo, el primer paso fue realizar un diagnóstico operativo de la planta a partir de un software simulador de plantas de tratamiento de agua llamado GPS-X®.

El tren de tratamiento de la planta está conformado por un clarificador primario, seguido por un reactor de aireación y un clarificador secundario, con lo cual se simuló en el programa cada una de las operaciones unitarias mencionadas para estimar la producción de lodos a tratar.

A partir de los parámetros de caracterización del agua y del flujo de agua negra entrante a la planta, se determinó la cantidad de lodos producidos así como los parámetros fisicoquímicos necesarios para establecer las alternativas para el tratamiento de los mismos.

Una vez calculada la producción de lodos y la calidad de los mismos, se establecieron las alternativas para llevar a cabo el tratamiento. Las alternativas propuestas fueron:

- Digestión anaerobia
- Digestión aerobia
- Estabilización alcalina

Se establecieron estas tres alternativas para el tratamiento de lodos debido a que son los tres procesos convencionales para la estabilización de los lodos.



Ya establecidas las alternativas de tratamiento de lodos a evaluar, se procedió a realizar un diseño conceptual de las tres alternativas propuestas, especificando criterios técnicos para cada una, con el fin de verificar cuál es la propuesta que proporciona un mejor tratamiento de los lodos.

Para el análisis técnico de las alternativas se evaluaron los criterios de volumen requerido, consumo de reactivos, porcentaje de disminución de SSV, lodos estabilizados producidos, instrumentación mínima requerida y la producción de biogás.

Posteriormente, se realizó un cálculo de los costos de inversión y operación asociados a cada una de las alternativas. Para llevar a cabo esta actividad se utilizó la herramienta Capdetworks®, la cual es una herramienta especializada en tratamiento de aguas que permite determinar los costos de inversión, operación y mantenimiento de un proceso de tratamiento.

Una vez determinados los costos de cada una de las alternativas, se procedió a calcular los indicadores de rentabilidad de Valor Presente de los Costos (VPC) y Costo Anual Equivalente (CAE), esto para determinar cuál de las alternativas es económicamente más viable.

Después de haber realizado una evaluación técnica y económica de las alternativas propuestas, se procedió a elaborar un análisis multicriterio, en el cual se consideraron todos los criterios calculados anteriormente para realizar una comparación de las propuestas y determinar cuál es el esquema de tratamiento de lodos más viable.

Como se mencionó anteriormente, un análisis multicriterio se aplica cuando una serie de condiciones afectan durante la selección de una alternativa, por lo que a partir del diagrama mostrado en la Figura 7 se estableció una evaluación multicriterio de las alternativas propuestas.

Para elaborar dicho análisis se establecieron porcentajes de peso para cada uno de los criterios y se establecieron tres distintos escenarios, estableciendo distintos porcentajes para los criterios técnicos y económicos.

Debido a que se trata de una evaluación multicriterio, se establecieron tres escenarios ya que los porcentajes de peso de cada criterio pueden cambiar de un



caso de estudio a otro, esto debido a las necesidades o prioridades que se tenga para la planta.

Finalmente, a partir de la herramienta de evaluación multicriterio, se elaboró un análisis de sensibilidad de la evaluación para determinar cómo se afecta la decisión de la mejor alternativa de tratamiento de lodos cuando se modifican los porcentajes de peso establecidos.

Siguiendo esta metodología se determinó cuáles son las alternativas más viables técnica y económicamente para dar tratamiento a los lodos producidos en la PTAN. En la Figura 8 se muestra un diagrama simplificado de los pasos desarrollados durante el presente trabajo.



Figura 8. Diagrama de bloques de las etapas desarrolladas durante el trabajo de tesis.



## 5 Caso de Estudio

La Planta de Tratamiento de Aguas Negras (PTAN) objeto de este estudio, inició su operación en el año de 1985, y su función es abastecer agua tratada a una Refinería en México. Esta planta está diseñada para un caudal de agua negra de 1100 L/s. En la Figura 9 se muestra el arreglo general de equipos de la PTAN. La planta se encuentra distribuida en cuatro trenes de tratamiento, tres trenes con una capacidad de diseño de 300 L/s cada uno.

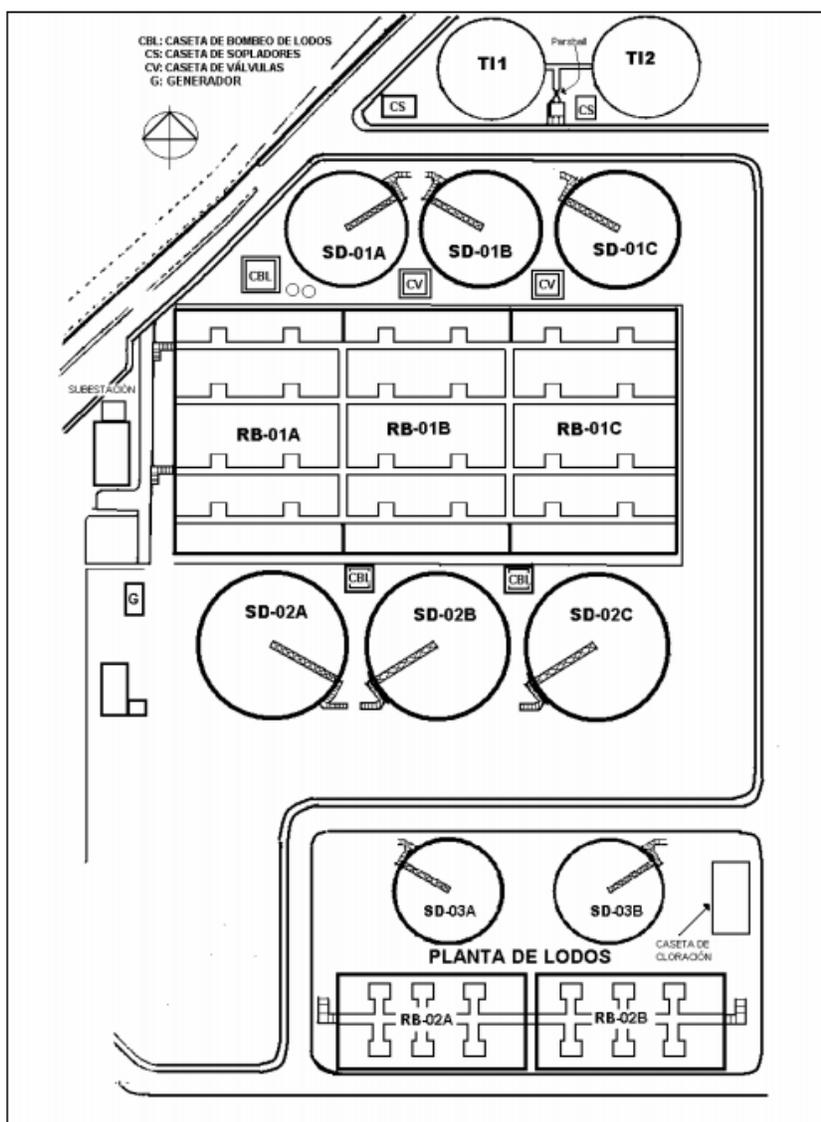


Figura 9. Esquema General de la Planta.



## Cárcamos de bombeo

El proceso de la PTAN comienza en los cárcamos de bombeo. Actualmente la planta cuenta con tres cárcamos de bombeo, en donde el agua recibe un pretratamiento y es enviada a la planta. El pretratamiento efectuado en los cárcamos de bombeo consta de las siguientes unidades:

- **Canal de derivación y conducción.** Este canal está conectado al colector sanitario por una sección de agujas metálicas de viga de acero tipo “U” de 4”.
- **Caja receptora.** Recibe el agua directamente del colector sanitario, se controla por una compuerta de función mecánica y manual para regular el flujo de entrada.
- **Compuerta de emergencia.** Está anexa a la caja receptora y se acciona con un freno eléctrico para cierre instantáneo de entrada de agua en caso de falla de energía eléctrica.
- **By-Pass.** Está instalado a la salida de la caja receptora conformado por válvulas de compuerta que se utiliza para seleccionar el canal de rejilla automática o manual para eliminación de gruesos.
- **Compuertas verticales.** Se utilizan ocasionalmente para seccionar canales y seccionar áreas del cárcamo húmedo.
- **Rejillas de gruesos automáticas.** Este elemento consiste en una estructura metálica de rastras dentadas, que se desplaza sobre una rejilla para eliminar en forma constante gruesos en suspensión de hasta 0.5 pulgadas de diámetro.
- **Rejillas de gruesos manuales.** Estos elementos se encuentran en el canal By-Pass de entrada, y se utilizan en caso de fallas de la rejilla automática.



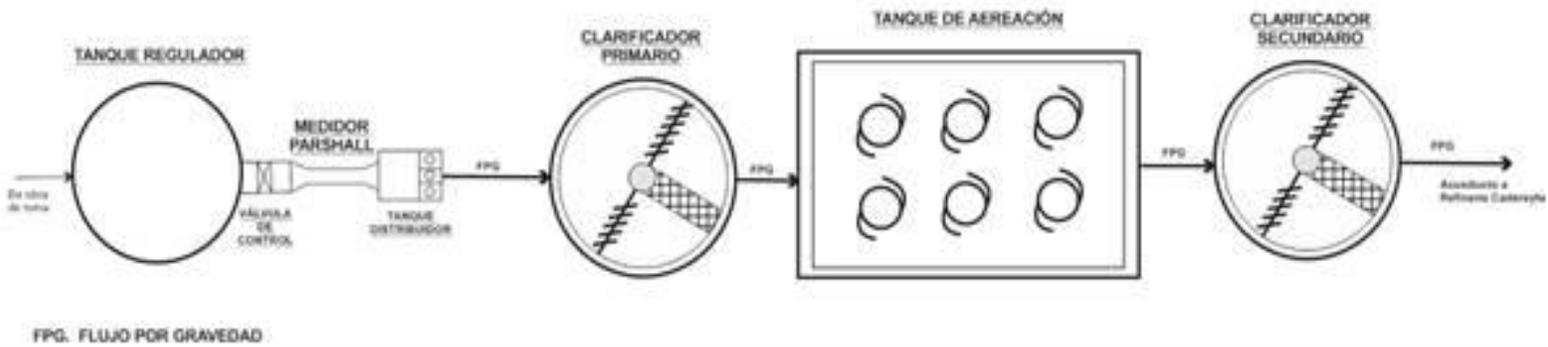
- **Canal Parshall.** Este equipo es un canal de medición de flujo para llevar un control del mismo y la medición de nivel es por burbujeo de aire.
- **Canales desarenadores.** Son cajas rectangulares de concreto con fondo plano y al final en forma de prisma que atrapa los sólidos; sus dimensiones reducen considerablemente la velocidad del agua negra, permitiendo la sedimentación de granos de arena hasta 0.5 milímetros de diámetro.
- **Pozo de bombeo.** Son cajas de concreto en dos secciones por debajo del nivel de los desarenadores, que reciben el agua negra libre de sólidos pesados o ligeros, gruesos y arenas; para ser conducidos por bombeo a la planta de tratamiento.

### **Planta de Tratamiento**

En la Planta de Tratamiento, las aguas negras son recibidas en dos tanques reguladores (TV-01 y TV-02), los cuales cuentan con un sistema continuo de inyección de aire en el fondo de los tanques para mantener un mezclado homogéneo del agua y evitar que adquiera características sépticas.

El volumen de agua a la salida de los tanques reguladores es controlado a partir de un sistema de medición Parshall, que se encuentra a la descarga de los tanques. Después del canal Parshall, el agua entra a una caja distribuidora para ser alimentada a los tres trenes de tratamiento.

De la caja de distribución, el agua residual es conducida a los clarificadores primarios mediante tubería de acero siguiendo el tren de tratamiento (Figura 10).



**Figura 10. Tren de Tratamiento de la PTAN.**

El primer paso de cada uno de los trenes de tratamiento es el clarificador primario (WL-01 A/B/C), en donde se lleva a cabo el tratamiento primario de las aguas negras. Este tratamiento se hace por sedimentación gravitacional, recolectando los sólidos en suspensión por medio de rastras y desnatadores.

El funcionamiento del equipo de desnatado es mediante un mecanismo o columna central que hace girar los brazos rotatorios, para arrastrar los sólidos flotantes o natas hacia una caja colectora de natas, la cual se encuentra ubicada en la periferia de las unidades, éstos presentan un sistema de rastras en el fondo del tanque para arrastrar los sólidos sedimentados hacia la caja colectora de lodos y son conducidos hacia un cárcamo de bombeo de lodos para su posterior tratamiento.

El segundo paso del tratamiento son los reactores biológicos (OB-01 A/B/C), en los cuales se lleva a cabo la oxidación de la materia orgánica contenida en el agua negra por medio de Lodos Activados.

Para llevar a cabo este proceso de tipo aerobio, se requiere oxigenación; la cual es suministrada a través de un sistema de aireación por burbuja fina (reactores OB-01 A/B) y un sistema de aireación superficial mediante aireadores mecánicos (reactor OB-01 C). El efluente de los reactores biológicos es enviado a los sedimentadores secundarios, en donde se lleva a cabo la sedimentación de los sólidos suspendidos. Al igual que los clarificadores primarios, estos equipos cuentan con rastras y desnatadores para recolectar los sólidos removidos, retornando una parte a los



reactores biológicos y enviando el exceso al cárcamo de bombeo de lodos para su tratamiento.

A la salida de los clarificadores secundarios, el agua pasa por un proceso de desinfección a través de una cloración en línea, esto con el fin de cumplir con la calidad del agua especificada por la Refinería.

El envío de agua a Refinería se realiza por medio de una tubería de acero de 30 pulgadas de diámetro a partir de flujo por gravedad gracias al desnivel existente entre la PTAN y la Refinería. Ya en la Refinería, el agua tratada es usada para servicios de enfriamiento, contra incendio y riego.

Para consulta detallada del tren de tratamiento de la planta, así como de las corrientes de proceso y equipos que lo conforman consultar el DFP (Anexo 1).

### **Tratamiento de Lodos**

Actualmente la planta no cuenta con equipos para el tratamiento de los lodos producidos. Los lodos que se purgan de los tanques reguladores, clarificadores primarios, reactores biológicos y clarificadores secundarios son enviados a un cárcamo de almacenamiento de lodos, para después ser bombeados a través de una línea de acero de ocho pulgadas de diámetro al prestador de servicio de agua negra para su tratamiento y disposición final.



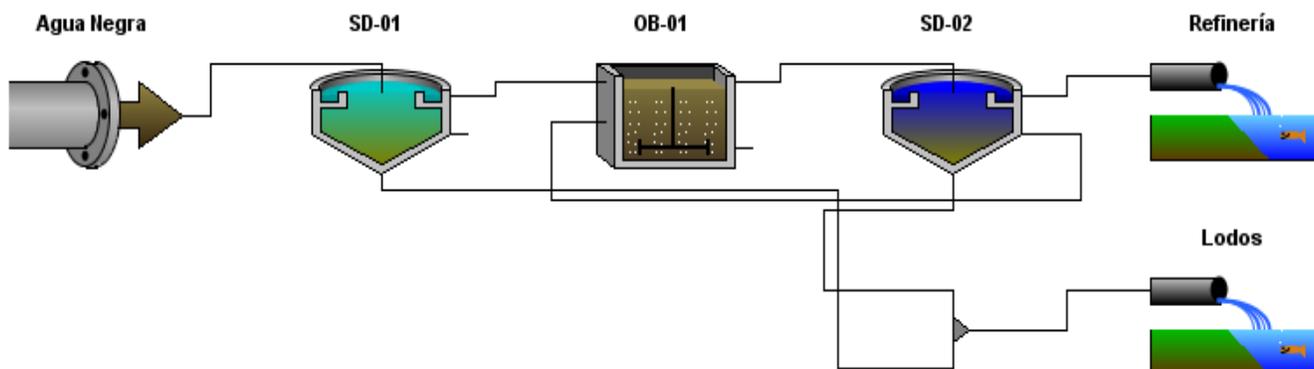
## 6 Desarrollo

### 6.1 Simulación GPS-X

El software GPS-X® es una herramienta para realizar modelado matemático, simulación, optimización y gestión de plantas de tratamiento de aguas residuales. (Hydromantis, Environmental Software Solutions Inc., s.f.).

Para la elaboración de este trabajo se utilizó este software para determinar la cantidad de lodos que se producen en la planta del caso de estudio, para lograr este objetivo, se simuló un tren de tratamiento de la planta que consta de los siguientes componentes (Figura 11):

- Entrada de agua negra
- Clarificador primario (SD-01)
- Reactor biológico (OB-01)
- Clarificador secundario (SD-02)
- Efluente de agua tratada (Enviada a Refinería).
- Efluente de lodos (Enviados a tratamiento)



**Figura 11. Tren de tratamiento simulado en el software GPS-X.**

Debido a que los tres trenes de tratamiento de la planta cuentan con las mismas características de capacidad de tratamiento de agua residual y las mismas dimensiones de equipos, sólo se introdujo un tren de tratamiento al software, contando con una capacidad de 300 L/s. Cabe mencionar que los resultados obtenidos en la simulación serán escalados para considerar la producción de lodos de los tres trenes de tratamiento.



Para la elaboración de la simulación del proceso de la planta se eligió la librería de componentes con la que el programa define las variables de operación del sistema. Debido a que no se cuenta con toda la información disponible de los parámetros fisicoquímicos de entrada del agua negra, se eligió la librería "Cnlib", esto a partir de lo mencionado en el manual técnico del programa.

Una vez elegida la librería para la simulación, se procedió a proporcionar algunos parámetros de calidad de entrada del agua negra, obtenidos de bitácoras de operación la planta<sup>a</sup>, a partir de los cuales el software realizará los cálculos para todos los tratamientos con los que cuenta el tren. Los datos que se alimentaron al programa se muestran en la Tabla 19.

**Tabla 19. Datos de calidad de agua influente a la planta alimentados al software.**

Parámetro	Unidad	Valor
DQO	$g_{DQO}/m^3$	310
Oxígeno disuelto	$g_{O_2}/m^3$	0.107
Alcalinidad	$mol/m^3$	4.06
DQO/SSV	$g_{DQO}/g_{SSV}$	1.11
DBO5/DBO <sub>última</sub>		0.565
SSV/SST	$g_{SSV}/g_{SST}$	0.75
Nitrógeno Total Kjeldahl	$g_N/m^3$	40

### 6.1.1 Simulación del clarificador primario

La sedimentación es uno de los procesos más importantes durante el tratamiento de aguas a partir del sistema de lodos activados. Ya sean clarificadores primarios, clarificadores secundarios o espesadores de lodos; las unidades de sedimentación tienen dos funciones: clarificación y espesamiento.

Los sedimentadores primarios y los espesadores de lodos son diseñados y operados con el fin de tomar ventaja del proceso de espesamiento, mientras que

<sup>a</sup> UPIIA, Soporte técnico, económico y legal para definir el esquema más conveniente de continuidad operativa de las PTAN's y la opción contractual para los tratamientos y sustancias químicas del SNR, Actividad 4, UNAM, Agosto, 2013.



los clarificadores secundarios, son diseñados y operados con el objetivo de tomar ventaja del proceso de clarificación.

En el software GPS-X®, se cuenta con distintos modelos para la simulación de los procesos de clarificación. Para este trabajo, se determinó el proceso de clarificación primaria a partir del modelo “*simple1d*”, debido a que este modelo matemático es unidimensional no reactivo.

Para la simulación del proceso, se introdujeron parámetros físicos y operacionales del sedimentador con el fin de determinar la cantidad y calidad de lodos que se producen durante esta etapa del tratamiento.

Los clarificadores primarios con los que cuenta la planta (SD-01) son clarificadores circulares que llevan a cabo la sedimentación a partir de rastras mecánicas. Para llevar a cabo la simulación de este proceso, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- 1) Los sólidos entrantes a la unidad de sedimentación son distribuidos instantánea y uniformemente a través de toda la sección transversal de la corriente de alimentación.
- 2) Sólo se considera flujo vertical.

Los datos alimentados al programa para la simulación del proceso de clarificación se presentan en la Tabla 20.

**Tabla 20. Parámetros físicos y operacionales del clarificador primario.**

Tipo de clarificador	Circular de fondo plano	
Punto de alimentación	0.9	m
Superficie	804.25	m <sup>2</sup>
Profundidad del agua	4.42	m
Límite de concentración de lodos	2000	mg <sub>SST</sub> /L
Velocidad máxima de sedimentación	200	m/d
Tiempo de retención hidráulico mínimo	0.021	d
Tiempo de retención hidráulico máximo	0.5	d



### 6.1.2 Simulación del reactor biológico.

Una vez simulado el proceso de clarificación primaria, se procedió a la programación del reactor biológico. Esto se realizó a través de los parámetros físicos y operacionales de los reactores biológicos, obtenidos de las bitácoras de operación de la planta.

Para la simulación de este proceso en el programa, se utilizó el modelo “*MANTIS*”, en el cual, la materia orgánica es categorizada de acuerdo a un determinado número de características. Primero, se toma en cuenta la biodegradabilidad del material. La materia orgánica no biodegradable pasa a través del sistema sin sufrir cambios y se puede clasificar a partir de su estado físico (soluble o particulada) más adelante. La materia particulada generalmente es removida con la corriente del lodo activado residual, mientras que la materia soluble abandona el sistema con el efluente.

Este modelo trabaja a partir de las siguientes premisas:

- 1) Se consideran dos procesos de crecimiento de biomasa, uno para organismos autótrofos y uno para organismos heterótrofos.
- 2) Los parámetros cinéticos son dependientes de la temperatura.
- 3) Se introduce la desnitrificación aeróbica.

La biomasa heterótrofa es generada por el crecimiento de sustrato fácilmente biodegradable bajo condiciones aeróbicas o anóxicas y decaimientos (incluyendo respiración endógena, muerte, depredación y lisis). La biomasa autótrofa es generada bajo condiciones aerobias utilizando amoníaco como energía o para decaimientos bajo todas las condiciones.

Los datos alimentados al simulador para la simulación de este proceso se enlistan en la Tabla 21.



**Tabla 21. Parámetros físicos y operacionales del reactor biológico.**

Tipo de reactor biológico	Tanque de mezclado completo	
Volumen máximo	4500	m <sup>3</sup>
Profundidad del tanque	4.5	m
Método de aireación	Difusión de aire	
Fracción orgánica (DQO/SSV)	1.48	g <sub>DQO</sub> /g <sub>SSV</sub>
Relación (DBO <sub>5</sub> /DBO <sub>última</sub> )	0.66	
Rendimiento heterótrofo	0.666	g <sub>DQO</sub> /g <sub>DQO</sub>
Fracción endógena heterótrofa	0.08	g <sub>DQO</sub> /g <sub>DQO</sub>
Rendimiento autótrofo	0.24	g <sub>COB</sub> /g <sub>N</sub>
Fracción endógena autótrofa	0.08	g <sub>DQO</sub> /g <sub>DQO</sub>
Relación de decaimiento heterótrofo	0.62	1/d
Relación de decaimiento autótrofo	0.17	1/d
Tiempo de retención hidráulico mínimo	0.05	d
Tiempo de retención hidráulico máximo	2	d
MLSS mínimo	800	mg/L
MLSS máximo	6000	mg/L

### 6.1.3 Simulación del clarificador secundario.

Para la simulación de la etapa final del tren de tratamiento de la planta (clarificación secundaria), se utilizó el mismo modelo para la determinación de la cantidad y calidad de lodo producido (“*simple 1d*”). El clarificador secundario con el que cuenta la planta es un tanque circular de fondo plano, que cuenta con una rastra mecánica que tiene el objetivo de eliminar los sólidos removidos.

Los datos alimentados al programa para la simulación de este proceso se observan en la Tabla 22.

**Tabla 22. Parámetros físicos y operacionales del clarificador secundario.**

Tipo de clarificador	Circular de fondo plano	
Punto de alimentación	1	m
Superficie	1231.63	m <sup>2</sup>
Profundidad del agua	4.42	m
Límite de concentración de lodos	2000	mg <sub>SS</sub> /L
Velocidad máxima de sedimentación	200	m/d
Tiempo de retención hidráulico mínimo	0.021	d
Tiempo de retención hidráulico máximo	0.5	d



Ya introducidos todos los equipos que conforman un tren de tratamiento al simulador, se obtuvo el caudal de lodos producidos, así como su calidad. Estos resultados se presentan en la Tabla 23.

**Tabla 23. Caracterización de lodos producidos por tren de tratamiento.**

Parámetro	Unidades	
Flujo	L/s	5.03
Flujo másico	kg/h	18832.3
SST	mg/L	14920
SSV	mg/L	10970
DBO5	mg/L	5853
DQO	mg/L	12860
Alcalinidad	mg <sub>CaCO3</sub> /L	157.2
NTK	mg <sub>N</sub> /L	731.6

Considerando que la planta consta de tres trenes de tratamiento de agua idénticos, el flujo con el que se diseñaron los equipos de estabilización de lodos es de 15.09 lps.

## 6.2 Diseño de los equipos de estabilización de lodos.

En esta sección se presentan los cálculos desarrollados para el diseño de los tres equipos de estabilización de lodos, a partir de los cuales se llevó a cabo el análisis técnico-económico.

### 6.2.1 Digestión anaerobia.

Una vez determinada la cantidad y calidad de lodos producidos (Tabla 23), se elaboró el diseño del reactor de digestión anaerobia. El primer paso para determinar las especificaciones de este equipo fue determinar la temperatura de operación del reactor así como el tiempo de residencia del mismo. En la NOM-004-SEMARNAT-2002 se muestran las regulaciones existentes para el proceso de estabilización con el fin de reducir el contenido de patógenos en los lodos. A partir de estas regulaciones se decidió que las condiciones de diseño son:



- Temperatura de operación: 40 °C
- Tiempo de retención de lodo (SRT): 15 días.
- Volumen de lodo a tratar: 1303.77 m<sup>3</sup>/día
- Carga de materia orgánica en la corriente de entrada: 2543.67 kg/d
- Coeficiente de producción celular (Y): 0.08 kg<sub>SSV</sub>/kg<sub>DBO</sub> (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)
- Coeficiente de decaimiento endógeno (k<sub>d</sub>): 0.03 d<sup>-1</sup> (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).

A partir de estos valores se realizaron los siguientes cálculos:

- Volumen del reactor

$$V = Q * SRT = (15d) * \left(1303.77 \frac{m^3}{d}\right) = 19\ 556.5\ m^3 \quad (4)$$

- Conversión de sólidos en el reactor

$$S = 2543.67 \frac{kg}{d} * (1 - 0.7^b) = 763.10 \frac{kg}{d} \quad (5)$$

- Producción de sólidos volátiles

$$P_X = \frac{Y*(S_0-S)}{1+k_d*SRT} = \frac{(0.08 \frac{kg}{d}) * (2543.67 \frac{kg}{d} - 763.10 \frac{kg}{d})}{1+(0.03\ d^{-1} * 15\ d)} = 98.24 \frac{kg_{SSV}}{d} \quad (6)$$

- Porcentaje de estabilización de lodos

$$\%S = \frac{[(S_0-S) - 1.42 P_x]}{S_0} * 100 = \frac{[(2543.67 \frac{kg}{d} - 763.10 \frac{kg}{d}) - 1.42(98.24 \frac{kg_{SSV}}{d})]}{2543.67 \frac{kg}{d}} = 64.51\ \% \quad (7)$$

- Volumen de metano producido

$$V_{CH_4} = (0.4) * [(S_0 - S) - 1.42 P_x] = (0.4) * \left[ \left(2543.67 \frac{kg}{d} - 763.10 \frac{kg}{d}\right) - 1.42(98.24 \frac{kg_{SSV}}{d}) \right] = 656.42 \frac{m^3}{d} \quad (8)$$

El último parámetro técnico que se determinó para esta alternativa fue la cantidad mínima de instrumentos que necesita este proceso para operar de manera eficiente. En el caso de la digestión anaerobia se necesitan mínimo 22 instrumentos controlando las variables del proceso (presión, temperatura, flujo, etc.) para llevar a cabo una operación correcta de dicho proceso (U.S. EPA, 1979).

En la Tabla 24 se resumen los parámetros técnicos calculados para este proceso.

<sup>b</sup> (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)



**Tabla 24. Criterios técnicos calculados para la digestión anaerobia.**

Parámetro	Unidades	Valor
Volumen requerido	m <sup>3</sup>	19556.5
Porcentaje de disminución de SSV	%	64.51
Instrumentación requerida	Pz.	22
Producción de biogás	m <sup>3</sup> /d	656.42

### 6.2.2 Digestión aerobia

El diseño del digestor aerobio se realizó a partir de las condiciones especificadas en la norma NOM-004-SEMARNAT-2002, en la cual se mencionan las condiciones de operación del reactor para disminuir la cantidad de patógenos y garantizar la calidad de los lodos para su disposición. A partir de dicha tabla, las condiciones con las que se realizó el diseño de este equipo son:

- Temperatura de operación: 20 °C
- Tiempo de retención de los lodos en el reactor: 40 días

A partir de estos parámetros se determinó el porcentaje de reducción de sólidos volátiles, como se especifica en el Anexo 2. Utilizando dicha gráfica, el porcentaje de reducción de SSV es aproximadamente el 45%.

Ya calculado el porcentaje de reducción de sólidos en la corriente de lodos, se establecieron los criterios necesarios para llevar a cabo el diseño del reactor, estos criterios se muestran a continuación:

- Caudal de lodos a tratar (Q): 1303.77 m<sup>3</sup>/d
- Fracción de DBO como sólidos primarios en el influente (Y): 0.4
- Sólidos suspendidos en el influente (X<sub>i</sub>): 14920 mg/L
- DBO en el influente (S<sub>i</sub>): 5853 mg/L
- Concentración de sólidos dentro del reactor (X): 8000 mg/L
- Coeficiente de decaimiento endógeno (k<sub>d</sub>): 0.06 d<sup>-1</sup>
- Fracción volátil de sólidos (P<sub>v</sub>): 0.75

Una vez determinados los parámetros de diseño, se realizaron los siguientes cálculos:



- Volumen del reactor:

$$V = \frac{Q*(X_i+Y*S_i)}{X(k_d*P_v+\frac{1}{SRT})} = 40187.15 \text{ m}^3 \quad (9)$$

- Reducción de SSV:

Considerando un contenido de  $SST_i = 6485 \text{ kg/d}$  en el influente:

$$SSV_i = 0.75 * SST_i = 4863.75 \frac{\text{kg}_{SSV}}{\text{d}} \quad (10)$$

$$\text{Reducción de SSV} = 4863.75 * 0.45 = 2188.69 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \quad (11)$$

- Requerimientos de  $O_2$

Considerando  $2.3 \text{ kg}_{O_2}/\text{kg}_{SSV}$  reducido (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).

$$\text{Req. Oxígeno} = 2188.69 * 2.3 = 5033.99 \frac{\text{kg}_{O_2}}{\text{d}} \quad (12)$$

Para la determinación de la cantidad de instrumentos necesarios para el control del proceso de digestión aerobia se utilizaron las especificadas en el manual de la “Environmental Protection Agency” para diseño de procesos de tratamiento de lodos. A partir de este documento se obtuvo que se necesitan mínimo 16 instrumentos para controlar las variables de proceso y llevar a cabo de manera eficiente la estabilización de los lodos (U.S. EPA, 1979).

En la Tabla 25 se encuentra un resumen de los criterios calculados para este proceso.

**Tabla 25. Criterios técnicos calculados para la digestión aerobia.**

Parámetro	Unidades	Valor
Volumen requerido	$\text{m}^3$	40187.15
Porcentaje de disminución de SSV	%	45
Instrumentación requerida	Pz.	16
Requerimientos de Oxígeno	$\text{kg/d}$	5033.99



### 6.2.3 Estabilización alcalina.

Para el diseño del equipo de estabilización con cal, se tomaron en cuenta las especificaciones señaladas en la NOM-004-SEMARNAT-2002, referentes a la reducción de patógenos en los procesos de estabilización de lodos. En dicha norma se especifica que se tiene que dosificar la cantidad necesaria de cal para mantener el pH de la corriente de lodos en 12 por lo menos durante media hora, esto para garantizar que la corriente de lodos se encuentra estabilizada y no atraerá vectores. A partir de dicha información, los criterios de diseño establecidos para este proceso fueron siguientes:

- Dosis de cal ( $D_c$ ):  $0.12 \text{ kg}_{\text{Ca(OH)}_2} / \text{kg}_{\text{lodos secos}}$  (U.S. EPA, 1979).
- Caudal de lodos a tratar ( $Q$ ):  $15.09 \text{ L/s}$
- Flujo másico de lodos a tratar ( $F$ ):  $56496.96 \text{ kg/h}$
- Porcentaje de sólidos en la corriente de lodos ( $\%P$ ):  $4.3\%$
- Tiempo de retención de la mezcla ( $SRT$ ):  $30 \text{ min}$  (U.S. EPA, 1979).

Una vez establecidos los criterios de diseño, se calcularon los siguientes parámetros técnicos para este proceso:

❖ Cantidad de cal

$$W = F * D_c * \%P = 273.22 \frac{\text{kg}_{\text{Ca(OH)}_2}}{\text{h}} \quad (13)$$

❖ Volumen del tanque de estabilización.

$$V = Q * SRT = 27.16 \text{ m}^3 \quad (14)$$

Con respecto a la instrumentación mínima requerida para llevar a cabo este proceso, se determinó que se necesita instalar mínimo 12 instrumentos para el control de las variables de proceso (U.S. EPA, 1979).

En la Tabla 26 se encuentra un resumen de los criterios calculados para este proceso de estabilización de lodos.



**Tabla 26. Criterios técnicos calculados para la estabilización alcalina.**

Parámetro	Unidades	Valor
Volumen requerido	m <sup>3</sup>	27.16
Porcentaje de disminución de SSV	%	-
Instrumentación requerida	pz	12
Consumo de reactivos (cal)	kg/h	273.22

Como se puede observar en los resultados presentados en la Tabla 26, en este proceso de estabilización no se presenta una disminución en el contenido de sólidos en suspensión volátiles de la corriente de lodos, esto debido a que a partir de este tratamiento sólo se busca mantener el pH de la corriente de lodos por encima de 12 para que los lodos no atraigan vectores y se pueda asegurar su disposición.

### **6.3 Estimado de inversión a través del software Capdetworks®.**

Este software es una herramienta que permite desarrollar un diseño preliminar rápido y preciso de proyectos de construcción de plantas de tratamiento de aguas, así como los costos asociados al proyecto. Dicho software utiliza algoritmos de diseño aceptados por la industria, con el objetivo de obtener el diseño de las unidades de proceso requeridas.

#### **6.3.1 Consideraciones generales.**

Para la estimación de los costos asociados a cada uno de los procesos propuestos, el programa con una serie de índices y parámetros para la elaboración de un estimado de costos a nivel Ingeniería Conceptual. Debido a que estos valores sólo son aplicables para E.U.A., los índices utilizados para la estimación y diseño de los equipos de estabilización se muestran en la Tabla 27.



**Tabla 27. Parámetros de costos utilizados en el diseño de los equipos de estabilización (Comisión Nacional del Agua, 2007).**

<b>Concepto</b>	<b>Costo (USD)</b>
Edificios	220.59/m <sup>2</sup>
Movimiento de tierra	7.07/m <sup>3</sup>
Concreto en muros	282.88/m <sup>3</sup>
Techumbres	69.66/m <sup>2</sup>
Pasamanos	89.23/m
Renta de grúa	72.36S/hr
Electricidad	0.05/kWh
<b>Productos químicos</b>	
Cal	0.08/kg
Alumbre	0.10/kg
Sales de hierro	0.14/kg
Polímeros	3.86/kg
Mano de obra de construcción	7.02/hr
Mano de obra de operadores	4.05/hr
Mano de obra de instaladores	7.56/hr

Una vez establecidos los parámetros de costos a los establecidos para los sistemas de tratamiento en México, se determinaron los índices para actualizar los costos de inversión, operación y mantenimiento arrojados por el software. Los cálculos realizados para los índices se muestran en el Anexo 3. En la Figura 12 se muestran los índices que se alimentaron al software.



The screenshot shows a software window titled "Cost Indices" with a tab labeled "Cost Indices". The window contains a list of cost indices with corresponding input fields and document icons. The data is as follows:

Cost Index	Value
Marshall and Swift Index	1561.4
Engineering News Records Cost Index	9870.1
Pipe Cost Index	876.2
User Cost Index 1	100
User Cost Index 2	100
User Cost Index 3	100

At the bottom of the window, there are "Accept" and "Cancel" buttons, along with a help icon and a refresh icon.

**Figura 12. Actualización de los índices de costos.**

Para el diseño y determinación de los costos de los equipos, se ingresó la información obtenida de la calidad de los lodos a tratar (Tabla 23) como se muestra en la Figura 13.



The screenshot shows a software window titled 'Influent Biosolids' with three tabs: 'Influent Biosolids', 'Other Contaminants', and 'Temperature'. The 'Influent Biosolids' tab is active, displaying a list of parameters with their respective values and units. Each parameter has a text input field and a unit label, with a document icon to the right of each row. At the bottom of the window are 'Accept' and 'Cancel' buttons.

Parameter	Value	Unit
Average Flow	15.09	L/s
Minimum Flow	15.09	L/s
Maximum Flow	15.09	L/s
Suspended Solids	14920	mg/L
% Volatile Solids	75	%
BOD5	5853	mg/L
Soluble BOD	4097.1	mg/L
COD	12860	mg/L
Soluble COD	9002	mg/L
TKN	731.6	mgN/L
Soluble TKN	512.12	mgN/L
Ammonia	18.71	mgN/L
Total Phosphorus	800	mgP/L

**Figura 13. Caracterización de los lodos a tratar.**

Cabe mencionar que para los tres procesos de estabilización se estableció un proceso de disposición de los lodos estabilizados, para lo cual se consideró un costo de manejo y transporte de los lodos al punto de disposición final. Las características de este servicio se muestran en la Tabla 28.

**Tabla 28. Características del transporte de lodos al punto de disposición.**

Parámetro	Unidades	Valor
Distancia al sitio de disposición	m	10
Horas de operación al día	h	8
Tiempo de carga por vehículo	h	0.75



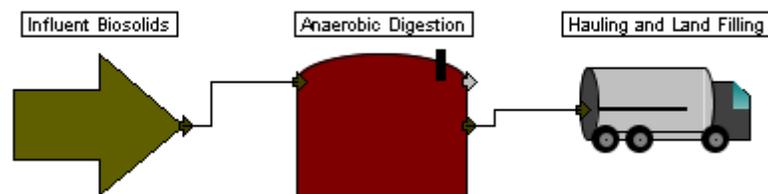
Ya definidos todos los parámetros necesarios para la simulación, se alimentaron las condiciones de cada uno de los procesos diseñados al software para determinar los costos generados por cada uno, los cuales se estimaron a partir de las siguientes premisas:

- Los costos de inversión estimados incluyen la instalación del equipo de estabilización de lodos y el manejo de lodos hacia el sitio de disposición.
- Los costos de operación consideran el consumo de energía eléctrica del proceso, consumo de reactivos, costos de mano de obra y mantenimiento a los equipos.

A partir de estas condiciones, se elaboró una simulación de los procesos de estabilización para determinar los criterios económicos para cada una de las alternativas propuestas.

### 6.3.2 Cálculo de costos para el proceso de digestión anaerobia

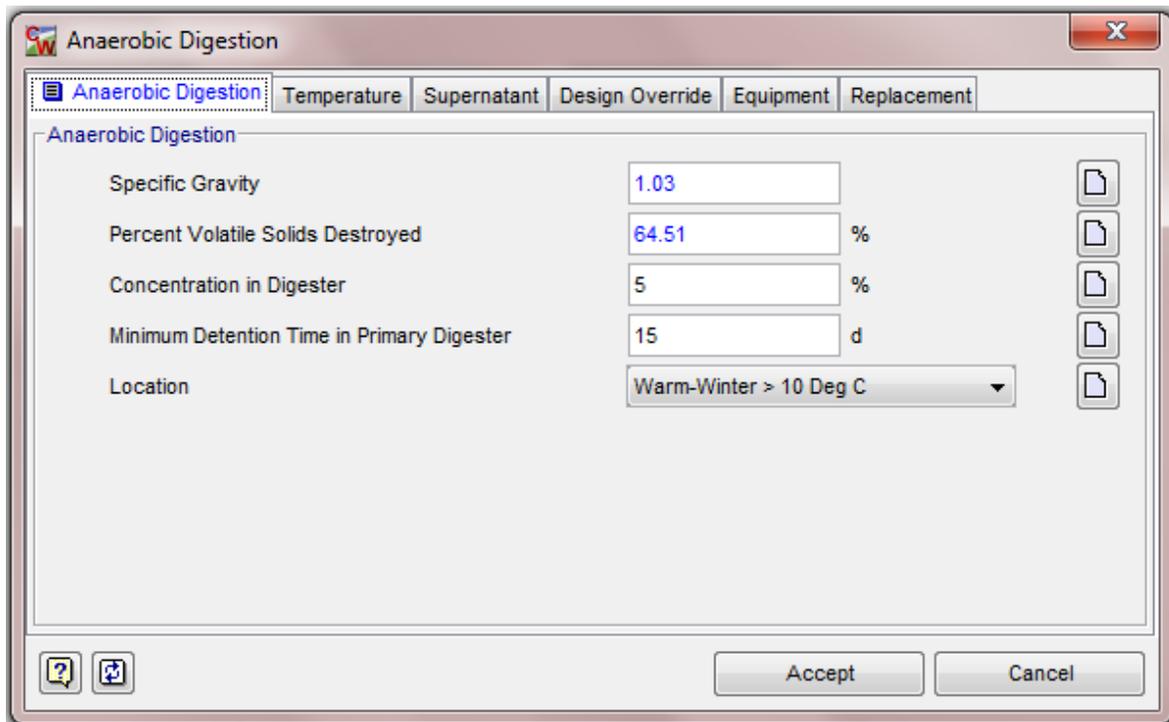
En la Figura 14 se muestra el tren de tratamiento que se introdujo al programa Capdetworks® para determinar los costos de inversión, operación y mantenimiento de este proceso. El proceso de tratamiento que se simuló consta de la corriente de lodos a tratamiento, un digestor anaerobio convencional de una etapa y un sistema para transportar los lodos digeridos a disposición.



**Figura 14. Modelado del sistema de tratamiento de digestión anaerobia en Capdetworks®.**



Una vez determinados los componentes del sistema de tratamiento, se introdujeron los parámetros calculados para este proceso (Tabla 24) en el software, como se muestra en la Figura 15, Figura 16 y Figura 17.



**Figura 15. Parámetros de diseño del digestor anaerobio alimentados a Capdetnetworks.**



ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS  
ALTERNATIVAS PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS  
EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

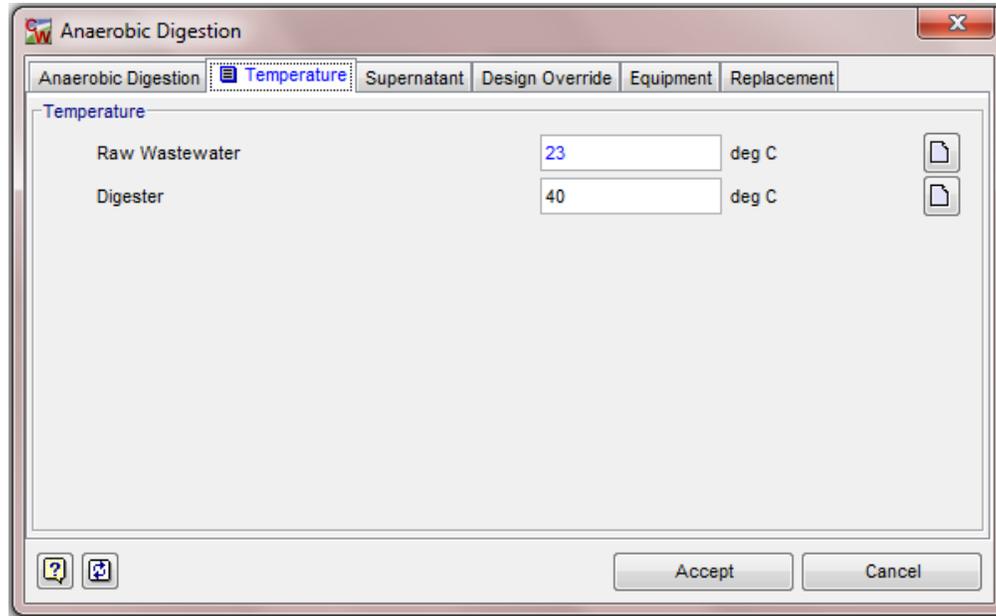


Figura 16. Condiciones de temperatura del digester anaerobio alimentadas a Capdetworks.

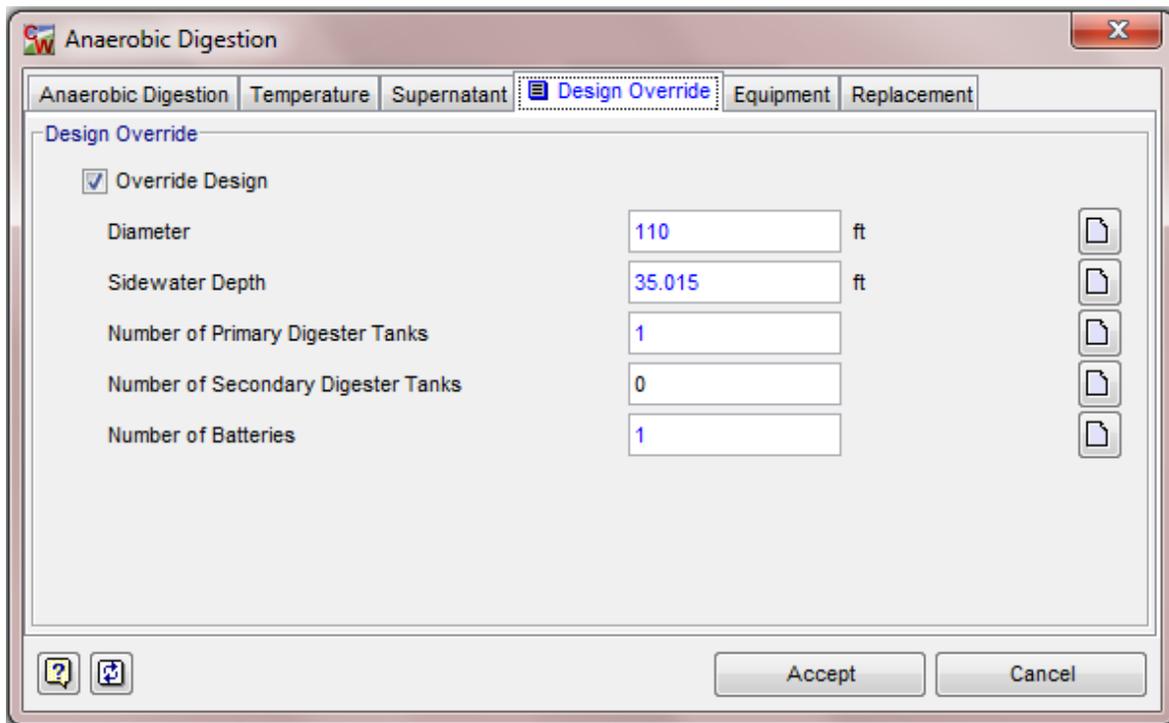


Figura 17. Dimensiones del digester anaerobio alimentadas a Capdetworks.



A partir de los datos alimentados al programa, los resultados obtenidos para la digestión anaerobia se muestran en la Tabla 29.

**Tabla 29. Resultados de Capdetworks para la digestión anaerobia.**

Parámetro	Unidades	Valor
Costo de inversión	USD	\$26,490,000.00
Costo de operación	USD/año	\$100,230.00
Flujo de lodos a disposición	m <sup>3</sup> /d	201

Una vez obtenidos los costos asociados a esta alternativa, se calcularon dos indicadores económicos para evaluar la rentabilidad del proyecto. Los indicadores calculados fueron el Valor Presente de los Costos (VPC) y el Costo Anual Equivalente (CAE). Para el cálculo de estos valores se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- La tasa de interés a la que se calcularon estos indicadores es del 10% (tasa social de descuento para proyectos del estado) (Secretaría de Hacienda y Crédito Público, 2014).
- El horizonte de evaluación del proyecto es de 10 años.

En el Anexo 4 se muestra el detalle de los cálculos realizados para los indicadores de rentabilidad económica.

De acuerdo con lo establecido en dicho anexo, en la Tabla 30 se presentan los valores obtenidos para estos indicadores.

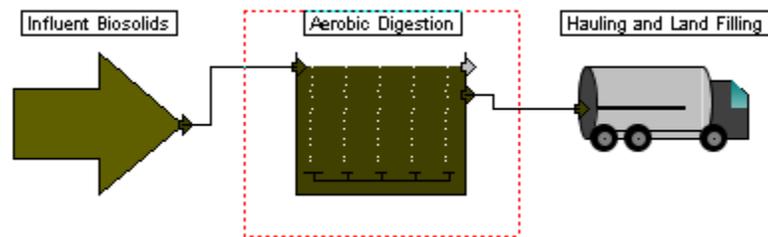
**Tabla 30. Indicadores de viabilidad económica para la digestión anaerobia.**

Indicador	Unidades	Valor
VPC	USD	\$27,105,869.96
CAE	USD	\$4,411,355.51



### 6.3.3 Cálculo de costos para el proceso de digestión aerobia

En la Figura 18 se muestra el tren de tratamiento establecido para el sistema de digestión aerobia. Este sistema cuenta con un digestor aerobio convencional de una etapa y un sistema de manejo y transporte de lodos a su disposición.



**Figura 18. Modelado del sistema de digestión aerobia en Capdetworks.**

Ya definidos los componentes de esta alternativa de tratamiento de lodos, se introdujeron los cálculos de diseño obtenidos en la Tabla 25 para determinar los costos de inversión y operación para esta alternativa.

En la Figura 19 y Figura 20 se observan los datos alimentados al programa para el diseño de este sistema de tratamiento.



ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS  
ALTERNATIVAS PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS  
EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

Parameter	Value	Unit
Detention Time	40	d
Volatile Solids Destroyed	45	%
Mixed Liquor Solids	12000	mg/L
Digested Sludge Concentration	3	%
Temperature	20	deg C
Aeration Type	Mechanical Aeration	

Figura 19. Condiciones de operación del digester aerobio en Capdetworks.

Parameter	Value	Unit
Total Volume	52154	m3
Tank Width	26	m
Tank Depth	5	m
Pipe Gallery Width	6.1275	m
Excavation Depth	1.3	m
Number of Tanks	1	
Number of Batteries	1	
Required Air Flow - Diffused Aeration	0.0	N m3/min/1000 m3
Required Horsepower - Mechanical Aeration	1789.4	kW

Figura 20. Dimensiones del digester aerobio en Capdetworks.



Los costos arrojados por el software y el cálculo de los indicadores económicos se muestran en la Tabla 31 y Tabla 32 respectivamente.

**Tabla 31. Resultados de Capdetworks para la digestión aerobia.**

Parámetro	Unidades	Valor
Costo de inversión	USD	\$19,830,000.00
Costo de operación	USD	\$872,400.00
Flujo de lodos a disposición	m <sup>3</sup> /d	322

**Tabla 32. Indicadores de viabilidad económica para la digestión aerobia.**

Indicador	Unidades	Valor
VPC	USD	\$25,190,520.34
CAE	USD	\$4,099,641.18

#### 6.3.4 Cálculo de costos para el proceso de estabilización con cal

Debido a que el software Capdetworks® no cuenta con un equipo para simular el proceso de estabilización con cal, los costos de inversión, operación y mantenimiento para este proceso se estimaron a partir de valores encontrados en la literatura. Los costos encontrados en literatura corresponden a costos de plantas de estabilización de lodos para el año 1979, por lo que estos costos fueron actualizados como se muestra en el Anexo 3. Los valores de costos para el año 2014 se muestran en la Tabla 33.

**Tabla 33. Estimado de costos anuales para instalaciones de estabilización con cal (U.S. EPA, 1979).**

	Capacidad de tratamiento de la planta (mgd)		
	1	4	40
Costo de inversión (USD)	\$27,560.10	\$79,005.62	\$228,880.07
Costo de operación y mantenimiento (USD/año)	\$33,072.12	\$94,229.30	\$675,616.18
Total (USD)	\$60,632.22	\$173,234.92	\$904,496.25



A partir de estos valores se realizó un ajuste de capacidad a partir de la regla de los seis décimos, la cual se utiliza para estimar el costo de una planta cuando se conocen costos para plantas del mismo tipo con distinta capacidad. Los costos ajustados con la capacidad de lodos producidos en la planta se muestran en la Tabla 34.

**Tabla 34. Ajuste de capacidad de los costos para el proceso de estabilización alcalina.**

Capacidad de tratamiento (mgd)	0.34
Costos de Inversión (USD)	\$14,426.74
Costos de Operación y mntto. (USD/año)	\$17,312.09

De igual manera se determinaron los costos de inversión y operación correspondientes al manejo y transporte de lodos a su punto de disposición. En la Figura 21 se muestra el esquema que se introdujo al software para determinar los costos del manejo de lodos.



**Figura 21. Esquema de manejo de lodos para la estabilización alcalina.**

Una vez simulado el proceso de manejo de lodos, se determinaron los costos totales para esta alternativa, los cuales se muestran en la Tabla 35. De igual manera se determinaron los indicadores de viabilidad económica, estos se muestran en la Tabla 36.



**Tabla 35. Costos totales para el proceso de estabilización alcalina.**

Parámetro	Unidades	Valor
Costo de inversión	USD	\$10,988,629.31
Costo de operación	USD	\$125,916.00
Flujo de lodos a disposición	m <sup>3</sup> /d	1303.78

**Tabla 36. Indicadores de viabilidad económica para la estabilización alcalina.**

Indicador	Unidades	Valor
VPC	USD	\$10,988,629.31
CAE	USD	\$1,788,348.82

Una vez determinados los criterios técnicos y económicos para las tres alternativas propuestas de tratamiento, se procedió a realizar la evaluación multicriterio para determinar cuál es la mejor alternativa de tratamiento de lodos.

En la Tabla 37 se muestra un cuadro resumen de todos los parámetros técnicos y económicos calculados para las distintas alternativas propuestas.

**Tabla 37. Cuadro resumen de los criterios calculados para las alternativas de estabilización de lodos.**

Criterio	Digestión Anaerobia	Digestión Aerobia	Estabilización alcalina
Volumen requerido (m <sup>3</sup> )	19556.5	40187.15	27.16
Consumo de reactivo (kg/h)	-	-	273.22
Disminución de SSV (%)	64.51	45	-
Lodos a disposición (m <sup>3</sup> /d)	201	322	1303.78
Instrumentación requerida (pza.)	22	16	12
Producción de biogás (m <sup>3</sup> /d)	1009.87	-	-
Costo de Inversión (USD)	\$26,490,000.00	\$19,830,000.00	\$10,214,930.00
Costo de Operación (USD/año)	\$100,230.00	\$872,400.00	\$125,916.00
VPC (USD)	\$27,105,869.96	\$25,190,520.34	\$10,988,629.31
CAE (USD)	\$4,411,355.51	\$4,099,641.18	\$1,788,348.82



#### 6.4 Análisis multicriterio

Para la elección de la propuesta técnica y económicamente más viable, se utilizó el software de análisis multicriterio Visual PROMETHEE, en el cual se establecieron una serie de criterios técnicos y económicos con el fin de determinar cuál es la mejor de las alternativas.

Los parámetros establecidos para la evaluación fueron elegidos a partir de entrevistas con expertos en la materia de tratamiento de agua, así como de Ingeniería de Costos. La descripción de cada uno de estos parámetros se observa en la Tabla 38.

**Tabla 38. Definición de los criterios a evaluar en análisis multicriterio.**

	<b>Criterios</b>	<b>Definición</b>
<b>Técnicos</b>	Volumen Requerido (m <sup>3</sup> )	Volumen necesario para la instalación de cada uno de los equipos propuestos.
	Consumo de Reactivos (lb/d)	Cantidad de reactivos necesaria para llevar a cabo las operaciones unitarias diseñadas
	Disminución de SSV (%)	Porcentaje de estabilización de los lodos, después de ser sometidos a los procesos de estabilización especificados.
	Producción de lodos (m <sup>3</sup> /d)	Cantidad de lodos estabilizados producidos.
	Instrumentación requerida (pza.)	Cantidad de instrumentos de medición de las distintas variables manejadas durante los procesos de estabilización.
	Producción de biogás (m <sup>3</sup> /d)	Biogás generado a partir del tratamiento de lodos.
<b>Económicos</b>	Costo de inversión (USD)	Gasto asociado a la adquisición de los equipos y accesorios necesarios para llevar a cabo las propuestas de estabilización.
	Costos de operación (USD/año)	Incluyen los costos de reactivo, energía eléctrica, y costos de mantenimiento de los equipos.
	Valor Presente de los costos (USD)	Valor actual de los gastos efectuados por las distintas alternativas durante el horizonte de evaluación del proyecto (10 años).
	Costo Anual Equivalente (USD)	Cantidad de dinero por año del costo de inversión del propietario durante la vida útil del activo.



Para establecer el análisis multicriterio, se define si cada uno de los criterios especificados se quiere minimizar o maximizar. A partir de esto, el programa establecerá una preferencia dependiendo del valor que tengan las alternativas para cada uno de los criterios específicos.

Una vez establecidos los criterios a evaluar a cada una de las alternativas propuestas, se procedió a asignar el peso específico a cada uno de los criterios.

Debido a que se trata de una evaluación multicriterio, la asignación de los pesos específicos de cada uno de los criterios es una tarea que se lleva a cabo dependiendo de las necesidades que un cliente específico tiene cuando se está desarrollando el proyecto, por lo que en este trabajo se presentan tres escenarios de evaluación multicriterio con distintos pesos específicos para ejemplificar la evaluación. La estructura de cada uno de los escenarios planteados se puede observar en la Tabla 39, Tabla 40 y 0, respectivamente.

**Tabla 39. Peso específico de los criterios a evaluar (Escenario 1)**

	<b>Criterios</b>	<b>Peso específico (%)</b>	<b>Total (%)</b>
<b>Técnicos</b>	Volumen Requerido (m <sup>3</sup> )	4	40
	Consumo de Reactivos (lb/d)	4	
	Disminución de SSV (%)	10	
	Producción de lodos (m <sup>3</sup> /d)	10	
	Instrumentación requerida (pz.)	2	
	Producción de biogás (m <sup>3</sup> /d)	10	
<b>Económicos</b>	Costo de inversión (USD)	15	60
	Costos de operación (USD/año)	15	
	Valor Presente de los costos (USD)	15	
	Costo Anual Equivalente (USD)	15	



ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS  
ALTERNATIVAS PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS  
EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

**Tabla 40. Peso específico de los criterios a evaluar (Escenario 2)**

	<b>Criterios</b>	<b>Peso específico (%)</b>	<b>Total (%)</b>
<b>Técnicos</b>	Volumen Requerido (m <sup>3</sup> )	5	50
	Consumo de Reactivos (lb/d)	5	
	Disminución de SSV (%)	12.5	
	Producción de lodos (m <sup>3</sup> /d)	12.5	
	Instrumentación requerida (pz.)	2.5	
	Producción de biogás (m <sup>3</sup> /d)	12.5	
<b>Económicos</b>	Costo de inversión (USD)	12.5	50
	Costos de operación (USD/año)	12.5	
	Valor Presente de los costos (USD)	12.5	
	Costo Anual Equivalente (USD)	12.5	

**Tabla 41. Peso específico de los criterios a evaluar (Escenario 3)**

	<b>Criterios</b>	<b>Peso específico (%)</b>	<b>Total (%)</b>
<b>Técnicos</b>	Volumen Requerido (m <sup>3</sup> )	6	60
	Consumo de Reactivos (lb/d)	6	
	Disminución de SSV (%)	15	
	Producción de lodos (m <sup>3</sup> /d)	15	
	Instrumentación requerida (pz.)	3	
	Producción de biogás (m <sup>3</sup> /d)	15	
<b>Económicos</b>	Costo de inversión (USD)	10	40
	Costos de operación (USD/año)	10	
	Valor Presente de los costos (USD)	10	
	Costo Anual Equivalente (USD)	10	



**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS  
ALTERNATIVAS PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS  
EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES**

---

---

Una vez establecidos los tres escenarios, se introdujeron los valores de cada uno de los criterios para las distintas alternativas (Tabla 37) en el programa. En la Figura 22 se muestra la información introducida al software.



**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS  
ALTERNATIVAS PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS  
EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES**

Scenario1	Volumen req...	Consumo de ...	Disminución ...	Lodos a disp...	Instrumenta...	Producción d...	Inversión	Operación	Valor Presen...	Costo Anual ...	
Unit	m3	kg/d	%	m3/d	pz.	m3/d	USD	USD/año	USD	USD	
Cluster/Group	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	
<b>Preferences</b>											
<b>Statistics</b>											
Minimum	27.16	0.00	0.00	201.00	12	0.00	10,214,930.00	100,230.00 €	10,988,629.31	1,788,348.82	
Maximum	40187.15	273.20	64.51	1303.78	22	1009.87	26,490,000.00	872,400.00 €	27,105,869.96	4,411,355.51	
Average	19923.60	91.07	36.50	608.93	17	336.62	18,844,976.67	366,182.00 €	21,095,006.54	3,433,115.17	
Standard Dev.	16397.30	128.79	27.01	493.81	4	476.06	6,680,677.57	358,103.75 €	7,188,939.96	1,169,966.87	
<b>Evaluations</b>											
✓ Digestión anaero...	■	19556.50	0.00	64.51	201.00	22	1009.87	26,490,000.00	100,230.00 €	27,105,869.96	4,411,355.51
✓ Digestión aerobia	■	40187.15	0.00	45.00	322.00	16	0.00	19,830,000.00	872,400.00 €	25,190,520.34	4,099,641.18
✓ Estabilización alc...	■	27.16	273.20	0.00	1303.78	12	0.00	10,214,930.00	125,916.00 €	10,988,629.31	1,788,348.82

**Figura 22. Tabla de evaluación multicriterio introducida al software.**



## 7 Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos a partir de la evaluación multicriterio realizada a partir del software Visual PROMETHEE<sup>®</sup> para la selección de la mejor alternativa de tratamiento de lodos.

### 7.1 Escenario 1

En la Tabla 42 se muestran los resultados obtenidos en la evaluación multicriterio para el escenario 1. En este escenario se estableció un ponderado en el cual los criterios técnicos tienen un peso del 40% y los criterios económicos del 60% (Tabla 39).

**Tabla 42. Resultados de evaluación de criterios (Escenario 1).**

Alternativa	Phi	Phi+	Phi-
Estabilización alcalina	0.2114	0.5650	0.3536
Digestión anaerobia	0.1384	0.4570	0.3186
Digestión aerobia	-0.3498	0.1807	0.5305

En esta tabla se muestran los flujos de preferencia que el programa asigna a cada una de las alternativas dependiendo de los valores que presenten para cada uno de los criterios calificados.

El programa establece tres flujos de preferencia:

- Phi+: Este número se asigna a partir de los aspectos positivos que presentan cada una de las alternativas.
- Phi-: Está basado en los aspectos negativos de cada una de las alternativas.
- Phi: Es la suma de los dos parámetros anteriores. Este representa el parámetro global con el cual el programa califica las alternativas. Mientras más grande sea el valor de Phi, más conveniente resulta la alternativa.

Como se puede observar, para el escenario 1, la alternativa que presenta mayores beneficios es la estabilización alcalina, mientras que la peor alternativa resulta la digestión aerobia. En la Figura 23 y Figura 24 se muestran gráficamente los parámetros obtenidos en esta evaluación.



ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS ALTERNATIVAS PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

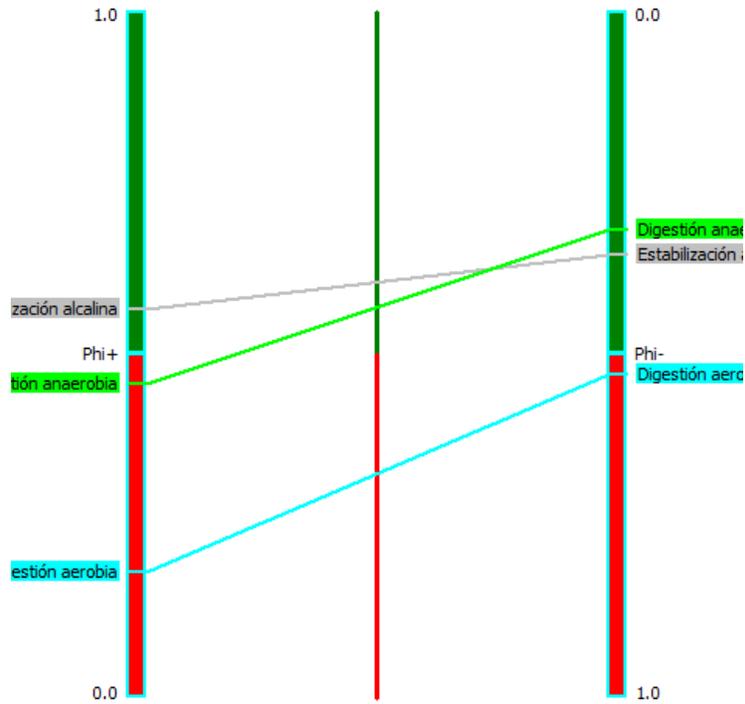


Figura 23. Clasificación gráfica de las alternativas de estabilización de lodos a través de PROMETHEE I (Escenario 1).

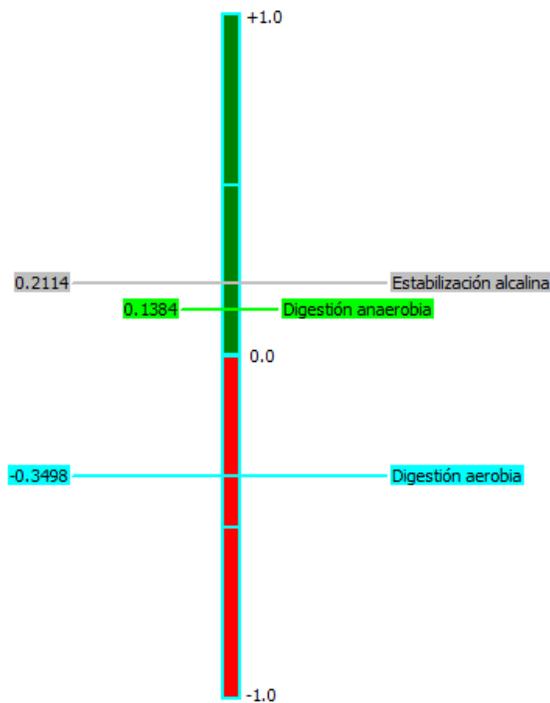


Figura 24. Clasificación gráfica de las alternativas de estabilización de lodos a partir de PROMETHEE II (Escenario 1).



## 7.2 Escenario 2

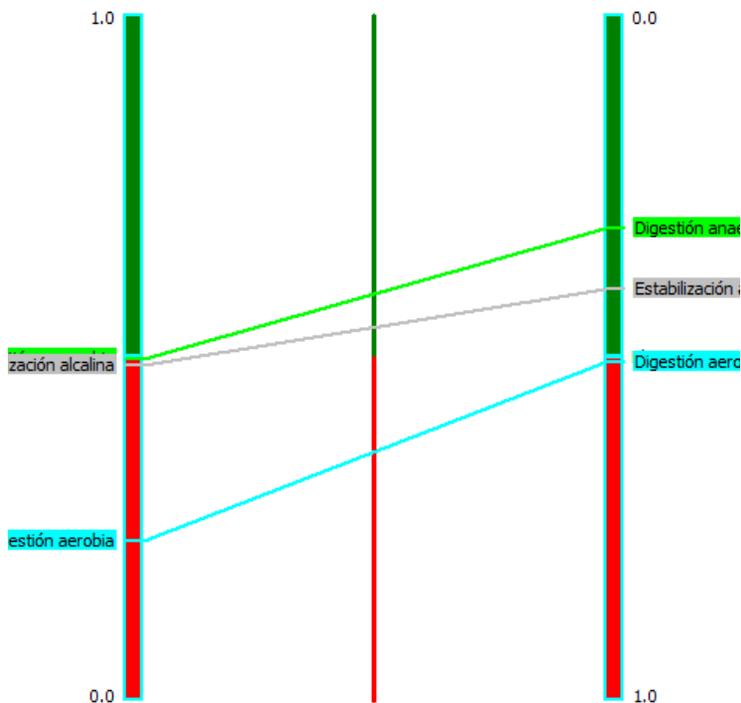
En la Tabla 43 se muestran los resultados obtenidos en la evaluación multicriterio para el escenario 2. En este escenario se estableció un ponderado en el cual los criterios técnicos y económicos equivalen a 50% cada uno (Tabla 40).

**Tabla 43. Resultados de evaluación de criterios (Escenario 2).**

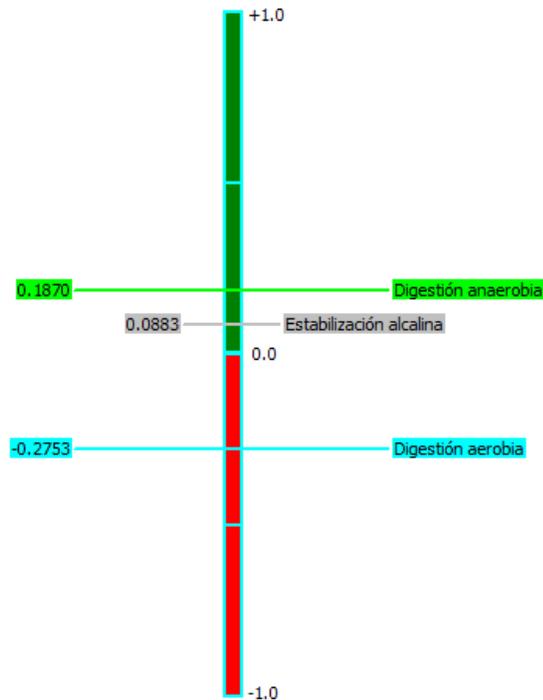
Alternativa	Phi	Phi+	Phi-
Digestión anaerobia	0.1870	0.4973	0.3103
Estabilización alcalina	0.0883	0.4875	0.3992
Digestión aerobia	-0.2753	0.2317	0.5069

Para este escenario se puede observar que la alternativa que presenta más beneficios es la digestión anaerobia, mientras que la peor calificada es la digestión aerobia.

En la Figura 25 y Figura 26 se muestran de manera gráfica los resultados obtenidos para este escenario.



**Figura 25. Clasificación gráfica de las alternativas de estabilización de lodos a través de PROMETHEE I (Escenario 2).**



**Figura 26. Clasificación gráfica de las alternativas de estabilización de lodos a través de PROMETHEE II (Escenario 2).**

### 7.3 Escenario 3

En la Tabla 44 se muestran los resultados obtenidos para la evaluación realizada para el escenario 3. En este escenario, las ponderaciones establecidas fueron de 60% para los criterios técnicos y 40% para los criterios económicos (0).

**Tabla 44. Resultados de evaluación de criterios (Escenario 3).**

Alternativa	Phi	Phi+	Phi-
Digestión anaerobia	0.2931	0.5514	0.2583
Estabilización alcalina	-0.0486	0.4100	0.4586
Digestión aerobia	-0.2444	0.2389	0.4833

De acuerdo a lo obtenido para este escenario, la alternativa que presenta los mayores beneficios es la digestión anaerobia, mientras que la digestión aerobia es la alternativa que presenta la menor cantidad de beneficios.

En la Figura 27 y Figura 28 se pueden observar las gráficas arrojadas por el programa para este escenario.



ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS ALTERNATIVAS PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

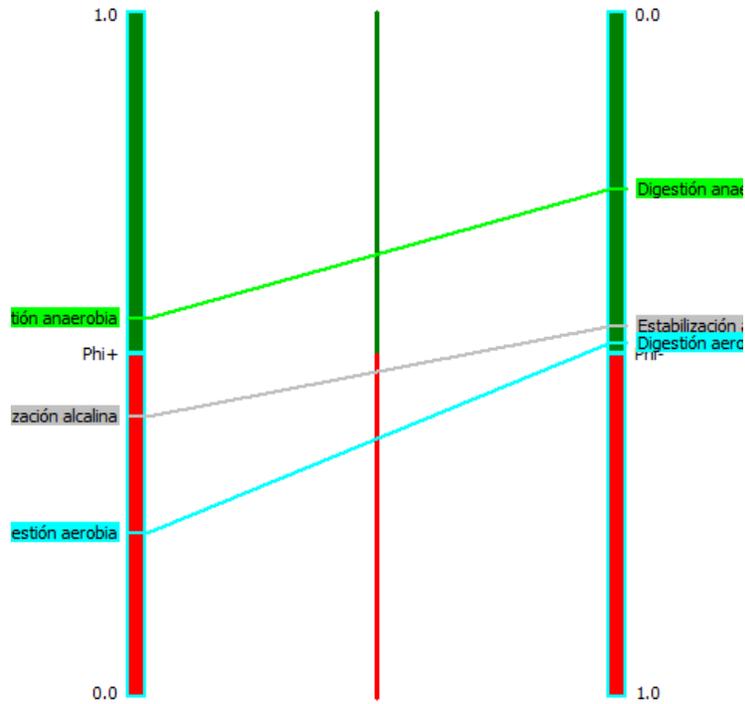


Figura 27. Clasificación gráfica de las alternativas de estabilización de lodos a través de PROMETHEE I (Escenario 3).

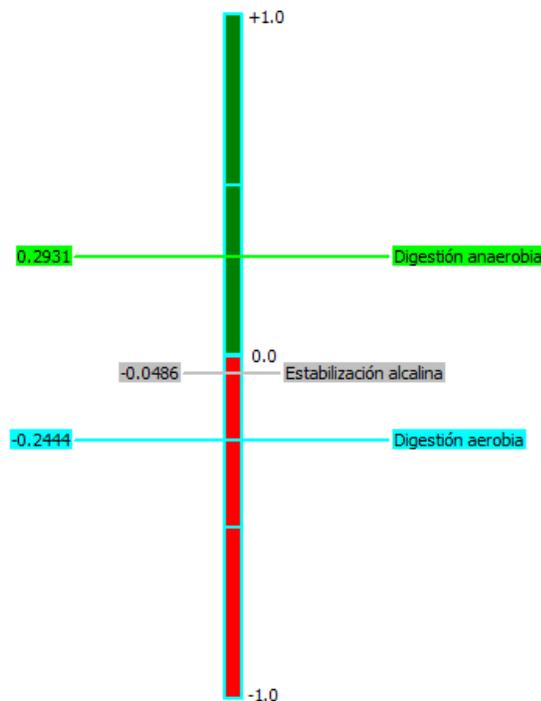
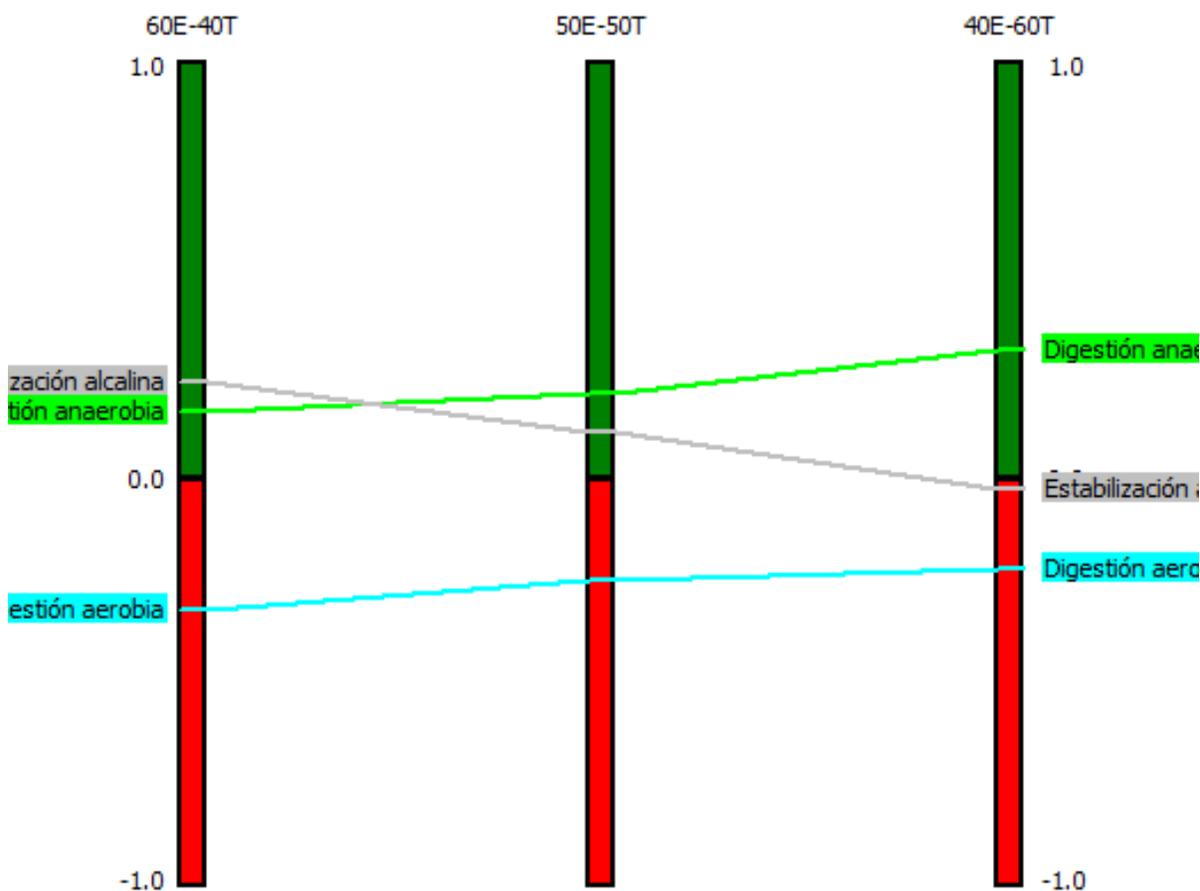


Figura 28. Clasificación gráfica de las alternativas de estabilización de lodos a través de PROMETHEE II (Escenario 3).



De igual manera, en la Figura 29 se puede observar la gráfica comparativa de los tres escenarios, en la cual se muestra graficado el parámetro global ( $\Phi$ ) para las distintas alternativas.



**Figura 29. Gráfica comparativa de la evaluación multicriterio de los tres escenarios propuestos.**

En este gráfico se puede observar como varía la decisión de la mejor alternativa dependiendo de los pesos específicos que se asigne al conjunto de criterios técnicos y económicos. Mientras se le dé mayor importancia a los criterios técnicos, la alternativa que se ve beneficiada es la Digestión anaerobia.

De igual manera, si se le da un mayor ponderado a los criterios económicos, la mejor alternativa para el tratamiento de lodos es la Estabilización alcalina.



## 8 Análisis de resultados

Una vez construidos los tres escenarios de evaluación multicriterio, se procedió a especificar dos escenarios adicionales para determinar el grado de afectación del peso específico de los criterios técnicos y económicos durante la decisión de la mejor alternativa de tratamiento de lodos

El primer escenario adicional fue el darle un peso de 80% a los criterios técnicos y 20% a los criterios económicos. El segundo escenario consiste en darle 80% a los criterios económicos y 20% a los criterios técnicos.

A partir de esto, al realizar la comparación de los escenarios establecidos se puede identificar como varía la decisión de la mejor alternativa de estabilización de lodos conforme se modifican los ponderados para los criterios establecidos.

En la Figura 30 se muestra el gráfico obtenido en la comparación de los cinco escenarios alimentados al programa.

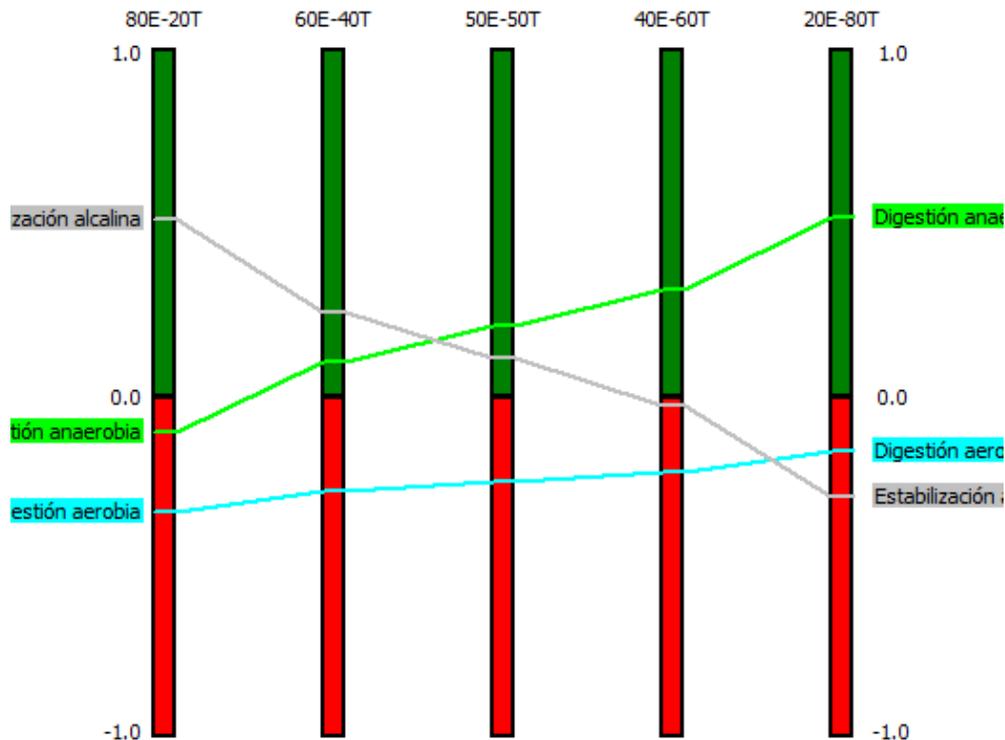


Figura 30. Gráfico de análisis de sensibilidad de los ponderados establecidos.



Como se puede observar en la Figura 30, mientras más aumente el ponderado de los criterios económicos, la mejor alternativa resulta ser la estabilización alcalina, ya que; como se mostró en la Tabla 37, esta alternativa presenta los menores costos de inversión y los indicadores de rentabilidad (VPN y CAE) son menores para esta alternativa.

De igual manera se puede observar que mientras más va aumentando el ponderado de los criterios técnicos, la decisión cambia, y aproximadamente cuando los criterios económicos tienen un valor del 55% y los criterios técnicos 45%, existe un cambio en la decisión, ya que cuando los criterios técnicos tienen un valor mayor al mencionado, resultan como la mejor alternativa de estabilización de lodos.

Así mismo se puede observar que cuando los criterios técnicos tienen un ponderado muy alto (75% técnico – 25% económico) existe un cambio entre cuál es la peor alternativa de estabilización de lodos según los criterios establecidos.

Por debajo del 75% de peso de los criterios técnicos, la peor alternativa para la estabilización de lodos es la Digestión aerobia, ya que esta presenta costos de inversión y operación muy altos y no proporciona tantos beneficios técnicos como la digestión anaerobia.

Cuando el peso de los criterios técnicos supera el 75% aproximadamente, se puede observar que la peor alternativa de estabilización pasa a ser la Estabilización alcalina, ya que ésta prácticamente se ve beneficiada sólo por los criterios económicos.

### **8.1 Análisis de sensibilidad de criterios**

Para la elaboración del análisis de sensibilidad de criterios se modificaron los pesos específicos de algunos parámetros calificados durante el análisis multicriterio con el fin de determinar cómo afecta la alteración de los pesos a cada escenario.

Durante este análisis se modificó el ponderado de la “Disminución de SSV” en el caso de los criterios técnicos, y para los criterios económicos se modificó el ponderado del “Costo de Inversión”.

En el caso de los criterios técnicos, la “Disminución de SSV” fue elegida debido a que es uno de los criterios con mayor peso dentro de la evaluación técnica, por lo



que su impacto sobre la decisión de la mejor alternativa de estabilización de lodos es de mayor magnitud.

Debido a que se estableció que los cuatro criterios económicos tuvieran el mismo peso específico, cualquiera de los criterios elegidos tendrá el mismo impacto la variación del peso específico del criterio.

Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad se empleó una herramienta del programa de evaluación multicriterio. La herramienta llamada “*Walking Weights*” tiene como función el modificar el peso de un criterio en particular, para determinar el impacto provocado en el análisis.

### 8.1.1 Análisis de sensibilidad del Escenario 1

En este escenario se estableció que el conjunto de criterios técnicos tienen un peso del 40% mientras que los criterios económicos tienen un valor del 60%. A partir de estas premisas, la alternativa más factible es la Estabilización alcalina.

Los ponderados específicos de cada criterio para este escenario se muestran en la Figura 31.

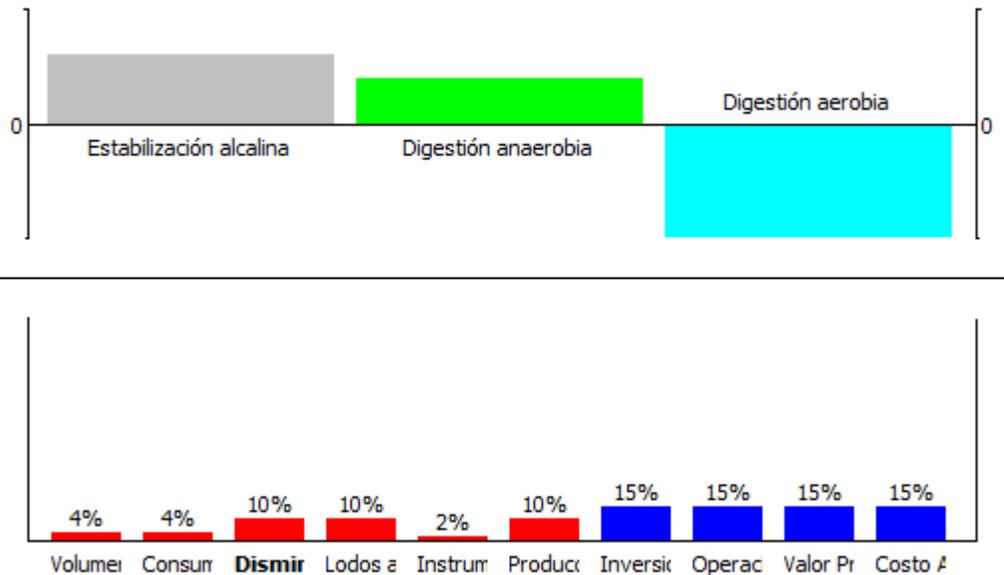
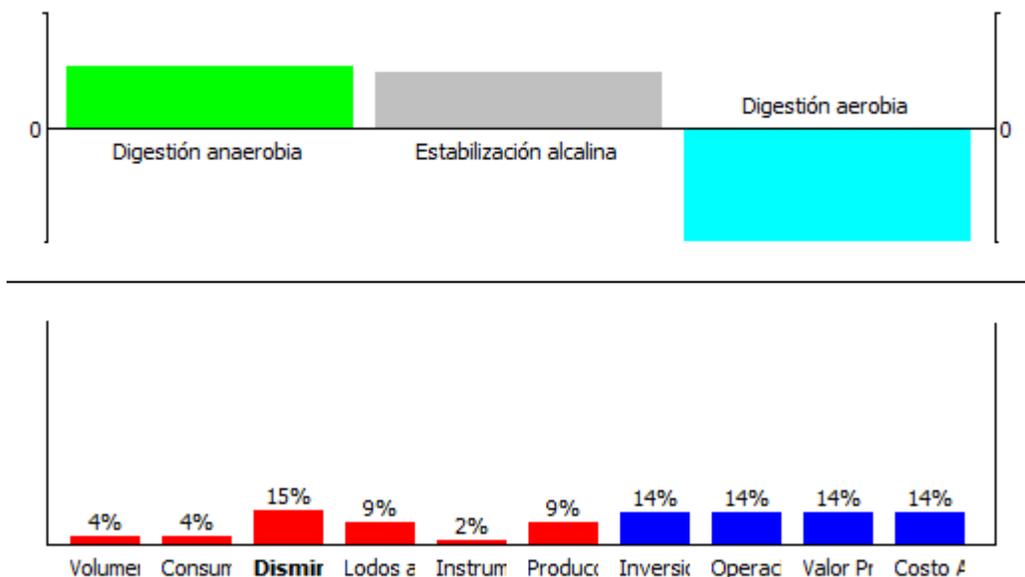


Figura 31. Peso específico de los criterios en el Escenario 1.



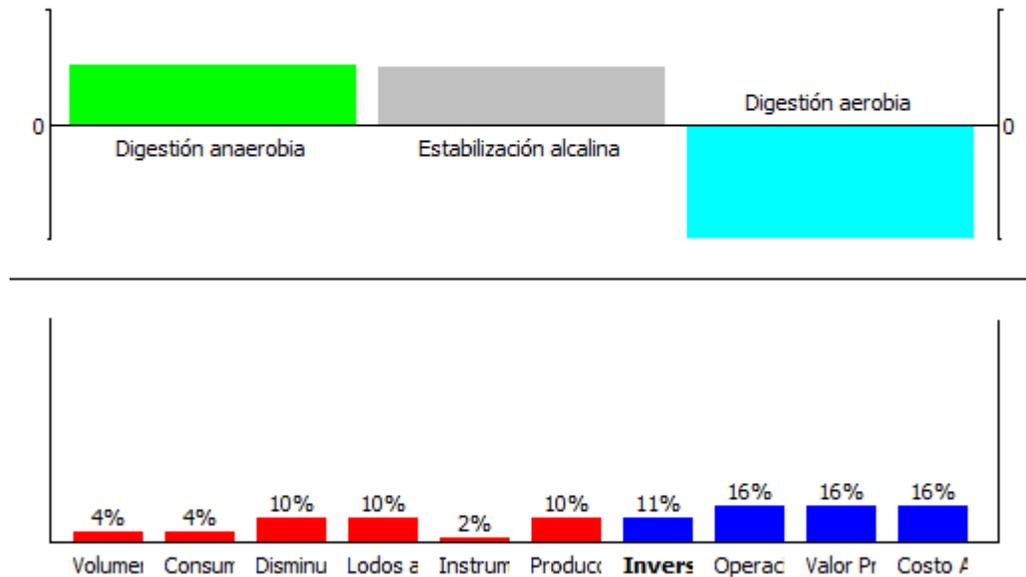
A partir del planteamiento de este escenario, se varió el peso específico del criterio “Disminución de SSV” para determinar qué impacto tiene el peso de este criterio sobre la decisión de la alternativa. En la Figura 32 se muestra la variación aplicada a dicho criterio.



**Figura 32. Análisis de sensibilidad de criterios técnicos (Escenario 1).**

Al realizar una comparación entre la Figura 31 y Figura 32, se puede observar que cuando la “Disminución de SSV” tiene un peso por debajo del 14%, la mejor alternativa para la estabilización de lodos es la Estabilización alcalina. Arriba de este porcentaje, la decisión que prevalece es la Digestión anaerobia.

De igual manera, en la Figura 33 se muestra el análisis de sensibilidad para el criterio “Costo de Inversión”.



**Figura 33. Análisis de sensibilidad de criterios económicos (Escenario 1).**

Como se puede observar en la Figura 33, cuando el ponderado correspondiente a los “Costos de Inversión” se encuentra por debajo del 12%, la Estabilización alcalina deja de ser la mejor alternativa de tratamiento de lodos y la Digestión anaerobia resulta ser la alternativa más viable.

### 8.1.2 Análisis de sensibilidad del Escenario 2

Para este escenario se estableció que el peso de los criterios técnicos y criterios económicos sería de 50% cada uno. Con base en estas premisas, la alternativa que resulta más viable es la Digestión anaerobia.

Los ponderados específicos de cada criterio para este escenario se muestran en la Figura 34.



ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS ALTERNATIVAS PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

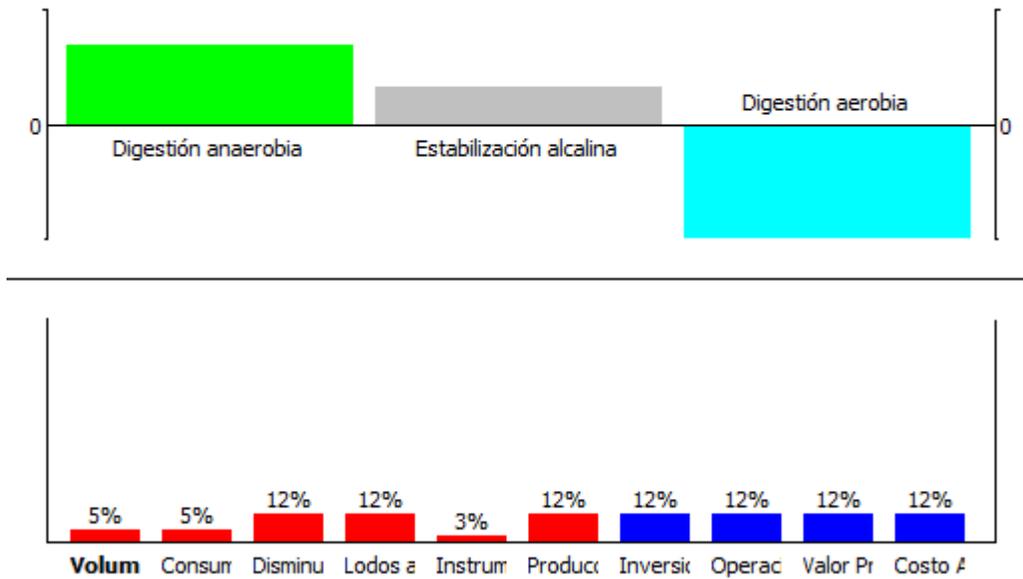
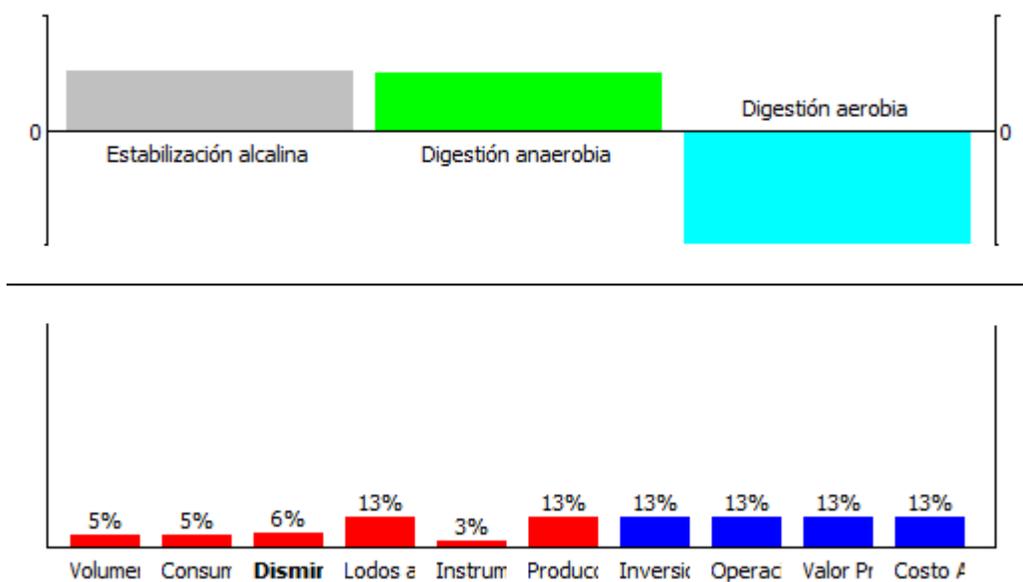


Figura 34. Peso específico de los criterios en el Escenario 2.

A partir del planteamiento de este escenario, se elaboró el análisis de sensibilidad en el cual se variaron los mismos criterios que en el Escenario 1.

En la Figura 35 se observa el análisis de sensibilidad realizado para el criterio técnico de “Disminución de SSV”.

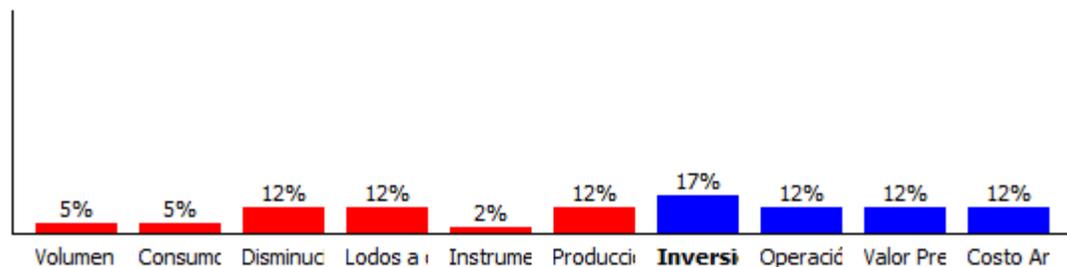
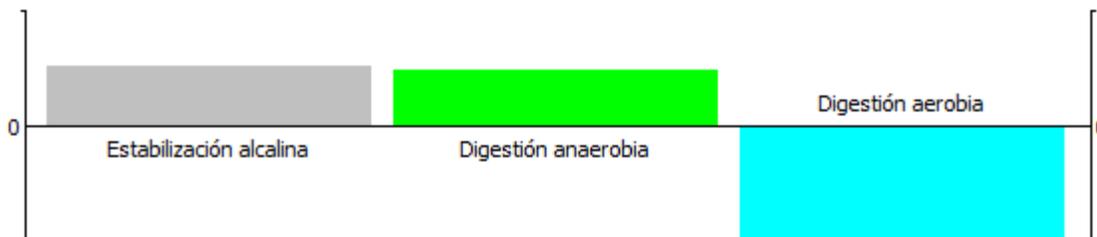




### Figura 35. Análisis de sensibilidad de criterios técnicos (Escenario 2).

Como se puede observar en la Figura 35, cuando el criterio modificado toma un valor de peso específico por debajo del 7% existe un cambio en la mejor alternativa de estabilización de lodos, ya que por debajo de dicho valor la alternativa más viable es la Estabilización alcalina.

De igual manera, el análisis de sensibilidad realizado para los criterios económicos se puede observar en la Figura 36.



### Figura 36. Análisis de sensibilidad de criterios económicos (Escenario 2).

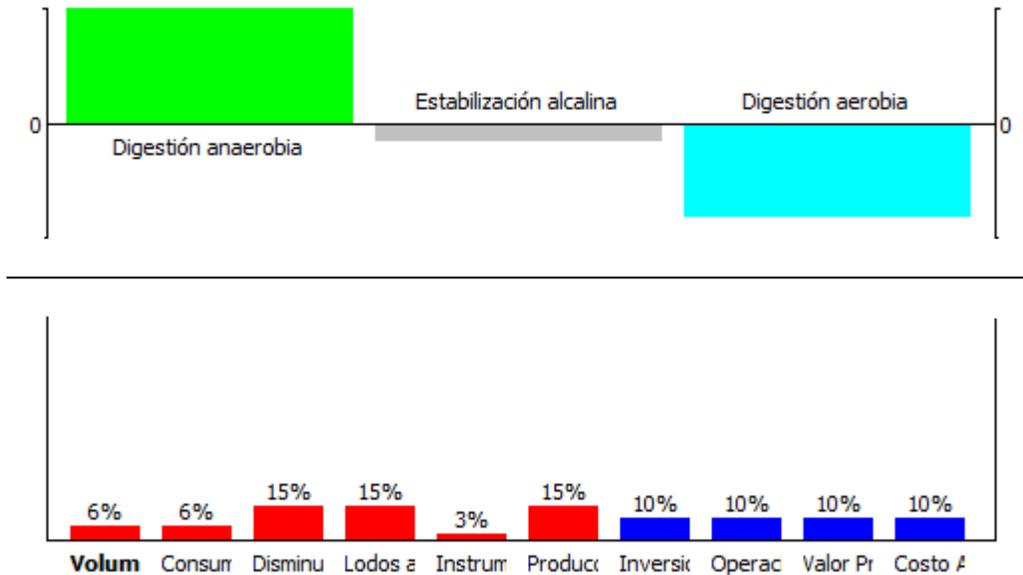
A partir de los resultados obtenidos en la Figura 36, se determinó que cuando el “Costo de Inversión” tiene un ponderado por encima de 16%, la Estabilización alcalina es la mejor alternativa de estabilización de lodos para este escenario.

#### 8.1.3 Análisis de sensibilidad del Escenario 3

En este escenario se estableció que los ponderados asignados para los criterios técnicos son del 60%, mientras que los criterios económicos tienen un peso del 40%. Bajo las condiciones establecidas en este escenario, la mejor alternativa para la estabilización de lodos es la Digestión anaerobia.



Los pesos específicos de cada uno de los criterios en este escenario se muestran en la Figura 37.

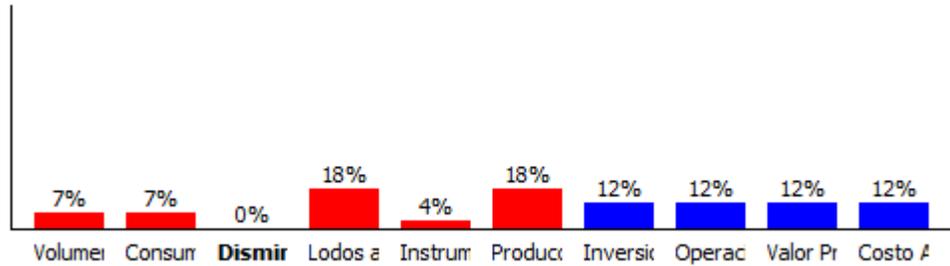
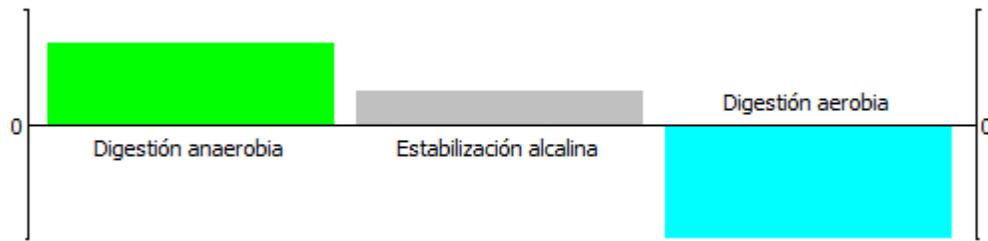


**Figura 37. Peso específico de los criterios en el Escenario 3.**

A partir de los ponderados establecidos para este escenario, se elaboró el análisis de sensibilidad para los criterios de “Disminución de SSV” y “Costos de Inversión”. El análisis elaborado para el criterio técnico se muestra en la Figura 38.



ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS  
ALTERNATIVAS PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS  
EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES



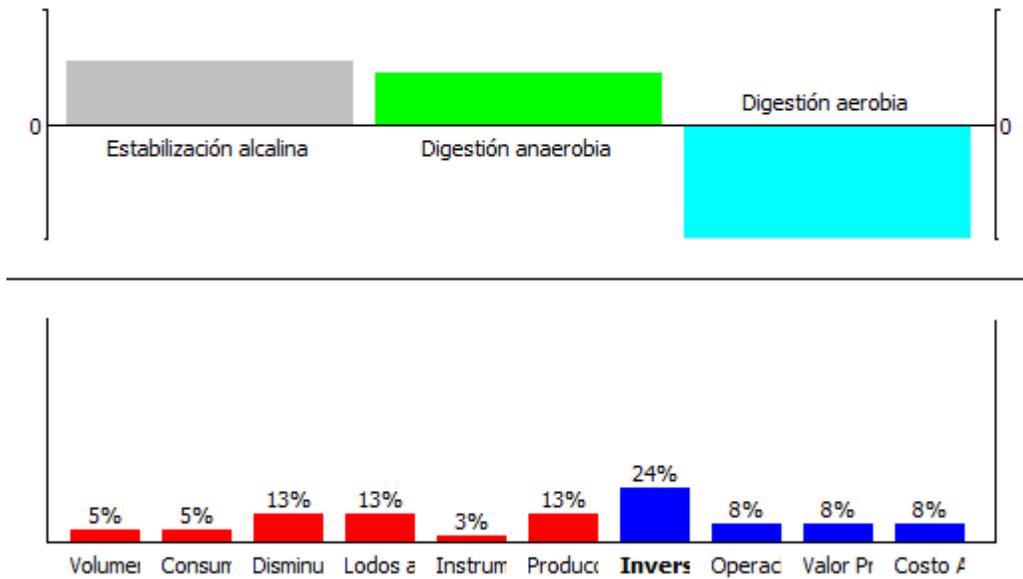
**Figura 38. Análisis de sensibilidad de criterios técnicos (Escenario 3).**

A partir de los resultados obtenidos en la Figura 38, se puede observar que no existe un valor para el cual se modifique la decisión de la mejor alternativa de estabilización de lodos para este escenario. Esto debido a que el porcentaje asignado para el conjunto de criterios técnicos es muy alto, lo que beneficia a la Digestión anaerobia, a tal grado que la anulación de un criterio técnico no causa un impacto en este escenario.

En la Figura 39 se muestra el análisis de sensibilidad elaborado para el criterio económico de este escenario.



ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS  
ALTERNATIVAS PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS  
EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES



**Figura 39. Análisis de sensibilidad de criterios económicos (Escenario 3).**

Como se puede observar en la Figura 39, cuando el “Costo de Inversión” tiene un ponderado asignado por arriba del 23%, la decisión de la mejor alternativa de estabilización de lodos se modifica. Por encima de este valor, la mejor alternativa para el tratamiento de los lodos resulta la Estabilización alcalina.



## 9 Conclusiones

Con base en los objetivos perseguidos y de acuerdo al alcance establecido, se logró plantear y evaluar las distintas alternativas para la estabilización de lodos producidos en una PTAN, concluyendo lo siguiente:

- a) A partir de la simulación de los trenes de tratamiento de la planta se logró determinar el caudal y la calidad de lodos producido por el tratamiento de agua negra, a partir del cual se diseñaron las alternativas de estabilización de lodos.
- b) Se propusieron tres alternativas para el tratamiento de lodos, las cuales fueron Digestión anaerobia, Digestión aerobia y Estabilización alcalina, a partir de las cuales se producen lodos estabilizados de clase B según lo especificado en la NOM-004-SEMARNAT-2002, y estos pueden ser reutilizados como mejoradores de suelo.
- c) Se planteó una evaluación multicriterio de las tres alternativas propuestas para la estabilización de lodos, con lo cual se establecen los criterios técnicos y económicos mínimos que se deben especificar para la implementación de un sistema de tratamiento de lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas negras.
- d) Con base en los resultados obtenidos en la evaluación técnica-económica se determinó que las mejores alternativas para el tratamiento de lodos son la estabilización con cal y la digestión anaerobia. Para determinar cuál es la alternativa más viable para la estabilización de lodos se debe conocer qué conjunto de criterios tendrá más peso.
- e) Si se le da más peso a los criterios técnicos, la alternativa de estabilización de lodos más conveniente es la Digestión anaerobia, ya que esta produce lodos con un menor contenido de sólidos en suspensión volátil, se tiene un menor caudal de lodos a disposición, no hay consumo de reactivos y se cuenta con el beneficio de producción de biogás el cual puede ser reutilizado para la producción de energía eléctrica.
- f) En el caso en el que los criterios económicos tengan un mayor peso en la evaluación multicriterio, la alternativa más conveniente para la estabilización



de lodos es la Estabilización alcalina. Esto debido a que el proceso presenta un menor costo de inversión, y por consiguiente, un menor Valor Presente de los Costos y un menor Costo Anual Equivalente.

- g) La hipótesis planteada resultó verdadera, ya que, como se pudo observar durante el desarrollo de este trabajo, las alternativas que resultaron más viables para el tratamiento de lodos fueron la estabilización alcalina y la digestión anaerobia.
- h) En conclusión, la elección de la mejor alternativa de tratamiento de lodos está fuertemente ligada a los porcentajes asignados a los criterios a evaluar. La asignación de los ponderados dependerá de las necesidades que tenga la planta en la cual se desee implementar un sistema de estabilización de lodos.



## 10 Bibliografía

- Barrios, J.A., R. A. (2000). *Destrucción de coliformes fecales y huevos de helmintos en lodos fisicoquímicos por vía ácida*. Morelia, Michoacán, México: FEMISCA.AIDIS.
- Cardoso Vigueros, L., & Ramírez González, A. (2012). *Identificación de Sistemas de Tratamiento de Lodos Residuales*. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua. Subdirección General de Administración del Agua.
- Castrejón, A., Barrios, J., Jiménez, B., Maya, C., Rodríguez, A., & y González, A. (2000). *Evaluación de la calidad de lodos residuales en México*. México: Instituto de Ingeniería. Grupo de Tratamiento y Reúso. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Centros de Excelencia. (s.f.). Recuperado el 21 de Septiembre de 2014, de <http://www.centrosdeexcelencia.com/entidades/herram/multicriterio.htm>
- Chemical Engineering. (2014). Economic Indicators. *Publicación mensual Chemical Engineering*, 184.
- Ciceri, H. N. (2009). *Decisiones de inversión en Plantas Químicas. Modelos y Criterios* (Segunda ed.). México, México: UNAM, Facultad de Química.
- Comisión Nacional del Agua. (2007). *Guía para el Manejo, Tratamiento y Disposición de Lodos Residuales de Plantas de Tratamiento Municipales*. Ciudad de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Ciudad de México, México.
- Degrémont. (2007). *Water Treatment Handbook* (Séptima ed., Vol. 2). París, Francia: Lavoisier SAS.
- Engineering News Record. (s.f.). *ENR Construction*. Obtenido de <http://enr.construction.com/economics/>
- García, N. O. (2006). *Lodos residuales: estabilización y manejo*. Chetumal, Quintana Roo, México.
- Hydromantis, Enviromental Software Solutions Inc. (s.f.). Recuperado el 14 de Enero de 2015, de <http://www.hydromantis.com/GPS-X.html>



- Islas, I. (2007). *Evaluación de opciones de modernización de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales*. México, México: UNAM.
- Limón, J. (2013). *Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales ¿Problema o recurso?* Jalisco, Guadalajara, México.
- Menéndez, C., & Pérez, J. (2007). *Procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales*. La Habana, Cuba: Universitaria.
- Metcalf & Eddy, Inc. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (Cuarta ed.). New York, United States: McGraw-Hill.
- PEMEX. (Diciembre de 1999). *Simbología de Equipo de Proceso*. México.
- Pérez, E. (2013). *Propuesta de una metodología para la evaluación integral de proyectos industriales, mediante un análisis multicriterio*. México: UNAM.
- Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Quebec, Canada: Reverté.
- Secretaría de Hacienda y Crédito Público. (2013). *Lineamientos para la elaboración y presentación de los análisis costo y beneficio de los programas y proyectos de inversión*. México.
- Secretaría de Hacienda y Crédito Público. (Enero de 2014). *Estimación del costo de oportunidad del capital para proyectos de Inversión pública*. México. Recuperado el 15 de Octubre de 2014, de [http://www.hacienda.gob.mx/EGRESOS/ppi/tasa\\_social\\_bibli/resumen\\_banco\\_mundial\\_soberana.pdf](http://www.hacienda.gob.mx/EGRESOS/ppi/tasa_social_bibli/resumen_banco_mundial_soberana.pdf)
- Secretaría de Hacienda y Crédito Público. (13 de Enero de 2014). Oficio Circular No. 400.1.410.14.009. México, D.F., México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (15 de Agosto de 2003). *Protección Ambiental.- Lodos y Biosólidos.- Especificaciones y Límites Máximos Permisibles de Contaminantes para su Aprovechamiento y Disposición Final. NOM-004-SEMARNAT-2002, 25*. Ciudad de México, México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (23 de Junio de 2006). *Características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. NOM-052-SEMARNAT-2005*. Ciudad de México, México.

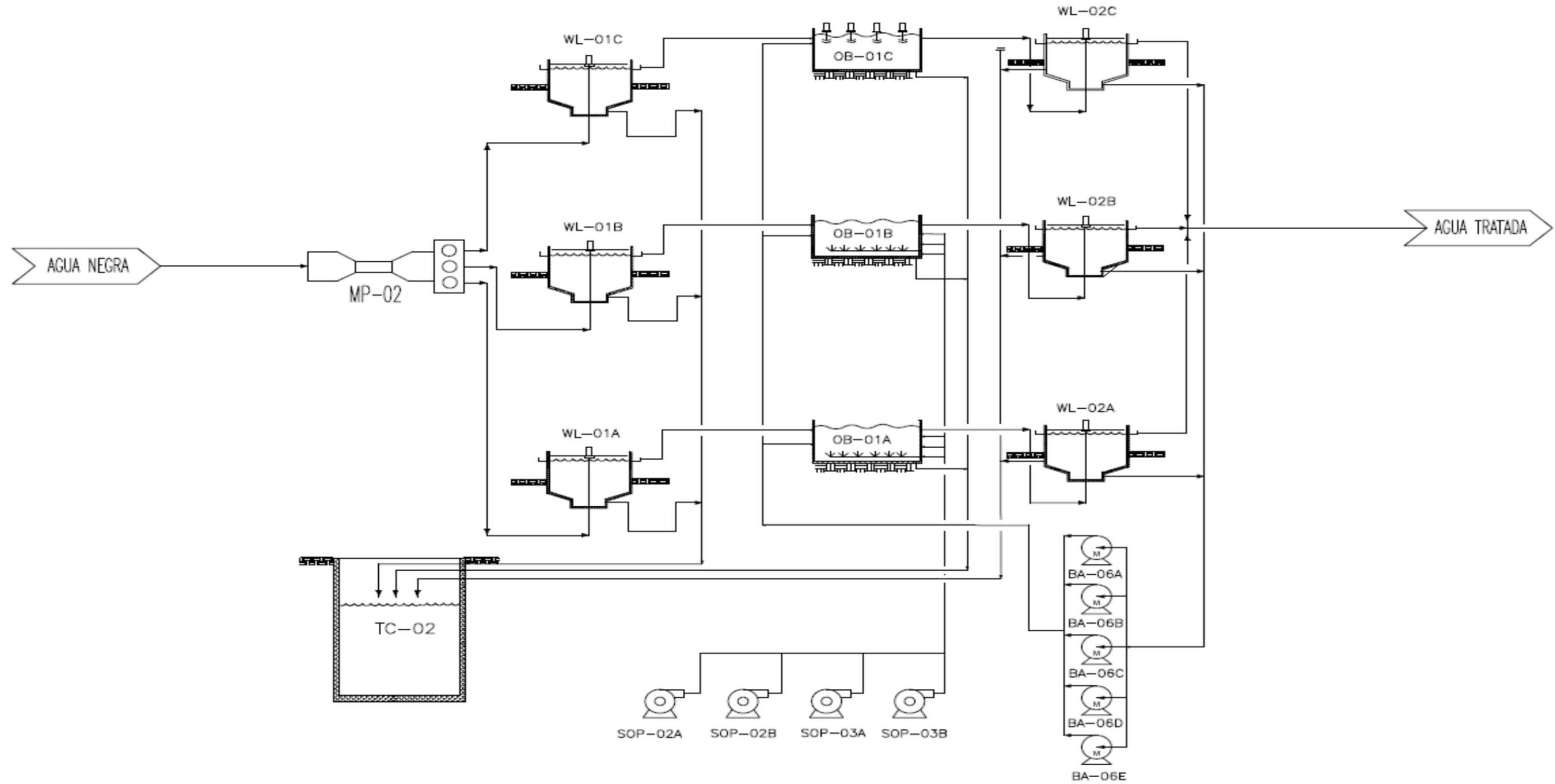


- U.S. EPA. (Septiembre de 1979). *Process Design Manual Sludge Treatment and Disposal*. 1152. Cincinnati, Ohio, United States: U.S. Environmental Protection Agency.
- UPIIA. (2013). *Soporte técnico, económico y legal para definir el esquema más conveniente de continuidad operativa de las PTAN's y la opción contractual para los tratamientos y sustancias químicas del SNR*. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado el 13 de Junio de 2014
- Valdez, E., & Vázquez, A. (2003). *Ingeniería de los Sistemas de Tratamiento y Disposición de Aguas Residuales*. México: Fundación ICA.
- Vallín, E. (2001). *Análisis de los métodos: Proceso de análisis jerárquico y Rembrandt*. México: UNAM.
- VP Solutions. (5 de Septiembre de 2013). *Visual PROMETHEE 1.4 Manual*. Obtenido de <http://www.promethee-gaia.net/files/VPManual.pdf>



11 Anexos

Anexo 1. Diagrama de Flujo de Proceso de la Planta





## Anexo 2. Reducción de sólidos en suspensión volátiles en la digestión aerobia.

Para determinar el porcentaje de disminución de sólidos volátiles durante el proceso de digestión aerobia se siguió la siguiente metodología:

- Se determinó la temperatura de operación (20°C)
- Para determinar el tiempo de retención de sólidos en el digestor se utilizó la Tabla 45 en la cual se especifican distintos criterios de diseño para reactores de digestión aerobia.

**Tabla 45. Criterios de diseño para digestores aerobios (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).**

Parámetro	Unidad	Valor
TRS	d	
a 20°C		40
a 15°C		60
Carga de SSV	kg/m <sup>3</sup> d	1.6-4.8
Requerimientos de Oxígeno	kgO <sub>2</sub> /kgSSV	~ 2.3
Requerimientos energéticos para mezclado		
Aireación mecánica	kW/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	20-40
Mezclado por difusión de aire	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> min	0.02-0.040
Reducción de SSV	%	38-50

- A partir de lo establecido en la Tabla 45 se estableció que el SRT es de 20 días.
- Para el cálculo del porcentaje de disminución de SSV, se calculó el producto de Tiempo de Retención de Sólidos por Temperatura de operación, a partir del cual se puede aproximar el valor del porcentaje de disminución con base en la Figura 40.

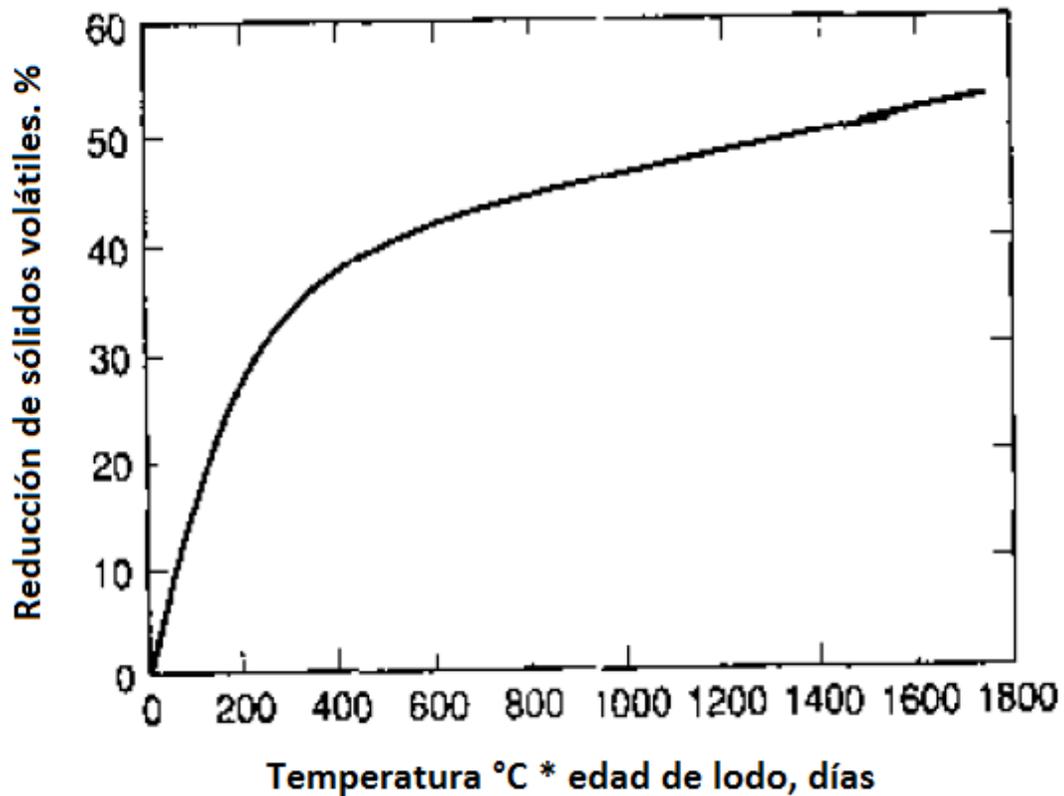


Figura 40. Reducción de sólidos volátiles en un digestor aerobio (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).

- Para el caso del digestor diseñado, el producto de  $T \times \text{SRT}$  es de  $800^\circ\text{C d}$ , por lo que en la Figura 40 se puede observar que el porcentaje de disminución de sólidos es aproximadamente del 45%.



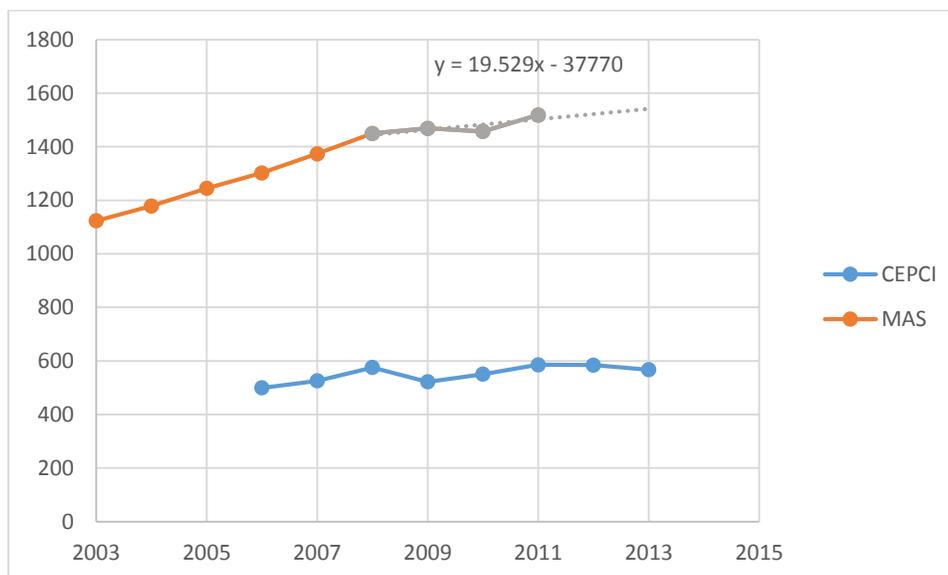
### Anexo 3. Actualización de índices de costos.

En la Tabla 46 se muestran los valores recopilados para índices alimentados al software para la estimación de los costos de las alternativas propuestas.

De igual manera, en la Figura 41 se muestra el gráfico que se utilizó para estimar el valor del índice de Marshall and Swift, ya que en la literatura sólo se encontraron datos hasta el año 2011.

**Tabla 46. Actualización de índices de costos para la estimación de costos (Chemical Engineering, 2014)**

Año	Indice de Marshall	CEPCI	ENR
2003	1123.6	--	--
2004	1178.5	--	--
2005	1244.5	--	--
2006	1302.3	499.6	--
2007	1373.3	525.4	--
2008	1449.3	575.4	--
2009	1468.6	521.9	--
2010	1457.4	550.8	--
2011	1518.13	585.7	--
2012	1522.34	584.6	--
2013	1541.87	567.3	--
2014	1561.40	--	9870.12



**Figura 41. Actualización de índices de costos.**



#### Anexo 4. Cálculo del VPC y CAE.

En la Tabla 47 se muestran los flujos de efectivo para la digestión anaerobia establecidos durante el horizonte de operación (10 años).

**Tabla 47. Flujos de efectivo para la digestión anaerobia.**

Año	Costo de Inversión(USD)	Costos de operación y mntto.(USD/año)
0	-\$26,490,000.00	
1	--	-\$100,230.00
2	--	-\$100,230.00
3	--	-\$100,230.00
4	--	-\$100,230.00
5	--	-\$100,230.00
6	--	-\$100,230.00
7	--	-\$100,230.00
8	--	-\$100,230.00
9	--	-\$100,230.00
10	--	-\$100,230.00

A partir de la siguiente ecuación se calculó el flujo de efectivo descontado según la tasa de interés establecida (10%). Los flujos descontados se muestran en la Tabla 48.

$$\text{Flujo de efectivo descontado} = \frac{\text{Costo}}{(i+i)^n} \quad (15)$$

Donde:

i = Tasa de interés utilizada para el proyecto (10%)

n = Año en el que se realiza el gasto



**Tabla 48. Flujos de efectivo descontados para la digestión anaerobia.**

Año	Costo de Inversión(USD)	Costos de operación y mntto.(USD/año)	Flujo de efectivo descontado (USD)
0	-\$26,490,000.00		-\$26,490,000.00
1	--	-\$100,230.00	-\$91,118.18
2	--	-\$100,230.00	-\$82,834.71
3	--	-\$100,230.00	-\$75,304.28
4	--	-\$100,230.00	-\$68,458.44
5	--	-\$100,230.00	-\$62,234.94
6	--	-\$100,230.00	-\$56,577.22
7	--	-\$100,230.00	-\$51,433.84
8	--	-\$100,230.00	-\$46,758.03
9	--	-\$100,230.00	-\$42,507.30
10	--	-\$100,230.00	-\$38,643.00
<b>VPC (USD)</b>			<b>-\$27,105,869.96</b>

El Valor Presente de los Costos resulta de la suma de todos los flujos de efectivo descontados durante el horizonte de operación. Para el caso de la digestión anaerobia el VPC es de -\$27, 105, 869.96 USD.

Para el caso del indicador de rentabilidad del Costo Anual Equivalente, se utilizó la siguiente ecuación para su cálculo:

$$CAE = VPC * \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (16)$$

Donde:

i = Tasa de interés utilizada para el proyecto

n = Horizonte de evaluación del proyecto (10 años)

Para la digestión anaerobia se obtuvo un valor de CAE de -\$4, 411, 355.51 USD.

El procedimiento de cálculo fue empleado para determinar el valor de los (Secretaría de Hacienda y Crédito Público, 2013) indicadores de rentabilidad para las otras dos alternativas propuestas.