



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**SELECCIÓN DE SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES PARA LOCALIDAD DE SANTA BÁRBARA USANDO  
METODOLOGÍA DE DECISIÓN MULTICRITERIO AHP**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**ASTRID VIVIANA PÉREZ ODDERSHEDE**

**PROFESOR GUÍA:  
Sra. MARÍA PÍA MENA PATRI**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
Sr. JORGE CASTILLO GONZÁLEZ  
Sr. OSCAR SILVA LETELIER**

**SANTIAGO DE CHILE  
ABRIL 2010**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
CIVIL  
POR: ASTRID PÉREZ ODDERSHEDE  
FECHA: 16/04/10  
PROF. GUÍA: MARÍA PÍA MENA P.

**SELECCIÓN DE SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
PARA LOCALIDAD DE SANTA BÁRBARA USANDO METODOLOGÍA DE  
DECISIÓN MULTICRITERIO AHP**

El objetivo general de este trabajo de título es proponer un sistema de tratamiento de aguas residuales para la nueva ciudad de Chaitén, la cual será reubicada en la localidad de Santa Bárbara, provincia de Palena, Región de los Lagos. La selección se realizó mediante una metodología de decisión multicriterio conocida como AHP (Proceso Jerárquico Analítico), para lo cual se generó un modelo de selección de alternativas de tratamiento de aguas residuales, que se aplicó a la localidad de Santa Bárbara.

Para alcanzar el objetivo planteado, se estudiaron las características de la zona donde se instalará la nueva ciudad, así como también las necesidades y aspectos más importantes de la antigua ciudad de Chaitén. Se analizaron las diferentes alternativas disponibles para el tratamiento de aguas residuales, considerado sus particularidades, aspectos de operación, ventajas y desventajas. Se escogieron seis tecnologías para compararlas entre ellas utilizando el modelo de decisión generado, en donde se consideran los aspectos más importantes que se debe tener en cuenta al momento de instalar una nueva planta de tratamiento de aguas residuales.

Los resultados indican que los tratamientos de aguas residuales técnicamente apropiados para el caso de la localidad de Santa Bárbara son: emisarios submarinos, lodos activados con aireación extendida y lombrifiltros. La evaluación de costos de estas alternativas indica que el sistema que presenta menor costo anual equivalente es el de lombrifiltros, dejando en segundo lugar a emisario submarino y por último a aireación extendida.

El Proceso Jerárquico Analítico reflejó ser una herramienta útil para estructurar y ordenar el problema de decisión, identificando los aspectos que influyen de manera directa en la selección de alternativas de tratamiento de aguas residuales. Este estudio sirve de base para quienes deben fijar prioridades y tomar decisiones en la selección de alternativas de tratamiento de aguas residuales de cualquier localidad.

Como conclusiones finales se puede destacar que la localidad de Santa Bárbara requiere un sistema de tratamiento de aguas residuales que sea sencillo, fácil de operar, de bajos costos de mantención y operación, y de baja generación o tratamiento de lodos, dado a sus propias características y al aislamiento de la zona. Los emisarios submarinos resultaron ser una alternativa atractiva de solución, ya que proveen una tecnología eficiente, segura y relativamente económica para la disposición final de aguas residuales.

*Dedicada a mi hija Livka, que día a día  
me da la fuerza e inspiración para  
seguir adelante*

## **Agradecimientos**

En primer lugar quisiera agradecer a mi madre, Astrid, por su incondicional apoyo y afecto, y por ser un gran ejemplo a seguir. Gracias por darme los valores, las herramientas y la confianza para llegar a este punto de mi vida.

Al resto de mi familia, a mis hermanas Carolina y Alejandra, por ayudarme y darme ánimo constantemente a lo largo de mis estudios. A José Miguel Blanco, por creer en mí.

A las Pléyades, que sin quererlo fueron grandes inspiradoras de este tema de tesis.

Gracias a mis compañeros y amigos de la Universidad por darle a la carrera un valor más humano, que me ayudó a que gran parte de ella fuera más que estudiar: Javier, Carito, Pía, Álvaro, Alfonso, Thomas, Nata, Lautaro, Pollo y Daniel. A mis amigas Pau, Paola, Marce y Dani, gracias por las largas noches de estudio y conversación. Y a Matías por estar a mi lado justo en el momento preciso, por su amor y compañía en este proceso.

En cuanto a la realización de este trabajo, debo agradecer a los profesores de mi comisión, María Pía Mena, Jorge Castillo y Oscar Silva, por sus comentarios constructivos y por su tiempo, ya que contribuyeron directamente a la obtención de los resultados de este estudio.

A la gente del Departamento de Programas Sanitarios de la Dirección de Obras Hidráulicas, al Sr. Reinaldo Fuentealba y a Eric Figueroa, por ayudarme a obtener información fundamental para la elaboración de este trabajo.

# **SELECCIÓN DE SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA LOCALIDAD DE SANTA BÁRBARA USANDO METODOLOGÍA DE DECISIÓN MULTICRITERIO AHP**

## **Contenido**

Agradecimientos .....	4
I. Índice de Tablas .....	6
II. Índice de Figuras .....	7
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	10
CAPÍTULO 2: CARACTERÍSTICAS GENERALES DE CHAITÉN Y SANTA BÁRBARA.....	12
2.1 Antecedentes Generales de Chaitén.....	12
2.2 Antecedentes Generales de Santa Bárbara .....	14
2.2.1 Geografía.....	15
2.2.2 Clima.....	15
2.2.3 Accesos .....	16
2.2.4 Población y Vivienda.....	17
2.2.5 Servicios Existentes .....	17
2.2.6 Actividad Económica.....	18
2.2.7 Situación Sanitaria .....	19
CAPÍTULO 3: ASPECTOS GENERALES SOBRE EL TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS .....	20
3.1 Características de Aguas Residuales.....	20
3.2 Sistemas Biológicos de Tratamiento de Aguas Residuales.....	21
3.2.1 Sistemas de Tratamiento del Tipo No Convencional.....	22
3.2.2 Sistemas de Tratamiento del Tipo Convencional .....	25
3.2.3 Sistemas Innovadores.....	38
3.2.4 Sistemas Biológicos para Remoción de Nutrientes .....	49
3.2.5 Otros Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales .....	56
3.2.6 Desinfección.....	59
3.3 Tratamiento y disposición de Lodos.....	61
3.3.1 Acondicionamiento.....	61
3.3.2 Espesamiento .....	62

3.3.3	Estabilización .....	62
3.3.4	Deshidratado.....	63
3.3.5	Secado.....	64
3.4	Normativa de Efluentes Líquidos.....	64
3.5	Normativa de Lodos .....	65
3.6	Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales Utilizados Actualmente en Chile .....	67
CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA SANTA BÁRBARA. APLICACIÓN DEL PROCESO JERÁRQUICO ANALÍTICO .....		69
4.1	Factores a Considerar.....	69
4.1.1	Alternativas de Descarga de Aguas Servidas .....	70
4.2	Preselección de Alternativas .....	70
4.3	Metodología de Selección.....	71
4.3.1	Proceso Jerárquico Analítico (AHP).....	72
4.3.2	Modelo de Decisión Para Selección de Tecnología de Tratamiento.....	77
4.3.3	Comparaciones pareadas.....	80
4.3.4	Priorización .....	80
CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		85
5.1.	Resultados del Análisis Jerárquico .....	85
5.2.	Costos de Alternativas .....	92
5.2.1.	Comparación de Costos .....	93
CAPÍTULO 6: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES.....		96
Bibliografía.....		99
Anexo A: Figuras de Resultados de Análisis Jerárquico.....		103
Anexo B: Cálculos de Valor Actual Neto y Costo Anual equivalente.....		108

## I. Índice de Tablas

Tabla 3.1.1	Caracterización de Aguas Servidas domésticas correspondiente a 100 habitantes .....	21
Tabla 3.2.1	Proceso Biológicos de Tratamiento de Aguas Residuales .....	22
Tabla 3.2.2	Eficiencias de Remoción.....	23
Tabla 3.2.3	Eficiencia Lombrifiltración.....	24
Tabla 3.2.4	Eficiencia Lagunas Aireadas Aerobias .....	26
Tabla 3.2.5	Eficiencia Lagunas Aireadas Facultativas .....	26
Tabla 3.2.6	Clasificación de Filtros Percoladores .....	28

Tabla 3.5.7 Eficacia de remoción de biofiltros.....	29
Tabla 3.2.8 Eficacia remoción Biodiscos.....	30
Tabla 3.2.9 Eficiencia de remoción Lodos Activados .....	32
Tabla 3.2.10 Eficiencia de Remoción Aireación Extendida.....	33
Tabla 3.2.11 Eficiencia remoción sistema zanjas de oxidación .....	35
Tabla 3.2.12 Eficiencia remoción sistema SBR .....	37
Tabla 3.2.13 Parámetros de Diseño Lodos Activados .....	38
Tabla 3.2.14 Calidad del efluente de sistema de lodos activados en pozo profundo .....	40
Tabla 3.2.15 Eficiencia de remoción del tratamiento IFAS .....	41
Tabla 3.2.16 Eficiencia de Remoción del sistema MBR.....	44
Tabla 3.2.17 Rendimiento de reactor anaerobio de lecho fluidificado .....	48
Tabla 3.2.18 Rendimientos típicos de procesos anaerobios en aguas residuales domesticas a 20°C	49
Tabla 3.2.19 Eficiencia de remoción del sistema CEPT .....	57
Tabla 3.4.1 Concentraciones Máximas Permitidas para Descarga de SST, DBO5, NKT y Fósforo Total en los Distintos Cuerpos Receptores Definidos en DS 90/2000.....	64
Tabla 3.5.1: Nivel Máximo de Patógenos en Lodos Clase A y B.....	65
Tabla 3.5.2 Concentraciones Máximas de Metales en Suelo Receptor.....	66
Tabla 3.5.3 Concentraciones máximas de metales en lodos para aplicación en suelos .....	66
Tabla 4.1.1 Proyección de Población y Caudal de Aguas Servidas a 20 años para Santa Bárbara ...	69
Tabla 4.3.1 Escala Fundamental de importancia .....	74
Tabla 4.3.2 Comparación de elementos .....	74
Tabla 4.3.3 Índice de Consistencia Aleatorio para diferentes cantidades de criterios .....	76
Tabla 4.3.4 Juicios sobre sub-criterio “olores”.....	81
Tabla 4.3.5 Sumatoria por columna.....	81
Tabla 4.3.6: Matriz Normalizada.....	82
Tabla 4.3.7: Vector de prioridades para sub-criterio “olores”.....	82
Tabla 4.3.8: Vectores de prioridades .....	83
Tabla 4.3.9 Juicios sobre sub-criterio “Riesgos Ambientales”.....	83
Tabla 4.3.10 Sumatoria por columna.....	83
Tabla 4.3.11: Matriz Normalizada.....	83
Tabla 4.3.12: Prioridades globales para criterio “Riesgos ambientales”.....	84
Tabla 5.2.1.1 Costos de Inversión, Mantenimiento y Operación de Alternativas .....	94
Tabla 5.2.1.2 Valor Actual Neto de Alternativas .....	94
Tabla 5.2.1.3 Costo Anual equivalente de Alternativas.....	94
Tabla B.1 VAN y CAE Lombrifiltros.....	108
Tabla B.2 VAN y CAE Emisarios Submarinos.....	108
Tabla B.3 VAN y CAE Aireación Extendida.....	109

## II. Índice de Figuras

Figura 2.1.1 Volcán Chaitén en erupción 02/05/08 (Fuente: www.emol.com).....	12
Figura 2.1.2 Chaitén días después de la erupción (Fuente: www.blogopolis.cl).....	12
Figura 2.1.3 La ciudad inundada por desborde del río Blanco (Fuente: muypatagonia.com).....	13
Figura 2.1.4 Flujos de Lava Volcánica (Fuente: www.plataformaurbana.cl).....	14
Figura 2.2.1 Mapa de ubicación Santa Bárbara (Fuente: Instituto Geográfico Militar).....	15

Figura 2.2.2 Acceso a Chaitén por vía terrestre (Fuente: www.turistel.cl) .....	16
Figura 2.2.3 Santa Bárbara (Fuente: La Nación, 05/05/2009).....	18
Figura 3.2.1 Filtro Percolador (Fuente: Miliarium Aureum, 2001) .....	27
Figura 3.2.2 Diagramas de Flujos típicos de Filtros Percoladores.....	28
Figura 3.2.3 Biodiscos .....	30
Figura 3.2.4 Sistema convencional de lodos activados (Fuente: www.rema.com).....	31
Figura 3.2.5 Sistema típico de zanjas de oxidación (EPA-US, Folleto Informativo de Tecnología de Aguas Residuales: Zanjas de Oxidación, 1999) .....	34
Figura 3.2.6 Sistema SBR .....	36
Figura 3.2.7 Diagrama de flujo del Proceso VERTREAT (Noram Bio Systems Inc.) .....	39
Figura 3.2.8 Sistema MBR con membranas sumergidas (EPA-US, Wastewater Management Fact Sheet: Membrane Bioreactors, 2007).....	43
Figura 3.2.9 Sistema MBR con membranas externas (EPA-US, Wastewater Management Fact Sheet: Membrane Bioreactors, 2007).....	43
Figura 3.2.10 Biorreactor de Lecho Fluidificado (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).....	45
Figura 3.2.11 Filtro anaerobio (Menendez & Pérez, 2007).....	46
Figura 3.2.12 UASB (Rodríguez).....	47
Figura 3.2.13 Reactor de lecho fluidizado (Menendez & Pérez, 2007) .....	48
Figura 3.2.14 Phoredox (Metcalf & Eddy, Inc., 2003) .....	50
Figura 3.2.15 A2/O (Metcalf & Eddy, Inc., 2003) .....	51
Figura 3.2.16 Proceso Bardenpho de 5 etapas.....	51
Figura 3.2.17 UCT (Metcalf & Eddy, Inc., 2003) .....	52
Figura 3.2.18 VIP (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).....	52
Figura 3.2.19 Proceso Johannesburg (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).....	53
Figura 3.2.20 SBR con remoción biológica de fósforo (Metcalf & Eddy, Inc., 2003) .....	53
Figura 3.2.21 Proceso Ludzack-Ettinger (Metcalf & Eddy, Inc., 2003) .....	54
Figura 3.2.23 Proceso de alimentación escalonada (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).....	54
Figura 3.5.23 Proceso Bardenpho de 4 etapas (Metcalf & Eddy, Inc., 2003) .....	55
Figura 3.2.24 Remoción de nitrógeno con zanjas de oxidación (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).....	55
Figura 3.2.25 Sistema Orbal (Metcalf & Eddy, Inc., 2003) .....	56
Figura 3.2.26 Diagrama de Flujos sistema CEPT.....	57
Figura 3.3.1 Digestor Convencional (Menendez & Pérez, 2007).....	63
Figura 4.3.1 Estructura Jerárquica de tres niveles .....	73
Figura 5.1.1 Resultados Primer Nivel.....	85
Figura 5.1.2 Priorización local criterio Riesgos Ambientales .....	86
Figura 5.1.3 Priorización local criterio Estabilidad del proceso.....	86
Figura 5.1.4 Priorización local criterio Clima .....	87
Figura 5.1.5 Priorización local criterio Requerimientos .....	87
Figura 5.1.6 Priorización local criterio Generación de lodos .....	87
Figura 5.1.7 Priorización local criterio Tratamiento de lodos .....	87
Figura 5.1.8 Priorización local criterio Población .....	88
Figura 5.1.9 Priorización local criterio Remoción de DBO .....	88
Figura 5.1.10 Priorización local criterio Remoción de nutrientes .....	88
Figura 5.1.11 Priorización local criterio Cercanía y accesibilidad .....	88



Figura 5.1.12 Resultados globales .....	89
Figura 5.1.13 Comparación de Resultados según Criterios entre CEPT y Emisarios Submarinos ...	90
Figura 5.1.14 Comparación de Resultados según Criterios entre Lombrifiltros y Aireación extendida .....	91
Figura 5.1.15 Resultado global ante incremento de importancia de criterio “Riesgos Ambientales” (Análisis de Sensibilidad).....	92
Figura A.1 Riesgos Ambientales .....	103
Figura A.2 Estabilidad del Proceso.....	103
Figura A.3 Clima .....	104
Figura A.4 Requerimientos .....	104
Figura A.5 Generación de Lodos.....	105
Figura A.6 Tratamiento de Lodos.....	105
Figura A.7 Población .....	106
Figura A.8 Remoción de DBO .....	106
Figura A.9 Remoción de Nutrientes .....	107
Figura A.10 Cercanía y Accesibilidad .....	107
Gráfico 3.6.2 Procesos de Tratamiento de Aguas Servidas Usados Actualmente en Chile .....	67

# **SELECCIÓN DE SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA LOCALIDAD DE SANTA BÁRBARA USANDO METODOLOGÍA DE DECISIÓN MULTICRITERIO AHP**

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

En mayo del año 2008 el volcán Chaitén, ubicado en la provincia de Palena en la Región de Los Lagos, hizo erupción causando la devastación total de la ciudad del mismo nombre. El río Chaitén se desbordó inundando todo a su paso y las cenizas cubrieron el valle completo. La población tuvo que ser evacuada de manera indefinida debido al riesgo de nuevas erupciones y del colapso del domo que aun crece aceleradamente en el volcán.

En febrero de 2009, se decidió refundar Chaitén en la localidad de Santa Bárbara, ubicada en el borde costero, 10 kilómetros al norte de su actual emplazamiento. La idea es transformar esta catástrofe en la oportunidad de construir una ciudad modelo: sustentable, segura y hecha a la medida de los chaiteninos.

Este proyecto de nueva ciudad considera la instalación de una planta de tratamiento de aguas residuales, por lo que la tecnología a usar debe ser fiable y de acuerdo al concepto de sustentabilidad planteado.

De este modo, el objetivo general de este trabajo es seleccionar una tecnología de tratamiento de aguas residuales para la localidad de Santa Bárbara, la nueva Chaitén.

Además de identificar las necesidades y cualidades de la localidad de Santa Bárbara, en este estudio se describe varias tecnologías de tratamiento de aguas residuales, se muestran sus ventajas y desventajas, y se propone una metodología de selección multicriterio que ordene, estructure el problema y que identifique las alternativas de solución técnicamente factibles.

La metodología de selección a usar corresponde al Proceso Jerárquico Analítico (AHP, Analytic Hierarchy Process en inglés), proceso que ordena, jerarquiza y estructura el problema para realizar comparaciones entre diferentes alternativas. Más allá de prescribir una decisión correcta, el método AHP ayuda a los tomadores de decisión a encontrar la alternativa que mejor se ajusta a las necesidades planteadas.

Entre las diferentes tecnologías de tratamiento de aguas residuales, se selecciona la más adecuada para este nuevo proyecto de ciudad y se compara la conveniencia económica, basada en costos. De esta manera se presenta una herramienta de selección para futuros casos.

Debido a que los principales contaminantes de las aguas servidas domésticas son la materia orgánica, sólidos y algunos nutrientes, las tecnologías que acá se presentan como alternativas de tratamiento son principalmente aquellos procesos que tienen como objetivo la remoción de la materia orgánica y sólidos suspendidos totales presentes en el agua. Por lo tanto los procesos fisicoquímicos y los tratamientos terciarios para remoción de compuestos inorgánicos, metales, elementos específicos, etc., no se han incluido en este análisis.

Además, este estudio busca seleccionar el tratamiento que mejor se ajuste a las necesidades de la localidad de Santa Bárbara, cumpliendo con la normativa vigente respecto a la descarga de efluentes de aguas servidas y vertido o reutilización de lodos.

## **CAPÍTULO 2: CARACTERÍSTICAS GENERALES DE CHAITÉN Y SANTA BÁRBARA**

El proceso de toma de decisiones utiliza como materia prima información. Ésta es fundamental, ya que sin ella no resultaría posible evaluar las alternativas de tratamiento de aguas residuales apropiadas para la localidad a evaluar. En este capítulo, se describe las características principales de la antigua Chaitén, antes de la erupción del volcán homónimo, así como algunos aspectos sobre la localidad de Santa Bárbara.

### **2.1 Antecedentes Generales de Chaitén**

Chaitén es una ciudad perteneciente a la Comuna de Chaitén y la provincia de Palena, ubicada en la Región de Los Lagos, al este del golfo de Corcovado frente al archipiélago de Chiloé. Esta comuna era, a comienzos de los años 2000, una de las comunas con mayor índice de desarrollo humano de la región y su población total llegaba en 2002 a los 7.182 habitantes, de los cuales 4.625 vivían en el puerto.

El día 2 de mayo de 2008, se produjo la erupción del volcán Chaitén afectando a las comunas de Chaitén y Futaleufú. Este fenómeno provocó daños de consideración, tanto en las edificaciones, terrenos y predios del lugar, como en la flora, fauna y en el medioambiente de dichas zonas.

La Figura 2.1.1, Figura 2.1.2 y Figura 2.1.3 muestran las consecuencias de la erupción del volcán en la ciudad de Chaitén:



**Figura 2.1.1 Volcán Chaitén en erupción  
02/05/08 (Fuente: [www.emol.com](http://www.emol.com))**



**Figura 2.1.2 Chaitén días después de la  
erupción (Fuente: [www.blogopolis.cl](http://www.blogopolis.cl))**



**Figura 2.1.3 La ciudad inundada por desborde del río Blanco (Fuente: muypatagonia.com)**

A consecuencia de los daños provocados por la erupción y de los riesgos de nuevos eventos similares, las autoridades decidieron evacuar a los habitantes de dicha zona. Actualmente, a marzo de 2010, el volcán aún no ha cesado su actividad.

Adicionalmente y frente a la incertidumbre de este fenómeno natural, el gobierno de Chile ha decidido refundar la ciudad en la localidad de Santa Bárbara, ubicada 10 kilómetros al norte de la actual ciudad de Chaitén, por reunir las mejores condiciones de acuerdo a la metodología MEAL (Modelo Estratégico para el Análisis de Localizaciones).

La protección natural frente a futuras erupciones del volcán y la cercanía a la ciudad antigua de Chaitén, fueron las principales características de Santa Bárbara para ser escogida como la nueva localización de la devastada ciudad.

El macizo Cordón Chaitén, ubicado al este de Santa Bárbara, alcanza los 1000 metros de altura, lo cual evitaría la llegada de flujos de lava provenientes de una probable erupción. La Figura 2.1.4 muestra el sentido que tomaron los flujos de lava volcánica en la última erupción del volcán, y se aprecia como la localidad de Santa Bárbara no fue afectada.



**Figura 2.1.4 Flujos de Lava Volcánica (Fuente: [www.plataformaurbana.cl](http://www.plataformaurbana.cl))**

Santa Bárbara actualmente es una pequeña playa en donde existen alrededor de 70 viviendas y la nueva ciudad se encuentra en proceso de construcción. Se espera que a mediados del año 2010 se pueda dar inicio a la edificación de las nuevas viviendas.

## **2.2 Antecedentes Generales de Santa Bárbara**

Santa Bárbara se ubica en el borde costero de la provincia de Palena, Región de los Lagos, 10 kilómetros al norte de la ciudad de Chaitén. La Figura 2.2.1 muestra la ubicación de Santa Bárbara en un mapa de la zona.

Se localiza en las coordenadas 42°51' de latitud sur y 72°47' de longitud oeste. La zona donde se instalará la nueva ciudad es un predio fiscal que se emplaza a una altura media de 17 m respecto al nivel del mar y cuenta con una superficie de 90 hectáreas.



Figura 2.2.1 Mapa de ubicación Santa Bárbara (Fuente: Instituto Geográfico Militar)

## 2.2.1 Geografía

Esta localidad básicamente es una pequeña bahía, protegida al este por el macizo Cordón Chaitén. La zona en donde se instalará la nueva ciudad cuenta con pocos terrenos planos y, el suelo está compuesto principalmente por grava arenosa, con alto contenido de material orgánico saturado y espesa vegetación. El nivel de la napa subterránea se encuentra a 50 metros de profundidad aproximadamente (Perfomaq S.A., 2008).

Los cuerpos de agua superficiales más importantes de la zona son: el río Santa Bárbara ubicado 300 metros al sur de la futura ciudad, el cual desemboca en la playa Santa Bárbara; el río Camahueto o Vilcún que se ubica 4 km al norte, cercano al monte Vilcún y; el Estero Fandango ubicado 2,5 km al sur, camino hacia la antigua Chaitén (Instituto Geográfico Militar).

## 2.2.2 Clima

La zona presenta un clima templado marítimo lluvioso con una mayor presencia de precipitaciones durante la temporada invernal (mayo a julio). La precipitación media anual es mayor a 4.000 mm, y en los meses de invierno supera los 500 mm/mes. La temperatura en promedio no supera los 10°C y los vientos predominantes provienen desde el oeste.



### 2.2.3 Accesos

Debido a sus características geográficas, la comuna de Chaitén presenta una importante situación de aislamiento. La principal vía existente es la Carretera Austral (Ruta CH-7) la cual conecta en sentido norte-sur Caleta Gonzalo con Santa Bárbara, Chaitén, Puerto Cárdenas, Villa Santa Lucía y el límite sur con la XI Región de Aysén. Ninguna de estas rutas está pavimentada, excepto algunos tramos en las cercanías de la ciudad de Chaitén. Esta ruta se ve en la Figura 2.2.2.



Figura 2.2.2 Acceso a Chaitén por vía terrestre (Fuente: [www.turistel.cl](http://www.turistel.cl))

Este tramo de la Carretera Austral se encuentra interrumpido desde Hornopirén por el norte y Caleta Gonzalo por el sur, impidiendo así la conexión por vía terrestre con el resto de la Región de los Lagos y con gran parte del territorio continental chileno.

Para suplir estas deficiencias en el transporte terrestre se ha dispuesto de transporte naviero que conecta Chaitén con Puerto Montt y con la isla Grande de Chiloé, a través de transbordadores directos. También existen servicios ocasionales hacia otras localidades.



Además, en octubre de 2009 se habilitó para vuelos comerciales el aeródromo provisorio Santa Bárbara, el cual restablecerá la conexión aérea con los habitantes de la zona de Chaitén, la que se vio interrumpida por la erupción del volcán (Fuerza Aerea de Chile).

#### **2.2.4 Población y Vivienda**

La ciudad de Chaitén, de acuerdo al censo del año 2002 tenía una población total de 4.625 habitantes, correspondiente al 56,6% de la población total comunal, con un total de 1.224 viviendas. En ese mismo año, la localidad de Santa Bárbara contaba con sólo 346 habitantes (Instituto Nacional de Estadísticas de Chile).

La mayor parte de los habitantes que fueron evacuados de la ciudad de Chaitén se han instalado en Puerto Montt y en la Provincia de Chiloé (Quinchao, Dalcahue, Chonchi y Castro). También hay información de desplazados en Osorno, Frutillar, Puerto Varas, Valdivia, Región del Bío – Bío, Valparaíso y Santiago.

Actualmente, se estima que el 48% de las familias desplazadas de Chaitén tiene la intención de reinstalarse en Santa Bárbara, lo que equivale a 2.900 habitantes aproximadamente. A futuro, una vez que la nueva ciudad esté terminada, se espera que este porcentaje aumente. Esta población se sumaría a la población de la localidad al año 2010, la cual se estima es alrededor de 400 personas.

#### **2.2.5 Servicios Existentes**

En abril del presente año se autorizó la instalación de infraestructura provisorio en Santa Bárbara, la cual se compone de:

- Contenedores distribuidos en dependencias de Carabineros de Chile y Municipalidad. Dichas dependencias cuentan con servicios de telefonía fija, internet, agua y luz.
- 2 generadores para luz eléctrica. La distribución será de responsabilidad de la empresa Edelaysen S.A.
- Agua. Al costado del terreno donde se emplazarán las instalaciones provisorias, se dispondrá de un pozo profundo que permitirá la distribución de agua potable, en una primera fase, a Carabineros y al Municipio, para, posteriormente, distribuir al caserío existente en la localidad de Santa Bárbara.
- Antenas provisorias para telecomunicaciones, lo que permitirá contar con telefonía móvil, fija e internet en el lugar.

En la Figura 2.2.3 se muestra la ubicación de los actuales servicios en Santa Bárbara:



**Figura 2.2.3 Santa Bárbara (Fuente: La Nación, 05/05/2009)**

El Ministerio de Vivienda y Urbanismo está trabajando en un Plan Maestro, que corresponde al Plano Regulador, en el que se definirán los límites urbanos que tendrá la nueva ciudad. Esta considera un centro cívico, un barrio residencial, un barrio de pescadores artesanales (que es una de las actividades más comunes en la zona), y un barrio turístico, en una superficie total que podría alcanzar 50 hectáreas. Se propone hacer una ciudad moderna, que será la puerta de entrada a la Patagonia.

## **2.2.6 Actividad Económica**

La actividad pesquera correspondía el principal sustento económico de la comuna de Chaitén, ya sea de forma artesanal por pequeños grupos de pescadores, como por flotas pesqueras de alta mar. Ambas formas abastecían las industrias de procesamiento y congelamiento y las conserveras, ubicadas dentro de la Región de Los Lagos. La ganadería también era un sector importante, principalmente basada en la crianza de bovinos y ovinos para la producción de carne, lácteos y otros subproductos.

La agricultura se realizaba a nivel de subsistencia local con algunos cultivos de papas, ajos y hortalizas establecidos en los lugares más abrigados del territorio comunal. La industria forestal estaba limitada debido a la protección existente sobre grandes extensiones de bosque nativo.

Durante los últimos años, el turismo enfrentó una importante alza aprovechando el hecho de ser la puerta de ingreso a la XI Región de Aysén a través de la Carretera Austral o de los servicios de transbordadores existentes desde Puerto Montt y Quellón. A esto, se sumaba la explotación turística de diversos sectores de la comuna tales como termas, lagos, ríos o bosques nativos con muy poca intervención humana, existentes dentro del Parque Nacional Corcovado y el Parque Pumalín.

### **2.2.7 Situación Sanitaria**

Chaitén contaba con red de agua potable y alcantarillado proporcionado por la empresa de servicios sanitarios ESSAL S.A. El sistema de tratamiento de aguas residuales utilizado era un emisario submarino, que estaba en funcionamiento desde el año 2004 y operaba a caudal medio de 13,98 litros/seg (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2007).

Para la nueva Santa Bárbara, aún no está definido si el servicio será suministrado por la misma u otra concesionaria o si entrará al Programa Nacional de Agua Potable Rural (APR). Esto debido a que hasta marzo de 2010 no está claro si la zona se definirá como urbana o rural, dependerá del nivel de población que se estime luego que se hagan los estudios demográficos pertinentes.

## **CAPÍTULO 3: ASPECTOS GENERALES SOBRE EL TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS**

En este capítulo se describen los contaminantes típicos presentes en aguas residuales de origen doméstico y su necesidad de remoción. Se presenta la normativa chilena vigente con respecto a la descarga de efluentes líquidos y normas de disposición de lodos al medioambiente.

Se identifica y describe los procesos de tratamiento de aguas residuales más utilizados en el país, junto con otras alternativas menos conocidas a nivel nacional. También se describen algunas alternativas de desinfección y de tratamiento de lodos, lo cual completa el proceso generalmente requerido para el manejo y disposición de aguas residuales en forma ambientalmente adecuada.

### **3.1 Características de Aguas Residuales**

Las aguas residuales son los vertidos que se generan en los núcleos de población concentrada como consecuencia de las actividades propias de éstos. Las características de las aguas residuales dependen del núcleo de población en el que se genere, influyendo parámetros tales como el clima, número de habitantes, la existencia de industrias dentro del núcleo, tipos de industria, etc. Los contaminantes que se encuentran habitualmente en las aguas residuales son:

Arenas: Se entiende como tales una serie de partículas de tamaño apreciable y que en su mayoría son de naturaleza mineral, aunque pueden llevar adherida materia orgánica. Las arenas enturbian las masas de agua cuando están en movimiento, o bien forman depósitos de lodos si encuentran condiciones adecuadas para sedimentar.

Grasas y aceites: Son todas aquellas sustancias de naturaleza lipídica, que al ser inmiscibles con el agua, van a permanecer en la superficie, dando lugar a la aparición de natas y espumas. Estas natas y espumas entorpecen cualquier tipo de tratamiento físico o químico, por lo que deben eliminarse en los primeros pasos del tratamiento de un agua residual.

Materia orgánica: Son compuestos orgánicos que sufren fácilmente y de forma natural procesos de oxidación, que van a llevar a cabo consumo del oxígeno del medio. Estas oxidaciones van a realizarse bien por vía química o bien por vía biológica. En ausencia de oxígeno generan condiciones indeseables.

Nitrógeno y fósforo: Tienen un papel fundamental en el deterioro de las masas acuáticas. Su presencia en las aguas residuales es debida a los detergentes y fertilizantes, principalmente. El nitrógeno orgánico también es aportado a las aguas residuales a través de las excretas humanas.

Agentes patógenos: Son organismos que pueden ir en mayor o menor cantidad en las aguas residuales y que son capaces de producir o transmitir enfermedades.

Otros contaminantes específicos: Se incluyen sustancias de naturaleza muy diversa que provienen de aportes muy concretos: metales pesados, fenoles, petróleo, pesticidas, etc.

Para medir la presencia de los contaminantes descritos, se utilizan los siguientes parámetros:

- DBO<sub>5</sub>: es la demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días y a 20°C, indica el contenido de materia orgánica en un aguas servidas. La DBO<sub>5</sub> tiene una componente particulada y una componente disuelta. Este parámetro indica la presencia de materia orgánica en el agua.
- Sólidos Suspendidos Totales (SST): indican el contenido de materia en suspensión en las aguas servidas, se consideran sólidos suspendidos aquellos que no pasan a través de un filtro membrana de porosidad de 0,8 [µm] o menor. Los sólidos suspendidos se dividen en sólidos volátiles y sólidos fijos.
- Nitrógeno Kjeldahl (NKT): es la suma del nitrógeno orgánico y el nitrógeno amoniacal. En aguas servidas domésticas aproximadamente un 25% es nitrógeno orgánico y un 75% es nitrógeno amoniacal
- Fósforo total: incluye todas las formas del fósforo, tiene una componente orgánica y una inorgánica, la primera representa un 35% del fósforo total y la segunda un 65% del fósforo total.

El Decreto Supremo N°609/1998 define las características de las aguas servidas chilenas para una población de 100 personas, considerando una dotación de 200 [l/hab/día] y un factor de recuperación de 0,8. Los valores característicos propuestos para los parámetros anteriormente descritos se muestran a continuación:

**Tabla 3.1.1 Caracterización de Aguas Servidas domésticas correspondiente a 100 habitantes**

Parámetros	Valor característico	Carga contaminante 100 Hab/día
Aceites y Grasas	60 (mg/L)	960 (g/día)
DBO <sub>5</sub>	250 (mg/L)	4.000 (g/día)
Fósforo	5 (mg/L)	80 (g/día)
Nitrógeno amoniacal	50 (mg/L)	800 (g/día)
Sólidos suspendidos totales	220 (mg/L)	3.520 (g/día)

(Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República de Chile, DS N°690, 1998)

### 3.2 Sistemas Biológicos de Tratamiento de Aguas Residuales

Se define como tratamiento biológico aquellos procesos que utilizan microorganismos para realizar la degradación biológica de la materia orgánica. La remoción de DBO, la coagulación de los sólidos coloidales y la estabilización de la materia

orgánica es llevada a cabo por una gran variedad de microorganismos, especialmente bacterias.

Existe una gran variedad de formas de llevar a cabo el tratamiento biológico. En la Tabla 3.2.1 se resumen los más importantes

**Tabla 3.2.1 Proceso Biológicos de Tratamiento de Aguas Residuales**

Sistemas Biológicos No Convencionales	Lagunas de Estabilización
	Lombrifiltración
Sistemas Biológicos Convencionales	Lagunas Aireadas
	Biofiltros o filtros percoladores
	Biodiscos
	Lodos Activados
	Aireación Extendida
	Zanjas de Oxidación
	SBR
Sistemas Biológicos Innovadores	Biorreactor de Membrana (MBR)
	Película Fija Integrada en Lodos (IFAS)
	Procesos Anaeróbicos
	Biorreactor de Lecho Fluidizado
	Lodo Activado en Pozo Profundo
Sistemas Biológicos de Remoción de Nutrientes	Remoción Biológica de Fósforo
	Remoción Biológica de Nitrógeno

### 3.2.1 Sistemas de Tratamiento del Tipo No Convencional

Las alternativas del tipo no convencional prescinden de mecanización, pero requieren mayores áreas de terreno. En general, son sistemas naturales en los que no se cuenta con variables operativas que permitan controlar el sistema.

#### 3.2.1.1 Lagunas de Estabilización

Las lagunas de estabilización facultativas son estanques de tierra de entre 1,2 y 2,4 metros de profundidad en donde se acumulan las aguas servidas por un tiempo determinado (mayor a 20 días). La materia orgánica contenida es degradada naturalmente mediante la acción de bacterias facultativas, aerobias y anaerobias.

La capa superficial de agua contiene oxígeno disuelto debido a la aireación atmosférica y la respiración algal, lo que condiciona la existencia de microorganismos aeróbicos. La capa de fondo de la laguna contiene los depósitos de sólidos, los cuales se descomponen debido a la acción de bacterias anaeróbicas (fermentación anaeróbica). La capa intermedia es parcialmente aerobia y anaeróbica, en la que la descomposición

de los residuos orgánicos la llevan a cabo las bacterias facultativas (EPA-US, Wastewater Technology Fact Sheet: Facultative Lagoons, 2002a).

### Aplicabilidad

Este tipo de tratamiento es muy adecuado para comunidades rurales e industrias en donde los costos de terreno no son un factor limitante. Las lagunas facultativas pueden utilizarse para tratar aguas servidas crudas, filtradas o con sedimentación primaria y aguas residuales industriales biodegradables.

### Eficiencia del tratamiento

Las eficiencias de remoción para los parámetros más importantes se muestran en la Tabla 3.2.2.

**Tabla 3.2.2 Eficiencias de Remoción**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Eficiencia</b>
DBO	mg/l	75-85%
Sólidos Totales	mg/l	95%
Nitrógeno	mg/l	30-50%
Fósforo	mg/l	20-60%
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	60-99%

(Sperling, 1996)

### Ventajas:

- Bajos costos relativos de construcción y operación con respecto a otros procesos
- Operación sencilla
- La cantidad de lodo extraído será relativamente pequeño en comparación con otros procesos convencionales
- Bajos requerimientos de energía para sistemas diseñados para operar con flujo gravitacional

### Desventajas

- Requiere de terreno relativamente grandes
- Posible proliferación de olores y vectores sanitarios
- Rendimientos limitados en climas fríos
- La acumulación de lodos será mayor en climas fríos debido a la reducción de la actividad microbiana.
- Los niveles de amoníaco en el efluente son difíciles de controlar o predecir
- Existen muchas variables incontrolables que afectan al proceso, como el viento, la temperatura, entre otras.

### 3.2.1.2 Lombrifiltración

Este sistema consiste en percolar las aguas servidas domésticas a través de un medio filtrante compuesto de aserrín o viruta en el cual se encuentra una gran cantidad de lombrices. La materia orgánica que queda retenida en el medio filtrante es removida por la acción de las lombrices junto con otros microorganismos presentes. Las lombrices, luego de digerir la materia orgánica, producen a través de sus deyecciones el denominado humus de la lombriz, considerado excelente abono orgánico para suelo (Santibañez, 2002).

#### Aplicabilidad

El tipo de lombriz usada en este tipo de sistema es la del tipo californiana, las cuales pueden criarse en cualquier lugar del planeta que posea temperaturas ambientales que no superen los 40°C.

Entre los 14°C y 27°C alcanzan la máxima capacidad de reproducción y de producción de humus, pero se reproducen menos durante los meses más cálidos y los más fríos. Cuando la temperatura es inferior a 7°C, las lombrices no se reproducen, pero siguen produciendo abono, aunque en menor cantidad.

#### Eficiencia del tratamiento

Las eficiencias de remoción para los parámetros más importantes se muestran en la Tabla 3.2.3.

**Tabla 3.2.3 Eficiencia Lombrifiltración**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Eficiencia</b>
DBO	mg/l	95%
Sólidos Totales	mg/l	95%
Nitrógeno	mg/l	60%
Fósforo	mg/l	70%
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	1 escala log

(Santibañez, 2002)

#### Ventajas

- No requiere creación de biomasa degradador lo que implica una rápida puesta en marcha
- Se obtiene humus que puede ser utilizado como abono orgánico
- Bajos costos operacionales al tener bajos requerimientos de energía



### Desventajas

- Requiere de mayor superficie que sistemas convencionales. Por cada  $m^2$  de superficie de lombrifiltro se pueden tratar  $0,6 m^3/d$ , lo que implica que se necesitan  $0,75 m^2$  de terreno por habitante.
- Sensibilidad a variaciones bruscas de carga orgánica
- Posible proliferación de olores y vectores sanitarios
- Climas extremos pueden afectar el crecimiento de las lombrices

## **3.2.2 Sistemas de Tratamiento del Tipo Convencional**

Las alternativas de tratamiento del tipo convencional incluyen mecanización de los sistemas, pero utilizan menores extensiones de terreno.

### **3.2.2.1 Lagunas Aireadas**

El proceso de lagunaje aireado usa como reactor un depósito excavado en el terreno. El oxígeno necesario se suministra mediante difusores sumergidos o aireadores superficiales, a diferencia de las lagunas facultativas en donde el oxígeno es suministrado por la fotosíntesis algal.

Existen dos tipos de lagunas aireadas: las aerobias y las facultativas. La diferencia entre ellas es que en una laguna aerobia, la totalidad de los sólidos se mantiene en suspensión gracias a la potencia de la aireación artificial, mientras que en la facultativa, la potencia entregada sólo permite introducir oxígeno necesario para el proceso, pero no asegura que todos los sólidos se mantengan en suspensión. Esto trae como consecuencia la generación de algas y la decantación de parte de los sólidos en la laguna, los cuales se digieren anaeróbicamente en el fondo. El tiempo de retención hidráulico generalmente fluctúa entre 4 y 6 días.

En la mayoría de los casos, la aireación no se aplica de manera uniforme en todo el sistema sino que se divide en sectores. Por ejemplo, la aireación más intensa se utiliza en el primer sector y ya el último sector puede tener poca o nula aireación para permitir la sedimentación de partículas. En algunos casos, posterior a la laguna de aireación se utiliza una laguna de sedimentación que cumpla este objetivo.

El sistema de lagunas aireadas es similar al de lodos activados, con la diferencia que no se incluye la recirculación de material celular, resultando una concentración más baja de sólidos suspendidos en el licor mezclado. Esto implica que se requieren mayores tiempos de retención hidráulica, para que el proceso biológico pueda llevarse a cabo.

En los sistemas de lagunas aireadas es posible llevar a cabo el proceso de nitrificación, tanto de forma estacional como en continuo si es que se diseña para esto. El

grado de nitrificación depende del diseño y de las condiciones de funcionamiento del sistema, así como de la temperatura del agua residual. Generalmente, cuánto más alta sea la temperatura de ésta y cuanto menores las cargas, mayor será el grado de nitrificación alcanzable (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).

### Aplicabilidad

Una laguna aireada es adecuada para tratar aguas servidas domesticas e industriales de baja a mediana intensidad de pequeñas y medianas poblaciones. Si bien requiere de un nivel medio-alto de espacio, éste es menor al que requiere una laguna facultativa, obteniendo mejores niveles de tratamiento.

### Eficiencia de tratamiento

En la Tabla 3.2.4 y Tabla 3.2.5 se muestran las eficiencias alcanzadas tanto para las lagunas aireadas aerobias como para las lagunas aireadas facultativas:

**Tabla 3.2.4 Eficiencia Lagunas Aireadas Aerobias**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Eficiencia</b>
DBO	mg/l	50-60%
Nitrógeno	mg/l	30-50%*
Fósforo	mg/l	15-25%*
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	60-96%

\*Sólo si se diseña para remoción de nutrientes (Sperling, 1996)

Si se incluye laguna de sedimentación posterior a la laguna aireada, la remoción de DBO aumenta a 80-90% y la de de sólidos suspendidos totales alcanza también bordea los 80-90%

**Tabla 3.2.5 Eficiencia Lagunas Aireadas Facultativas**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Eficiencia</b>
DBO	mg/l	75-90%
Nitrógeno	mg/l	30-50%
Fósforo	mg/l	20-60%
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	60-96%

(Sperling, 1996)

### Ventajas

- Baja producción de lodos comparado con un sistema convencional
- Proceso simple y confiable
- Puede ser operada para remover nitrógeno

### Desventajas

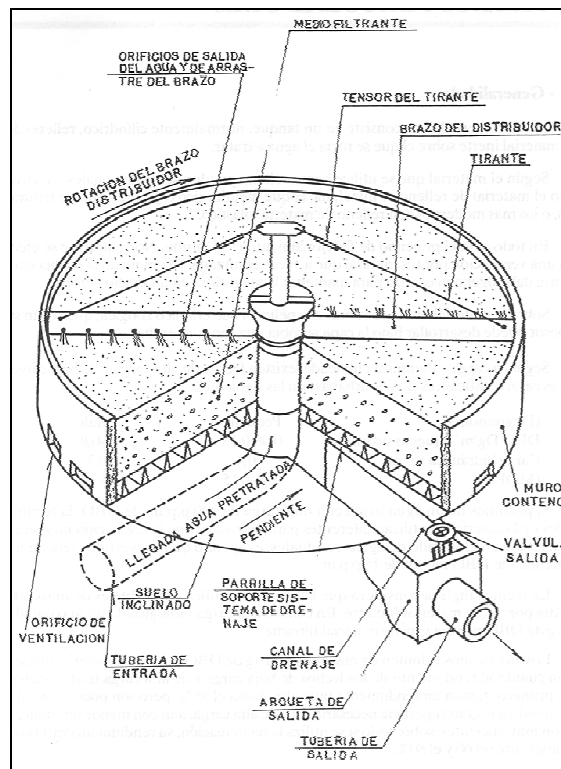
- En climas fríos se reduce la actividad biológica
- Altos requerimientos de energía a bajas condiciones de carga

(EPA-US, Wastewater Technology Fact Sheet: Aerated, Partial Mix Lagoons, 2002b)

### **3.2.2.2 Biofiltros o Filtros Percoladores**

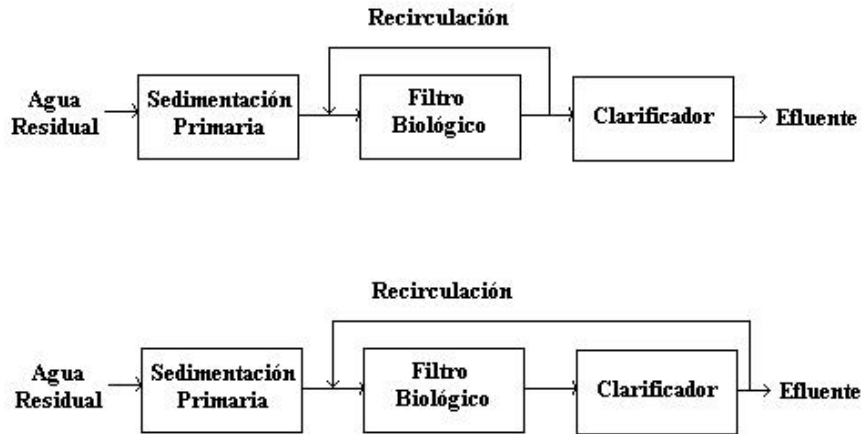
El filtro percolador consiste en un lecho formado por un medio sumamente permeable al que se le adhieren microorganismos y a través del cual percola el agua residual. La materia orgánica presente en el agua residual se degrada aeróbicamente por la acción de la población de microorganismos adherida al medio. El medio filtrante suele estar formado por piedras o diferentes materiales plásticos de relleno. Previo al biofiltro es necesario someter el agua a tratar a un tratamiento primario.

Los filtros incluyen un sistema de drenaje inferior para recoger el líquido tratado y los sólidos biológicos que se hayan separado del medio. El líquido recogido pasa a un tanque de sedimentación, en el que se separan los sólidos del agua residual (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).



**Figura 3.2.1 Filtro Percolador (Fuente: Miliarium Aureum, 2001)**

Parte del efluente es recirculado para ponerlo de nuevo en contacto con la población biológica y para diluir la concentración del agua afluente. Esta recirculación puede ser antes o después del sedimentador secundario. A continuación se muestran las alternativas de flujos posibles:



**Figura 3.2.2 Diagramas de Flujos típicos de Filtros Percoladores**

Los filtros percoladores se clasifican según las cargas orgánicas o hidráulicas aplicadas a ellos en: baja carga, carga intermedia, carga alta, carga muy alta de desbaste y doble etapa. Las características de cada uno se resumen en la Tabla 3.2.6.

**Tabla 3.2.6 Clasificación de Filtros Percoladores**

Elemento	Unidad	Baja Carga	Carga Intermedia	Carga Alta	Carga Muy Alta	De Desbaste	Doble Etapa
Medio Filtrante		Piedra, Escoria	Piedra, Escoria	Plástico	Plástico	Plástico, Madera	Roca, Plástico
Carga Hidráulica	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día	1,2-3,5	3,5-9,4	9,4-37,6	11,7-70,4	47,0-188,0	9,4-37,6
Carga Orgánica	kgDBO/m <sup>3</sup> /día	0,08-0,40	0,25-0,50	0,50-0,95	0,48-1,60	1,60-8,00	0,95-1,80
Profundidad	m	1,80-2,40	1,80-2,40	0,90-1,80			
Relación de Recirculación		0	0-1	1-2	1-2	1-4	0,5-2

(Metcalf & Eddy, Inc., 2003)

### Aplicabilidad

Los filtros percoladores son aplicables para tratar aguas residuales domésticas e industriales. Está comprobado que los cultivos fijos a un soporte o medio son afectados en menor medida que los cultivos suspendidos ante cambios en las condiciones ambientales

(Menendez & Pérez, 2007), por lo que este sistema sería también aplicable en zonas donde la temperatura varía bastante durante el día y durante el año.

### Eficiencia de Tratamiento

Los filtros percoladores bien operados pueden producir un efluente con bajas concentraciones de DBO y altamente nitrificado.

**Tabla 3.2.7 Eficacia de remoción de biofiltros**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Eficiencia</b>
DBO	mg/l	65-85%
Sólidos Totales	mg/l	60-85%
Nitrógeno	mg/l	15-50%
Fósforo	mg/l	8-12%
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	60-97%

(Metcalf & Eddy, Inc., 2003)

### Ventajas

- Capaz de alcanzar consistentemente un efluente de muy alta calidad.
- Proceso relativamente sencillo
- Estabilidad ante variaciones de la carga y concentración afluente
- Producción de un lodo estable concentrado, en general bien floculado y fácil de decantar
- Bajo costo y técnica de modernización confiable
- Se pueden diseñar para que haya desnitrificación
- La biomasa inmovilizada tiene una vida larga, típicamente 5 años o más.
- Aplicables a instalaciones nuevas o para modernización de plantas existentes que cuenten con filtros percoladores.

### Desventajas

- Riesgo de desarrollo de vectores sanitarios especialmente en climas cálidos o templados
- Se requiere de clarificación primaria
- Se requiere de bombeo para alimentar al filtro percolador
- Posibilidad de generar malos olores en los clarificadores primarios, el filtro percolador y las instalaciones de manejo de lodos residuales
- Requerimientos de operación y mantenimiento moderados, es necesario contar con un operador capacitado

### **3.2.2.3 Biodiscos (RBC)**

Un reactor biológico rotativo de contacto (RBC) consiste en una serie de discos circulares de poliestireno o cloruro de polivinilo, situados sobre un eje, a corta distancia

unos de otros. Los discos están parcialmente sumergidos en el agua residual y giran lentamente en el seno de la misma.

En el funcionamiento de un sistema de este tipo, el cultivo bacteriano se desarrolla adherido a la superficie de los discos, hasta formar una película biológica (biofilm) sobre la superficie mojada de los mismos. La rotación de los discos pone la biomasa en contacto, de forma alternativa, con la materia orgánica presente en el agua residual y con la atmosfera para la adsorción de oxígeno (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).



**Figura 3.2.3 Biodiscos**

### Aplicabilidad

Para operar los biodiscos, es necesario contar con una fuente de energía permanente para hacer rotar los discos. Los rendimientos de eliminación de materia orgánica disminuyen cuando la temperatura es inferior a 13°C, haciendo necesario aumentar la superficie del medio.

### Eficiencia de Tratamiento

La eficiencia del tratamiento de aguas residuales con biodiscos se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 3.2.8 Eficacia remoción Biodiscos**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Eficiencia</b>
DBO	mg/l	80-85%
Sólidos Totales	mg/l	80-85%
Nitrógeno	mg/l	15-50%
Fósforo	mg/l	10-25%

(Metcalf & Eddy, Inc., 2003)

### Ventajas

- Es necesaria baja energía para accionarlos
- Fácil operación
- Baja producción de lodos debido al uso de cultivo fijo

### Desventajas

- Se requiere tratamiento primario
- Altos costos de mantención, debido principalmente a fallas en los ejes
- Cada cierto tiempo se produce desprendimiento de la biopelícula, lo cual paraliza el proceso hasta que se produzca la recolonización.

## 3.2.2.4 Lodos Activados

### a) Convencional

El sistema de lodos activados es el proceso biológico con cultivo en suspensión más común en el tratamiento de aguas servidas. Consiste en tres etapas: sedimentación primaria, tanque de aireación y sedimentación secundaria. En la siguiente figura se muestra la configuración típica del sistema:

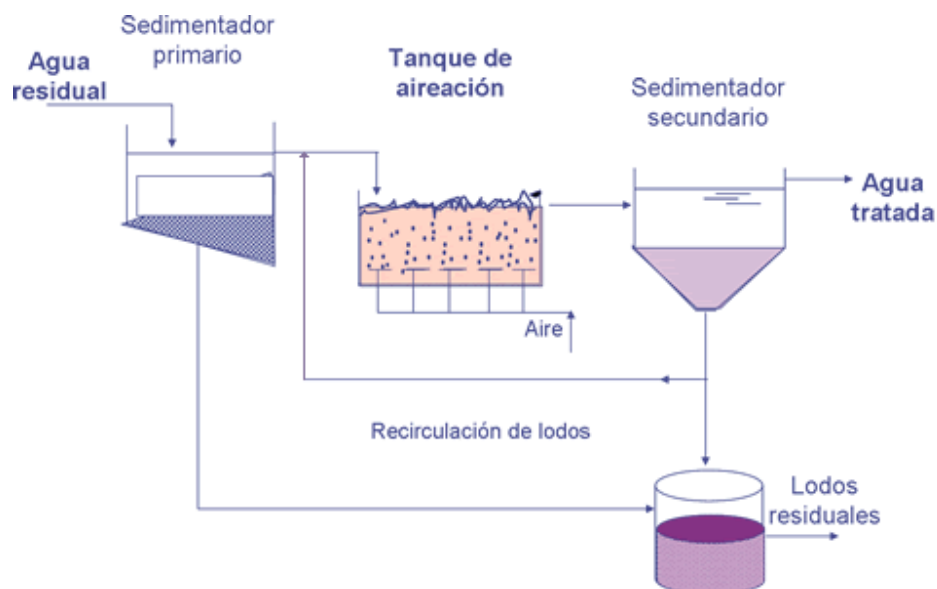


Figura 3.2.4 Sistema convencional de lodos activados (Fuente: [www.rema.com](http://www.rema.com))

El tratamiento primario corresponde a sedimentación, donde básicamente se remueven sólidos suspendidos. Éstos sólidos generalmente están constituidos en gran parte por materia orgánica, lo que implica una reducción de la DBO particulada.

Posteriormente, el agua pasa a ser tratada con microorganismos en el tanque de aireación con el fin de degradar la DBO disuelta presente en el agua servida. En el tanque de aireación los microorganismos se mezclan completamente con las aguas servidas de manera que éstos puedan crecer y estabilizar la materia orgánica en un ambiente aeróbico. Este proceso puede durar entre cuatro a ocho horas. La mezcla de los lodos activados y las aguas servidas en el estanque de aireación se denomina “licor mezclado”.

Usualmente el oxígeno es suministrado a partir de las burbujas de aire que se incorporan al licor mezclado en forma turbulenta, mediante el empleo de aireadores mecánicos o de aire comprimido.

El licor mezclado luego fluye desde el estanque de aireación a un decantador secundario en donde se produce la separación sólido-líquido y los lodos activados sedimentan para obtener un efluente clarificado. Una porción de los lodos sedimentados son retornados al estanque de aireación para mantener una adecuada población de microorganismos en relación a la carga orgánica que ingresa al reactor. La otra parte de los lodos sedimentados es descartada del proceso y manejada en unidades de tratamiento de lodos.

### Aplicabilidad

El sistema de lodos activados puede ser utilizado tanto para aguas residuales domésticas como para aguas industriales. Dependiendo de la calidad y cantidad del agua afluente, de la necesidad de remoción, y de las condiciones de espacio y operación que se tengan, el proceso se puede modificar para adecuarse a la situación. Las modificaciones más comunes del proceso son descritas más adelante en el capítulo.

### Eficiencia de Tratamiento

El efluente obtenido es de muy buena calidad si se complementa con desinfección. Las eficiencias de remoción se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3.2.9 Eficiencia de remoción Lodos Activados**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Eficiencia</b>
DBO	mg/l	85-95%
Sólidos Totales	mg/l	80-90%
Nitrógeno	mg/l	15-50%
Fósforo	mg/l	10-25%

(Metcalf & Eddy, Inc., 2003)



### Ventajas

- Efluente de buena calidad utilizando poco espacio
- Adaptable a distintos tipos de agua residual

### Desventajas

- Requiere de energía eléctrica para su operación
- Requiere operador capacitado
- Proceso susceptible a producción de bulking filamentoso

### **b) Lodos Activados con Aireación Extendida**

La aireación extendida es una variación de los lodos activados convencionales, en donde se utiliza la fase endógena de la respiración microbiana con periodos de aireación prolongados. El tiempo de retención hidráulico y celular es aumentado a 20 o más días, por lo que el volumen del reactor también debe aumentar.

Teóricamente la pequeña cantidad del lodo que se produce en estos sistemas está constituida fundamentalmente por sustancias no biodegradables. Debido a que los sistemas de baja carga por lo común no se diseñan con sedimentación primaria, en el tanque de aireación existirá una mezcla del lodo primario y biomasa.

### Aplicabilidad

El sistema de aireación extendida se utiliza para tratar aguas residuales de origen domestico o industrial y en general es recomendable para poblaciones con menos de 50.000 habitantes.

### Eficiencia del Tratamiento

Las eficiencias de remoción se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3.2.10 Eficiencia de Remoción Aireación Extendida**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Eficiencia</b>
DBO	mg/l	75-95%
Sólidos Totales	mg/l	85-95%
Nitrógeno	mg/l	15-30%
Fósforo	mg/l	10-20%

(Sperling, 1996)

### Ventajas

- Buena calidad del efluente
- Diseño y operación poco complicada
- Se puede usar sin necesidad de tratamiento primario

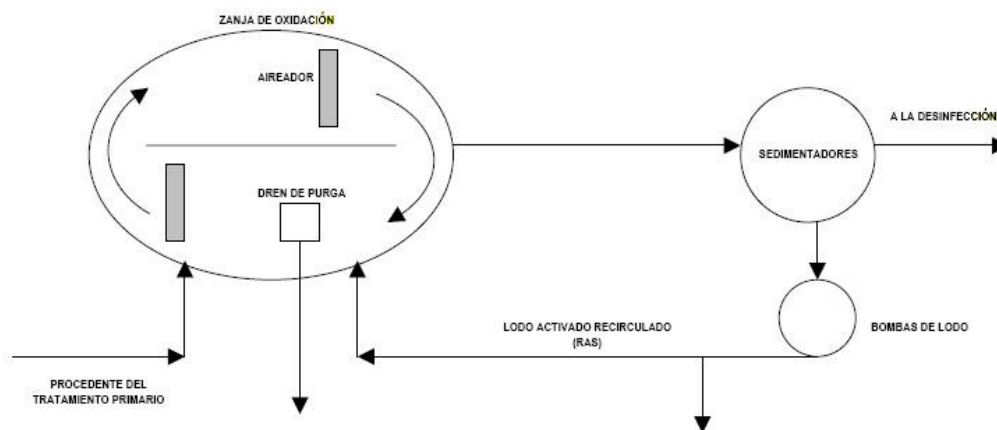
- El sistema es capaz de resistir aumentos bruscos de caudal y de tóxicos en el afluente
- Producción de lodos estabilizados y menor cantidad que en el sistema de lodos activados convencional

### Desventajas

- Necesidad de mayor superficie que en proceso de lodos convencional
- La energía necesaria en la aireación es alta
- Requiere operador capacitado

### c) Zanjas de Oxidación

Una zanja de oxidación es una variación del proceso de lodos activados, que utiliza un tiempo extenso de retención de sólidos para la remoción de compuestos orgánicos biodegradables. El sistema tiene una configuración de anillo, óvalo o tanque en forma de herradura dentro de los cuales se encuentran uno o múltiples canales. La circulación del agua, la transferencia de oxígeno y la aireación en las zanjas son promovidas por aireadores montados en forma vertical u horizontal. Posterior a las zanjas, el agua pasa por sedimentadores secundarios desde los cuales se recircula parte del lodo acumulado. Algunas veces se incluye sedimentación primaria antes de las zanjas, pero lo más común es que se aplique solamente tratamiento preliminar (EPA-US, Folleto Informativo de Tecnología de Aguas Residuales: Zanjas de Oxidación, 1999).



**Figura 3.2.5 Sistema típico de zanjas de oxidación (EPA-US, Folleto Informativo de Tecnología de Aguas Residuales: Zanjas de Oxidación, 1999)**

### Aplicabilidad

Las zanjas de oxidación pueden ser aplicadas a cualquier situación en donde sea apropiado el sistema de lodos activados ya sea convencional o de aireación extendida, pero requieren un área de terreno mayor debido al mayor tiempo de retención del agua a tratar.

Esta tecnología es muy efectiva en instalaciones pequeñas, comunidades pequeñas e instituciones aisladas.

Las zanjas de oxidación tienen costos de operación y mantenimiento significativamente menores que otros procesos de tratamiento secundario. Con relación a otras tecnologías de tratamiento las necesidades de energía son bajas, el control por parte de los operadores es mínimo, y normalmente no se requiere la adición de compuestos químicos.

### Eficiencia del tratamiento

Los niveles de remoción del sistema zanjas de oxidación son similares a los alcanzados por sistemas convencionales de lodos activados, pero si son operados para desnitrificar, la remoción de nitrógeno es mucho más elevada.

**Tabla 3.2.11 Eficiencia remoción sistema zanjas de oxidación**

Parámetro	Eficiencia
DBO	75-95%
SST	95%
Nitrógeno Total	94%*

\*Si el diseño considera desnitrificación (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)

Además, se pueden añadir sales metálicas para mejorar la remoción del fósforo.

### Ventajas

- La principal ventaja de las zanjas de oxidación es su capacidad de lograr los objetivos de remoción de contaminantes con requerimientos operacionales reducidos y a bajos costos de operación y mantenimiento.
- El tiempo extendido de retención hidráulica y la mezcla completa minimizan el impacto de cargas contaminantes extremadamente altas o de sobrecargas hidráulicas.
- Produce menos lodos que otros sistemas biológicos debido a la extensa actividad biológica durante el proceso de lodos activados.
- La eficiencia de operación en cuanto al uso de energía da como resultado la reducción de consumo de electricidad en relación con otros procesos biológicos de tratamiento.
- El sistema puede ser operado para lograr desnitrificación parcial. Una de las modificaciones de diseño más comunes para mejorar la remoción de nitrógeno se conoce como el proceso modificado de Ludzack-Ettinger (MLE).

### Desventajas

- Las concentraciones de sólidos suspendidos en el efluente son relativamente altas en comparación con otras modificaciones del proceso de lodos activados.
- Requiere una superficie de terreno más grande que otras opciones de tratamiento.

#### **d) Reactor Discontinuo Secuencial (SBR)**

El sistema Reactor Discontinuo Secuencial o, más conocido en inglés como Sequencing Batch Reactor (SBR), es otra variante del proceso de lodos activados que utiliza ciclos de llenado y descarga del agua residual. La diferencia es que todos los procesos tienen lugar secuencialmente en el mismo tanque. Las etapas se describen a continuación:

Tratamiento preliminar: El agua residual afluyente debe pasar a través de rejillas y desarenación antes de llegar al SBR.

Llenado: En la primera etapa, el agua residual entra a un reactor parcialmente lleno que contiene la biomasa ya aclimatada a los componentes del agua residual de los ciclos anteriores.

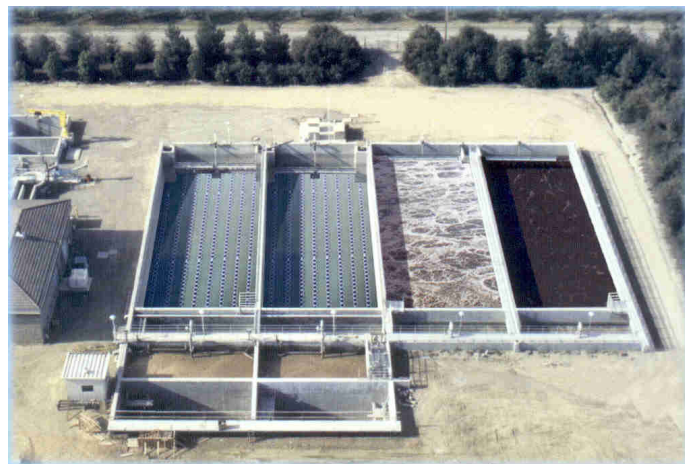
Reacción: Una vez que el reactor se llena, este opera como un sistema convencional de lodos activados, pero sin el flujo continuo de afluyente o descarga de efluente. Luego de completarse las reacciones biológicas, la aireación y la mezcla se descontinúan.

Sedimentación: se sedimenta la biomasa para separar los sólidos del líquido.

Vaciado: se remueve el sobrenadante.

El exceso de biomasa se purga en cualquier punto de este ciclo. La purga frecuente hace que de un ciclo al siguiente se mantenga una relación de masas casi constante entre el sustrato afluyente y la biomasa.

Para optimizar el desempeño del sistema, se utilizan dos o más reactores en una secuencia de operación predeterminada. (EPA-US, Folleto Informativo de Tecnologías de Aguas Residuales: Reactores Secuenciales por Tandas, 1999b)



**Figura 3.2.6 Sistema SBR**

### Aplicabilidad

Los sistemas SBR son recomendados para poblaciones bajas a medianas. A caudales mayores, la operación se vuelve más compleja, lo que desestimula el uso de este tipo de tratamiento.

La superficie requerida para la instalación del proceso es baja ya que como se describió antes, los procesos de depuración se realizan en un mismo estanque.

### Eficiencia del Tratamiento

Los niveles de remoción de un sistema SBR son similares a los alcanzados por sistemas convencionales de lodos activados.

**Tabla 3.2.12 Eficiencia remoción sistema SBR**

Parámetro	Eficiencia
DBO	85-95%
SST	85-95%
Nitrógeno Total	15-30%
Fósforo Total	10-25%
Coliformes Fecales	60-90%

(Metcalf & Eddy, Inc., 2003)

### Ventajas

- La homogenización de caudales, el tratamiento biológico y la sedimentación secundaria pueden lograrse en un tanque reactor único.
- El material biológico puede mantenerse en el tanque tanto como sea necesario.
- El proceso tiene alta flexibilidad de operación y control.
- El área superficial requerida es mínima.
- El sistema puede ser operado para alcanzar nitrificación, desnitrificación y remoción de fósforo sin adición de reactivos químicos
- Ahorro potencial de inversión de capital por la eliminación de sedimentadores y otros equipos.
- Los requisitos laborales y de mantenimiento pueden reducirse con los SBR por cuanto los sedimentadores, los equipos asociados y las bombas de recirculación de lodos activados pueden no ser necesarios.

### Desventajas

- Se requiere un nivel mayor de complejidad (en comparación a los sistemas convencionales) de las unidades de programación temporal y controles, especialmente en sistemas de mayor tamaño.
- Un nivel más alto de mantenimiento (comparado con los sistemas convencionales) asociado con el tipo de controles, interruptores automáticos y válvulas automáticas.

- Las necesidades de mantenimiento de los interruptores y las válvulas automáticas que controlan la secuencia de operación pueden ser mayores que en los sistemas convencionales de lodos activados.

Los parámetros de diseño de los diferentes sistemas de lodos activados se resumen en la Tabla 3.2.13

**Tabla 3.2.13 Parámetros de Diseño Lodos Activados**

	Tiempo de retención celular	SSLM	Tiempo retención hidráulico	Razón de circulación lodos
Unidades	d	mg/l	h	
Convencional	5-15	1.500-3.000	4-8	0,25-0,75
Aireación Extendida	20-30	3.000-6.000	18-36	0,5-1,5
Zanjas de Oxidación	10-30	3.000-6.000	8-36	0,75-1,5
SBR	NA	1.500-5.000	12-50	NA

(Metcalf & Eddy, Inc., 2003)

### 3.2.3 Sistemas Innovadores

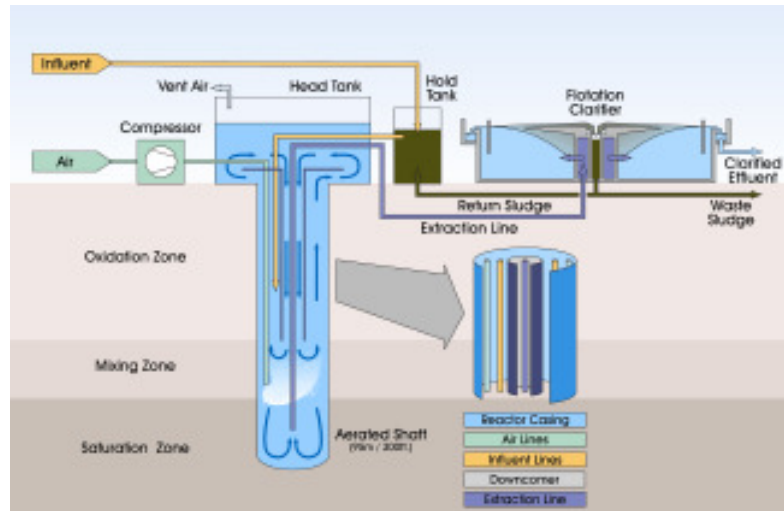
Los sistemas innovadores corresponden a tecnologías que han sido probadas a escala de demostración, que han estado disponibles e implementadas en Estados Unidos por menos de cinco años o que tienen un nivel de uso inicial. De un informe de la U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) se seleccionaron algunas de estas tecnologías, las cuales se describe a continuación (EPA-US, Emerging Technologies for Wastewater Treatment and In-Plant Wet Weather Management, 2008).

#### 3.2.3.1 Lodo Activado en Pozo Profundo (VERTREAT)

El sistema de lodo activado en pozo profundo VERTREAT™, patentado por Noram Bio Systems Inc., es una modificación del lodo activado convencional que usa un tanque o pozo vertical en lugar del estanque de aireación en superficie. Esta configuración vertical da como resultado un aumento en la transferencia de oxígeno en el licor mezclado, lo que permite operar con mayores cargas orgánicas y población de microorganismos.

Las aguas residuales son tratadas en un reactor aeróbico enterrado, normalmente de entre 75 a 90 m de profundidad. El aire se inyecta bajo presión en la parte inferior del reactor, el cual proporciona oxígeno para la reducción de DBO, promueve la mezcla en el reactor y logra la separación de sólidos a través de clarificación por flotación. El gas disuelto en profundidad sale de la solución cuando el efluente tratado se devuelve a

la atmósfera y se recoge en un tanque cerrado para ser tratado por separado si fuese necesario. La Figura 3.2.7 muestra el diagrama de flujo de este proceso.



**Figura 3.2.7 Diagrama de flujo del Proceso VERTREAT (Noram Bio Systems Inc.)**

### Aplicabilidad

El proceso es aplicable al tratamiento de aguas residuales industriales biodegradables y aguas residuales domésticas. Ofrece ventajas especiales en las aplicaciones con las siguientes condiciones:

- Sitios con limitaciones de espacio
- Aguas residuales con alto contenido de COV
- Modernizaciones y expansiones de plantas
- Aguas residuales muy concentradas
- Sitios con altas precipitaciones o temperaturas extremas
- Sitios cercanos a las zonas residenciales
- Aplicaciones con cargas variables
- Sitios en zonas de elevada actividad sísmica
- Flujos de aguas residuales propensas a la formación de espuma.
- Zonas donde la napa freática se encuentra a más de 100 metros de profundidad

### Eficiencia del Tratamiento

Los proveedores de este sistema aseguran un efluente con la siguiente calidad:

**Tabla 3.2.14 Calidad del efluente de sistema de lodos activados en pozo profundo**

Parámetro	Eficiencia
DBO	<5mg/l
SST	<5mg/l
Nitrógeno Total	<3ppm
Fósforo Total	<1ppm

(Green Earth Systems Inc.)

#### Ventajas

- El sistema usa entre el 10% y 30% del espacio que utiliza un sistema de lodos activados convencional
- El impacto visual es mínimo ya que el proceso ocurre bajo tierra
- Bajas emisiones de olores dado a la ausencia de estanques exteriores
- Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles son mínimas en comparación con los procesos convencionales de aireación, que pueden descargar hasta el 60% de los compuestos orgánicos volátiles contenidos en afluente a la atmósfera.
- Alta eficiencia en transferencia de oxígeno, lo cual reduce los requerimientos de energía por aireación
- No requiere tratamiento primario

#### Desventajas

- Pobre sedimentación de sólidos
- El proceso tiene potencial corrosivo en el revestimiento de acero del pozo
- Difícil mantención, operación y limpieza debido a la gran profundidad del pozo

### **3.2.3.2 Película Fija Integrada en Lodos Activados (IFAS)**

El sistema IFAS (Integrated fixed-Film Activated Sludge) consiste en la adición de algún medio de película fija (biofilm) en el reactor biológico de cultivo suspendido del proceso de lodos activados, con el fin de aumentar la biomasa disponible para el tratamiento.

El tipo de medio varía según los diferentes sistemas IFAS, puede ser cualquiera que ofrezca un área superficial efectiva para el crecimiento de biofilm. Los medios más comunes son cuerdas, esponjas y plásticos.

Existen dos tipos principales de sistemas IFAS: IFAS de medio móvil sumergido e IFAS de medio fijo sumergido. Los procesos están patentados y son los siguientes:



IFAS – Medio Móvil Sumergido	AGAR <sup>®</sup>
	Captor <sup>®</sup>
	LINPOR <sup>®</sup>
IFAS – Medio Fijo Sumergido	CLEARTEC <sup>®</sup>
	AccuWeb <sup>®</sup>
	BioMatrix <sup>™</sup>
	HYBAS <sup>™</sup>
	BioWeb <sup>™</sup>
	RINGLACE <sup>®</sup>

(EPA-US, Emerging Technologies for Wastewater Treatment and In-Plant Wet Weather Management, 2008)

Por ejemplo, el proceso Captor<sup>®</sup> utiliza pequeñas esponjas de poliuretano (1”x1”x0,5” de dimensión) como medio para retener grandes cantidades de biomasa en el reactor. Los SSLM en el estanque de aireación pueden ser mantenidos entre 6000 mg/l y 12000 mg/l según se requiera. De esta manera, el tiempo de retención hidráulico se puede reducir a un tercio de lo que comúnmente se usa en el proceso convencional (Golla, Reddy, Simms, & Laken, 1994).

RINGLACE<sup>®</sup> es un sistema del tipo IFAS que usa cuerdas como medio para el biofilm y ha sido usado en más de 100 plantas de tratamiento en Japón. El proceso no usa recirculación de lodos en el estanque de aireación y fue considerado aplicable a pequeñas comunidades ya que es capaz de tratar grandes cargas, producir baja cantidad de lodos (50% menos lodos que en un lodo activado convencional) y presenta costos de construcción y operación relativamente bajos. Además, puede mantener la nitrificación a bajas temperaturas (Water Environment Research Foundation, 2000).

### Aplicabilidad

Los sistemas IFAS pueden adaptarse a los actuales sistemas de lodos activados, lo que permite una expansión significativa sin necesidad de agregar tanques de aireación adicionales. En plantas nuevas diseñadas con este sistema se obtendrá un volumen menor del tanque de aireación.

### Eficiencia del Tratamiento

La eficiencia de remoción de los principales parámetros de interés se muestra en la Tabla 3.2.15.

**Tabla 3.2.15 Eficiencia de remoción del tratamiento IFAS**

Parámetro	Eficiencia
DBO	93-98%
SST	80-90%
Nitrógeno Total	28-50%

(Germain, Bancroft, Dawson, Hinrichs, Fricker, & Pearce, 2007)

### Ventajas

- Se obtiene una mayor capacidad de tratamiento sin necesidad de aumentar el volumen del estanque de aireación, lo que disminuye los requerimientos de superficie
- La operación es similar a la de lodos activados comunes
- Produce menos cantidad de lodos

### Desventajas

- La nitrificación puede ser afectada por cambios bruscos de temperatura
- Cada cierto tiempo se produce desprendimiento de la biopelícula, lo cual afecta el rendimiento del proceso, hasta que se produzca la recolonización microbiana.

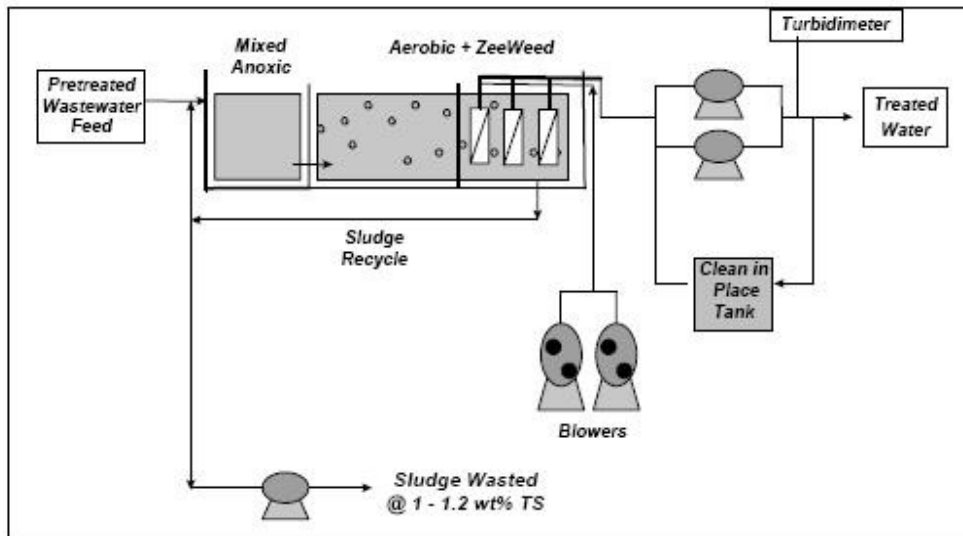
### **3.2.3.3 Biorreactor de Membrana (MBR)**

El sistema biorreactor de membranas (MBR) consiste en un reactor biológico, en el cual se degrada la materia orgánica, seguido de membranas que separan los sólidos mediante filtración. Estas membranas reemplazan el uso de sedimentadores secundarios, comúnmente usados en procesos convencionales.

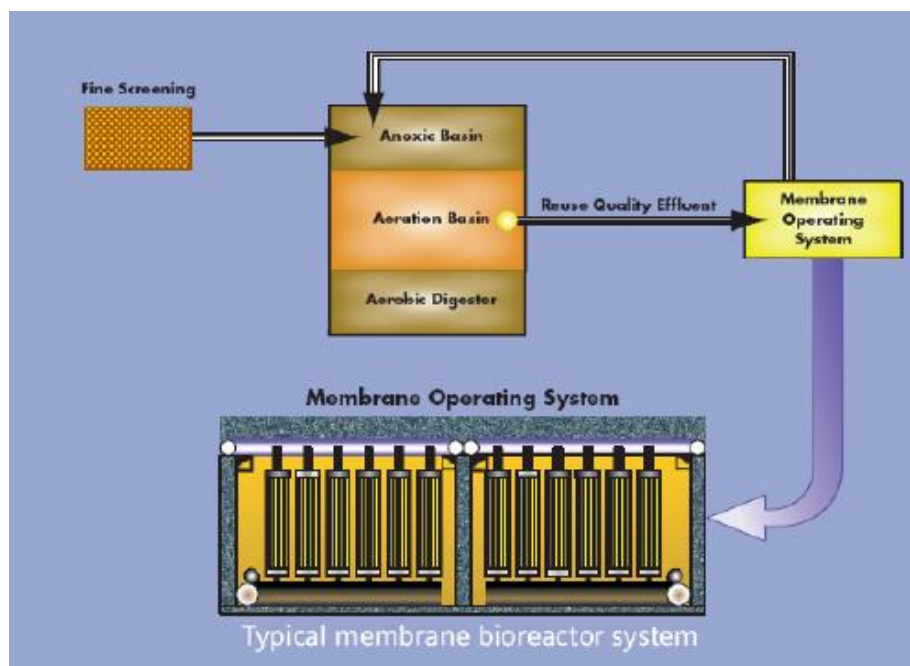
El uso de membranas en vez de clarificadores tiene como consecuencia un lodo activado con mayor concentración de biomasa (mayores SSLM), lo que permite el uso de biorreactores más pequeños.

Las membranas utilizadas en este tipo de proceso son unidades modulares que pueden ser de distintos tipos dependiendo de la aplicación deseada: de fibra hueca, tubulares, en espiral, planas y cilíndricas.

La etapa de filtración puede ser realizada en forma externa en un compartimiento separado o internamente, en donde las membranas se sumergen en el reactor. En la Figura 3.2.8 y Figura 3.2.9 se muestran ambas configuraciones (EPA-US, Emerging Technologies for Wastewater Treatment and In-Plant Wet Weather Management, 2008).



**Figura 3.2.8 Sistema MBR con membranas sumergidas (EPA-US, Wastewater Management Fact Sheet: Membrane Bioreactors, 2007)**



**Figura 3.2.9 Sistema MBR con membranas externas (EPA-US, Wastewater Management Fact Sheet: Membrane Bioreactors, 2007)**

### Aplicabilidad

La alta calidad de los efluentes producidos por el sistema MBR es interesante en zonas en donde se reutilizan las aguas tratadas o donde éstas son descargadas en superficies que requieren alta remoción de nutrientes y bacterias.

### Eficiencia del tratamiento

En la Tabla 3.2.16 se resumen los resultados de remoción de los parámetros más importantes:

**Tabla 3.2.16 Eficiencia de Remoción del sistema MBR**

Parámetro	Eficiencia
DBO	95-99%
SST	95-98%
Nitrógeno Total	94-99%
Fósforo Total	95-98%
Coliformes Fecales	90-99%

(EPA-US, Wastewater Management Fact Sheet: Membrane Bioreactors, 2007)

### Ventajas

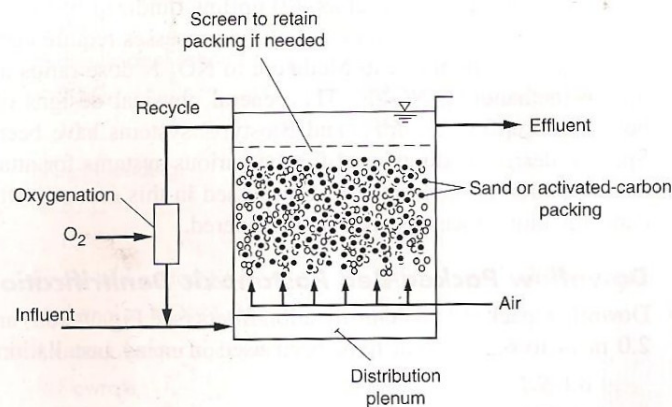
- Excelente calidad del efluente
- El sistemas además de remover materia orgánica y sólidos suspendidos, remueve nutrientes y bacterias
- El espacio requerido es menor que en un tratamiento con lodos activados convencional
- Facilidad de automatización

### Desventajas

- Las membranas tienen un alto costo de inversión y de mantención
- Altos requerimientos de energía

### **3.2.3.4 Biorreactor de Lecho Fluidificado**

En el biorreactor aerobio de lecho fluidificado, el agua residual a tratar circula ascensionalmente a través de un lecho de material granular fino (diámetro entre 0,4-0,5mm) de arena o carbón activado, a una velocidad lo suficientemente elevada como para suspender o fluidificar el medio. La fluidificación aumenta considerablemente la superficie específica del medio y permite altas concentraciones de biomasa en el reactor.



**Figura 3.2.10 Biorreactor de Lecho Fluidificado (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)**

La recirculación del efluente es necesaria para proveer la velocidad del fluido y el tiempo necesario de retención. Este tiempo varía en un rango de 5 a 20 minutos. (Metcalf & Eddy, Inc., 2003).

#### Aplicabilidad

Los biorreactores aerobios de lecho fluidificado son frecuentemente utilizados para tratar aguas subterráneas contaminadas con sustancias peligrosas. Para esta aplicación, se usa carbón activado como material del lecho, para promover el proceso de adsorción además de la degradación biológica.

#### Ventajas

- El reactor requiere un espacio relativamente pequeño y es relativamente sencillo de operar.
- El tiempo de retención de microorganismos es suficiente para degradar xenobióticos y compuestos tóxicos
- Tóxicos no biodegradables pueden ser removidos gracias a la capacidad de adsorción del carbón activado
- Se obtiene un efluente de buena calidad con bajas concentraciones de sólidos suspendidos y DBO.

### **3.2.3.5 Procesos Anaeróbicos**

La digestión anaerobia es el proceso fermentativo que ocurre en el tratamiento de las aguas residuales en ausencia de oxígeno disuelto. El proceso se caracteriza por la

conversión de la materia orgánica a metano y CO<sub>2</sub>, en ausencia de oxígeno y con la interacción de diferentes poblaciones bacterianas (Rodríguez, 2003).

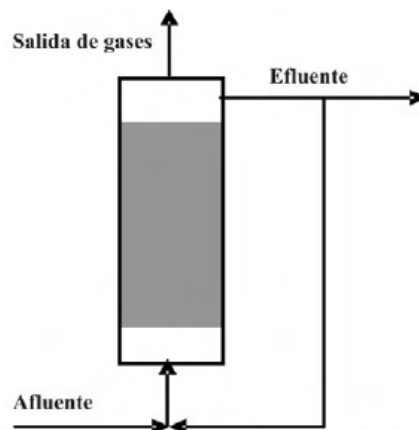
El proceso anaerobio no permite conseguir la calidad de efluente que se puede alcanzar en una planta de lodos activos y otros sistemas aerobios, pero sí permite eliminar gran parte de los sólidos suspendidos y de la DQO y/o DBO<sub>5</sub>, incluso en una sola etapa, que sustituiría al decantador primario, al digestor de lodos activos (aerobio) y al digestor anaerobio de estabilización de lodos (Schellinkhout, 1993; Lettinga *et al*, 1993).

Hoy en día son muchos y variados los procesos de digestión anaerobia que se utilizan, y son diversos los factores que inciden en que se emplee una u otra variante. En términos generales, se registran tres generaciones de reactores anaerobios, las cuales se caracterizan porque en cada generación se reduce el tiempo de retención hidráulico (TRH) y mejora el contacto entre el lodo y el sustrato, lo cual significa menores volúmenes de reactor, costos más bajos, sistemas más estables y de más fácil operación. Los de primera generación se usan para estabilizar lodos, se describe más adelante.

- **Reactores de segunda generación**

Se caracterizan porque los microorganismos son retenidos en el reactor por la presencia de un soporte al que se adhieren o bien por su sedimentación.

Filtro anaerobio: Este dispositivo consiste en un reactor empacado con material inerte en el que los microorganismos crecen sobre la empaquetadura. Los filtros pueden operarse a flujo ascendente o descendente.

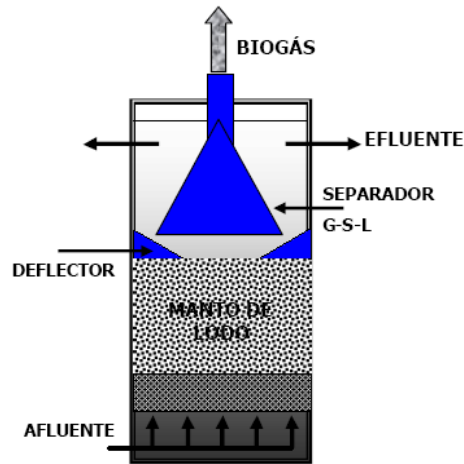


**Figura 3.2.11 Filtro anaerobio (Menendez & Pérez, 2007)**

Estos reactores son estratificados como consecuencia del poco mezclado que existe en su interior. Por lo tanto, se aprecia una tendencia de los microorganismos a distribuirse de acuerdo a sus requerimientos y las características del sustrato.

Reactores de manto de lodo de flujo ascendente (UASB): Su característica principal está dada por la capacidad que poseen de retener biomasa sin necesidad de un soporte, como

consecuencia de la formación de granos o pellets. El agua residual se alimenta por el fondo, se distribuye uniformemente por toda el área y asciende a través del manto biológicamente activo en el que experimenta las transformaciones típicas de la descomposición anaerobia. El CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> formados ascienden a lo largo del reactor y son extraídos por el domo superior.

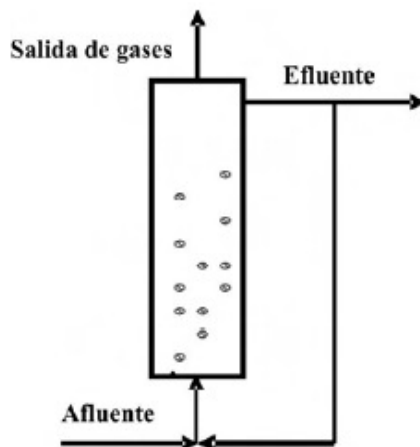


**Figura 3.2.12 UASB (Rodríguez)**

Su principio de funcionamiento se basa en la capacidad de sedimentación de la biomasa producida en el reactor. Esta se aglomera en forma de granos de 1 a 3 mm de diámetro y presenta elevada actividad metanogénica. El lavado o escape de los flóculos más pequeños de la zona del manto, generalmente se minimiza creando dentro del propio reactor una zona tranquila que posibilita que estas partículas vuelvan a sedimentar.

- **Reactores de tercera generación**

Estos reactores contienen microorganismos en forma de biopelícula adherida a un soporte que se expande o fluidiza. Utilizan una corriente de recirculación para provocar un flujo ascendente y mantener fluidizado el lecho de partículas de soporte. Estas partículas pueden ser arena, material plástico o cerámico. El material de soporte brinda una gran área superficial sobre la que se adhiere la biopelícula y mantiene una buena sedimentabilidad, garantizando la retención celular.



**Figura 3.2.13 Reactor de lecho fluidizado (Menendez & Pérez, 2007)**

Los reactores anaerobios de lecho fluidificado son frecuentemente utilizados para tratar aguas residuales domesticas, y su rendimiento depende de la temperatura.

**Tabla 3.2.17 Rendimiento de reactor anaerobio de lecho fluidificado**

Temperatura °C	Carga Orgánica kgDQO/m <sup>3</sup> ·d	Remoción de DQO %
20	4,4	89
15	4,0	80
10	0,4	71
5	0,3	35

(Metcalf & Eddy, Inc., 2003)

### Aplicabilidad

La principal aplicación de los tratamientos anaeróbicos se halla en la estabilización de lodos con alto contenido de materia orgánica, así como en el tratamiento de aguas residuales de alta carga. Sin embargo, a través de los años se han desarrollado nuevas tecnologías basadas en el propio metabolismo anaerobio que facilitan el tratamiento ya no sólo de los lodos, sino que pueden ser tratados exitosamente aguas residuales orgánicas diluidas (Menendez & Pérez, 2007).



## Eficiencia del tratamiento

**Tabla 3.2.18 Rendimientos típicos de procesos anaerobios en aguas residuales domesticas a 20°C**

Proceso	Remoción DQO
	%
De contacto	75-90
UASB	75-85
Lecho Fijo	75-85
Lecho fluidizado	80-85

(Metcalf & Eddy, Inc., 2003)

### Ventajas

- No requiere consumo de oxígeno, ahorrando la energía de aireación.
- Se generan cantidades de lodo muy inferiores a las producidas en el proceso aerobio, y en un mayor grado de mineralización, concentración y fácil deshumidificación.
- Existe la posibilidad de trabajar a TRH inferiores, o lo que es igual, se necesitan menores volúmenes de instalación, abaratando las inversiones.
- Se puede recuperar cierta cantidad de energía en forma de biogás.
- Rápida respuesta a agregación de sustrato después de largos periodos sin alimentarse

### Desventajas

- El crecimiento de las bacterias metanogénicas es lento en comparación con la mayoría de los otros microorganismos. A 35°C algunas especies requieren cuatro días para duplicar su número, mientras que otras necesitan diez días o más.
- El proceso requiere temperaturas altas para su funcionamiento, para nivel mesófilo entre 20-45°C y para nivel termófilo entre 45-60°C, por lo que en climas fríos y templados se requerirá calefaccionar el sistema para mantener la temperatura dentro de los valores del intervalo indicado. Una disminución de la temperatura implica un mayor tiempo de regeneración de las bacterias.
- Proceso puede requerir alcalinidad y/o agregación de iones específicos
- Se producen malos olores y gases corrosivos debido a la generación de compuestos azufrados como el H<sub>2</sub>S en el biogás.
- Con los sistemas anaerobios, no es posible la remoción biológica de nitrógeno y fósforo (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)

### **3.2.4 Sistemas Biológicos para Remoción de Nutrientes**

Para tratar aguas residuales con alto contenido de fósforo y nitrógeno (nutrientes más comunes en aguas de desecho), los sistemas biológicos comunes no son suficientes,

por lo que se deben usar sistemas que estén diseñados específicamente para la remoción de nutrientes.

El funcionamiento de estos sistemas se basa en la combinación de reactores aeróbicos, anaeróbicos y/o anóxicos para promover la nitrificación, desnitrificación y/o remoción de fósforo, con lo cual se obtiene un efluente con bajo nivel de nutrientes.

### 3.2.4.1 Remoción Biológica de Fósforo

El proceso de Remoción Biológica de Fósforo (RBF) es un sistema que se caracteriza por la introducción de una fase anaerobia y una subsecuente fase aerobia para promover la remoción de fósforo del agua. El proceso basa su funcionamiento en la actividad metabólica de un grupo de microorganismos llamados poly-P (estrictos aerobios), los cuales son capaces de capturar y almacenar fósforo en forma de polifosfatos bajo condiciones aerobias y posteriormente liberarlos bajo condiciones anaerobias.

Muchas modificaciones a este sistema han sido usadas para la remoción de nitrógeno y fósforo conjuntos. Algunas consisten en diferentes diseños que intentan minimizar la cantidad de nitrato suministrado a la zona anaerobia, otras involucran pequeños tiempos de retención de sólidos, y otras usan múltiples etapas de zonas anaerobias, anóxicas y aerobias. Los principales procesos son (Metcalf & Eddy, Inc., 2003):

Phoredox (A/O): no hay nitrificación y el tiempo de retención anaerobio es de 30min a 1hr. El tiempo de retención de sólidos para la zona aerobia es de 2 a 4 días, dependiendo de la temperatura.

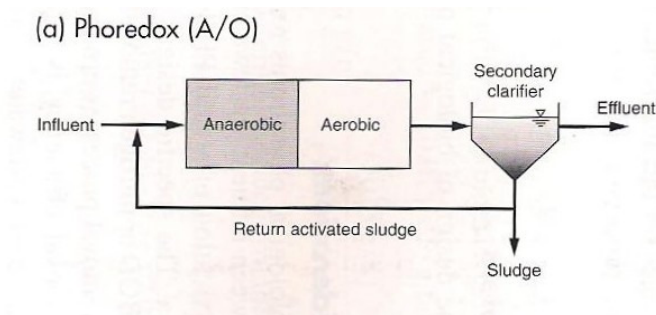
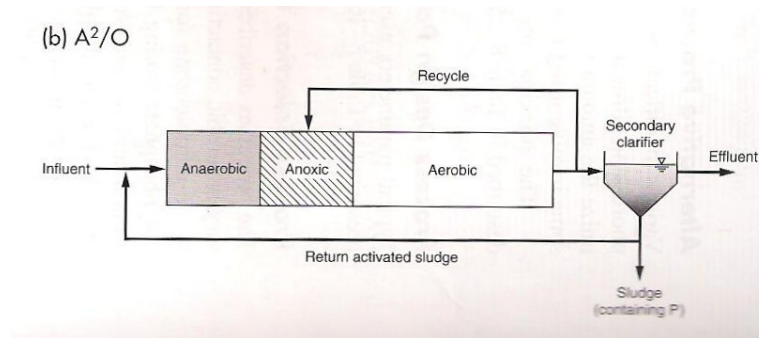


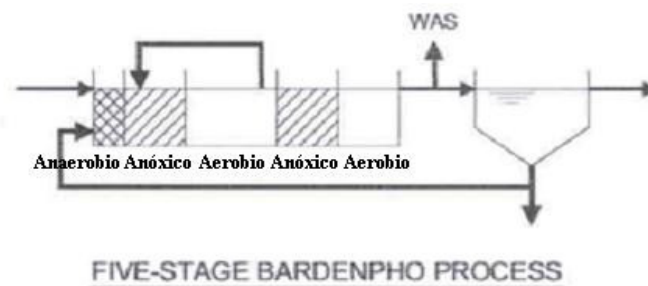
Figura 3.2.14 Phoredox (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)

A2/O: es una modificación del proceso Phoredox, al cual le agrega una zona anóxica entre la anaerobia y aerobia para la desnitrificación.



**Figura 3.2.15 A<sup>2</sup>/O (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)**

Bardenpho de 5 etapas: este proceso remueve nitrógeno, fósforo y materia orgánica a medida que el agua pasa por las diferentes zonas.



**Figura 3.2.16 Proceso Bardenpho de 5 etapas**

UCT (University of Cape Town): este proceso fue desarrollado para minimizar el efecto del nitrato en aguas residuales débiles al entrar en la zona anaerobia, el cual reduce la eficiencia de remoción de fósforo en esta etapa.

(d) UCT (standard and modified)

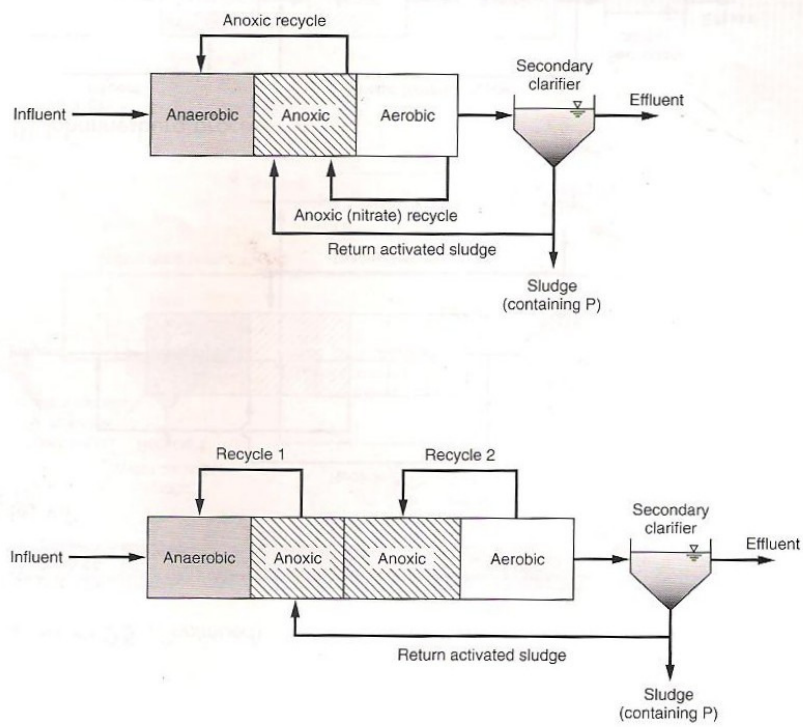


Figura 3.2.17 UCT (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)

VIP (Virginia Initiative Plant): este proceso es similar al sistema A2/O y al sistema UCT, pero los métodos de recirculación son diferentes.

(e) VIP

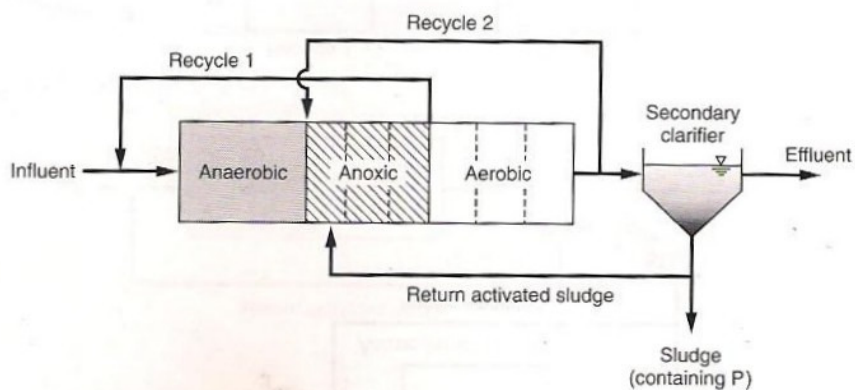
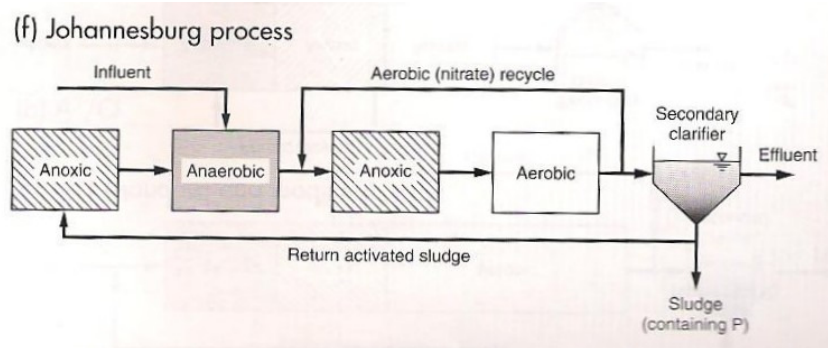


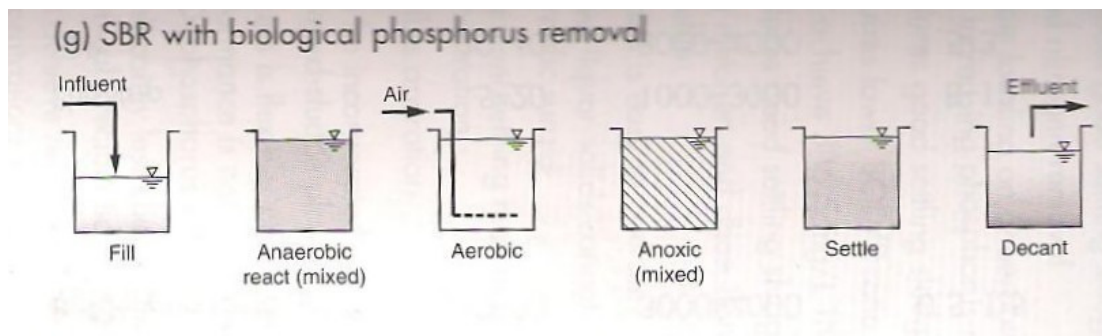
Figura 3.2.18 VIP (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)

Proceso Johannesburg: este proceso es otra alternativa que intenta minimizar el efecto del nitrato en aguas residuales débiles al entrar en la zona anaerobia.



**Figura 3.2.19 Proceso Johannesburg (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)**

SBR con remoción biológica de fósforo: se alternan las etapas anaerobias, aerobias y anóxicas en un reactor discontinuo secuencial para remover fósforo biológicamente.



**Figura 3.2.20 SBR con remoción biológica de fósforo (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)**

### 3.2.4.2 Remoción Biológica de Nitrógeno

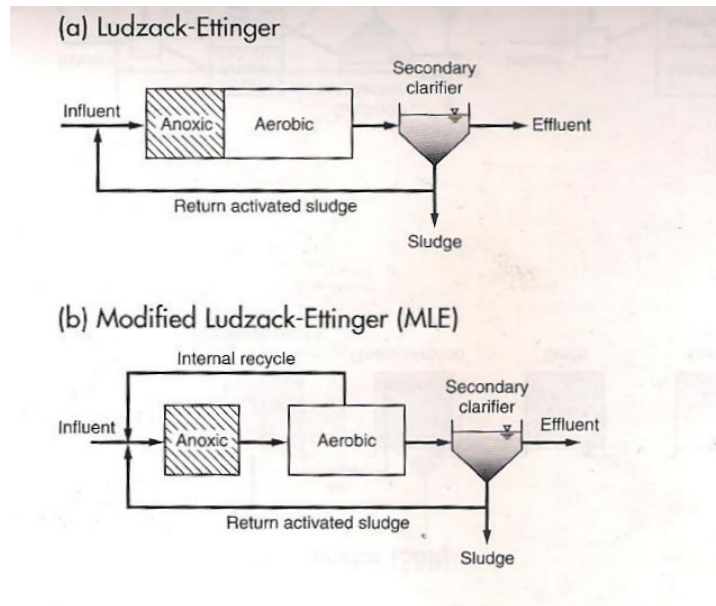
Todos los procesos de remoción biológica de nitrógeno incluyen una zona aerobia en donde se lleva a cabo la nitrificación. La nitrificación es el término usado para describir el proceso biológico de dos pasos en donde el amonio ( $\text{NH}_4$ ) es oxidado a nitrito ( $\text{NO}_2$ ) y el nitrito es oxidado a nitrato ( $\text{NO}_3$ ), por bacterias aerobias autótrofas.

Para completar el objetivo de remoción de nitrógeno total, se debe agregar una zona anóxica en donde se dan las condiciones para que ocurra el proceso de desnitrificación, en donde el nitrato es reducido a óxido nítrico, óxido nitroso y nitrógeno gas.

Hay múltiples procesos de remoción biológica de nitrógeno, los que difieren básicamente en la posición en donde se encuentra la zona anóxica: antes, después o entre la zona de nitrificación aerobia.

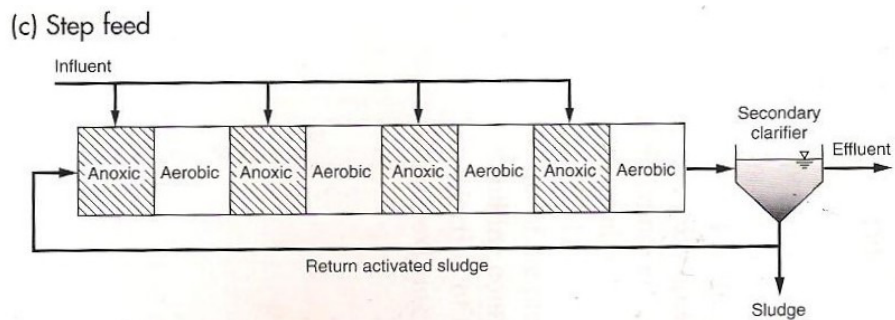
Pre-anóxicos: el contacto inicial de las aguas residuales y el lodo activado recirculado es en la zona anóxica. Ejemplos:

- Ludzac-Ettinger, standard y modificado



**Figura 3.2.21 Proceso Ludzack-Ettinger (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)**

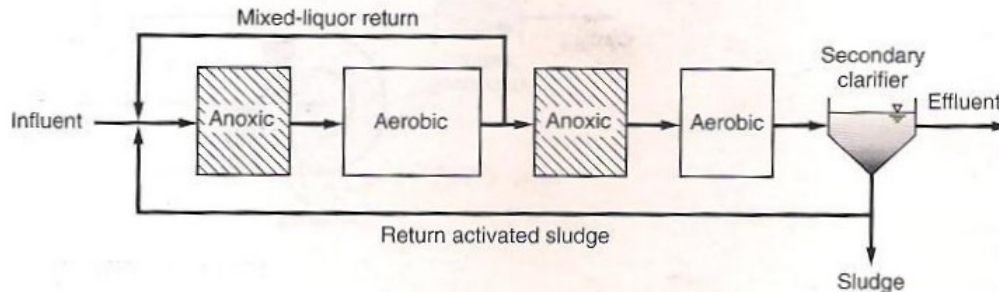
- Alimentación escalonada



**Figura 3.2.22 Proceso de alimentación escalonada (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)**

- Bardenpho de 4 etapas

(h) Bardenpho (4-stage)

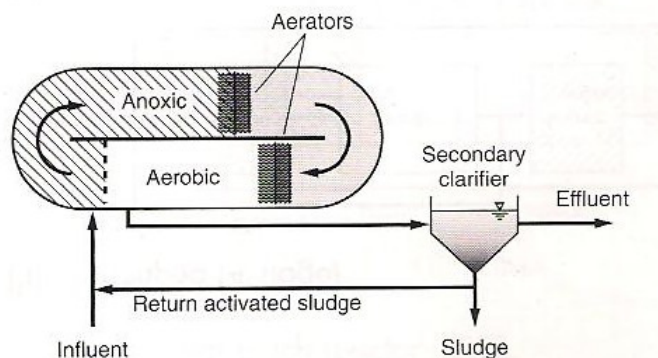


**Figura 3.2.23 Proceso Bardenpho de 4 etapas (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)**

Post-anóxicos: la zona anóxica es posterior a la zona aerobia. Ejemplos:

- Zanja de oxidación

(i) Oxidation ditch

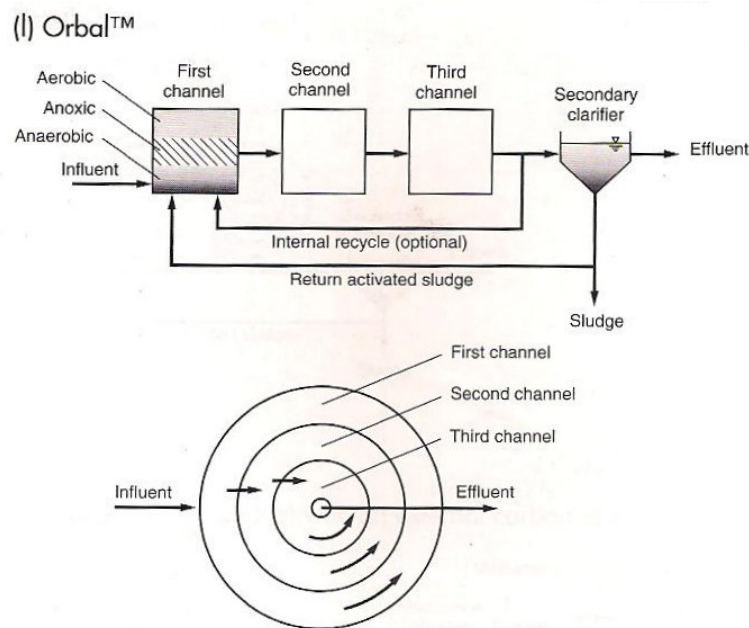


**Figura 3.2.24 Remoción de nitrógeno con zanjas de oxidación (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)**

Nitrificación/desnitrificación simultánea: procesos en donde la nitrificación y la desnitrificación se dan simultáneamente en el mismo tanque. Ejemplo:



- Sistema Orbal



**Figura 3.2.25 Sistema Orbal (Metcalf & Eddy, Inc., 2003)**

La eliminación biológica de nitrógeno se utiliza en el tratamiento de aguas residuales cuando la descarga del efluente es en cuerpos de agua con riesgo de eutroficación y en aguas subterráneas que deben estar protegidos contra las concentraciones elevadas de  $\text{NO}_3$ . También es utilizado en otras aplicaciones de regeneración de aguas.

### 3.2.5 Otros Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales

#### 3.2.5.1 Tratamiento Primario Químicamente Asistido (CEPT)

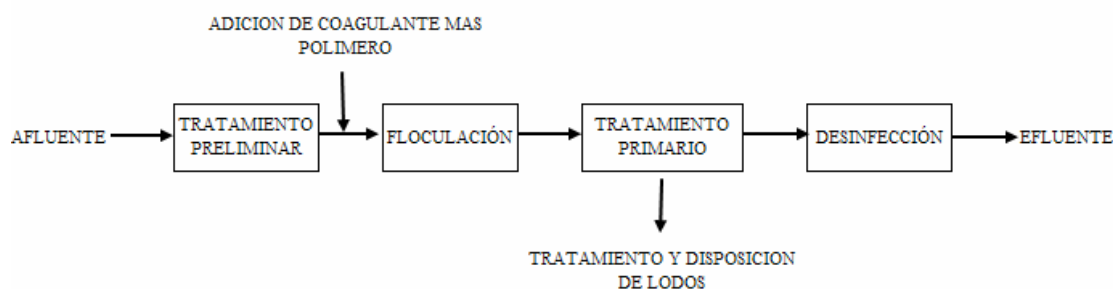
El tratamiento físico químico de aguas servidas o tratamiento primario avanzado, conocido como CEPT por sus siglas en inglés (Chemical Enhanced Primary Treatment), es un sistema que busca aumentar la tasa de sedimentación gravitacional y la eficiencia de remoción de contaminantes en el tratamiento primario de aguas servidas, mediante la adición de pequeñas dosis de sales metálicas que actúan como coagulante (Carrasco, 2007).

El sistema consiste en una primera fase de tratamiento preliminar que puede estar compuesto de rejas, desarenadores y/o desgrasadores en donde se eliminan los elementos de mayor tamaño. Luego, se agrega coagulante y polímero en mezcla rápida y se procede al proceso de floculación. Posteriormente, el agua pasa a un sedimentador primario, en donde los sólidos decantan generando lodo primario y el efluente clarificado sigue al proceso de



desinfección. Los lodos generados deben ser sometidos a tratamiento para su disposición final.

En la Figura 3.2.26 se muestra un esquema con los procesos y secuencias involucrados en el tratamiento físico químico.



**Figura 3.2.26 Diagrama de Flujos sistema CEPT**

### Aplicabilidad

La aplicación del tratamiento físico químico en aguas servidas domésticas permite cumplir con la normativa de descarga vigente en Chile, dada por el DS 90/2000, siempre y cuando la descarga se realice en un cuerpo de agua fluvial con capacidad de dilución.

El tratamiento físico químico puede ser una buena alternativa de implementación en localidades con población flotante, debido a su flexibilidad operacional. Su aplicación en este tipo de localidades se puede realizar siempre y cuando la capacidad de las unidades e instalaciones lo permitan.

### Eficiencia del Tratamiento

La eficiencia del proceso se muestra en la Tabla 3.2.19

**Tabla 3.2.19 Eficiencia de remoción del sistema CEPT**

Parámetro	Eficiencia
DBO	50-60%
SST	70-90%
NKT	25-35%
Fósforo Total	>80%

(Carrasco, 2007)

### Ventajas

- En comparación con los procesos biológicos, este proceso es más fácil de operar
- Permite operar a mayores tasas superficiales, por lo tanto permite operar con sedimentadores más pequeños.

- CEPT permite reducir el tamaño de las unidades siguientes o de incrementar la capacidad de las plantas convencionales existentes.
- CEPT es el esquema de tratamiento más económico en el cual el efluente puede ser adecuadamente desinfectado.
- Rápida recuperación después de un problema operacional (~2 hrs).
- Se produce una buena remoción de helmintos; puede ser desinfectado con mayor efectividad.

#### Desventajas

- Alta producción de lodos
- Los lodos tienen un alto contenido de agua lo que puede hacer que el proceso de deshidratación y secado del lodo sea más complejo.
- Menor eficiencia de remoción de DBO y SST que tratamientos biológicos
- La adición de coagulante en exceso puede disminuir la efectividad del tratamiento.
- Nitrógenos son levemente removidos o alterados durante el proceso.
- Existe un incremento en la producción de lodos y co-precipitación de otros componentes en el agua. En el caso de utilizar cal, el incremento en los lodos producidos puede ser hasta en un 50%.
- Este proceso puede implicar trabajar con productos químicos corrosivos aumentando los riesgos de seguridad para el operador.

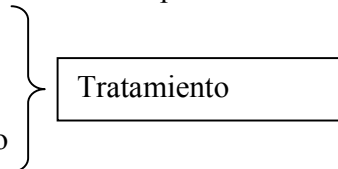
### **3.2.5.2 Emisarios Submarinos**

Los emisarios submarinos son un sistema de disposición final de las aguas residuales en el mar, mediante tuberías (de hierro fundido, acero, hormigón o polietileno) ancladas al lecho marino. Este sistema aprovecha la capacidad hidrodinámica del medio marino de diluir y dispersar las sustancias orgánicas de las aguas servidas domésticas.

Previo a la descarga, el agua residual debe someterse a tratamiento preliminar y/o primario con el fin de proteger efectivamente las unidades mecanizadas de elevación y transporte, así como favorecer los fenómenos de estabilización utilizados posteriormente por el sistema. Además, el material orgánico grueso suspendido debe ser acondicionado para optimizar su posterior degradación, a través de la disminución de tamaño.

De esta forma, previo al emisario el diseño debe contemplar:

- Cribas o rejas (fijas o mecanizadas).
- Unidades desarenadoras.
- Desgrasador.
- Triturador del material orgánico suspendido



### Aplicabilidad

La instalación de emisarios submarinos, además de cumplir con la Norma de Emisión (D.S. N°90/2000), debe hacerse en el lugar y forma que determine la DIRECTEMAR, conforme a lo indicado en los artículos 139° y 140° del Reglamento para el Control de la Contaminación Acuática (D.S.(M) N°1/92).

### Eficiencia de Remoción

Se pueden alcanzar diluciones inmediatas iniciales del orden de 100 a 1 en forma consistente durante los primeros minutos de descarga al mar, reduciendo la concentración de materia orgánica y nutrientes a niveles que no tendrían efectos ambientales adversos en el mar abierto (Salas, 2000).

### Ventajas

- Un emisario submarino bien diseñado cumple con todos los requisitos de un eficaz y verdadero tratamiento.
- La operación de un emisario submarino es mas sencilla que cualquier otra alternativa
- Al no generar lodos, se disminuyen los costos de operación
- Los emisarios submarinos pueden ser diseñados para manejar adecuadamente variaciones estacionales de caudal de aguas residuales, debidas por ejemplo a población estacional típica de áreas turísticas.

### Desventajas

- Para pequeñas poblaciones, el costo de inversión de un emisario submarino puede ser mucho mas elevado que otras alternativas
- La descarga con emisarios submarinos no debe realizarse en zonas donde existen criaderos de mariscos

## **3.2.6 Desinfección**

La normativa de efluentes vigente exige que los coliformes fecales en el agua no superen los 1000 NMP/100ml, con el fin de disminuir el riesgo de exposición pública a enfermedades infecciosas. En general, las aguas servidas domésticas contienen entre  $10^6$  y  $10^7$  NMP/100ml de coliformes fecales y los tratamientos convencionales sólo los disminuyen en uno o dos órdenes de magnitud. Por este motivo es necesario complementar el tratamiento con un proceso de desinfección, que permita una reducción significativa de los microorganismos patógenos presentes en las aguas servidas y que sea efectivo frente a una amplia gama de bacterias y virus, en variadas condiciones de calidad del agua.

Existen varios métodos utilizados para la desinfección de aguas, siendo los más aplicados para el caso de efluentes tratados la desinfección mediante aplicación de cloro y la radiación ultravioleta (UV).

### **3.2.6.1 Desinfección con Cloro**

El cloro es el desinfectante más ampliamente utilizado debido a su efectividad en bajas concentraciones, bajos costos y que permite mantener un residual si se aplica en dosis adecuadas. Además, el cloro permite oxidar materia orgánica y amoníaco que contribuye a la DBO del efluente. Permite controlar olores y condiciones sépticas y permite el control de algas y organismos relacionados.

El cloro puede ser aplicado como cloro-gas ( $\text{Cl}_2$ ) o como hipoclorito (de sodio o calcio).

#### Ventajas

- Tecnología bien establecida
- Confiable y efectivo en su acción sobre un amplio rango de microorganismos.
- Fácil dosificación y control
- Fácil de transportar, almacenar, manejar y aplicar
- Mantiene residual que prolonga el efecto bactericida
- Permite eliminar olores
- Costo razonable

#### Desventajas

- El cloro residual es tóxico a la vida acuática y al excederse puede requerir decloración
- Todas las formas de cloro son altamente corrosivas y tóxicas. Se debe mantener adecuadas condiciones de seguridad.
- El cloro reacciona con cierto tipo de materia orgánica formando trihalometanos (THMs) identificados como precursores de cáncer.
- Se incrementan los niveles de sólidos disueltos y cloruros en el efluente.

### **3.2.6.2 Desinfección con radiación UV**

La luz UV corresponde a la porción de espectro electromagnético con longitud de onda entre 100 y 400 nm; la acción bactericida ocurre fundamentalmente entre 200 y 300 nm. Los microorganismos son inactivados por la luz UV debido a un daño fotoquímico en el ácido nucleico; la alta energía asociada a la radiación UV es absorbida por el ADN y ARN celular, generando enlaces distintos.

### Ventajas

- Desinfectante efectivo para bacterias y virus
- Se requiere un corto período de contacto
- No existe toxicidad residual
- No existe necesidad de manipular productos químicos
- No genera subproductos

### Desventajas

- No existe una medición inmediata para controlar efectividad de la aplicación.
- No existe efecto residual
- Las dosis requeridas para inactivar coliformes pueden no ser efectivas para virus, esporas y quistes.
- Tecnología de costo relativo más elevado

Además existe la desinfección con Ozono y con dióxido de cloro, pero éstas no son tan usadas en nuestro país.

## **3.3 Tratamiento y disposición de Lodos**

El objetivo del tratamiento de lodos es obtener un producto que sea estable y que pueda ser dispuesto con seguridad de que no se generarán daños al medioambiente ni condiciones molestas al entorno. Los procesos comúnmente usados en el tratamiento de lodos son:

Acondicionamiento → Espesamiento → Estabilización → Deshidratado → Secado

Va a depender del tipo de lodo y del lugar de disposición final de este, el nivel de tratamiento necesario a aplicar.

### **3.3.1 Acondicionamiento**

El objetivo del acondicionamiento es preparar al lodo para obtener un buen espesamiento y posterior estabilización. Además, permite mejorar las características de deshidratado de los sólidos en los lodos.

El acondicionamiento puede ser químico (con cloruro férrico, cal y/o polímeros), o térmico.

### 3.3.2 Espesamiento

El objetivo del espesamiento es disminuir parcialmente el contenido líquido de los lodos (2-10%). Los principales procesos de espesamiento son:

- Espesamiento gravitacional: se utiliza para concentrar sólidos de lodos primarios, secundarios y/o combinación de ambos. La concentración se produce por gravitación de sólidos y puede alcanzar hasta un 5%.
- Espesamiento por flotación: se utiliza para concentrar los sólidos en lodos activados y/o químicos. La separación de sólidos se produce mediante burbujas de gas y requiere uso de polímeros. Máxima concentración alcanza entre 4-5%.
- Centrifugación: se utiliza para concentrar los sólidos en lodos activados y/o químicos. Tiene altos requerimientos de energía, altos costos de mantención y requiere uso de polímeros. Alcanza concentraciones entre 4-8%.

### 3.3.3 Estabilización

El objetivo de la estabilización es descomponer la materia orgánica presente en lodos, eliminar olores desagradables y reducir el contenido de patógenos. Los procesos más usados son:

- Digestión Aeróbica: es la oxidación biológica de lodos orgánicos en presencia de oxígeno. El producto final resulta inodoro y con buenas características de deshidratación. Se utiliza principalmente en plantas de tratamiento de pequeñas poblaciones
- Digestión Anaeróbica: es la oxidación biológica de lodos orgánicos en ausencia de oxígeno. La biomasa se encuentra en relativo reposo, con un mínimo contacto con el sustrato, o también en suspensión, pero sin recirculación de sólidos. Por esta razón la relación (edad del lodo/tiempo de retención hidráulico) es igual a 1, como es el caso de los reactores completamente mezclados. Sistema indicado para plantas medianas a grandes. Ejemplos de reactores de digestión anaeróbica son:

Digestores convencionales: Estos digestores trabajan a flujo discontinuo, y debido a que no son agitados, están estratificados. Como se aprecia en la Figura 3.3.1 Digestor ConvencionalFigura 3.3.1, una capa superior de nata relativamente inactiva, una capa intermedia de la que sedimentan los sólidos y una capa inferior de sólidos digeridos.



**Figura 3.3.1 Digestor Convencional (Menendez & Pérez, 2007)**

Son apropiados para el tratamiento de lodos orgánicos y residuales líquidos de alta demanda bioquímica de oxígeno (mayor de 20000 mg/l). Se requiere de altos tiempos de retención.

Reactores completamente mezclados: En este tipo de digestor la carga de sólidos es mayor que en el convencional. El lodo se mezcla íntimamente mediante la recirculación del propio gas que se genera en el proceso o a través del empleo de agitadores mecánicos.

- Estabilización con cal: La estabilización se realiza mediante la adición de cal líquida o seca. Indicada para pequeñas plantas de tratamiento.

### 3.3.4 Deshidratado

El objetivo de este proceso es reducir el volumen y peso de los lodos con el fin de minimizar los requerimientos de almacenamiento, transporte y disposición.

Los procesos que más se usan son:

- Filtro Prensa de Banda: este sistema consiste en dos cintas móviles que sometidas a presión, deshidratan el lodo en forma continua.
- Centrífugas: este sistema deshidrata el lodo utilizando la fuerza centrífuga para acelerar la velocidad de sedimentación de los sólidos.

### 3.3.5 Secado

El secado puede ser térmico, solar o con lechos. Los lechos de secado son los más comunes, consisten en disponer del lodo en capas de 20 a 30 cm sobre un lecho constituido por arena y grava bajo el cual hay una tubería perforada que permite el drenaje. De esta manera, el secado ocurre por gravedad y por evaporación.

## 3.4 Normativa de Efluentes Líquidos

Para la descarga de residuos líquidos en cuerpos de aguas marinas y continentales superficiales de todo el país, el Decreto Supremo DS 90/2001 establece la concentración máxima de contaminantes permitida. Los límites máximos dependen del tipo de cuerpo receptor, y de la capacidad de dilución de éstos.

En la Tabla 3.4.1 se resumen los límites de los parámetros de mayor importancia para la descarga de residuos industriales líquidos a cuerpos de aguas.

**Tabla 3.4.1 Concentraciones Máximas Permitidas para Descarga de SST, DBO5, NKT y Fósforo Total en los Distintos Cuerpos Receptores Definidos en DS 90/2000**

Parámetro	Cuerpo Receptor					
	Unidad	Fluvial	Fluvial con Capacidad de Dilución	Lacustre	Marino dentro de zona de protección litoral	Marino fuera de zona de protección litoral
Coliformes Fecales	NMP/100ml	1000	1000	1000-70*	1000-70*	
DBO5	mg/l	35	300	35	60	
Fósforo	mg/l	10	15	2	5	
Nitrógeno Kjeldahl	mg/l	50	75	10	50	
SST	mg/l	80	300	80	100	300

\*En áreas aptas para la acuicultura y áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos, no se deben sobrepasar los 70 NMP/100 ml. (Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República de Chile, DS N°90, 2001)

Es importante mencionar que esta normativa se encuentra en proceso de revisión y, entre otras cosas, se fijarán concentraciones máximas para la descarga de contaminantes a estuarios.



### 3.5 Normativa de Lodos

Los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas pueden ser depositados en rellenos sanitarios con tratamiento previo, o bien por su alto contenido de materia orgánica y nutrientes pueden ser aplicados en suelos como fertilizantes para mejorar las condiciones de éstos.

El Decreto Supremo D.S. N°4/2009 realiza una clasificación sanitaria de los lodos en donde se consideran lodos estabilizados o con reducción del potencial de atracción de vectores sanitarios, a los lodos que se les ha reducido el contenido de sólidos volátiles en un 38% como mínimo. En este decreto los lodos son clasificados sanitariamente en lodo Clase A, que no tiene restricciones sanitarias para aplicación al suelo, y lodo Clase B que se considera apto para aplicación al suelo con restricciones sanitarias de aplicación según tipo y localización de los suelos o cultivos. Ambos tipos de lodos deben cumplir con el requerimiento de reducción de atracción de vectores.

En la Tabla 3.5.1 se detallan los límites máximos de contenido de patógenos para que un lodo sea clasificado como Clase A o B.

**Tabla 3.5.1: Nivel Máximo de Patógenos en Lodos Clase A y B**

Parámetro	Unidad	Lodo Clase A	Lodo Clase B
Coliformes Fecales	NMP/g ST	1000*	2000000
Salmonella sp.	NMP/4g ST	3*	**
Ova Helmíntica	Org/4g ST	1	**

\* Es necesario cumplir uno de estos 2 requisitos

\*\* No existe limitación para estos patógenos en lodo Clase B

(Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República de Chile, DS N°4, 2009)

En rellenos sanitarios sólo se podrá disponer de Lodos Clase A o Clase B y se requerirá una autorización sanitaria para disponer dichos lodos en conjunto con residuos domiciliarios. Respecto a la aplicación de lodos a suelos, las concentraciones máximas de metales pesados que pueden contener los suelos receptores previo a la aplicación de lodos son las que se presentan en la Tabla 3.5.2 3.3.2, dependiendo de la zona del país en que se encuentre el suelo<sup>1</sup> y de su nivel de pH.

<sup>1</sup> Macrozona norte: Regiones XV de Arica Parinacota, I de Tarapacá, II de Antofagasta, III de Atacama, IV de Coquimbo, V de Valparaíso, VI del Libertador General Bernardo O'Higgins y Región Metropolitana de Santiago. Macrozona sur: Regiones VII del Maule, VIII del Bío Bío, IX de la Araucanía, XIV de los Ríos, X de Los Lagos, XI de Aysén y XII de Magallanes y la Antártica Chilena.

**Tabla 3.5.2 Concentraciones Máximas de Metales en Suelo Receptor**

Metal	Concentración máxima en mg/kg suelo (en base materia seca) <sup>1</sup>		
	Macrozona norte		Macrozona Sur
	pH>6,5	pH≤6,5	pH>5
Arsénico	20	12,5	10
Cadmio	2	1,25	2
Cobre	150	100	75
Mercurio	1,5	1	1
Níquel	112	50	30
Plomo	75	50	50
Selenio	4	3	4
Zinc	175	120	175

<sup>1</sup> Concentraciones expresadas como contenidos totales (Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República de Chile, DS N°4, 2009)

En aquellos suelos que cumplan los requisitos establecidos en la tabla anterior, la tasa máxima de aplicación de lodos al suelo es 90 Ton/ha por año (base materia seca). En aquellos suelos que posean una mayor concentración de metales pesados a las señaladas en la tabla anterior sin haber sido receptores de lodo, se permitirá sólo una aplicación de una tasa máxima de 30 ton/ha.

Además, el decreto indica que sólo se podrán aplicar lodos Clase A y Clase B, provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas que cuentan con un proyecto aprobado por la Autoridad Sanitaria y que cumplan con las concentraciones máximas de metales pesados señaladas en la siguiente tabla:

**Tabla 3.5.3 Concentraciones máximas de metales en lodos para aplicación en suelos**

Metal	Concentración máxima en mg/kg de sólidos totales (base materia seca) <sup>1</sup>	
	Suelos que cumplen los requisitos establecidos en este título	Suelos degradados que cumplen los requisitos establecidos en este título
Arsénico	20	40
Cadmio*	8	40
Cobre	1000	1200
Mercurio*	10	20
Níquel	80	420
Plomo*	300	400
Selenio*	50	100
Zinc	2000	2800

<sup>1</sup> Concentraciones expresadas como contenidos totales

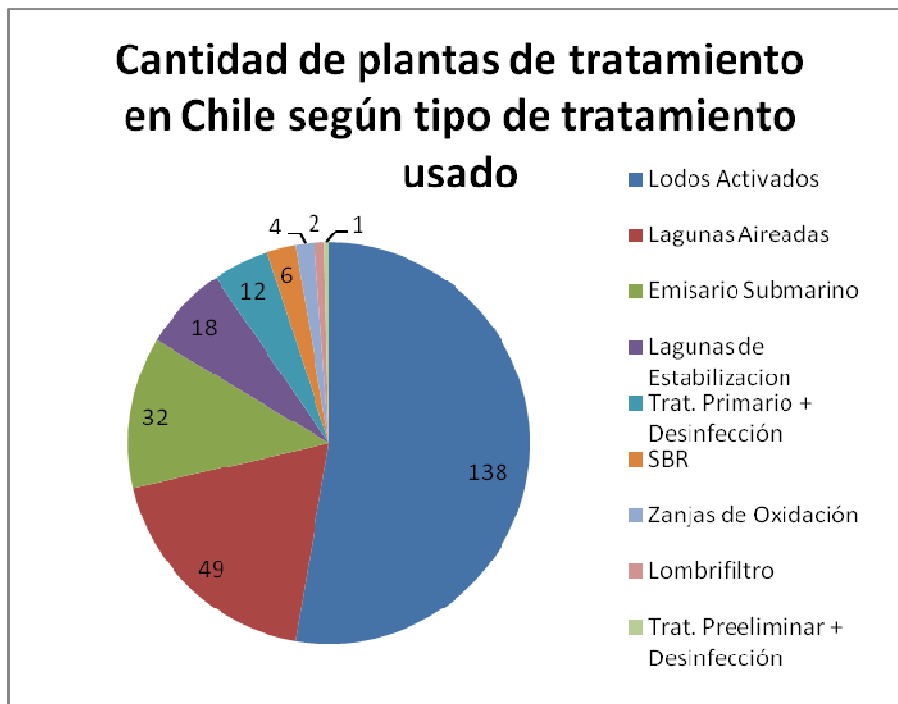
\*Cuando las concentraciones totales de cadmio, mercurio, plomo y selenio superen los valores de 20, 4, 100 y 20 mg/kg respectivamente, se deberá demostrar que estos lodos no son peligrosos de acuerdo a lo establecido en el DS 148/2003 del Ministerio de Salud. (Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República de Chile, DS N°4, 2009)

### 3.6 Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales Utilizados Actualmente en Chile

Las plantas de tratamiento de aguas servidas domésticas actualmente autorizadas en Chile son 262 (Superintendencia de Servicios Sanitarios), donde los procesos mayormente utilizados son: Lodos Activados (59%), Lagunas Aireadas (20%) y Emisarios Submarinos (12%).

El Gráfico 3.6.1 muestra que la distribución de las plantas de tratamiento en Chile según tipo de tecnología usada. De acuerdo a los procesos utilizados, aproximadamente el 83% de las plantas corresponden a procesos biológicos.

Gráfico 3.6.1 Procesos de Tratamiento de Aguas Servidas Usados Actualmente en Chile



Fuente: Elaboración propia.

Las tecnologías de desinfección usadas en Chile corresponden principalmente a cloración, por sus bajos costos y buen rendimiento. La mayoría de las plantas utiliza cloración en base a hipoclorito, en especial en aquellas plantas que atienden a poblaciones menores de 40.000 habitantes. El resto utiliza gas cloro, tecnología que es usada en la mayoría de las PTAS de localidades con más de 40.000 habitantes. De aquellas plantas que utilizan cloración, un bajo porcentaje incluye el proceso de dechloración, es decir, la remoción del cloro residual antes de descargar el efluente final en el medio ambiente, con el objetivo de reducir la toxicidad a los peces.

También, pero en menor medida, se utiliza la radiación ultravioleta (UV), esencialmente en plantas que atienden a una población de menos de 35.000 habitantes y principalmente en plantas de lodos activados y lombrifiltros.

Para el tratamiento de lodos, la digestión aeróbica es la alternativa más usada en Chile, mientras que la digestión anaeróbica, pese a ser menos popular, es utilizada en las plantas de mayor tamaño, debido a los menores costos operacionales y al atractivo energético que significa la generación de metano. El proceso de deshidratación del lodo por lo general se realiza en distintas etapas, siendo las más comunes un espesado gravitacional, seguido por una deshidratación mecánica y eventualmente, un secado posterior en canchas de secado (Baraño & Tapia, 2004).

## CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA SANTA BÁRBARA. APLICACIÓN DEL PROCESO JERÁRQUICO ANALÍTICO

El objetivo de este capítulo es seleccionar las alternativas de tratamiento que sean técnicamente aplicables para la localidad de Santa Bárbara, basándose en las necesidades y características de la zona. Para cumplir este objetivo, se diseñó un modelo de selección que utiliza una metodología de decisión multicriterio conocida como AHP (Analytic Hierarchic Process), la cual se describe en detalle mas adelante.

### 4.1 Factores a Considerar

Debido al aislamiento de la zona, Santa Bárbara requiere un sistema de tratamiento de aguas residuales sencillo, fácil de operar y de baja generación de lodos o necesidad de tratamiento de éstos. También, dadas las condiciones climáticas, los procesos a usar deben ser eficientes en climas fríos y lluviosos.

Con los antecedentes de población descritos en el Capítulo 2, se puede hacer una estimación de los habitantes que tendrá la nueva ciudad en 20 años a partir del 2011, usando un crecimiento vegetativo de 2%, comúnmente usado en proyectos de este tipo. Para determinar el caudal de aguas servidas se utiliza una dotación de agua potable de 150 l/hab/día y un factor de recuperación  $r=1$ , frecuentemente usado en zonas del sur de Chile debido a las altas precipitaciones. La estimación se muestra en la Tabla 4.1.1.

**Tabla 4.1.1 Proyección de Población y Caudal de Aguas Servidas a 20 años para Santa Bárbara**

Año	Población (hab)	Caudal Agua Potable (l/d)	Caudal medio Aguas Servidas (l/s)	Coef Harmon M	Caudal máximo Aguas Servidas (l/s)
2002	346				
2010	373				
2011	2.770*	554.000	4,8	3,4	16,1
2031	3.878	775.600	6,7	3,3	22,1

\*A la población proyectada para ese año en Santa Bárbara, se le agrega la parte de la población de Chaitén que se estima se reinstalará allí (Fuente: Elaboración Propia)

Dado que la población estimada para la futura localidad de Santa Bárbara es menor a 5000 habitantes, se considera que la planta de tratamiento de aguas residuales a diseñar será de tamaño pequeño. Los requerimientos para la construcción de una planta de tratamientos de baja escala se describen a continuación (Iwai, Oshino, & Tsukada, 1990):

- El proceso debe ser simple y con bajas necesidades de energía
- Los costos de construcción deben ser los más bajos posible
- La operación y mantenimiento del sistema deben ser sencillos y de bajo costo
- El proceso debe tener flexibilidad ante cambios bruscos de carga

#### 4.1.1 Alternativas de Descarga de Aguas Servidas

La descarga de aguas servidas en esta zona puede realizarse en el mar o en los ríos cercanos a Santa Bárbara mencionados en el capítulo 2, sección 2.2.1, siempre que se cumpla con los límites establecidos en la normativa vigente de descargas (DS N°90/2001). La información sobre los caudales de estos ríos no pudo ser obtenida ya que no está disponible en la Dirección General de Aguas, por lo tanto para este estudio, por seguridad, se asumirá que éstos no tienen capacidad de dilución.

Se descartan la descarga en lagos, ya que en la zona cercana a Santa Bárbara no hay presencia de este tipo de cuerpo de aguas. La infiltración en suelos tampoco es viable por ser una zona muy lluviosa.

Por lo tanto, teniendo estas dos alternativas de cuerpos receptores de descargas y dado que en la zona no había ni está proyectada la instalación de ninguna gran industria, los contaminantes que son importantes de remover se limitan a materia orgánica disuelta y particulada, y coliformes fecales, descartando entonces los sistemas biológicos con remoción de nutrientes en la selección.

#### 4.2 Preselección de Alternativas

La preselección de alternativas se realizó en base a los requerimientos descritos anteriormente y a los objetivos establecidos para el tratamiento en general, seleccionando los procesos que han demostrado su capacidad para cumplirlos. Con esto, las alternativas escogidas son:

- Lombrifiltro: proceso indicado para poblaciones pequeñas (menores a 5000 hab), de sencilla operación y bajos costos operacionales.
- Filtro Percolador: proceso relativamente sencillo, aplicable a pequeñas localidades y de eficiencia comprobada.
- Biodiscos: sistema de fácil operación, baja producción de lodos y bajos requerimientos de energía.
- Aireación Extendida: se seleccionó esta alternativa por ser un sistema confiable y adecuado para poblaciones pequeñas, con baja producción de lodos estabilizados, además de su usual preferencia, principalmente en regiones del sur del país.
- CEPT: escogido por su fácil operación y economía.
- IFAS: sistema con capacidad de tratamiento para altas y bajas cargas, con baja producción de lodos y buen funcionamiento en climas fríos.

- Emisario Submarino: escogido ya que Santa Barbara se ubica en el borde costero. Además, este sistema es de fácil operación, mantención, y baja necesidad previa de remoción de contaminantes.

### 4.3 Metodología de Selección

La toma de decisiones es el proceso de convertir información en acción. El proceso considera la identificación y formulación de soluciones factibles, su evaluación y selección de las alternativas más adecuadas. Los métodos de apoyo a la toma de decisiones persiguen eliminar las conjeturas improvisadas, el pensamiento no explicado, injustificado e intuitivo que subyace en la mayoría de las decisiones que se toman respecto a problemas complejos.

Un análisis de decisión de múltiples atributos puede ser visto como un procedimiento estructurado y objetivo, que respalda los juicios emitidos por los profesionales que seleccionan las alternativas, tanto como para respaldar los requerimientos del mandante. Al aplicar criterios de evaluación para comparar alternativas conceptuales, usando protocolos establecidos, se pueden obtener las alternativas que mejor se adapten a los objetivos de diseño de un cliente (WEF/ASCE, 1998).

Existen técnicas que ayudan a valorar múltiples criterios. Los siguientes términos pueden ayudar a tomar la decisión según el resultado que se busque:

- Maximizar: Tomar la mejor decisión posible.
- Satisfacer: Elegir la primera opción que sea mínimamente aceptable satisfaciendo de esta forma una meta u objetivo buscado.
- Optimizar: La que genere el mejor equilibrio posible entre distintas metas.

Este estudio utilizará el Proceso Jerárquico Analítico (AHP – Analytic Hierarchy Process) (Saaty, 1997) como herramienta para la selección de la alternativas de tratamientos de aguas residuales. Este método tiene un sólido fundamento científico y se ha empleado porque está basado en el establecimiento de una estructura jerárquica que permite trabajar con mucha información y admite la integración de las opiniones y juicios de diferentes expertos en el tema en cuestión. Incorpora los aspectos cualitativos y cuantitativos del pensamiento humano: los cualitativos para describir el problema y su jerarquía, y los cuantitativos para expresar los juicios y preferencias de manera concisa. Considera la consistencia de los juicios emitidos y además tiene soporte de software para hacer los cálculos y el análisis de sensibilidad<sup>2</sup> (Oddershede, Arias, & Cancino, 2007).

---

<sup>2</sup> El software utilizado es el Expert Choice. Más información puede ser encontrada en [www.expertchoice.com](http://www.expertchoice.com)

### 4.3.1 Proceso Jerárquico Analítico (AHP)

El AHP ha sido utilizado por gerentes y tomadores de decisión en todos los niveles. Permite incluir tanto la intensidad de los sentimientos necesarios para expresar los juicios, como la lógica y la comprensión relacionadas con los temas involucrados en la decisión, combinando los múltiples juicios de forma sistemática para obtener el mejor resultado. Finalmente, y más significativamente, estos resultados se obtienen de una forma natural, en armonía tanto con la intuición como con el conocimiento y no forzada mediante manipulaciones técnicas (Garuti & Escudey).

Este proceso implica descomponer el problema en partes cada vez más finas, de manera de entregar opiniones comparando sólo un par de elementos en cada juicio. Esto evita el mezclar demasiados aspectos del problema y desconocer cómo se relacionan unas cosas con otras para obtener la respuesta final. Sin embargo, se hace necesario estructurar el problema jerárquicamente, con un amplio entendimiento de las personas, sus intereses y los temas involucrados. Una vez definida la estructura, es más sencillo hacer ver a los demás, las influencias que controlan la decisión.

Los tres principios básicos del Proceso Jerárquico Analítico (AHP) son:

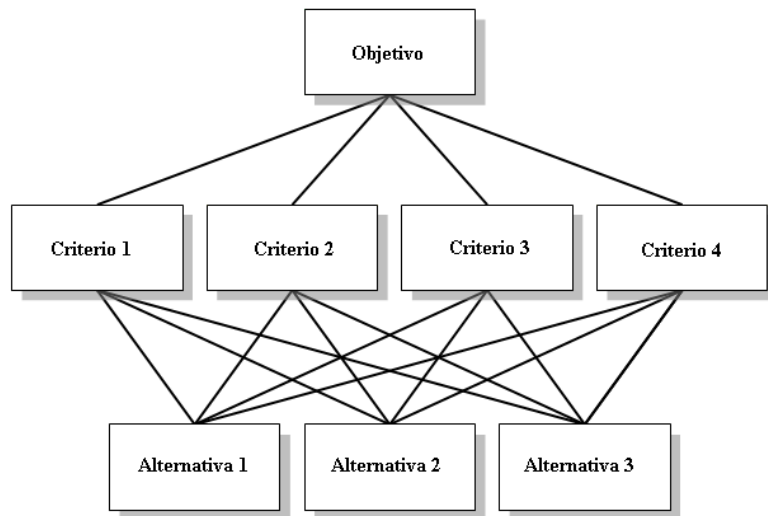
a) Representación jerárquica y descomposición:

Una jerarquía es una representación del problema complejo en una estructura de varios niveles, cuyo primer nivel representa el objetivo global o la meta, continuando con niveles subsecuentes que pueden representar factores, criterios, criterios secundarios, y así sucesivamente, hasta llegar al último nivel de las alternativas.

En la Figura 4.3.1, se muestra una ilustración de una jerarquía simple de tres niveles. El propósito de una jerarquía es determinar el impacto de los elementos de un alto nivel en los de un nivel inferior, o alternativamente la contribución de los elementos en el nivel inferior al cumplimiento de los elementos en el nivel superior.

Este tipo de evaluación se realiza por comparaciones pareadas, que responden a una pregunta apropiadamente planteada respecto de la preferencia o importancia de los criterios. La definición matemática de una jerarquía se puede encontrar en el texto del profesor Saaty, 1997.





**Figura 4.3.1 Estructura Jerárquica de tres niveles**

(Saaty, 1997)

b) Priorización y Síntesis:

Para establecer prioridades en una jerarquía, se requiere que se lleve a cabo una medición a través de la estructura. Se deben sintetizar estas medidas para obtener las prioridades de las alternativas del nivel más bajo.

Lo que hace el proceso AHP, es descomponer el problema y hacer comparaciones pareadas de todos los elementos (criterios, sub-criterios, alternativas) en un nivel dado, con respecto a los elementos relacionados justo en el nivel superior. El grado de preferencia o intensidad en la elección para cada comparación pareada es cuantificado en una escala fundamental indicada en la Tabla 4.3.1 y va siendo ordenada en matrices según cada elemento.

**Tabla 4.3.1 Escala Fundamental de importancia**

Intensidad de Importancia	Definición	Explicación
1	Igual	Dos actividades contribuyen en igual medida al objetivo
3	Moderada	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra
5	Fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre la otra
7	Muy fuerte o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica
9	Extremadamente fuerte	Las pruebas que favorecen a una actividad más que a otra son del nivel de aceptación más alto posible
Recíprocos de lo anterior	Si la actividad <i>i</i> se le ha asignado uno de los números distintos de cero señalados cuando se compara con la actividad <i>j</i> , entonces <i>j</i> tiene el valor recíproco cuando se le compara con <i>i</i>	Una comparación que surge de la elección del elemento más pequeño como unidad, para estimar el mayor como múltiplo de esa unidad

(Saaty, 1997)

Este proceso se realiza para cada par, pero en vez de asignar dos números  $w_i$  y  $w_j$  para formar la razón  $w_i/w_j$ , se asigna un número entero de la escala fundamental.

Si por ejemplo, un elemento *X* se dice que es de dominación moderada sobre un elemento *Y*, entonces el número de preferencia a asignar es 3, de tal manera que el juicio de *Y* relativo a *X* tomará el valor recíproco de  $1/3$ . Luego se construye una matriz de comparaciones para todos los elementos con los números de preferencia obtenidos anteriormente. En este ejemplo:

**Tabla 4.3.2 Comparación de elementos**

Criterios	Criterio X	Criterio Y
Criterio X	1	3
Criterio Y	$1/3$	1

c) Consistencia Lógica:

El AHP proporciona pautas para probar la consistencia de los juicios, para asegurarse de que los elementos sean agrupados lógicamente y organizados consistentemente según un criterio lógico. Es necesario cierto grado de consistencia en la fijación de prioridades para los elementos o actividades respecto de algún criterio

para obtener los resultados válidos en el mundo real. Los seres humanos tienen la capacidad de establecer relaciones entre los objetos o las ideas, de manera que sean consistentes. La consistencia tiene relación con el grado de dispersión de los juicios del participante, dada la ausencia de valores exactos para la escala de la mente humana, la que no está preparada para emitir juicios 100% consistentes (que cumplan las relaciones de transitividad y proporcionalidad). Se espera que se viole la proporcionalidad, de tal manera que no signifique violaciones a la transitividad.

La transitividad de las preferencias implica que el orden de las preferencias por los elementos de un conjunto sea coherente y no contradictorio. Por ejemplo, si C1 es mejor que C2 y C2 es mejor que C3, entonces se espera que C1 sea mejor que C3.

La proporcionalidad de las preferencias implica que haya un orden cuantificable entre los elementos de un conjunto y que tal orden se mantenga entre las distintas posibles comparaciones. Por ejemplo, si C1 es 3 veces mejor que C2 y C2 es 2 veces mejor que C3, entonces se espera que C1 sea 6 veces mejor que C3.

Una medida de inconsistencia puede ser calculada para cada conjunto de juicios. Sea:

- A** = matriz de comparación compuesta por valores ***ij***
- a<sub>ij</sub>*** = la importancia de ***i*** en relación a ***j***
- 1/*a<sub>ij</sub>*** = la importancia de ***j*** en relación a ***i***
- w<sub>j</sub>*** = el peso del factor ***j***, donde  $\sum w_j = 1$
- a<sub>ij</sub>*** =  $w_i / w_j$
- n*** = número de factores comparados y el rango de **A**

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \dots a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} \dots a_{2n} \\ a_{n1} & a_{n2} \dots a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_n \end{pmatrix} = n \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_n \end{pmatrix}$$

$$AW = n W$$

Donde **W** es el vector propio de la matriz.

**A** es consistente solo si  $\lambda_{\max} = n$ , pequeños cambios en ***a<sub>ij</sub>*** implican pequeños cambios en  $\lambda_{\max}$

Saaty propuso el Índice de Consistencia (CI) asociado al método del valor propio para chequear la consistencia en la asignación de las prioridades.

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n-1)$$

Donde  $\lambda_{\max}$  es el valor máximo de la matriz A, (max valor propio) y  $n$  es la dimensión de la matriz.

El cociente de consistencia (CR) se define como la razón de CI con el promedio del Índice Aleatorio (RI).

$$\text{Cociente de Consistencia} = \frac{\text{Índice de Consistencia}}{\text{Índice Aleatorio}}$$

El Índice Aleatorio (RI) representa la consistencia de una matriz de comparación pareada generada aleatoriamente. Se deriva como el promedio del índice de consistencia aleatorio calculado a partir de una muestra de 500 matrices generadas aleatoriamente sobre la base de la escala de fundamental AHP. La Tabla 4.3.3 muestra los RI para diferentes cantidades de criterios:

**Tabla 4.3.3 Índice de Consistencia Aleatorio para diferentes cantidades de criterios**

Orden de la Matriz	Índice de Consistencia Aleatoriamente Generado
1	0
2	0
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
10	1.49

Generalmente, el cociente de consistencia debe ser alrededor de 0,10 para no causar preocupación por mejoras necesarias en los juicios emitidos. Una desviación demasiado grande del valor consistente indica una necesidad de mejorar los juicios o reestructurar la jerarquía.

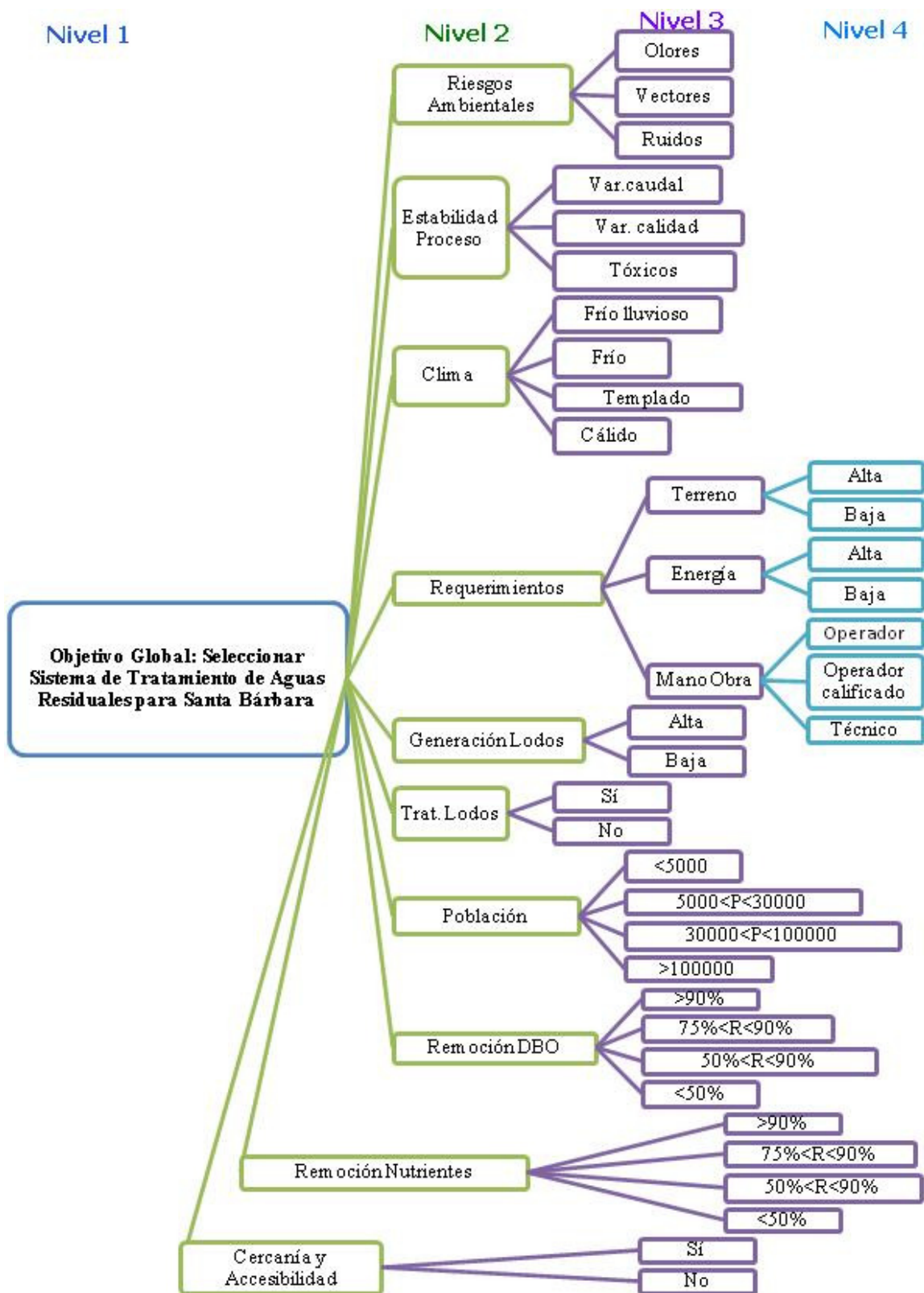
### 4.3.2 Modelo de Decisión Para Selección de Tecnología de Tratamiento

Un modelo con estructura jerárquica de cinco niveles fue elaborado para el problema general de selección de tecnología de tratamiento de aguas residuales.

El primer nivel tiene relación con el objetivo global deseado, en este caso el objetivo es: “Seleccionar un *sistema de tratamiento de aguas residuales para localidad de Santa Bárbara*”. El siguiente nivel representa los criterios de comparación, los cuales son los principales aspectos que contribuyen e interesa tener en cuenta al momento de seleccionar una tecnología. El tercer y cuarto nivel corresponde a los sub-criterios que influyen en el progreso de cada uno de los criterios del nivel superior. El último nivel muestra las alternativas, en este caso, las diferentes tecnologías de tratamiento de aguas residuales.

Por lo tanto, la estructura jerárquica se construye sobre la base de los aspectos más importantes asociados al objetivo global en cuestión, lo cual permite descomponer el problema y analizarlo según cada uno de ellos. Esto es muy interesante, ya que de esta manera es posible realizar un análisis de sensibilidad, para ver cuánto y de que manera se ve afectado el resultado final al cambiar las preferencias de uno o varios aspectos.

La estructura jerárquica propuesta es la siguiente:



Los criterios de comparación del segundo nivel (color verde) consisten en:

**Riesgos ambientales:** se refiere a la posible proliferación de olores, vectores y ruidos de las diferentes alternativas de tratamiento.

**Estabilidad del proceso:** la estabilidad del proceso de remoción de materia orgánica puede verse afectada por cambios en el caudal, en la calidad y por aumento de tóxicos en el afluente a la planta de tratamiento. Este criterio compara el comportamiento de las tecnologías frente a estos cambios.

**Clima:** Los diferentes procesos de tratamiento funcionan de distinta manera según el clima en donde se encuentren. Este criterio evalúa cómo se comportan las tecnologías en climas frío-lluviosos, fríos, templados y cálidos.

**Requerimientos:** este criterio se refiere a los requerimientos de terreno y energía de las diferentes alternativas, catalogándolas en alta o baja necesidad.

**Generación de Lodos:** se refiere a la alta o baja generación de lodos, ya sea primario y/o secundario, de cada alternativa de tratamiento.

**Tratamiento de Lodos:** este criterio evalúa la necesidad de tratamiento de lodos.

**Población:** algunas tecnologías son más apropiadas para caudales bajos y otras para caudales altos, lo que se puede traducir en cantidad de población de la localidad en cuestión. Este criterio compara el comportamiento de los diferentes procesos para poblaciones pequeñas, medianas y grandes.

**Remoción requerida de DBO:** dependerá de la disposición final del efluente de la planta de tratamiento, por eso la remoción requerida de DBO será diferente si la descarga es en ríos, ríos con capacidad de dilución, lagos o mar. Esta diferencia se hace notar por porcentaje de remoción, evaluando en que rango se encuentra la alternativa en cuestión.

**Remoción requerida de nutrientes:** al igual que para la remoción de DBO, este criterio dependerá de la disposición final del efluente de la planta de tratamiento, por eso la remoción de nutrientes será diferente si la descarga es en ríos, ríos con capacidad de dilución, lagos o mar.

**Cercanía y accesibilidad:** se refiere a la dependencia de la tecnología a la cercanía de centros de abastecimiento.

El criterio “costos” no fue incluido en el análisis ya que se determinó que es más interesante primero analizar los aspectos técnicos de los sistemas de tratamiento, seleccionando los procesos que son factibles dadas las restricciones y posteriormente comparar las alternativas escogidas según costos. Igualmente, si se prefiere, se puede incluir la comparación de costos en el análisis con AHP.

### 4.3.3 Comparaciones pareadas

El siguiente paso consiste en comparar de a dos los elementos de cada nivel, mediante juicios basados en el conocimiento y la experiencia, para interpretar los datos en función de su contribución al nodo principal en el nivel inmediatamente superior.

Los juicios son emitidos por un panel de expertos constituido por tres ingenieros civiles que trabajan en el área sanitaria. Cada uno de ellos realizó las comparaciones por separado, y posteriormente estas fueron ponderadas entre sí para obtener un sólo modelo general, que represente la opinión grupal.

Las comparaciones pareadas se llevaron a cabo en el software Expert Choice en donde se establecen las prioridades. Hay tres modos para realizar comparaciones por pares: numérico, verbal y gráfico, todas son análogas y se llega al mismo resultado.

De acuerdo a la estructura jerárquica básica descrita anteriormente, una comparación por pares se hace de tal manera que se comparan todos los elementos de un mismo nivel y se pesan unos con respecto a los otros. El panel de expertos debe ir derivando una matriz de prioridades en cada nivel de la estructura jerárquica. Las sentencias se consignan en la matriz, en respuesta a la pregunta: *¿Cuánto más importante es un criterio en el lado izquierdo de la matriz en comparación con otro en la parte superior de la matriz?* Esto se hace para justificar una decisión de selección justa. Cuando un criterio se compara con sí mismo, es de igual importancia y se le asigna valor 1. Una vez que todas las comparaciones del grupo se han completado, una escala de prioridades relativas se deriva de ellos. El proceso debe repetirse para cada criterio de la jerarquía y cada miembro del panel de expertos deberá asignar sus juicios.

### 4.3.4 Priorización

La prioridad de un nodo/criterio/objetivo/sub-objetivo es un valor numérico y se representa como un porcentaje de 1. Se deriva de las comparaciones pareadas con respecto al nodo “padre”. Dado que las prioridades globales de los nodos “hijos” también se suman a la prioridad global de los nodos “padres”, estas últimas representan la porción de prioridad que heredan los nodos padres de los hijos. La prioridad global de un nodo “hijo” equivale a la prioridad local del mismo nodo por la prioridad global del nodo padre correspondiente.

A modo de ilustración, se tomará como ejemplo el sub- criterio “Olores”, el cual es hijo del nodo “Riesgos ambientales”.

Se tiene la siguiente matriz de juicios:



**Tabla 4.3.4 Juicios sobre sub-criterio “olores”**

	Filtro Percolador (TF)	Aireación Extendida	IFAS	CEPT	Lombrifiltros	Biodiscos	Emisario Submarino
Filtro Percolador (TF)	1,0	0,5	0,7	3,0	1,0	0,7	0,7
Aireación Extendida	2,0	1,0	1,4	3,0	2,0	2,0	0,7
IFAS	1,4	0,7	1,0	3,0	2,0	1,4	0,7
CEPT	0,3	0,3	0,3	1,0	0,4	0,3	0,4
Lombrifiltros	1,0	0,5	0,5	2,5	1,0	0,5	0,7
Biodiscos	1,4	0,5	0,7	3,0	2,0	1,0	0,7
Emisario Submarino	1,4	1,4	1,4	2,5	1,4	1,4	1,0

Esta matriz fue completada respondiendo a la pregunta *¿Cuánto mejor se comporta la alternativa del lado izquierdo de la matriz en comparación con la otra en la parte superior de la matriz, con respecto al sub-criterio olores?* Por ejemplo, Al comparar filtro percolador con aireación extendida la respuesta de los expertos fue 0,5=1/2 (basado en la escala de fundamental de importancia mostrada en la Tabla 4.3.1) ya que estiman que el filtro percolador se comporta levemente peor en cuanto a producción de olores (es decir, producen más olores) que la aireación extendida.

Luego, al comparar filtro percolador con CEPT la respuesta de los expertos fue 3 ya que estiman que el filtro percolador se comporta levemente mejor en cuanto a producción de olores (es decir, producen más olores) que el proceso CEPT. Y así sucesivamente con las demás comparaciones.

Posteriormente, para calcular las prioridades locales de este sub-criterio, primero se deben sumar los elementos de cada columna de la matriz anterior:

**Tabla 4.3.5 Sumatoria por columna**

	Filtro Percolador (TF)	Aireación Extendida	IFAS	CEPT	Lombrifiltro	Biodisco	Emisario Sub
$\Sigma$ columna	8,56	4,90	6,02	17,95	9,81	7,35	4,95

Luego se divide cada elemento de la matriz por la suma total de la columna a que pertenezca, para obtener la matriz normalizada que permite realizar comparaciones significativas entre los elementos.

**Tabla 4.3.6: Matriz Normalizada**

	Filtro Percolador (TF)	Aireación Extendida	IFAS	CEPT	Lombrifiltros	Biodiscos	Emisario Submarino
Filtro Percolador (TF)	(1,0/8,56)= 0,12	(0,5/4,90)= 0,10	(0,7/6,02)= 0,12	(3/17,95)= 0,17	(1,0/9,81)= 0,10	(0,7/7,35)= 0,10	(0,7/4,95)= 0,14
Aireación Extendida	0,23	0,20	0,23	0,17	0,20	0,27	0,14
IFAS	0,16	0,14	0,17	0,17	0,20	0,19	0,14
CEPT	0,04	0,06	0,05	0,06	0,04	0,05	0,08
Lombrifiltros	0,12	0,10	0,08	0,14	0,10	0,07	0,14
Biodiscos	0,16	0,10	0,12	0,17	0,20	0,14	0,14
Emisario Submarino	0,16	0,29	0,23	0,14	0,14	0,19	0,20

Finalmente, se promedian los elementos de cada fila de la matriz normalizada, para obtener el vector de prioridades:

$$v_{k=1..n} = \frac{\sum_{i=k, j=1}^{i=k, j=n} a_{ij}}{n}$$

**Tabla 4.3.7: Vector de prioridades para sub-criterio “olores”**

Alternativa	Vector de Prioridades
Filtro Percolador (TF)	0,121
Aireación Extendida	0,208
IFAS	0,169
CEPT	0,054
Lombrifiltros	0,107
Biodiscos	0,148
Emisario Submarino	0,194

Estos promedios proporcionan una estimación de las prioridades locales de los elementos que se comparan y en este caso indican que para el sub-criterio “olores” el sistema aireación extendida es el preferido debido a su buen desempeño en la producción de olores, obteniendo el valor mas alto del vector de prioridades (0,208).

El mismo procedimiento anterior se realiza para los otros sub-criterios Ruidos y Vectores obteniéndose:

**Tabla 4.3.8: Vectores de prioridades**

	Olores	Vectores	Ruidos
	Vector de Prioridades	Vector de Prioridades	Vector de Prioridades
Filtro Percolador (TF)	0,121	0,057	0,189
Aireación Extendida	0,208	0,169	0,063
IFAS	0,169	0,176	0,070
CEPT	0,054	0,088	0,126
Lombrifiltros	0,107	0,058	0,187
Biodiscos	0,148	0,115	0,132
Emisario Submarino	0,194	0,194	0,163

Los pesos relativos de los sub-criterios “olores”, “vectores” y “ruidos” se calculan con el mismo procedimiento anterior, ahora partiendo de la matriz de juicios elaborada para el criterio “Riesgos ambientales”:

**Tabla 4.3.9 Juicios sobre sub-criterio “Riesgos Ambientales”**

	Olores	Vectores	Ruidos
Olores	1	5	3
Vectores	1/5	1	1,41
Ruidos	1/3	0,71	1

**Tabla 4.3.10 Sumatoria por columna**

	Olores	Vectores	Ruidos
$\Sigma$ columna	1,53	6,71	5,41

**Tabla 4.3.11: Matriz Normalizada**

	Olores	Vectores	Ruidos
Olores	0,65	0,75	0,55
Vectores	0,13	0,15	0,26
Ruidos	0,22	0,11	0,18

Promediando los valores de cada fila se obtiene  $w_{\text{olores}}=0,655$ ,  $w_{\text{vectores}}=0,139$ ,  $w_{\text{ruidos}}=0,206$ .

Finalmente se calcula la priorización global del criterio Riesgos ambientales, ponderando los pesos relativos de los sub-criterios por el vector de prioridades y sumando la fila correspondiente a cada alternativa:

**Tabla 4.3.12: Prioridades globales para criterio “Riesgos ambientales”**

	<b>Olores (0,655)</b>	<b>Vectores (0,139)</b>	<b>Ruidos (0,206)</b>	<b>Suma= Prioridad Global Criterio</b>
Filtro Percolador (TF)	0,120 (0,655)	0,057 (0,139)	0,189 (0,206)	<b>0,121</b>
Aireación Extendida	0,201 (0,655)	0,169 (0,139)	0,063 (0,206)	<b>0,172</b>
IFAS	0,133 (0,655)	0,176 (0,139)	0,070 (0,206)	<b>0,130</b>
CEPT	0,044 (0,655)	0,088 (0,139)	0,126 (0,206)	<b>0,066</b>
Lombrifiltros	0,100 (0,655)	0,058 (0,139)	0,187 (0,206)	<b>0,108</b>
Biodiscos	0,133 (0,655)	0,115 (0,139)	0,132 (0,206)	<b>0,130</b>
Emisario Submarino	0,134 (0,655)	0,194 (0,139)	0,163 (0,206)	<b>0,150</b>

Este resultado muestra que el sistema que mejor se comporta ante la prevención de los riesgos ambientales, según los juicios expertos, es la aireación extendida ya que obtuvo la mayor prioridad global en este criterio (0,172).

El proceso de cálculo debe repetirse para cada criterio, con el fin de encontrar el resultado global del problema planteado. Todos estos cálculos pueden ser realizados usando el software Expert Choice, el cual es una herramienta de soporte basada en la metodología AHP.

## CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se dan a conocer los resultados del análisis de selección de alternativas de tratamientos de aguas residuales descrito en el capítulo anterior. Además, se hace una evaluación comparativa de costos de los sistemas escogidos del análisis de selección. La evaluación se realiza en base a los costos de inversión, operación y mantenimiento de los procesos de tratamiento, para un periodo de 20 años según lo recomendado para este tipo de proyectos (WEF/ASCE, 1998). La alternativa más conveniente, en términos económicos, será la que tenga el menor costo anual equivalente.

### 5.1. Resultados del Análisis Jerárquico

Una vez obtenidos los juicios de cada experto sobre las comparaciones planteadas en el modelo AHP, se formó un solo modelo general usando toda la información entregada por el panel. Los valores finales se derivaron mediante la media geométrica de los juicios<sup>3</sup> y los resultados se describen a continuación.

Para el primer nivel de la jerarquía, el orden de importancia asignada a los criterios de comparación se muestra en la siguiente figura:

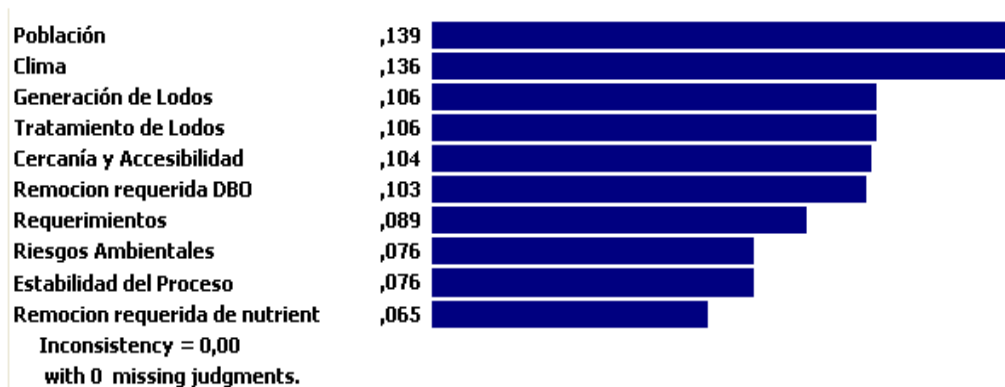


Figura 5.1.1 Resultados Primer Nivel

Los criterios de mayor relevancia para el análisis son los que obtuvieron los mayores porcentajes en la asignación de prioridades. Los demás criterios, obtuvieron baja

<sup>3</sup> Para calcular la media geométrica, los valores de las matrices se multiplican y se calcula la raíz igual al número de individuos participantes. Por ejemplo, la media geométrica de 2, 3 y 7 es  $(2 \times 3 \times 7)^{1/3}$ , la cual es 3,48.

prioridad ya que los expertos consideraron que para este caso no . Esto no quiere decir que no el sistema elegido no deba cumplir con estos criterios sino que al tener menor importancia asignada, influirán de menor manera en el análisis comparativo. En este caso, se le ha asignado mayor importancia al criterio Población con un 13,9% del peso total, seguido por Clima (13,6%), Generación de Lodos (10,6%), Tratamiento de Lodos (10,6%), Cercanía y Accesibilidad (10,4%) y Remoción Requerida de DBO (10,3%).

Las alternativas de tratamiento que cumplan de mejor manera con estos requerimientos, obtendrán mayor peso, demostrando que se ajustan mejor al objetivo planteado que otras.

Para el segundo nivel de la jerarquía se detallan los pesos asignados a cada criterio:

- Riesgos ambientales: Olores 65,5%, Ruidos 20,6% y Vectores 13,9%



**Figura 5.1.2 Priorización local criterio Riesgos Ambientales**

Para el criterio de riesgos ambientales se consideró que el problema de olores es más difícil de manejar que los ruidos y vectores, por lo tanto las alternativas de tratamiento que tengan mejor comportamiento ante el subcriterio olores, es decir los procesos que emitan menor cantidad de olores, resultan mejor evaluadas.

- Estabilidad del proceso: Variaciones de Caudal 46,9%, Tóxicos en el afluente 34,9% y Variaciones en la Calidad del afluente 18,3%



**Figura 5.1.3 Priorización local criterio Estabilidad del proceso**

La alternativa que se comporte mejor ante variaciones de caudal será la que tenga la mayor preferencia en el criterio Estabilidad del proceso. Lo mismo se va repitiendo en los demás aspectos.

- Clima: Frío lluvioso 75%, Frío 8,3%, Templado 8,3% y Cálido 8,3%



**Figura 5.1.4 Priorización local criterio Clima**

- Requerimientos: Terreno 50%, energía 25% y mano de obra 25%.



**Figura 5.1.5 Priorización local criterio Requerimientos**

Acá se consideró que la limitación de espacios es mas relevante a considerar que los requerimientos de energía y mano de obra, es decir, representa un factor mas difícil manejar. Por lo tanto, los sistemas de tratamiento que requieran de menor cantidad de espacio en sus instalaciones, serán los que mayor ponderación tengan bajo este criterio de Requerimientos.

- Generación de lodos: Baja 80,9% y Alta 19,1%



**Figura 5.1.6 Priorización local criterio Generación de lodos**

- Tratamiento de lodos: No requiere 83,1% y Sí requiere 16,9%



**Figura 5.1.7 Priorización local criterio Tratamiento de lodos**

- Población: <5000 habitantes 73,4%, 5000<hab<30000 11,3%, 30000<hab<100000 7,9% y >100000 habitantes 7,5%



**Figura 5.1.8 Priorización local criterio Población**

- Remoción de DBO: >90% 69,9%, 75%<R<90% 14,2%, 50%<R<75% 9,5% y <50% 6,4%.



**Figura 5.1.9 Priorización local criterio Remoción de DBO**

En este caso se asumió una remoción alta de DBO, pensando en los límites más restrictivos de la norma de descarga en aguas superficiales. Si la descarga se decidiera realizar en algún río con capacidad de dilución, entonces estas preferencias podrían modificarse a una necesidad menor de remoción de DBO y el análisis se puede realizar nuevamente con esa preferencia distinta.

- Remoción de nutrientes: >90% 30,7%, 75%<R<90% 27,7%, 50%<R<75% 23,7% y <50% 18%.



**Figura 5.1.10 Priorización local criterio Remoción de nutrientes**

- Cercanía y accesibilidad: No depende 79,5% y Sí depende 20,5%



**Figura 5.1.11 Priorización local criterio Cercanía y accesibilidad**

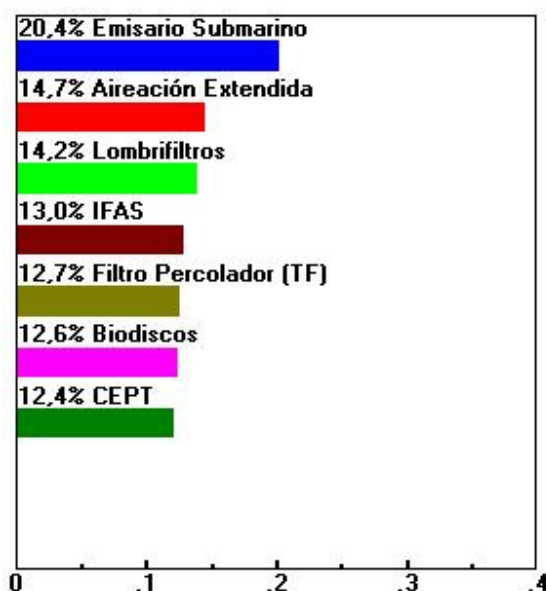


Las preferencias anteriormente mostradas dependen absolutamente del criterio y de la opinión personal de los expertos cuestionados, los cuales contestaron basándose en su experiencia y en las características propias de la localidad.

Los resultados locales, es decir los resultados que muestran como se comportan las alternativas según cada criterio de comparación, indican que el sistema de Emisarios Submarinos es preferido en la mayoría de los aspectos: “Riesgos Ambientales”, “Estabilidad del Proceso”, “Clima”, “Requerimientos”, “Generación de Lodos” y “Tratamiento de Lodos” (Ver figuras en Anexo A).

Para el criterio “población”, el sistema de tratamiento preferido es Aireación Extendida, para los criterios “remoción de DBO” y “remoción de nutrientes” la preferencia es IFAS y para el criterio “cercanía y accesibilidad” la preferencia es Lombrifiltros.

Con esto, el resultado global obtenido de la modelación general se muestra en la Figura 5.1.12 a continuación:



**Figura 5.1.12 Resultados globales**

En la Figura 5.1.12, se observa que la mejor alternativa para el tratamiento de aguas residuales de Santa Bárbara, según los juicios de expertos, resultó ser la descarga de aguas al mar mediante un emisario submarino, ya que es la opción que obtuvo el mayor peso de la sintetización global (20,4%). Esto debido a que este sistema se ajusta de mejor manera a la mayoría de los criterios de comparación. Todas las demás alternativas obtuvieron preferencias similares, dejando en último lugar al tratamiento primario químicamente asistido (CEPT) con 12,4% de preferencia.

Este resultado además demuestra la preferencia de los expertos por tratamientos convencionales sobre tratamientos innovadores, dejando a estos últimos con los valores más bajos de preferencia.

La comparación detallada criterio a criterio entre el sistemas de tratamiento mejor y el peor evaluado se muestra en la Figura 5.1.13, en donde se aprecia que CEPT es preferido sobre emisario submarino sólo para remover nutrientes y porque se ajusta al nivel de población de mejor manera.

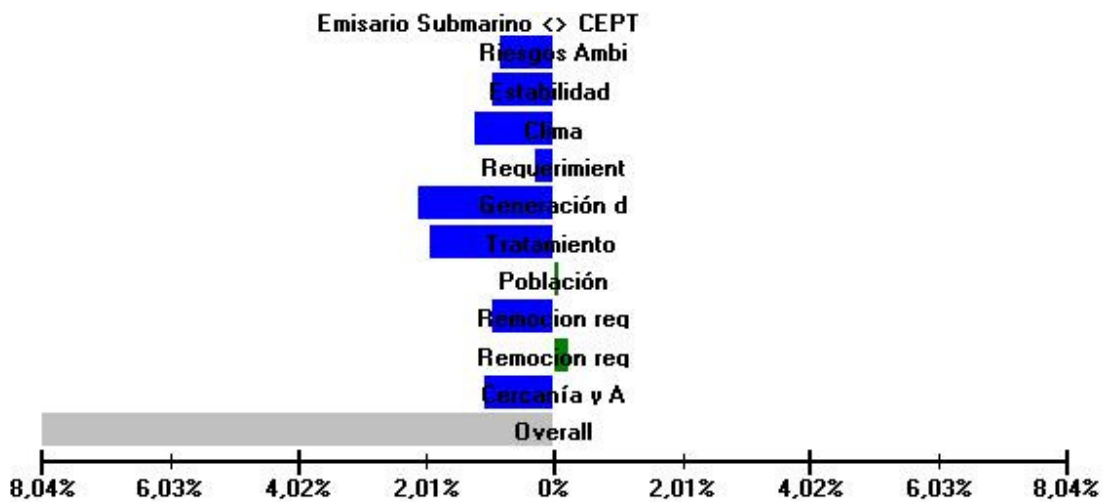
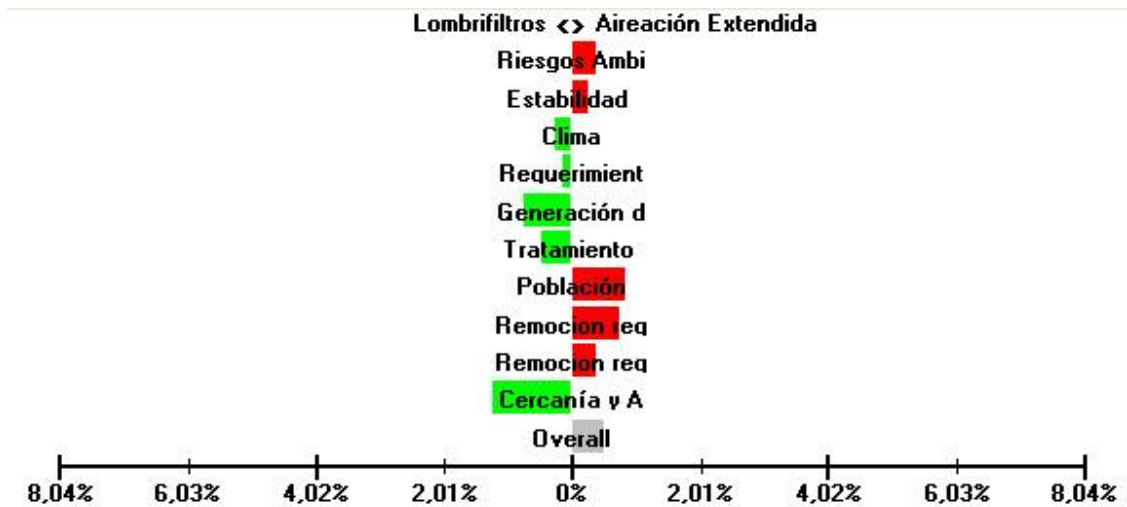


Figura 5.1.13 Comparación de Resultados según Criterios entre CEPT y Emisarios Submarinos

Las demás alternativas tienen pesos similares ya que son preferidos de igual manera para distintos criterios, lo cual hace que resulten con casi los mismos pesos. Por ejemplo, al comparar el sistema de Lombrifiltros con Aireación Extendida, se puede observar en la Figura 5.1.14 que las preferencias se reparten de manera equivalente para ambos, ya que en algunos criterios Lombrifiltros supera a Aireación Extendida y viceversa, pero aun así Aireación Extendida finalmente supera a Lombrifiltros:

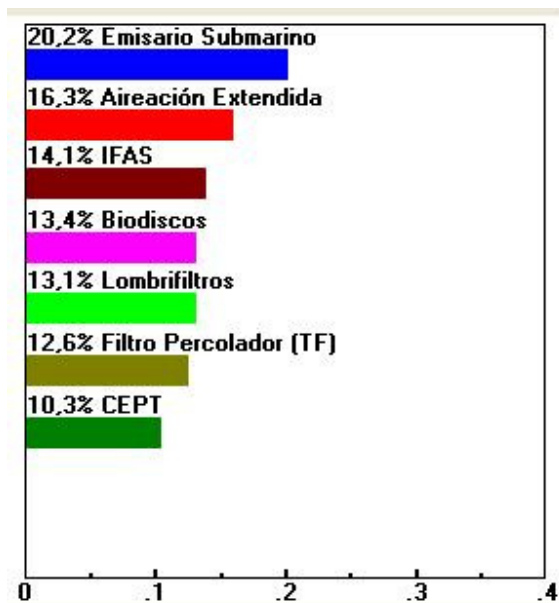


**Figura 5.1.14 Comparación de Resultados según Criterios entre Lombrifiltros y Aireación extendida**

Este gráfico es muy útil para comparar en que aspectos una alternativa se comporta mejor que la otra, por lo tanto, la selección entre estos dos sistemas dependerá absolutamente de la importancia que le asigne el evaluador a los criterios de comparación.

Para analizar de mejor manera estas preferencias, es posible realizar un análisis de sensibilidad, modificando el nivel de importancia asignado a cada criterio de comparación. Por ejemplo, en el caso que se considere que el criterio “Riesgos Ambientales” debe tener aun más importancia que los demás criterios, el resultado global muestra que el sistema IFAS gana mayor preferencia superando a Lombrifiltros y dejando a Biodiscos en cuarto lugar. Es decir, el orden de los resultados se altera debido a que el proceso IFAS se comporta mejor minimizando los riesgos ambientales que las demás alternativas.

La Figura 5.1.15 muestra los cambios en los resultados globales ante la variación en la relevancia del criterio “Riesgos Ambientales”:



**Figura 5.1.15 Resultado global ante incremento de importancia de criterio “Riesgos Ambientales” (Análisis de Sensibilidad)**

Otros cambios en las preferencias de los criterios de comparación fueron realizados para ir observando las diferencias en el resultado global, reflejando en la mayoría de los casos que la alternativa emisario submarinos es la más apropiada.

Un estudio de costos de las alternativas que mejor se ajustan a la solución del problema debe ser realizado para complementar la información obtenida del análisis anterior. Esto puede ser determinante al momento de elegir entre dos alternativas que tengan preferencias técnicas similares, ya que si los costos son mucho más elevados para una alternativa, desincentivará su elección a pesar de haber sido escogida como buena opción.

## 5.2. Costos de Alternativas

Los costos de un proyecto de tratamiento de aguas residuales típicamente consisten en los costos de adquisición de tierras más los costos estimados de construcción, los cuales incluyen equipos, tuberías, edificios y estructuras, el costo de la ingeniería, administración de proyectos y las contingencias. Todos estos costos son agrupados en un ítem de costos de inversión.

Además, se deben considerar los costos anuales que tendrá la planta de tratamiento una vez que entre en funcionamiento, los cuales corresponden a la mantención y buena operación de los equipos y a la preservación de su vida útil. Estos costos también incluyen sueldos, elementos de mantenimiento, el consumo de energía y los productos químicos que se requieran.

Los costos de inversión, mantención y operación de las tres alternativas de tratamiento de aguas residuales que mejor se ajustan al objetivo global, fueron obtenidos en función de la cantidad de habitantes de la localidad en donde se instalará la planta de tratamiento, por lo que se hace necesario realizar una proyección de población a 20 años.

Luego, las alternativas a comparar según costos son: Emisarios Submarinos, Lodos Activados con Aireación extendida y Lombrifiltros.

### 5.2.1. Comparación de Costos

Para comparar las diferentes alternativas, se calculará el Costo Anual Equivalente (CAE) de cada proceso, considerando un periodo de evaluación de 20 años. La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$CAE = VAC \cdot \left[ \frac{r \cdot (1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \right]$$

$$VAC = \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

CAE: Costo Anual Equivalente

VAC: Valor Actual de los Flujos de Costos

C<sub>i</sub>: Costos año i (suma de costos de inversión, mantención y operación)

r: Tasa de descuento (%)

n: Período de evaluación

Los costos aproximados de inversión, operación y mantenimiento de los emisarios submarinos y de aireación extendida fueron obtenidos de un estudio tarifario de la empresa ESSAL, para un caudal de aguas servidas promedio de 7 litros/segundo, similar al caso acá estudiado. Los costos de lombrifiltros fueron obtenidos de un artículo publicado en la revista Ciencia & Trabajo (Baraño & Tapia, 2004). Estos valores se presentan en la siguiente tabla<sup>4</sup>:

---

<sup>4</sup> Los costos fueron actualizados a los valores del dólar y UF para la fecha 8/03/10: 1 US\$= CLP\$509, 1UF=CLP\$20.950 (Fuente: www.df.cl)

**Tabla 5.2.1.1 Costos de Inversión, Mantenimiento y Operación de Alternativas**

Sistemas de Tratamiento	Costos Inversión		Costos Mantenimiento y Operación	
	US\$/hab	UF\$/hab	US\$/m <sup>3</sup>	UF\$/m <sup>3</sup>
Lombrifiltros	91	2,55	0,40	0,010
Emisario Submarino	310	7,53	0,25	0,006
Aireación Extendida	180	4,37	0,55	0,013

Como se puede ver en la Tabla 5.2.1.1, la alternativa Lombrifiltros tiene los costos de inversión, operación y mantenimiento más bajos de las tres alternativas, lo cual era esperable ya que es un sistema sencillo e indicado para pequeñas poblaciones. Los emisarios submarinos presentan los costos de inversión más altos, pero a la vez los costos de operación y mantenimiento más bajos.

Es importante destacar que estos costos son aproximados y que fueron estimados para un caudal bajo, por ende para poblaciones pequeñas. Para poblaciones mayores, estos costos por habitante o por metro cúbico disminuyen, ya que para este tipo de proyectos los costos marginales son decrecientes.

Se evaluará el VAC y CAE para las alternativas, considerando una tasa de retorno de 10%. Los resultados finales se presentan a continuación y el detalle de estos cálculos se adjunta en el Anexo B.

Los VAC calculados se muestran en la Tabla 5.2.1.2

**Tabla 5.2.1.2 Valor Actual Neto de Alternativas**

Tasa retorno	VAN Lombrifiltro (UF\$)	VAN Emisario Submarino (UF\$)	VAN Aireación Extendida (UF\$)
10%	\$ 19.316	\$ 29.313	\$ 30.298

Con lo anterior, se tienen los siguientes CAE:

**Tabla 5.2.1.3 Costo Anual equivalente de Alternativas**

Tasa retorno	CAE Lombrifiltro (UF\$)	CAE Emisario Submarino (UF\$)	CAE Aireación Extendida (UF\$)
10%	\$ 2.540	\$ 3.854	\$ 3.983

Este resultado muestra que a pesar de que el emisario submarino posee los costos de inversión relativos más altos, el costo anual equivalente de este sistema es menor al de la alternativa aireación extendida, aunque con una diferencia no muy alta (aproximadamente UF\$100).

Los lombrifiltros, a pesar de ubicarse en tercer lugar de preferencia técnica, se ubican en primer lugar de preferencia en costos con una diferencia importante con respecto a los otros dos sistemas, lo cual le agrega un atractivo adicional a este sistema.

Se debe considerar que estos valores no incluyen los costos de terrenos, los cuales son proporcionales a la cantidad de superficie requerida por cada sistema de tratamiento. Como se vio en el capítulo 3, comparativamente el sistema de lombrifiltros es el que requiere mayor cantidad de espacio, luego aireación extendida y el que requiere menor extensión es el emisario submarino. Esto puede determinar una diferencia importante entre estos últimos dos sistemas ya que, dependiendo de la disponibilidad de terreno existente y de los costos asociados, se podrían ver cambios en los costos finales de estos dos sistemas.

Los emisarios submarinos resultaron ser una alternativa atractiva de solución ya que proveen una tecnología eficiente, segura y relativamente económica para la disposición final de aguas residuales.

## **CAPÍTULO 6: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES**

El presente trabajo ha abordado el problema de selección de alternativas de tratamientos de aguas residuales para la localidad de Santa Bárbara, X Región. Esta localidad ha sido escogida por el gobierno para reinstalar a la destruida ciudad de Chaitén tras la erupción del volcán homónimo en mayo de 2008.

Para la selección de alternativas, se desarrolló un modelo de decisión multicriterio, fundamentalmente para ordenar y estructurar el problema y, para encontrar el sistema de tratamiento que mejor se ajusta a los requerimientos de la nueva ciudad. A continuación se presentan las principales conclusiones de este estudio.

- De la investigación de sistemas de tratamientos de aguas residuales se puede concluir que en Chile los sistemas convencionales son los más utilizados para medianas y grandes poblaciones. La mayoría son en base a Lodos Activados debido a su buen desempeño en general y fiabilidad comprobada mundialmente. Las Lagunas Aireadas también son bastante usadas, ya que muchas de ellas son antiguas lagunas de estabilización que debieron ser modificadas para alcanzar las eficiencias de remoción que se requieren para cumplir con la normativa vigente. Además, dado que Chile es un país con una larga costa, era esperable que los sistemas de emisarios submarinos también fuesen uno de los sistemas de gran uso.
- Los sistemas no convencionales son recomendados para pequeñas poblaciones (menor a 5.000 habitantes) debido a su simple operación y bajos costos de inversión y mantención. Los sistemas biológicos innovadores aquí descritos, en general, aún tienen un costo comparativo muy elevado para las necesidades de remoción de aguas residuales domésticas y son de operación más compleja, lo cual los hace menos interesante que otras alternativas. Su uso es recomendado mayormente para el tratamiento de aguas de residuos industriales o cuando se requiera tratamiento terciario.
- Ningún sistema de tratamiento es ideal y aplicable para todos los casos y condiciones. Cada situación debe analizarse individualmente.
- La localidad de Santa Bárbara requiere un sistema de tratamiento de aguas residuales que sea sencillo, fácil de operar, de bajos costos de mantención y operación, y de baja generación o tratamiento de lodos, dado a sus propias características y al aislamiento de la zona.
- Un modelo multicriterio permite examinar con detalle los elementos de un problema, lo que hace posible discernir la solución que mejor satisface una meta de manera rigurosa. Asimismo, el Proceso Jerárquico Analítico (AHP) resultó ser una herramienta útil para estructurar y ordenar el problema de decisión, identificando los aspectos que influyen de manera directa en la selección de alternativas de tratamiento de aguas residuales.



- Los resultados del proceso de selección indican que para el caso de Santa Bárbara, la alternativa de emisario submarino es más atractiva que las demás opciones de tratamiento secundario, principalmente por: la estabilidad del proceso; por su buena adaptación al clima; por sus requerimientos mínimos de energía, terreno y operación; por su mínima generación y necesidad de tratamiento de lodos; y por presentar menores riesgos ambientales.
- Los emisarios submarinos proveen una tecnología eficiente, segura y relativamente económica para la disposición final de aguas residuales que, cuando están diseñados apropiadamente, tienen un mínimo impacto en el medioambiente.
- La elección entre alguna de las alternativas aquí planteadas como solución para el tratamiento de aguas residuales para Santa Bárbara dependerá finalmente de los recursos económicos que se tengan, o de la importancia que se le de a éstos. Según la comparación de costos anuales equivalentes de las alternativas, el sistema de lombrifiltros aparece como el más conveniente, pero tercer lugar en el orden de preferencia técnicamente factible, después de Aireación extendida que presenta los costos más altos.
- El ordenamiento global de las alternativas vuelve a confirmar la preferencia de los sistemas convencionales sobre los sistemas innovadores.
- Con respecto al panel de expertos, es interesante mencionar que un trabajo de esta naturaleza requiere de una gran participación y disponibilidad en términos de tiempo. Una de las grandes dificultades además del diseño de los cuestionarios fue, organizar y establecer con los miembros del panel entrevistas para responder este.
- En la aplicación de la metodología es importante establecer la definición de cada elemento para que todos los involucrados hablen el mismo lenguaje. Es decir, dejar en claro en qué consiste cada criterio de comparación y cual es su alcance. También, al comparar dos elementos, se debe tener el cuidado de realizar las preguntas con la intención y el tono apropiado.
- Para este estudio no fue posible obtener los caudales de los ríos de la zona ya que la información no está disponible en la Dirección General de Aguas. Se recomienda hacer aforos o estimaciones de los caudales de estos ríos para analizar si tienen capacidad de dilución, en caso que se decida usarlos como cuerpo receptor del efluente de la planta de tratamiento. Esta información indicará el nivel de remoción de contaminantes que se requiere para cumplir con los límites que establece la normativa vigente.
- Para obtener un mayor análisis de las diferentes posibilidades que se tienen en cuanto a la aplicación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, se pueden generar resultados adicionales afinando el modelo, ya sea variando los criterios, las alternativas y las prioridades asignadas. Por ejemplo, el criterio costos puede ser agregado en el análisis con AHP y de esta forma descartar en esta instancia sistemas que tengan un costo muy elevado. También se puede agregar un criterio de impacto

ambiental posterior a la descarga de las aguas residuales tratadas, con lo que se podrían comparar las alternativas en cuanto a su amigabilidad con el medioambiente. En fin, hay muchas posibilidades que se pueden analizar y que podrían complementar este estudio.

- El presente estudio sirve de base para quienes deben fijar prioridades y tomar decisiones en la selección de alternativas de tratamiento de aguas residuales de cualquier localidad. Cada caso puede ser analizado según las restricciones que se requieran y según la importancia que el experto le quiera asignar a los criterios de comparación.

## Bibliografía

- Baraño, P., Tapia L. (2004). *Tratamiento de las Aguas Servidas: Situación en Chile*. Revista Ciencia & Trabajo, Número 13, pag 111-117.
- Carrasco, C. (2007). *Tratamiento Físico Químico de Aguas Residuales*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- EPA-US. (2008). *Emerging Technologies for Wastewater Treatment and In-Plant Wet Weather Management*. EPA 832-R-06-006, Fairfax, Virginia.
- EPA-US. (1999). *Folleto Informativo de Tecnología de Aguas Residuales: Zanjas de Oxidación*. EPA 832-F-00-013.
- EPA-US. (1999b). *Folleto Informativo de Tecnologías de Aguas Residuales: Reactores Secuenciales por Tandas*. EPA 832-F-99-073.
- EPA-US. (2007). *Wastewater Management Fact Sheet: Membrane Bioreactors*.
- EPA-US. (2002b). *Wastewater Technology Fact Sheet: Aerated, Partial Mix Lagoons*. EPA 832-F-02-008.
- EPA-US. (2002a). *Wastewater Technology Fact Sheet: Facultative Lagoons*. EPA 832-F-02-014.
- Fuerza Aerea de Chile. (s.f.). Recuperado el 12 de noviembre de 2009, de [www.fach.cl](http://www.fach.cl)
- Garuti, C., & Escudey, M. *Toma de Decisiones en Escenarios Complejos*. Santiago de Chile: Editorial de la Universidad de Santiago de Chile.
- Germain, E., Bancroft, L., Dawson, A., Hinrichs, C., Fricker, L., & Pearce, P. (2007). *Evaluation of Hybrid Processes for nitrification by comparing MBBR/AS and IFAS configurations*. Water Science & Technology , 55 (8-9), 43-49.
- Golla, P., Reddy, M., Simms, M., & Laken, T. (1994). *Three years of full-scale Captor Process operation at Moundville WWTP*. Water Science & Technology , 29 (10-11), 175-181.
- Green Earth Systems Inc. (s.f.). Recuperado el 17 de enero de 2009, de [www.gesi-solutions.com](http://www.gesi-solutions.com)
- Instituto Geográfico Militar. (s.f.). *Carta Geográfica Caleta Santa Barbara*. Obtenido de [www.igm.cl](http://www.igm.cl)
- Instituto Nacional de Estadísticas de Chile. (s.f.). Recuperado el 5 de noviembre de 2009, de [www.ine.cl](http://www.ine.cl)
- Iwai, S., Oshino, Y., & Tsukada, T. (1990). *Design and Operation of Small Wastewater Treatment Plants by the Microbil Film Process*. Wat. Sci. Tech. , 22 (3/4), 139-144.

Menendez, C., & Pérez, J. M. (2007). *Procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales*. La Habana: Universitaria.

Metcalf & Eddy, Inc. (2003). *Wastewater engineering, Treatment and Reuse* (Fourth ed.). New York: Mc Graw Hill.

Metcalf, & Eddy. (1996). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización* (3era ed.). (J. d. Montsoriu, Trad.) Mexico: Mc Graw Hill.

Miliarium Aureum, S. (2001). *Miliarium*. Recuperado el 27 de octubre de 2009, de [www.miliarium.com](http://www.miliarium.com)

Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República de Chile, DS N°4. (2009). *Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas*.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República de Chile, DS N°90. (2001). *Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos en cuerpos de aguas marinas y continentales superficiales*.

Noram Bio Systems Inc. *Vertreat Activated Sludge Process* .

Oddershede, A., Arias, A., & Cancino, H. (2007). *Rural development decision support using the Analytic Hierarchy Process*. *Journal of Mathematical and Computer Modelling* , 46 (7-8), 1107-1114.

Perfomaq S.A. (2008). *Informe de Pozo Profundo Santa Bárbara*. X Región.

Rema. (s.f.). Recuperado el 30 de Octubre de 2009, de [www.rema.com.mx](http://www.rema.com.mx)

Rodríguez, J. A. (2003). *Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales*. Universidad del Valle, Cali.

Saaty, T. L. (1997). *Toma de Decisiones para Líderes: El proceso analítico jerárquico la toma de decisiones en un mundo complejo*. (M. Escudey, E. Martínez, & L. Vargas, Trans.) Pittsburgh: RWS Publications.

Salas, H. (2000). *Emisarios Submarinos, Alternativa Viable para la Disposición de Aguas Negras de Ciudades Costeras de América Latina y el Caribe*.

Santibañez, J. (2002). *Estudio de Plantas Piloto de Aguas Servidas a base de Tecnologías No Convencionales*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Sperling, v. M. (1996). *Comparison among the most frequently used systems for wastewater treatment in developing countries*. *Water Science and Technology* , 33 (3), 59-62.

Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2007). *Informe de Gestión del sector Sanitario*.

Water Environment Research Foundation. (2000). *Investigation of Hybrids Systems for Enhanced Nutrient Control*.

WEF/ASCE. (1998). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants* (Cuarta Edición ed., Vol. 1). USA.

# ANEXOS

## Anexo A: Figuras de Resultados de Análisis Jerárquico

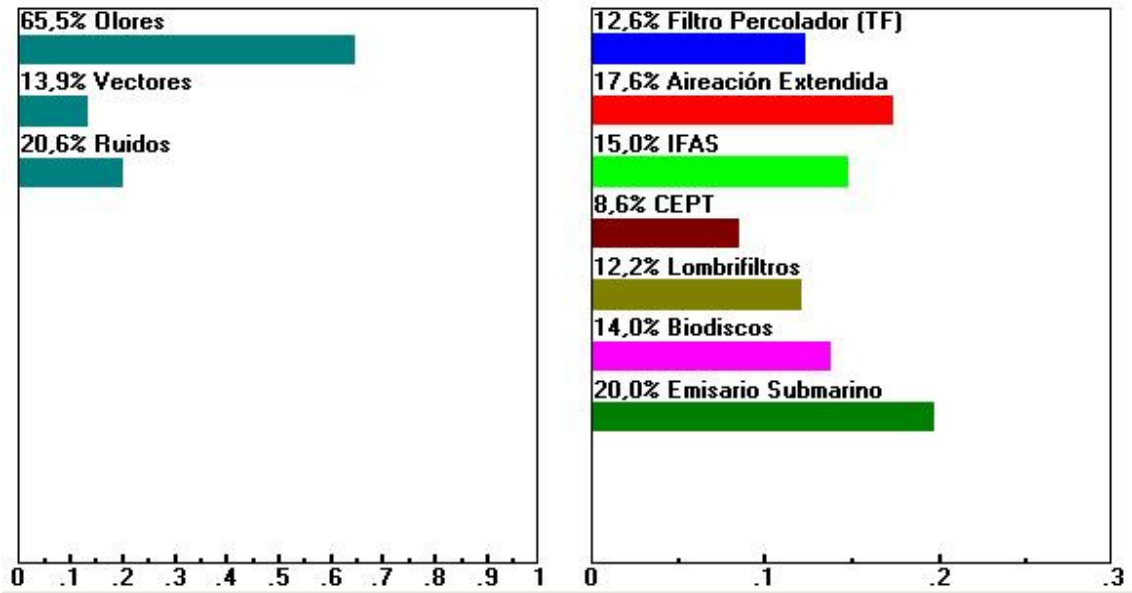


Figura A.1 Riesgos Ambientales

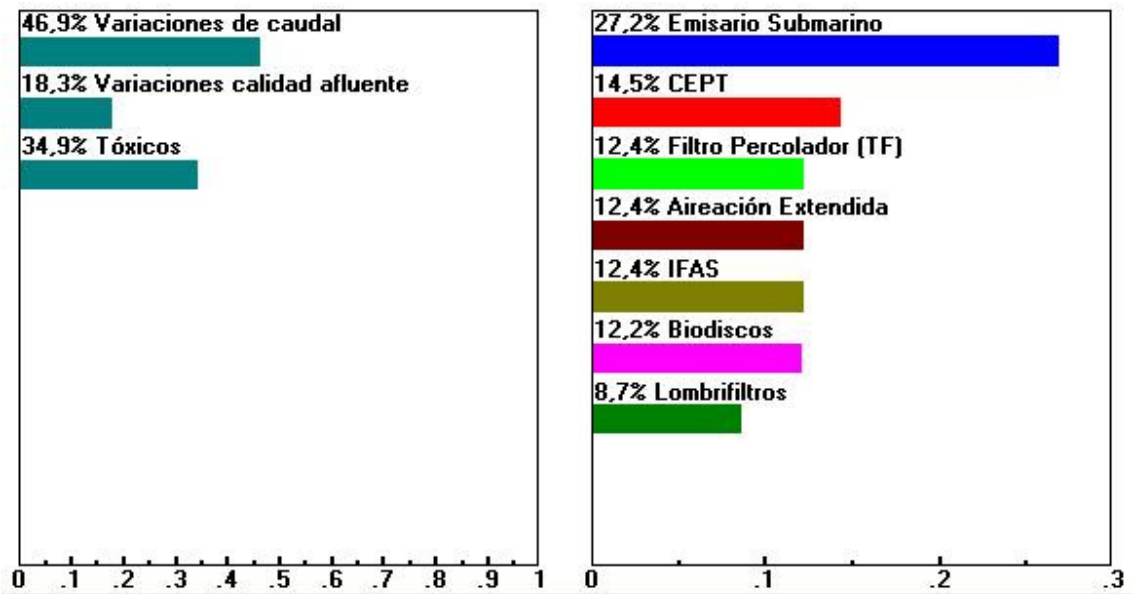


Figura A.2 Estabilidad del Proceso

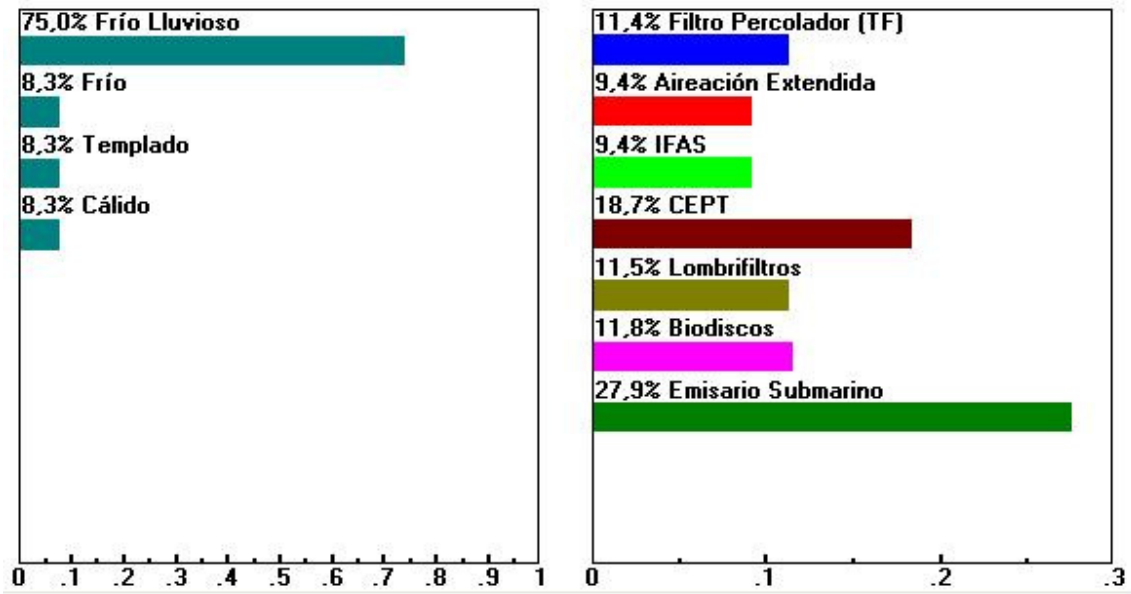


Figura A.3 Clima

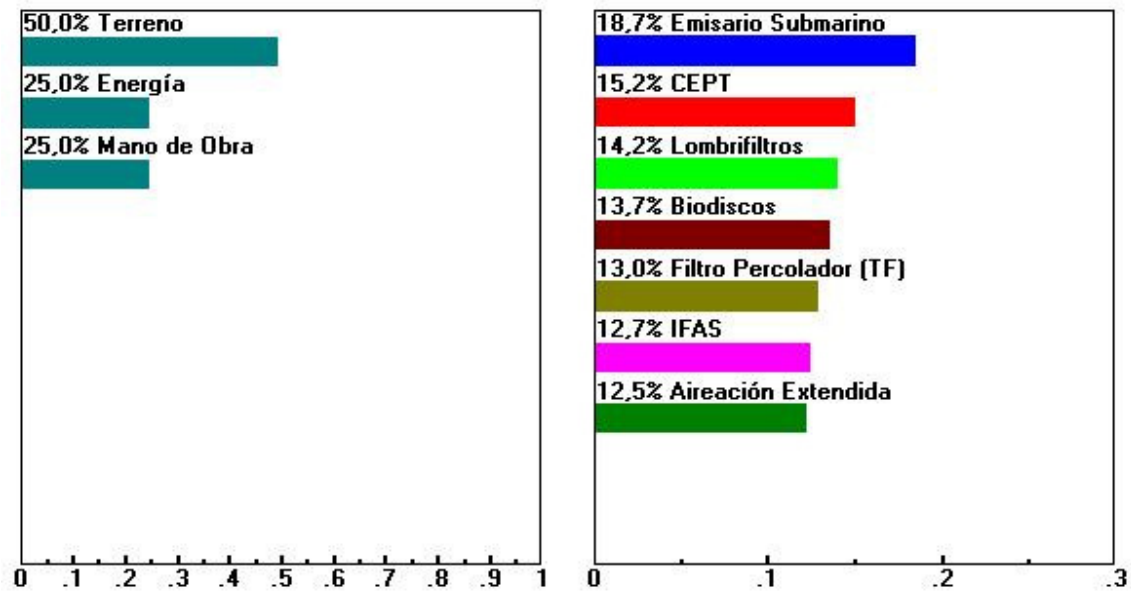


Figura A.4 Requerimientos



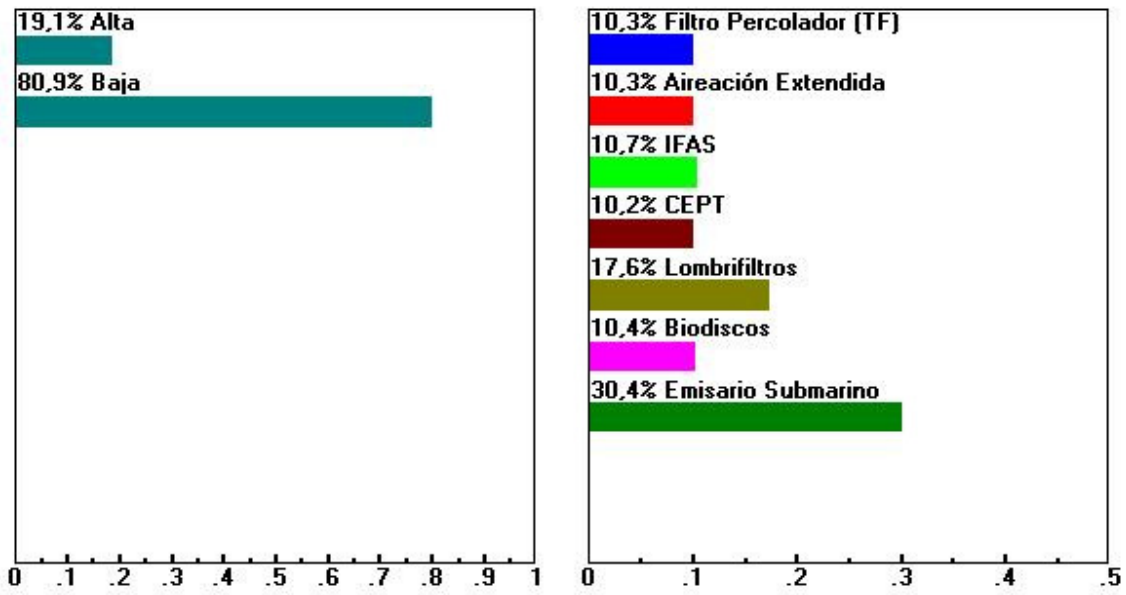


Figura A.5 Generación de Lodos

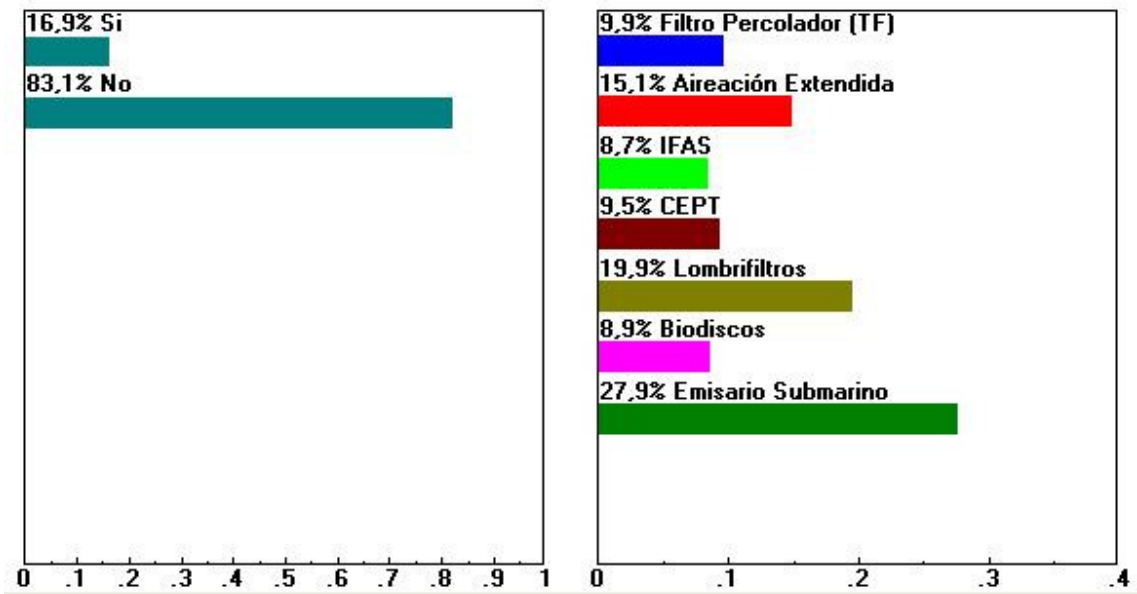


Figura A.6 Tratamiento de Lodos

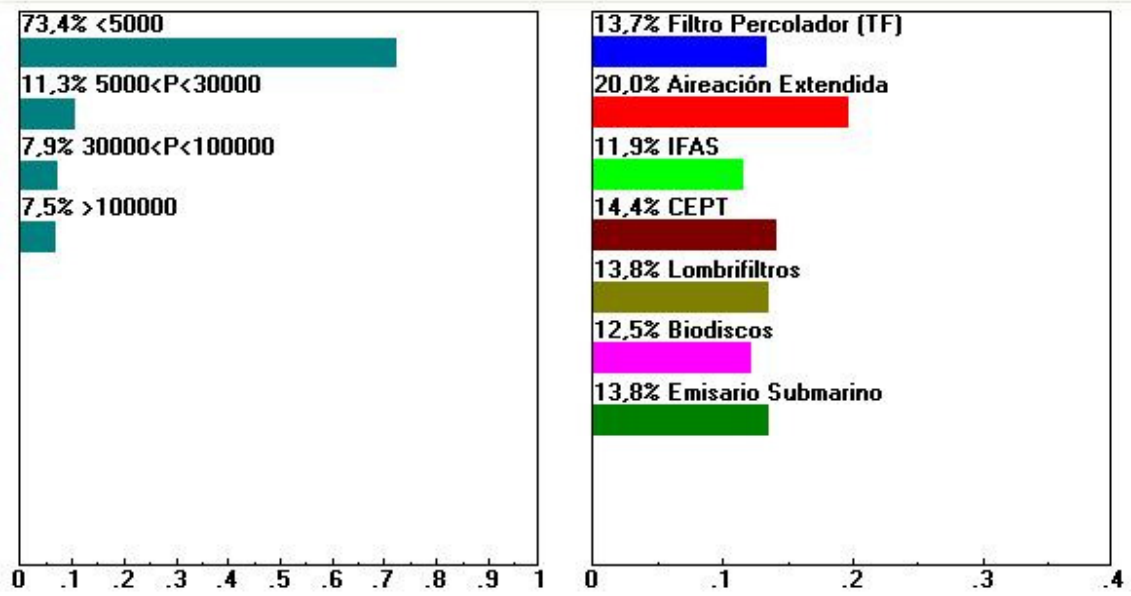


Figura A.7 Población

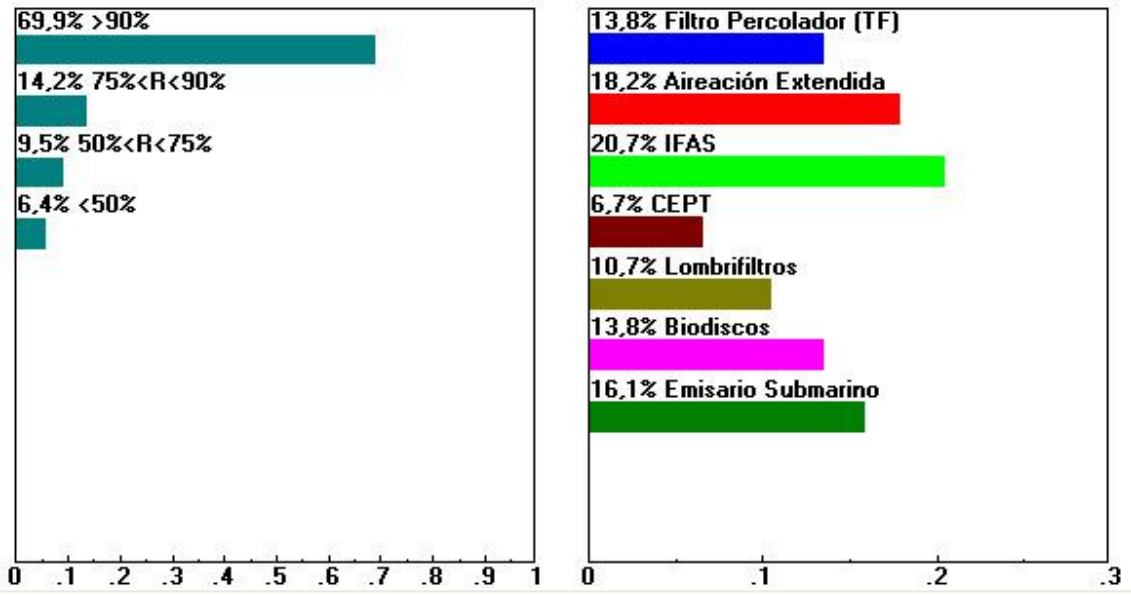


Figura A.8 Remoción de DBO

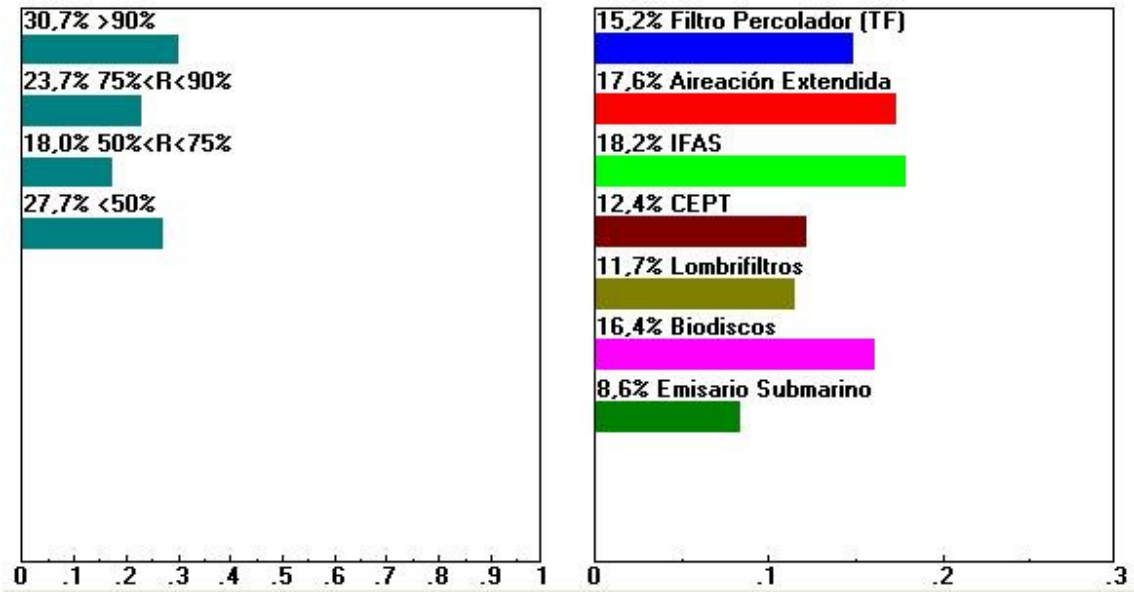


Figura A.9 Remoción de Nutrientes

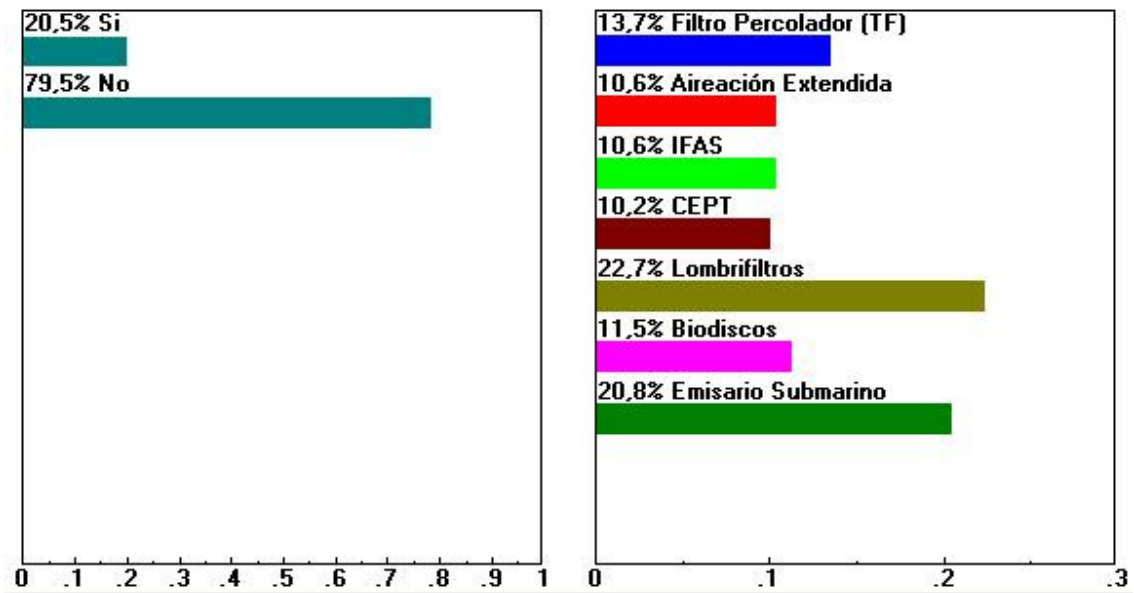


Figura A.10 Cercanía y Accesibilidad

**Anexo B: Cálculos de Valor Actual Neto y Costo Anual equivalente**

**Tabla B.1 VAN y CAE Lombrifiltros**

<b>Costos Año UF\$</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Inversión	6124						612					612					612				
Mantenimiento y operación		1503	1532	1562	1591	1621	1651	1680	1710	1739	1769	1798	1827	1857	1886	1916	1945	1975	2004	2034	2063
<b>SUMA TOTAL</b>	<b>6124</b>	<b>1503</b>	<b>1532</b>	<b>1562</b>	<b>1591</b>	<b>1621</b>	<b>2263</b>	<b>1680</b>	<b>1710</b>	<b>1739</b>	<b>1769</b>	<b>2410</b>	<b>1827</b>	<b>1857</b>	<b>1886</b>	<b>1916</b>	<b>2558</b>	<b>1975</b>	<b>2004</b>	<b>2034</b>	<b>2063</b>
<b>VAN (10%)</b>	<b>19.316</b>																				
<b>CAE (10%)</b>	<b>2.540</b>																				

**Tabla B.2 VAN y CAE Emisarios Submarinos**

<b>Costos Año UF\$</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Inversión	20863						2086					2086					2086				
Mantenimiento y operación		939	958	976	995	1013	1032	1050	1068	1087	1105	1124	1142	1161	1179	1198	1216	1234	1253	1271	1290
<b>SUMA TOTAL</b>	<b>20863</b>	<b>939</b>	<b>958</b>	<b>976</b>	<b>995</b>	<b>1013</b>	<b>3118</b>	<b>1050</b>	<b>1068</b>	<b>1087</b>	<b>1105</b>	<b>3210</b>	<b>1142</b>	<b>1161</b>	<b>1179</b>	<b>1198</b>	<b>3302</b>	<b>1234</b>	<b>1253</b>	<b>1271</b>	<b>1290</b>
<b>VAN (10%)</b>	<b>29.313</b>																				
<b>CAE (10%)</b>	<b>3.854</b>																				

**Tabla B.3 VAN y CAE Aireación Extendida**

<b>Costos Año U\$</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
inversión	12114						1211					1211					1211				
mantención y operación		2067	2107	2148	2188	2229	2269	2310	2351	2391	2432	2472	2512	2553	2594	2635	2675	2715	2756	2796	2837
<b>TOTAL</b>	<b>12114</b>	<b>2067</b>	<b>2107</b>	<b>2148</b>	<b>2188</b>	<b>2229</b>	<b>3481</b>	<b>2310</b>	<b>2351</b>	<b>2391</b>	<b>2432</b>	<b>3684</b>	<b>2512</b>	<b>2553</b>	<b>2594</b>	<b>2635</b>	<b>3886</b>	<b>2715</b>	<b>2756</b>	<b>2796</b>	<b>2837</b>

