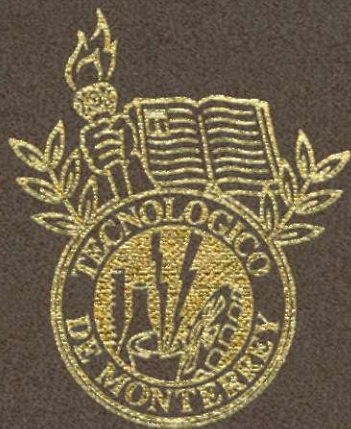


ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL DE UNA  
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES,  
A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL  
AGUA TRATADA



TESIS

MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS  
AMBIENTALES

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE MONTERREY

POR  
ANGÉLICA CANALES LÓPEZ

DICIEMBRE DE 2002

**ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES, A TRAVÉS DEL ANÁLISIS  
DEL CICLO DE VIDA DEL AGUA TRATADA**



**TESIS**

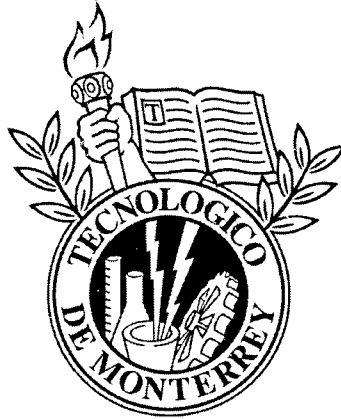
**MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS  
AMBIENTALES**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES  
DE MONTERREY**

**POR  
ANGÉLICA CANALES LÓPEZ**

**DICIEMBRE DE 2002**

**ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES, A TRAVÉS DEL ANÁLISIS  
DEL CICLO DE VIDA DEL AGUA TRATADA**



**POR  
ANGÉLICA CANALES LÓPEZ**

**TESIS**

**Presentada a la División de Graduados en  
Arquitectura, Ciencias, Ingenierías y Tecnologías**

**Este trabajo es Requisito Parcial para Obtener  
el Grado de**

**Maestra en Ciencias con Especialidad en Sistemas Ambientales**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES  
DE MONTERREY**

**DICIEMBRE DE 2002**



## **DEDICATORIA**

### **A mis papás**

Gracias por haberme dado la vida y por enseñarme a vivir.

Gracias por todo el amor que me han dado durante mi vida, en los momentos de logros y sobre todo en los momentos difíciles, porque siempre han estado conmigo y siempre estarán en mi corazón.

Gracias por darme el ejemplo de fuerza de vida, de amor a la naturaleza y respeto a la vida, porque son los pilares que me conducen cada día de mi vida. En mi vida vive parte de su ser, sus vivencias y sus creencias, y así formo parte de un maravilloso ser y universo, que están más allá de nuestra comprensión.

### **A Gerardo**

Gracias por compartir conmigo tu vida y darme tu amor, y por apoyarme en cada momento en el que he necesitado de tu comprensión y tu apoyo. Gracias por acompañarme en este maravilloso viaje llamado vida.

### **A Cannito**

Gracias por haberme entregado tu corazón y haberme enseñado lo que es la lealtad y el amor incondicional. Gracias por compartir conmigo todos esos momentos de alegría y de compañía cuando necesitaba que me animaran. Eres parte de mi ser y siempre te llevaré en mi corazón.

**Con todo mi amor  
Su Piquitas.**

## **RECONOCIMIENTOS**

La autora desea expresar su más sincera gratitud al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey por haberle brindado la oportunidad de superarse y haber alcanzado esta meta. En especial al MC. Roberto Dante Lavista, al Dr. Mario Yarto Ramírez y a la MC. Jessica Vicencio Andrade.

También expresa su gratitud a la empresa productora de papel por el apoyo brindado al proporcionarle los datos para la realización de este trabajo.

**ANGÉLICA CANALES LÓPEZ**

**DICIEMBRE DE 2002**

## RESUMEN

En este trabajo se presenta una investigación que se realizó para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Sistemas Ambientales. Éste se plantea en el marco global del desarrollo sostenible debido a que cualquier producto o servicio genera impactos sociales, ambientales y económicos.

En esta investigación se realizó un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) del agua que fue tratada durante el uso de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de una empresa productora de papel (EPP). Esta PTAR consiste en un módulo biológico y uno físico-químico. El objetivo de este análisis fue evaluar el impacto ambiental de la PTAR al medio a través de relacionar los posibles impactos con categorías ambientales y de obtener un Índice Global de Impacto Ambiental (IGIA) para así determinar si su uso es sostenible.

En México no existe suficiente información de eco-balances para realizar este ACV por lo que en este trabajo se propone una metodología particular para su desarrollo, para lo cual se desarrollará un algoritmo específico para resolver dichos eco-balances y obtener los Indicadores de Impacto Ambiental (IIA) y el IGIA del agua tratada.

Al aplicar la metodología propuesta se obtuvieron cuatro IIA (el de ahorro de agua, el de agotamiento de hidrocarburos, el de producción de lodos y el de cambio climático global) y un IGIA al considerar en los cuatro el mismo peso de importancia. Se aplicaron cuatro vectores más considerando diferentes pesos de importancia para cada IIA con lo que se obtuvieron otros cuatro IGIA.

Para evaluar el impacto de la PTAR al medio se tomó el análisis obtenido a través del vector 1, en el que el ahorro de agua tiene mayor importancia que los otros IIA. El valor que se obtuvo del IGIA fue  $-0.5503$ , lo cual indica que la PTAR durante el tratamiento del agua residual es sostenible para el medio.

Posteriormente se realizó un análisis de mejoras considerando la optimización de procesos en la que todos los lodos generados son reutilizados en otras actividades. El resultado obtenido del IGIA usando el vector de mayor importancia del ahorro de agua fue  $-0.6003$ , por lo que se puede decir que al implementar este proceso se obtendrá un mejor rendimiento de la PTAR. Los beneficios serán mayores que los impactos ambientales generados.

Dado que este estudio es una aproximación del ACV del agua tratada durante el uso de una PTAR con módulos biológico y físico-químico, se estima necesario realizar otras investigaciones en esta área para contar con datos de comparación.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	vi
<b>ÍNDICE</b> .....	vii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	x
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	xi
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. Definición del Problema</b> .....	2
1.1.1. Situación problemática.....	2
1.1.2. Definición del problema particular.....	4
<b>1.2. Objetivos</b> .....	6
1.2.1. Objetivo general.....	6
1.2.2. Objetivos modelo particular.....	6
<b>1.3. Hipótesis</b> .....	7
1.3.1. Preguntas de investigación.....	7
1.3.2. Hipótesis.....	7
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO</b> .....	9
<b>2.1. Análisis del ciclo de vida</b> .....	9
2.1.1. Antecedentes históricos del análisis del ciclo de vida.....	9
2.1.2. Generalidades del análisis del ciclo de vida.....	11
2.1.3. Aplicaciones del ACV.....	13
2.1.4. Metodologías de ACV.....	14
2.1.5. Bases de datos de inventarios para el ACV y programas disponibles...	20
2.1.6. Análisis de ciclo de vida en México.....	21
<b>2.2. Tratamiento de aguas residuales</b> .....	21
2.2.1. Operaciones unitarias.....	22
2.2.2. Procesos unitarios biológicos.....	23
2.2.3. Procesos unitarios químicos.....	23
2.2.4. Agentes floculantes.....	24
2.4.5. Problemas asociados a las plantas de tratamiento de aguas residuales.	27
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	30

<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN: DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EL ACV DEL AGUATRATADA EN LA PTAR.....</b>	<b>32</b>
<b>4.1. Definición del objetivo y el alcance.....</b>	<b>33</b>
4.1.1. Definición del motivo.....	33
4.1.2. Definición del objetivo.....	33
4.1.3. Definición de la unidad funcional.....	33
4.1.4. Destino de la información.....	33
4.1.5. Definición del alcance.....	33
<b>4.2. Análisis del inventario.....</b>	<b>34</b>
4.2.1. Componentes del producto.....	34
4.2.2. Árbol de procesos.....	34
4.2.3. Recolección de datos.....	34
4.2.4. Procesamiento de datos.....	36
<b>4.3. Análisis de los impactos.....</b>	<b>37</b>
4.3.1. Categorías ambientales.....	37
4.3.2. Indicadores de Impacto Ambiental.....	40
4.3.3. Índice Global de Impacto Ambiental.....	51
<b>4.4. Desarrollo del algoritmo.....</b>	<b>51</b>
<b>4.5. Interpretación.....</b>	<b>55</b>
<b>4.6. Análisis de mejoras.....</b>	<b>55</b>
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA DE ACV.....</b>	<b>56</b>
<b>5.1. Definición del objetivo y el alcance.....</b>	<b>56</b>
5.1.1. Definición del motivo.....	56
5.1.2. Definición del objetivo.....	56
5.1.3. Definición de la unidad funcional.....	56
5.1.4. Destino de la información.....	56
5.1.5. Definición del alcance.....	57
<b>5.2. Análisis del inventario.....</b>	<b>57</b>
5.2.1. Componentes del producto.....	57
5.2.2. Árbol de procesos.....	57
5.2.3. Recolección de datos.....	57
5.2.4. Procesamiento de datos.....	71
<b>5.3. Análisis de los impactos.....</b>	<b>81</b>
5.3.1. Categorías ambientales.....	81
5.3.2. Indicadores de Impacto Ambiental e Índice Global de Impacto Ambiental.....	81
<b>5.4. Resultados del análisis de mejoras.....</b>	<b>84</b>
<b>5.5. Comentarios e interpretación.....</b>	<b>86</b>



<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>90</b>
<b>6.1. Conclusiones.....</b>	<b>90</b>
<b>6.2. Recomendaciones.....</b>	<b>91</b>
<b>APÉNDICE 1. INFORMACIÓN SOBRE EL ACV.....</b>	<b>92</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>105</b>
<b>VITA.....</b>	<b>xii</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Productos analizados en los estudios de ACV.....	10
Figura 2.2.	Países en los cuales fueron realizados los ACV.....	10
Figura 2.3.	El concepto de ciclo de vida.....	12
Figura 2.4.	Etapas del ciclo de vida de un producto que pueden ser Consideradas en un ACV.....	17
Figura 2.5.	Estructura principal de un monómero de acrilamida.....	25
Figura 2.6.	Polímeros de acrilamida.....	25
Figura 2.7.	Estructura principal de una poliamina.....	26
Figura 2.8.	Amina de Mannich cuaternaria.....	27
Figura 4.1.	Metodología propuesta para realizar el ACV del agua tratada en la PTAR.....	32
Figura 4.2.	Estructura general de un ecobalance.....	35
Figura 4.3.	Diagrama del ciclo de vida general de la energía eléctrica.....	38
Figura 4.4.	Esquema de una central termoeléctrica tipo vapor.....	39
Figura 5.1.	Árbol de procesos del ciclo de vida del agua tratada de la PTAR.....	58
Figura 5.2.	Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de aguas residuales.....	60
Figura 5.3.	Parámetros de calidad del agua al entrar al módulo físico-químico.....	63
Figura 5.4.	Parámetros de calidad del agua al salir del módulo físico-químico.....	64
Figura 5.5.	Parámetros de calidad del agua al entrar al módulo biológico.....	65
Figura 5.6.	Parámetros de calidad del módulo biológico.....	66
Figura 5.7.	Parámetros de calidad del agua al salir del clarificador.....	67
Figura 5.8.	Parámetros de calidad del tanque de lodos.....	68
Figura 5.9.	Parámetros de calidad del drenado de prensas.....	69
Figura 5.10.	Estructura del monómero principal de la poli(acrilamida).....	71
Figura 5.11.	Estructura del monómero principal de una poliamina cuaternaria de Mannich.....	72
Figura 5.12.	Estructura molecular de la urea.....	73
Figura 5.13.	Estructura molecular del ácido fosfórico.....	74
Figura 5.14.	Comparación de valores de DBO <sub>5</sub> de entrada y salida de la PTAR.....	75
Figura 5.15.	Comparación de datos estandarizados de la DBO <sub>5</sub> de entrada y salida.....	77
Figura 5.16.	Indicadores de Impacto Ambiental e Índice Global de Impacto Ambiental del ACV del agua tratada por la PTAR.....	82
Figura 5.17.	Indicadores de Impacto Ambiental e Índice Global de Impacto del ACV del agua tratada por la PTAR en el análisis de mejoras.....	84

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1.	Poliaminas.....	27
Tabla 4.1.	Componentes del producto.....	34
Tabla 4.2.	Matriz MED.....	36
Tabla 4.3.	Procesos de generación de energía eléctrica y su capacidad proporcionada.....	38
Tabla 4.4.	Porcentaje de energía proveniente de diferentes tipos de combustibles fósiles.....	41
Tabla 4.5.	Cantidad de carbón producido por cada MJ generado por los diferentes tipos de combustibles fósiles.....	42
Tabla 5.1.	Componentes y materias auxiliares para el tratamiento del agua residual	57
Tabla 5.2.	Datos de calidad del agua residual al entrar al módulo físico-químico.....	63
Tabla 5.3.	Datos de calidad del agua residual al salir del módulo físico-químico.....	64
Tabla 5.4.	Datos de calidad del agua residual al entrar al módulo biológico.....	65
Tabla 5.5.	Datos de otros parámetros de calidad del módulo biológico.....	66
Tabla 5.6.	Datos de calidad del agua residual al salir del clarificador.....	67
Tabla 5.7.	Datos de calidad del tanque de lodos.....	68
Tabla 5.8.	Datos de calidad del drenado de prensas.....	69
Tabla 5.9.	Resultados matriz MED.....	70
Tabla 5.10.	Incrementos del monómero de la poliacrilamida.....	72
Tabla 5.11.	Incrementos del monómero de la amina cuaternaria.....	73
Tabla 5.12.	Incrementos de la urea.....	73
Tabla 5.13.	Energía de formación del ácido fosfórico.....	74
Tabla 5.14.	Datos de entrada y salida de DBO <sub>5</sub> de la PTAR.....	75
Tabla 5.15.	Datos de la estadística descriptiva.....	76
Tabla 5.16.	Datos estandarizados de los valores de DBO <sub>5</sub> de entrada y salida de la PTAR.....	77
Tabla 5.17.	Variables de entrada y eliminadas.....	78
Tabla 5.18.	Datos estadísticos de la ANOVA.....	78
Tabla 5.19.	Resumen del modelo estadístico.....	79
Tabla 5.20.	Tabla de coeficientes del modelo estadístico.....	80
Tabla 5.21.	Resultados finales del algoritmo numérico.....	81
Tabla 5.22.	Vectores de ponderación utilizados para la evaluación del IGIA.....	83
Tabla 5.23.	Pesos atribuidos a cada indicador para los 4 vectores y el IGIA correspondiente a cada caso.....	83
Tabla 5.24.	Resultados finales del algoritmo numérico para el análisis de mejoras.....	84
Tabla 5.25.	Vectores de ponderación utilizados para la evaluación del IGIA en el análisis de mejoras.....	85
Tabla 5.26.	Pesos atribuidos a cada indicador para los 4 vectores y el IGIA correspondiente a cada caso en el análisis de mejoras.....	85

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

Uno de los principales recursos naturales para la humanidad es el agua. Actualmente el crecimiento de la población ejerce mayor presión sobre este recurso, en comparación a la que se había ejercido durante toda la historia. Las actividades humanas generan aguas residuales, las cuales son dirigidas en el mejor de los casos a una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), aunque en muchos casos son vertidas a cuerpos receptores sin ningún tratamiento previo.

Se estima que estas PTARs generan impactos ambientales, sociales y económicos al medio por lo que se debe definir si el uso de la misma es sostenible. Para ello, la producción más limpia cuenta con diversas herramientas que permiten identificar las políticas de mejoramiento de las empresas, instituciones u organizaciones para alcanzar su sostenibilidad.

El diagnóstico ambiental del uso de la PTAR es la base para identificar tales políticas, diagnóstico que puede efectuarse a través de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que ofrece una estructura que integra todos los impactos ambientales de un producto o proceso, relacionándolos con problemas ambientales específicos. Esta relación abre la posibilidad de interpretar el desempeño ambiental de la unidad analizada de forma integral, en este caso el agua tratada en la PTAR. Por medio de la estructura del ACV se puede obtener cuantitativamente una medida para analizar el perfil ambiental del uso de la misma (van Hoof, 2002).

Para cualquier organización es fundamental conocer y desarrollar políticas ambientales que le permitan enfrentar los costos y disminuir los riesgos que sus servicios, procesos o productos le pueda causar al medio ambiente y a la sociedad. A su vez, es importante aprovechar las oportunidades y ventajas competitivas generadas por el creciente interés hacia un mejor ambiente.

Por lo anterior, este trabajo es importante ya que servirá para identificar las áreas de oportunidad en el manejo de los residuos generados en una empresa que son tratados en su PTAR, así como para definir un Índice Global de Impacto Ambiental (IGIA) que podrá ser utilizado en investigaciones posteriores para comparar la sostenibilidad de diferentes alternativas de manejo de dichos residuos. También servirá para generar una base de datos de eco-balances específicos para México que puedan ser usados en otros ACV a través del algoritmo particular que se desarrolle en este trabajo.

Actualmente los programas comerciales que han sido desarrollados para diversos ACV presentan eco-balances con estándares europeos por lo que es importante estandarizar un procedimiento de acuerdo a las necesidades de México y a los productos específicos de las instituciones o empresas que requieran este tipo de análisis.

Para resolver este problema se propuso una metodología particular de ACV para el agua tratada durante el uso de la PTAR, así como se generó un algoritmo numérico particular para ésta.

## **1.1. Definición del problema.**

### **1.1.1. Situación problemática.**

El agua es un recurso renovable, sin embargo, actualmente se ha rebasado la capacidad del medio natural para renovarla y purificarla como consecuencia de la alta tasa de su utilización en la mayoría de las actividades humanas.

Debido a que el agua es un recurso que después de ser utilizado pierde su calidad inicial, es necesario darle un tratamiento final para mejorar su calidad y poder descargarla a los sistemas municipales de alcantarillado, o bien para ser usada nuevamente en diversas actividades o procesos. Para alcanzar estos niveles de purificación del agua es necesario emplear PTARs de diversos tipos de acuerdo al nivel de purificación que se requiera, por lo que pueden contar con varios módulos de tratamiento, entre ellos el biológico, el físico-químico, el de osmosis inversa y el de rayos ultravioleta. Por esto, en nuestro país y en el resto del mundo hay un sin número de PTARs, cuyos impactos ambientales y sociales se desconocen y que nos afectan a nivel local, regional y global.

En general se considera que una PTAR por si misma es un beneficio a la comunidad, sin embargo, cualquier tipo de proceso involucra el uso de energía que genera impactos adversos, ya sea directa o indirectamente (ej.: durante la generación de la energía eléctrica en las termoeléctricas), por lo que se puede considerar que cualquier PTAR produce impactos ambientales, sociales y económicos al medio, desde el momento en que son procuradas las materias primas para su construcción, así como durante el desarrollo de su servicio y hasta terminar el tiempo de su vida útil.

Por esta razón es importante definir si el tratamiento del agua residual durante el uso de la PTAR es sostenible (hay más beneficios generados que impactos adversos). De no ser así, es necesario buscar alternativas de manejo de los residuos, como lo es el cambio de tecnología o de buenas prácticas para eficientizar el uso del agua y evitar el agotamiento

del recurso y la generación de impactos adversos al medio ambiente, social y económico, de tal manera que disminuyan los costos implicados.

Para analizar el impacto ambiental de cualquier producto o servicio se ha desarrollado una herramienta conocida como Análisis de Ciclo de Vida (ACV), con la cual se pueden identificar los impactos que genera dicho producto o servicio a través de diversos indicadores de impacto ambiental, que son específicos para cada una de las categorías ambientales que produce cada producto.

El análisis de cada categoría ambiental implica una investigación de cada uno de sus componentes y procesos involucrados, desde la generación de insumos para dicho producto hasta su fin de vida, por lo que los estudios se vuelven más detallados en función del número de categorías consideradas.

Entre las categorías se pueden mencionar la de deterioro de recursos bióticos, la de deterioro de recursos abióticos, la de efecto de invernadero, la de deterioro de la capa de ozono, la de acidificación, la de eutroficación, la de smog de verano, la de smog de invierno, la de toxicidad humana, la de ecotoxicidad, la de olores, la de calentamiento global y la de contaminación biológica del agua (van Hoof, 2002). Es importante mencionar, que cada producto o proceso que se analice, puede abarcar diferentes categorías ambientales de acuerdo al alcance de ese ACV en particular.

El ACV es usado para comparar los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida de los productos. Se conforma básicamente de tres componentes: (1) un inventario de residuos, emisiones y el uso de materia prima y energía asociados con el ACV entero del producto, desde la materia prima de extracción hasta su disposición; (2) una evaluación de impactos ambientales asociados con los residuos, emisiones y el uso de materia prima y energía; y (3) un análisis de mejora en el cual son analizados los mecanismos para reducir los impactos ambientales adversos encontrados (Allen, 1997; Hofstetter, 1998; Masters, 1998)

A pesar de las limitaciones que pudiera tener el ACV, es una herramienta efectiva para detectar áreas de oportunidad en el proceso, uso y disposición de un producto, así como para comparar alternativas, procesos y productos para definir cuál es la alternativa que produce menos impactos ambientales, con la cual los costos económicos, sociales y ambientales son reducidos (La Grega, 1997).



### 1.1.2. Definición del problema particular.

Existen antecedentes de que algunas PTARs durante su uso generan impactos al medio, en este trabajo se hace la suposición de que durante el uso de la PTAR de una empresa productora de papel (EPP) se producen impactos directos e indirectos, positivos y negativos al medio, cuya magnitud se desconoce. Uno de los impactos adversos directos es la generación de CO<sub>2</sub> producido por las bacterias, y entre los impactos adversos indirectos está la generación de CO<sub>2</sub> producido por el uso de energía eléctrica y el agotamiento de recursos naturales.

Estos impactos pueden generar diversos problemas ambientales, sociales y económicos al medio en función de su magnitud a nivel local, regional o global. Por lo anterior, es importante conocer y cuantificar dichos impactos adversos y los beneficios generados por la PTAR para determinar si ésta es sostenible, así como en un futuro identificar qué alternativas pudieren ser más eficientes para el manejo de las aguas residuales generadas en la empresa.

Para cuantificar dichos impactos es necesario generar un Índice Global de Impacto Ambiental (IGIA) a través de la solución de los eco-balances que intervienen en el proceso de tratamiento de la PTAR. Actualmente en México no existe una estandarización específica de dichos eco-balances para un ACV del tratamiento de aguas residuales en las PTARs, por lo que es primordial crear un algoritmo que resuelva dichos eco-balances, para contar con una base de datos estandarizados en México, para ACV posteriores y para facilitar la realización de los mismos, así como para realizar simulaciones en diversos escenarios de distintos tipos de PTARs y poder tomar decisiones sostenibles para la comunidad.

Por lo anterior, en este trabajo se desarrolló un procedimiento a través de un algoritmo numérico para la PTAR en cuestión, el cual pueda ser usado en México en cualquier otra PTAR que cuente cuando menos con los mismos procesos en los módulos biológico y físico-químico. Es importante mencionar que este algoritmo podrá ser usado también en otros países realizando la estandarización para el mismo. Dado el alcance de esta investigación, esto último no es objetivo de este estudio.

También es relevante mencionar que en cualquier ACV se pueden analizar diferentes categorías ambientales de impacto que produce cada producto. Para resolver específicamente el caso de estudio que aquí se propone, se analizarán únicamente las categorías de cambio climático global, cuyo indicador es la producción de CO<sub>2</sub> generado directa e indirectamente durante el proceso de tratamiento de las aguas, y el indicador de agotamiento de recursos naturales.

Trabajar sobre el indicador de cambio global fue importante porque la generación de gases que tienen un efecto de invernadero en la atmósfera terrestre (Mardones, 2000) traen consigo un sin número de impactos negativos significativos en el medio ambiente, social y económico a nivel local y mundial. Por esta razón fue importante obtener un indicador de la producción de CO<sub>2</sub> por el tratamiento de la PTAR.

También fue importante analizar la categoría de agotamiento de recursos naturales para detectar y proponer alternativas para el manejo de los recursos y para prevenir o minimizar la generación de aguas residuales, para poder mantener la sostenibilidad del sistema en el que vivimos y así garantizar nuestra supervivencia y la de nuestro planeta.

## **1.2. Objetivos.**

### **1.2.1. Objetivo General.**

Proponer una metodología particular para el Análisis de Ciclo de Vida del agua tratada en los módulos biológico y físico-químico de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de una empresa productora de papel, para evaluar su impacto ambiental a través de un algoritmo que resuelva los eco-balances que intervienen en dicha PTAR y que pueda ser utilizado en otras PTAR en México con las mismas características.

### **1.2.2. Objetivos del Modelo Particular.**

- 1.2.2.1. Proponer una metodología específica para evaluar el impacto ambiental de una PTAR en México, que consiste de los módulos biológico y físico-químico a partir del ciclo de vida del agua tratada.
- 1.2.2.2. Analizar el ciclo de vida del agua tratada en la PTAR para obtener indicadores de impacto ambiental de las categorías de cambio climático global (CO<sub>2</sub>) y de agotamiento de recursos naturales (hidrocarburos, lodos y agua).
- 1.2.2.3. Analizar el ciclo de vida del agua residual sin ser tratada en la PTAR para obtener indicadores de impacto ambiental de las categorías de cambio climático global (CO<sub>2</sub>) y de agotamiento de recursos naturales (hidrocarburos, lodos y agua).
- 1.2.2.4. Obtener un índice global de impacto ambiental de la PTAR con el fin de determinar si es sostenible.
- 1.2.2.5. Crear un algoritmo numérico para analizar el ciclo de vida del agua tratada durante el uso de la PTAR de acuerdo a la metodología específica propuesta, el cual servirá como un modelo preliminar para cualquier PTAR en México que consista de los módulos biológico y físico-químico con los mismos procesos que la PTAR estudiada.

### **1.3. Hipótesis.**

#### **1.3.1. Preguntas de Investigación.**

- 1.3.1.1. ¿La PTAR de la EPP genera impactos adversos a la comunidad?
- 1.3.1.2. ¿Cómo es posible relacionar los impactos adversos y los beneficios de la PTAR de la EPP?
- 1.3.1.3. ¿El uso de la PTAR de la EPP es sostenible para la comunidad?
- 1.3.1.4. ¿Cómo se puede mejorar la relación beneficios/impactos adversos de la PTAR de la EPP?
- 1.3.1.5. ¿Cómo se puede evaluar fácilmente el impacto ambiental de la PTAR de la EPP?
- 1.3.1.6. ¿Cómo puede generarse un modelo general para un ACV de cualquier PTAR que consista de módulos biológico y físico-químico?

#### **1.3.2. Hipótesis.**

**H<sub>1</sub>: El uso de la PTAR de la EPP es generadora de impactos adversos al medio, los cuales son compensados por los beneficios generados por la misma.**

H<sub>0</sub>: El uso de la PTAR de la EPP es generadora de impactos adversos a la sociedad, los cuales no son compensados por los beneficios generados por la misma

**H<sub>2</sub>: La metodología particular propuesta del ACV del agua tratada durante el uso de la PTAR de la EPP permitirá relacionar sus impactos adversos y beneficios a través de la obtención de un Índice Global de Impacto Ambiental.**

H<sub>0</sub>: La metodología particular propuesta del ACV del agua tratada durante el uso de la PTAR de la EPP no permitirá relacionar sus impactos adversos y beneficios a través de la obtención de un Índice Global de Impacto Ambiental.

**H<sub>3</sub>: Se puede evaluar el impacto ambiental de la PTAR en la EPP a partir del desarrollo de un algoritmo particular de ACV del agua tratada, el cual podrá ser utilizado en cualquier PTAR en México que consista, cuando menos, de los mismos procesos en los módulos biológico y físico-químico.**

H<sub>0</sub>: No se puede evaluar el impacto ambiental de la PTAR en la EPP a partir del desarrollo de un algoritmo particular de ACV del agua tratada, ni podrá ser utilizado en cualquier PTAR en México que consista, cuando menos, de los mismos procesos en los módulos biológico y físico-químico.

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

#### **2.1. Análisis del Ciclo de Vida.**

##### **2.1.1. Antecedentes históricos del Análisis del Ciclo de Vida.**

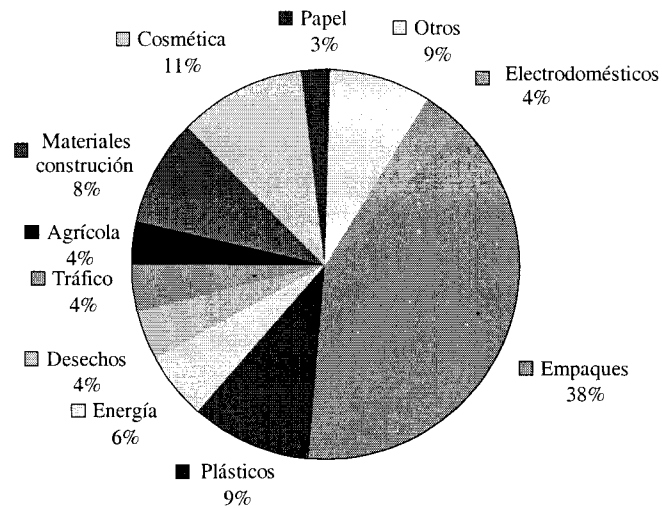
El término Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es relativamente nuevo. El primer estudio fue desarrollado por Coca-Cola en 1969 (Ecobilan, 2002) con el objetivo de analizar los empaques de sus refrescos. A pesar que el ACV se ha tomado en cuenta con especial atención desde el principio de los años 90; los primeros desarrollos metodológicos datan de los años 60. Los primeros trabajos de esta época se enfocaron básicamente en la demanda de energía en los sistemas productivos y fueron llevados a cabo por compañías privadas que no publicaron sus resultados. Estos estudios relacionados con la energía recibieron mayor atención a partir de la crisis energética de los años 70. El término utilizado en ese momento fue “Análisis de Perfil Ambiental y de Recursos” (REPA) (Will, 1996).

En Europa, los primeros estudios de comparación ecológica de productos, que en ese entonces eran llamados eco-balances, fueron realizados en 1974 en Suiza. En 1984 la agencia Suiza de Protección al Medio Ambiente publicó un boletín de eco-balances para materiales de empaque. Este estudio presentó una propuesta para una metodología que evaluaba las ventajas y desventajas de los diferentes sistemas de empaque (Detzel, 1996).

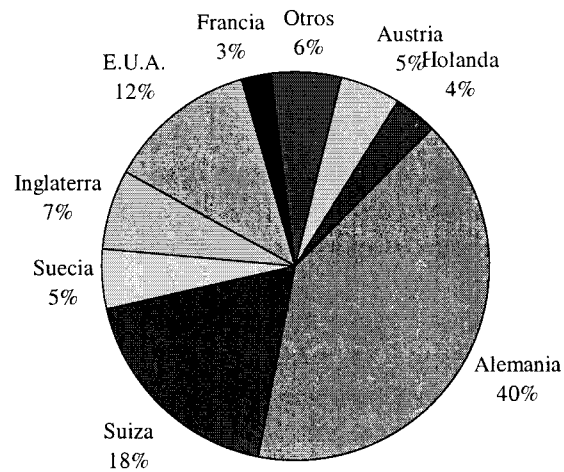
Los eco-balances dan una estructura para el cálculo de los datos dentro de la metodología de ACV. En cada fase del ciclo de vida hay una balanza que pesa las “entradas y salidas” de materiales, energía y emisiones. No todos los componentes tienen la misma unidad o contribución, pero a través de los eco-balances se elabora una estructura para inventariar, calcular y comparar datos (Detzel, 1996).

Desde entonces y hasta 1994 se publicaron mas de 3000 estudios (Will, 1996). En las figuras 2.1. y 2.2. se muestran los productos para los que se realizaron dichos estudios, así como los países en donde se desarrollaron.





**Figura 2.1. Productos analizados en los estudios de ACV.**  
(Tomado de Will, 1996).



**Figura 2.2. Países en los cuales fueron realizados los ACV.**  
(Tomado de Will, 1996).

En la segunda mitad de los años 80, el ACV se había convertido en una herramienta competitiva muy usada en las áreas de producción y mercadeo y de las empresas. Como resultado se llevaron a cabo varios estudios de ACV sobre las mismas áreas pero generaron resultados contradictorios. Este evento, puso en contraste la confiabilidad de la

aproximación del ACV, lo que generó una discusión intensiva sobre esta metodología (Detzel, 1996).

El primer taller de metodología de ACV fue iniciado en 1990 por la Sociedad de Química y Toxicología Ambiental (SETAC) en Vermont (SETAC, 2002), seguido por un taller de esta misma organización en 1991 en Leiden Holanda (Leiden, 2002). El ACV se consolidó como un tema de investigación en el Centrum Van Milieukunde y en las universidades. La universidad de Leiden se convirtió en una de las instituciones líder en la metodología de ACV. Dentro de las actividades que realizó el SETAC, se puede destacar la creación de un grupo de apoyo de miembros industriales llamado SPOLD. En general, el desarrollo de la metodología ocurrió de manera paralela en diferentes países (Detzel, 1996).

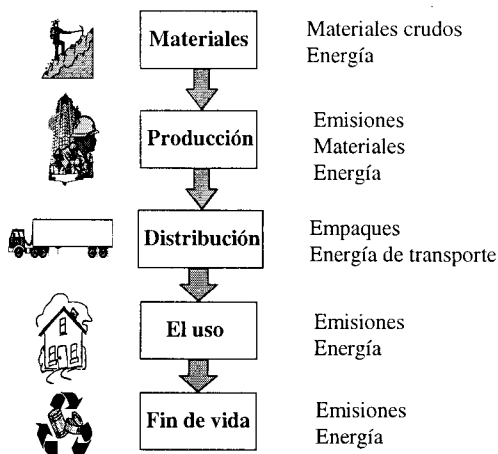
El SETAC tomó la iniciativa de crear un “código de práctica” para estandarizar los conceptos involucrados en un ACV (SETAC,1993). Después de varios años de trabajo continuo, en mayo de 1997 pasó la norma ISO 14040: Análisis del Ciclo de Vida, Principios y Aplicaciones, la cual fue aprobada por 60 países. El ACV es ahora la herramienta de análisis ambiental más utilizada que posee un estándar internacional (Detzel, 1996).

### **2.1.2. Generalidades del Análisis del Ciclo de Vida.**

El ACV, también conocido como evaluación “desde la cuna a la tumba”, proporciona un enfoque sistémico para cuantificar el uso de recursos utilizados y residuos liberados al ambiente (agua, aire, suelo), de productos, procesos y servicios (van Hoof, 2002).

Los impactos ambientales de los productos y procesos además de estar relacionados con varios problemas ambientales, también ocurren en diferentes fases de su ciclo de vida. Por ejemplo, una silla producida a partir de madera de un bosque primario tropical no tiene el mismo perfil ambiental que el de una silla a partir de madera de una plantación. Igualmente, los procesos de manufactura influyen en el impacto ambiental. El impacto ambiental durante el uso puede ser distinto de un producto a otro, como es el caso de los automóviles. El consumo de gasolina de una camioneta es mayor al de un carro pequeño. De igual forma el tratamiento al final del ciclo de vida puede ser muy diferente de un producto a otro.

El impacto ambiental de un producto o servicio específico es la suma de todos los impactos que ocurran durante todo el ciclo de vida del mismo (van Hoof, 2002). En la figura 2.3. se muestran las fases del ciclo de vida de un producto en general. En el punto 2.1.4. se presenta la figura 2.4. en la que se muestra la estructura de las fases del ciclo de vida propuesto por la EPA (2001).



**Figura 2.3. El concepto de Ciclo de Vida (van Hoof, 2002).**

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida ofrece una estructura que integra todos los impactos ambientales ocurridos a lo largo del ciclo de vida y los relaciona con problemas ambientales específicos. Con el enfoque “desde la cuna hasta la tumba”, se define el producto con todas las actividades necesarias para procesar, usar y disponer del producto y no sólo de los componentes individuales. El sistema de producción se considera como un conjunto complejo de distintos procesos y subsistemas como: el subsistema de producción de la materia prima, los subsistemas de la cadena de producción, de uso y de desecho, y el subsistema de reciclaje. Al determinar todas las entradas y salidas de todos los procesos de Ciclo de Vida, se obtienen los impactos para ser relacionados con los problemas ambientales definidos en la metodología y así abrir la posibilidad de interpretar el desempeño ambiental de la unidad analizada de manera integral (van Hoof, 2002).

Las aplicaciones del ACV son: (1) desarrollar una evaluación sistemática de las consecuencias ambientales asociadas a un producto, (2) analizar los intercambios ambientales asociados con uno o varios productos/servicios específicos para ayudar a los tomadores de decisiones (estado, sociedad, etc.) a aceptar una acción planeada, (3) cuantificar las emisiones a la atmósfera, agua y suelo en relación con cada etapa del ciclo de vida, (4) identificar los impactos ambientales significativos en las diferentes etapas del ciclo de vida y del medio ambiente, (5) evaluar los impactos sobre los humanos y el medio ambiente por los efectos de la materia prima usada y lo emitido al medio natural, local, regional o global, (6) comparar los impactos de productos o servicios e (7) identificar los impactos en áreas ambientales específicas (EPA, 2001).

Existen diversas organizaciones e instituciones en el mundo que realizan estudios de ACV de productos y servicios, a la vez que llevan a cabo investigaciones sobre la metodología, como el International Journal of Life Cycle Assessment. Entre las investigaciones realizadas se encuentran las de Werner (2002), Hellweg (2002), Brentrup (2002), Fukushima (2002), Cirot (2002), Jungmeier (2002).

Entre otras revistas científicas relacionadas con el ACV se encuentra The Journal of Industrial Ecology del Massachusetts Institute of Technology, en la que podemos encontrar artículos como los de S epala (2001) sobre los marcos del an alisis de decisi on para el ACV. Tambi en se pueden mencionar las revistas científicas de Environmental Impact Assessment Review, Environmental Management and Health y el Journal of Cleaner Production.

En el Apéndice 1 se presentan referencias y sitios en Internet que contienen información sobre el ACV.

### **2.1.3. Aplicaciones del ACV.**

El ACV es principalmente una herramienta de planeación. Proporciona direcciones concretas y prioridades sobre cómo implementar acciones y alternativas de mejoramiento (van Hoof, 2002). Las compa as, instituciones gubernamentales, organizaciones industriales y académicas pueden incorporar el desempeño ambiental en sus procesos de toma de decisiones (EPA, 2002) para identificar prioridades y enfocar políticas.

El ACV es una herramienta que sirve para identificar los “puntos débiles” en el ciclo de vida de los productos y servicios para poder comparar diferentes alternativas y también para mejorar la compatibilidad ambiental de los productos y servicios en beneficio de la sociedad (SETAC, 2002).

El ACV permite realizar una comparación de los impactos ambientales de diferentes productos con la misma función, la comparación de un producto con una referencia o estándar, la identificación de estrategias de mejoramiento ambiental (identificación de la fase dominante con respecto al impacto ambiental), la selección de materiales para el diseño de nuevos productos, el establecimiento de direcciones estratégicas para nuevos desarrollos técnicos y para la identificación de estrategias de mercado (van Hoof, 2002).

Es importante reconocer que el ACV únicamente proporciona información acerca de los impactos ambientales. Para la toma de decisiones se debe conjuntar esta información con la proporcionada por el an alisis de otros aspectos como costos, conveniencia y seguridad del consumidor. Por ejemplo, decisiones acerca de cómo desarrollar, implementar y producir políticas gubernamentales que afectan a productores y consumidores; así cómo las Organizaciones No Gubernamentales (ONGs) pueden producir lineamientos de sensibilización ambiental (van Hoof, 1997).

### **2.1.4. Metodologías de ACV.**

**SETAC** (Meier, 1997).

De acuerdo al grupo de trabajo de estudio de casos (CSWG) del Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), la sociedad está más consiente de que los productos y servicios contribuyen de cierta forma a efectos adversos en los recursos y en la calidad del medio ambiente. Estos efectos pueden ocurrir en cualquier etapa del ciclo de vida de un producto, desde la adquisición de las materias primas, la manufactura, la distribución, el consumo y la disposición final del producto.

El grupo CSWG definió los cuatro pasos de un ACV de la siguiente forma:

1. Definición del objetivo y alcance:
  - Definir el objetivo(s).
  - Definir el alcance.
  - Definir la unidad funcional.
  - Evaluación de la calidad de la información.
  - Definir las consideraciones metodológicas.
2. Análisis del inventario:
  - Definir los límites del sistema.
  - Desarrollar un diagrama de flujo.
  - Identificación y recolección de la información.
  - Asignación de los procesos.
  - Manejo de la energía
3. Evaluación de los impactos:
  - Clasificación (selección de las categorías ambientales).
  - Caracterización (puede llevarse a cabo una normalización).
  - Evaluación.
4. Interpretación:
  - Identificar los aspectos significativos.
  - Emitir conclusiones.

En la metodología general establecida por la SETAC se incluyen también otros aspectos que deben considerarse en un ACV. Al inicio del ACV se incluye un apartado de información general del proyecto de estudio y al final de las cuatro etapas descritas

anteriormente se puede incluir una evaluación de mejoras si el ACV es usado para comparar productos o mejoras a un mismo producto. También, pueden incluirse un resumen del reporte, una revisión externa, las experiencias de los ejecutantes del ACV y un apartado de terminología.

Desde que el “Code of Practice” (CoP) fue emitido en 1993 se han desarrollado muchos estudios, por lo que el CSWG desarrolló una lista de evaluación para un ACV como una herramienta para evaluar los casos de estudio reportados y para identificar las diferencias de manera estructurada y estandarizada.

### **ISO 14040** (ISO, 2002).

Las series de estándares de ISO 14040 a la 14043 describen el método de diferentes opciones para el desarrollo de un ACV, el cual será confiable. Las series son las siguientes:

1. ISO 14040 Objetivo y alcance (1997):

- Definir el objetivo(s) del proyecto.
- Definir la unidad funcional.
- Definir los límites del sistema.
- Requerimientos de la calidad de la información.
- Definir las consideraciones.

2. ISO 14041 Análisis del inventario del Ciclo de Vida (1998):

- Construcción del árbol del ciclo.
- Recolección de la información.
- Uso de la información.
- Aplicación de las consideraciones, tomando en cuenta los coproductos.
- Procesamiento del inventario.
- Identificación de la contribución de flujos a las diferentes etapas del ciclo de vida e identificación de las etapas más representativas.

3. ISO 14042 Evaluación de impactos del Ciclo de Vida (2000):

- Selección de las categorías ambientales.
- Determinación de los flujos que serán tomados en cuenta para la evaluación de impactos.
- Determinación de su contribución a los impactos.
- Cálculo de los impactos.
- Identificación de los principales flujos que contribuyen a los impactos.



#### 4. ISO 14043 Interpretación del Ciclo de Vida (2000):

- Identificación de los puntos fuertes y débiles de los casos estudiados.
- Alcanzar los objetivos establecidos en la primer etapa.
- Validación de la solución si es que es necesario.
- Detalle de las aplicaciones y límites del estudio.
- Posibles estudios posteriores.

#### **EPA (EPA, 2001).**

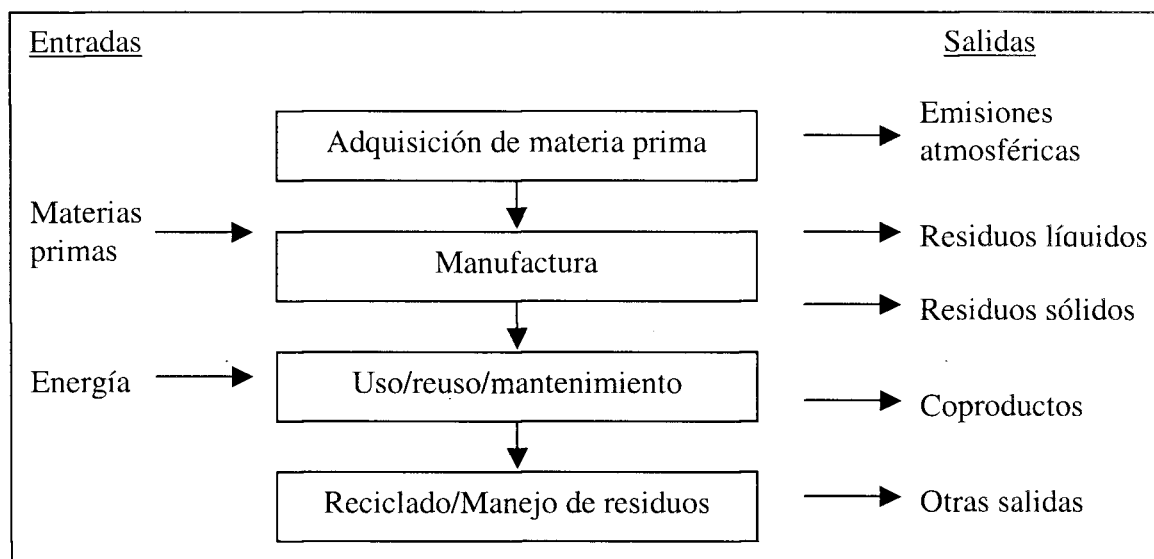
El ACV evalúa todas las etapas de la vida de un producto desde la perspectiva de que son interdependientes, es decir, que una depende de la anterior. El ACV estima los impactos ambientales acumulativos de todas las etapas del ciclo de vida del producto en el cual se incluyen impactos que no son considerados por los análisis tradicionales.

El ACV es una técnica que sirve para evaluar aspectos e impactos potenciales asociados con un producto, proceso o servicio levantando un inventario de entradas de energía y materiales y de las salidas al medio ambiente, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados con las entradas y salidas detectadas, e interpretando los resultados para ayudar a tomar decisiones informadas.

En la figura 2.4. se muestran las posibles etapas del ciclo de vida que pueden ser consideradas en un ACV, así como las entradas y salidas comúnmente medidas.

De acuerdo a la EPA, el proceso del ACV es un acercamiento sistemático y en etapas que consiste de cuatro componentes: la definición del objetivo, el análisis del inventario, la evaluación de impactos y la interpretación.

En la definición del objetivo se establece y describe el producto, proceso o actividad. Se determina el contexto en el que la evaluación se realizará y se define el alcance de la misma.



**Figura 2.4. Etapas del ciclo de vida de un producto que pueden ser consideradas en un ACV (tomado de EPA 2001).**

En el análisis del inventario se identifica y cuantifica la energía, el agua y materiales que se emplean y las salidas al ambiente, como las emisiones a la atmósfera, la disposición de residuos sólidos y las descargas de aguas residuales.

En la evaluación de impactos se evalúan los efectos de la energía, del agua y de los materiales usados y las salidas ambientales sobre la salud humana y ambiental.

Durante la interpretación se evalúan los resultados del análisis del inventario y de la evaluación de los impactos para seleccionar otros productos, procesos o servicios con un claro entendimiento de las consideraciones tomadas para la obtención de resultados.

A continuación se describe de forma general los pasos contemplados por la EPA para desarrollar un ACV.

#### 1. Definición del objetivo y alcance:

- Definir el objetivo(s) del proyecto.
- Determinar que tipo de información se requiere informar a los encargados de toma de decisiones.
- Determinar como será organizada la información y como serán presentados los resultados.
- Determinar que será o no incluido en el ACV.
- Determinar la veracidad de la información.
- Determinar como se desarrollará el trabajo.

## 2. Inventario del Ciclo de Vida:

- Desarrollar un diagrama de flujo.
- Desarrollar un plan de recolección de información.
- Colectar la información.
- Evaluar y reportar los resultados.

## 3. Evaluación de impactos del Ciclo de Vida:

- Selección y definición de las categorías ambientales.
- Clasificación (asignación de los resultados del inventario a las categorías).
- Caracterización (evaluar el impacto en cada categoría).
- Normalización (expresar los impactos de cada categoría de tal forma que puedan ser comparados entre sí).
- Agrupación (designar que indicador es local, regional o global).
- Ponderación (determinar cuales son los impactos más significativos).
- Evaluación y reporte de los resultados de la evaluación de impacto del ACV.

## 4. Interpretación de los resultados:

- Identificar los aspectos significativos.
- Evaluar la consistencia de los datos.
- Emitir conclusiones y recomendaciones.

### **Bart van Hoof** (van Hoof, 2002).

El concepto de Análisis de Ciclo de Vida ofrece una estructura que integra todos los impactos ambientales de una industria y los relaciona con problemas ambientales específicos. Utilizando el concepto “desde la cuna hasta la tumba”, el análisis no se encuentra en los productos, procesos productivos o patrones de consumo de manera aislada sino que estudia el sistema del producto que se amplía a todos los procesos y actividades que conforman su ciclo de vida y su efecto sobre los problemas ambientales.

Relacionar los impactos cuantificables de los procesos y productos con problemas ambientales requiere en general determinar sus orígenes, de esta forma se obtiene el Ciclo de Vida completo del sistema. A través del cálculo de las entradas y salidas de todos los procesos de ciclo de vida, se obtienen los impactos. Relacionar cada uno de éstos con los problemas ambientales definidos en la metodología, abre la posibilidad de interpretar el desempeño ambiental de la unidad analizada de una manera relevante.

La estructura de la metodología de ACV consiste básicamente de dos partes. El inventario de ciclo de vida en donde se calculan todos los impactos durante el ciclo de vida y el modelo de asignación en donde se relacionan los impactos con los problemas ambientales para obtener un eco-indicador. Con esta metodología de asignación se relaciona primero el impacto con un factor de contribución al problema ambiental definido en la metodología y en la segunda parte del modelo de asignación se prioriza entre los problemas ambientales (van Hoof, 1997).

En general un Análisis de Ciclo de Vida completa consiste de 5 pasos:

1. Definición del objetivo y alcance:
  - Definir el objetivo.
  - Definir el motivo.
  - Destino de los resultados.
  - Definir la unidad funcional.
  - Definir el alcance del estudio.
2. Inventario:
  - Definición de los límites.
  - Desarrollar el árbol de procesos.
  - Recolección de información.
  - Procesamiento de inventario.
3. Análisis de impactos:
  - Clasificación (Categorías ambientales).
  - Caracterización.
  - Evaluación.
4. Interpretación:
  - Identificar los aspectos significativos.
5. Definición de mejoramientos:
  - Reporte y análisis de mejoras (Análisis de sensibilidad).

### **2.1.5. Bases de datos de inventarios para el ACV y programas disponibles.**

Muchas aplicaciones del ACV se han visto entorpecidas debido a la inaccesibilidad de datos de eco-balances necesarios en los inventarios (Curran, 2000). Mucha de esa información es comercial y generalmente las bases de datos están relacionadas con herramientas particulares de programas los cuales deben ser comprados. Otros datos son producidos por sectores industriales específicos.

Entre las más conocidas herramientas para la evaluación del ACV se encuentran los siguientes programas y bases de datos:

1. ECO-it 1.0 de Pré Consulting.
2. SimaPro 4 de Pré Consulting.
3. SimaPro 5 de Pré Consulting.
4. Eco-indicator 99 de Pré Consulting.
5. EcoManager 1.0 de Franklin Associates, Ltd.
6. LCAiT 2.0 de Franklin Associates, Ltd.
7. EcoPro 1.5 de EMPA.
8. GaBi 3.0 de IPTS.
9. IDEMAT de Delf Univ. Of Technology.
10. LCAD de Battelle/DOE.
11. TEAMM 2.0 de Ecobalance.
12. Humberto 3.0 de IFEU.
13. ATHENA 1.2 de ATHENA.
14. BEES 2.0 del National Institute for Standards and Technology.
15. The Boustead Model 4.4. de Boustead Consulting.
16. CMCLA del Centre of Environmental Science.
17. EcoScan 3.0 de TNO Industrial Technology.
18. EDIP PC-tool de Danish EPA.
19. SPOLD Data Exchange Software de The Society for Promotion of Life-cycle Assessment.

En EPA (2002) se puede obtener mayor información sobre el ACV y programas del mismo.

### **2.1.6. Análisis de Ciclo de Vida en México.**

En México no se ha desarrollado el ACV como en otros países. El 94% de los estudios a nivel mundial corresponden a ACV desarrollados en EUA, Inglaterra, Suiza, Suecia, y Alemania entre otros países europeos. En México, la empresa 3M está desarrollando una investigación sobre el ACV de algunos de sus productos y la Mesa de Prevención de la Contaminación del Comité de Cooperación para la Protección Ambiental está promoviendo la capacitación de diversos sectores en la aplicación del Análisis del Ciclo de Vida. Actualmente han empezado a desarrollar un ACV para la industria cementera y de cultivo.

Para el caso del ACV para una planta de tratamiento de aguas residuales, no se cuenta con información suficiente a nivel mundial ni en México. El Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), Campus Ciudad de México realizó un trabajo sobre el ACV para su PTAR en donde se analizó el módulo biológico de la misma (Dante, 2000).

En el ITESM, Campus Estado de México, se están generando bases de inventarios de algunos giros industriales. Sin embargo, es el primer intento en la materia. Por ello es importante la investigación realizada en el presente trabajo ya que generó datos específicos para una PTAR, además de que se desarrolló un algoritmo numérico para el ACV del agua residual tratada en una PTAR en particular en México.

Por otra parte, en la Ciudad de México se fundó en 1995 el Centro Mexicano para la Producción más Limpia en el Instituto Politécnico Nacional. Sin embargo, no se ha realizado ningún estudio respecto a un ACV, aún cuando este tipo de análisis es una herramienta de la producción más limpia.

## **2.2. Tratamiento de Aguas Residuales.**

En todas las comunidades se producen tanto residuos sólidos como líquidos. Estos últimos son conocidos como aguas residuales. Esta agua es una combinación de residuos líquidos de residencias, instituciones y establecimientos comerciales e industriales, los cuales pueden ir acompañados con agua del subsuelo, agua superficial y agua pluvial. Cuando el agua no es tratada y se acumula, la descomposición de la materia orgánica que contiene produce condiciones insalubres, incluyendo la generación de gases y olores. Además las aguas no tratadas contienen numerosos microorganismos patógenos que habitan en el tracto intestinal de los humanos. Las aguas residuales también contienen nutrientes, los cuales pueden estimular el crecimiento de plantas acuáticas y pueden



contener compuestos tóxicos o compuestos potencialmente mutagénicos o carcinógenos. Por estas razones es importante el tratamiento, reuso o dispersión de las aguas para proteger la salud pública y el medio ambiente (Tchobanoglous, 2003).

El tratamiento de las aguas residuales puede efectuarse por medio de diferentes métodos, los cuales implican operaciones y procesos unitarios. Estas operaciones y procesos en conjunto proveen diferentes niveles de tratamiento conocidos como preliminar, primario, primario avanzado, secundario (con o sin remoción de nutrientes) y avanzado o terciario (Tchobanoglous, 2003).

En el tratamiento preliminar, los sólidos gruesos como objetos de gran tamaño, andrajos y arenas son removidos para evitar causar daños al equipo. En el tratamiento primario, se lleva a cabo la sedimentación (proceso físico), usada para remover los materiales flotantes que pueden ser depositados en el fondo. Para el tratamiento primario avanzado es necesario agregar químicos para aumentar la remoción de sólidos suspendidos y, en menor proporción, los sólidos disueltos. En el tratamiento secundario se usan procesos biológicos y químicos para remover la mayoría de la materia orgánica. En el tratamiento avanzado se emplean combinaciones de operaciones y procesos adicionales para remover sólidos suspendidos y otros constituyentes, que no son significativamente reducidos por un tratamiento secundario convencional (Tchobanoglous, 2003).

### **2.2.1. Operaciones unitarias.**

Las operaciones usadas para el tratamiento de aguas residuales, en las cuales los cambios son llevados a cabo a través de la aplicación de fuerzas físicas, se conocen como operaciones unitarias físicas. Debido a que éstas fueron derivadas de la observación física del mundo han sido los primeros métodos de tratamiento usados. Actualmente, los sistemas de tratamiento de aguas residuales son en su mayoría operaciones unitarias físicas (Tchobanoglous, 2003).

Las principales operaciones unitarias usadas en el tratamiento de aguas residuales incluyen: el cribado o desbrozo, mezclado y floculación, remoción de arenas, la sedimentación, separación acelerada por gravedad, la flotación, la neutralización y homogenización, clarificación, transferencia de oxígeno y aireación y por último, la volatilización de compuestos orgánicos (Ramalho, 1991; Tchobanoglous, 2003).

### **2.2.2. Proceso unitarios biológicos.**

Casi todas las aguas residuales que contienen constituyentes biodegradables pueden ser tratados biológicamente. El objetivo de los procesos unitarios biológicos es transformar constituyentes biodegradables disueltos y particulados en productos aceptables, capturar e incorporar sólidos coloidales suspendidos y no sedimentables en un flóculo biológico o biocapa, transformar o remover nutrientes como el nitrógeno y el fósforo y, en algunas ocasiones, remover constituyentes y compuestos orgánicos traza (Tchobanoglous, 2003).

### **2.2.3. Procesos unitarios químicos.**

Los procesos usados para el tratamiento de aguas residuales, en los cuales los cambios son llevados a cabo por reacciones químicas, son conocidos como procesos unitarios químicos. Los principales procesos de este tipo incluyen la coagulación química, la precipitación química, la desinfección química, la oxidación química, los procesos de oxidación avanzados, el intercambio iónico, la neutralización química y la estabilización (Tchobanoglous, 2003).

La selección de los procesos de tratamiento de aguas residuales o la serie de procesos de tratamiento, dependen de un cierto número de factores como: las características del agua residual (DBO, materia en suspensión, pH, productos tóxicos), la calidad del efluente de salida requerido, costo y disponibilidad de terrenos y la consideración de las futuras ampliaciones o la previsión de límites de calidad de vertido más estrictos, que necesiten el diseño de tratamientos más sofisticados en el futuro (Ramalho, 1991).

Para tratar las aguas residuales, generalmente los procesos químicos unitarios son usados en conjunto con las operaciones físicas unitarias y con los procesos biológicos unitarios (Tchobanoglous, 2003).

#### 2.2.4. Agentes floculantes.

La floculación es el proceso por el cual las partículas suspendidas en un líquido forma agregados estables llamados flóculos. La floculación genera una suspensión no homogénea en una macroescala, la cual puede ser total o parcialmente separada en sus fases sólida y líquida usando diferentes medios (Kroschwitz, 1998).

Los agentes floculantes son aditivos químicos que aumentan el grado de floculación de la suspensión. Actúan a nivel molecular sobre las superficies de las partículas para reducir las fuerzas de repulsión entre ellas y aumentar las fuerzas de atracción (Kroschwitz, 1998).

Existen varios usos de los agentes floculantes (Kroschwitz, 1998):

1. Remoción de pequeñas cantidades de partículas orgánicas e inorgánicas de la superficie del agua, previo a su uso como agua potable o de procesos industriales.
2. Concentración de sólidos orgánicos en aguas residuales industriales o municipales para producir un lodo con un volumen mínimo y bajo contenido de agua para su disposición final.
3. Remoción de materia inorgánica de los efluentes residuales generados en procesos mineros.
4. Separación de las fases líquida y sólida en operaciones de tipo de intercambio iónico, como en las superficies cromadas.

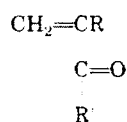
La composición química de los floculantes se clasifica en orgánicos e inorgánicos. Los grupos de los inorgánicos y algunos floculantes orgánicos catiónicos altamente cargados son algunas veces referidos como coagulantes.

Los floculantes inorgánicos son sales de metales di o trivalentes solubles en agua, entre los cuales están el aluminio, el hierro y el sodio (Kroschwitz, 1998). Algunos de los floculantes inorgánicos son:  $\text{NaAlO}_2$ ,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{FeClSO}_4$ ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (Elvers, 1996).

Por otra parte, los floculantes orgánicos pueden ser productos naturales (proteína albúmina) o polímeros sintéticos. Por el interés de este estudio se profundiza en los polímeros sintéticos. Entre los polímeros sintéticos se puede mencionar a los polímeros acrílicos; de acrilamidas y sus derivados; las poliaminas y sus derivados; y los polímeros de alliaminas.

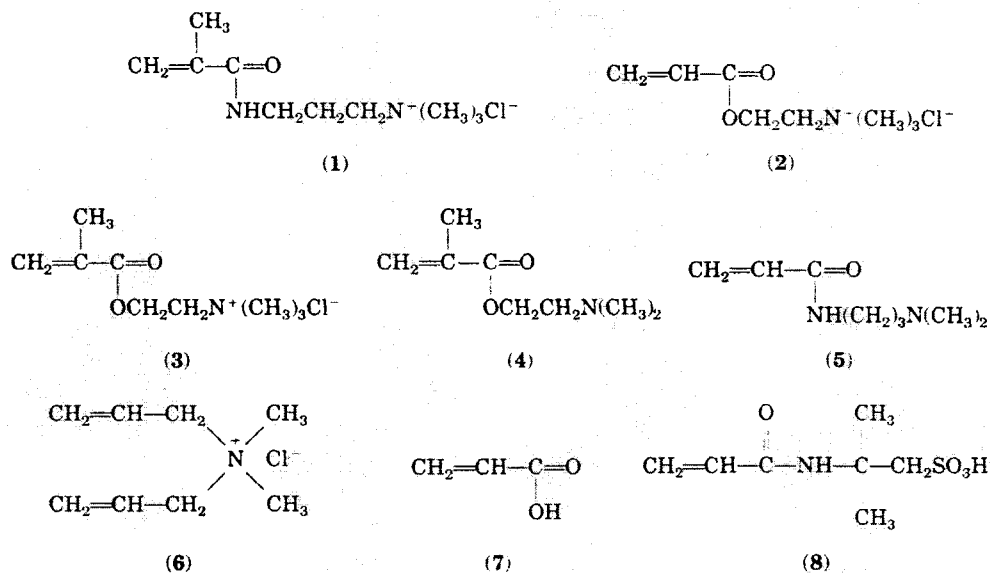
### 2.2.4.1. Polímeros de acrilamida.

Los polímeros de acrilamida están formados a partir de una polimerización de tipo radical libre de monómeros que contienen la estructura acrílica, donde R es -H o -CH<sub>3</sub> y R' es -NH<sub>2</sub> o una amida o un grupo alkoxy sustituido por un ester. En la figura 2.5. se muestra esta estructura.



**Figura 2.5. Estructura principal de un monómero de acrilamida.**  
(Tomado de Kroschwits, 1998).

El principal monómero es la acrilamida, donde R = H y R' = NH<sub>2</sub> son formados por la hidrólisis del acrilonitrilo. La mayoría de los floculantes basados en la acrilamida son copolímeros con monómeros acrílicos que contienen grupos funcionales cargados. En la Figura 2.6. se muestra algunos de los polímeros de la acrilamida.



**Figura 2.6. Polímeros de acrilamida.**  
(Tomado de Kroschwits, 1998).

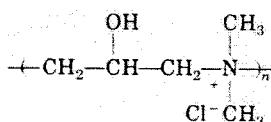
Los compuestos son: Cloruro de metacrilamidopropiltrimetilamonio (1), Cloruro de acrililoioxietiltrimetilamonio (2), Cloruro de metacrililoioxietiltrimetilamono (3), N,N-dimetilaminoetil metacrilato (4), N,N-dimetilaminopropilacrilamida (5),

Cloruro de diallidimetilamono (6), ácido acrílico y sus sales (7), y 2-acrilamido-2-ácido metilpropanosulfónico y sus sales (8).

El uso de los floculantes basados en la acrilamida se debe a que estos polímeros pueden fabricarse a escala comercial con pesos moleculares entre 10 y 15 millones, lo cual es mucho mayor que el de ningún producto natural. Además de lo anterior, sus cargas eléctricas en solución y su densidad de carga pueden variar en un amplio rango a través de la copolimerización de la acrilamida con una variedad de monómeros funcionales o por modificación química (Kroschwitz, 1998).

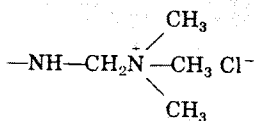
#### 2.2.4.2. Poliaminas.

Las poliaminas son polímeros condensados que contienen nitrógeno y son conformadas a partir de una gran variedad de rutas sintéticas. Las poliaminas comerciales son formadas en su mayoría por la reacción entre la epoclorohidrina y las aminas como la metilamina o la dimetilamina. En la figura 2.7. se muestra la estructura típica de una poliamina.



**Figura. 2.7. Estructura típica de una poliamina.**  
(Tomado de Kroschwits, 1998).

Las poliaminas también pueden ser formadas a partir de la reacción entre el dicloro etileno con aminas. Algunos de estos productos son formados como coproductos de la manufactura de las aminas. Existe otro tipo de poliamina, la polietileneimina, que se forma por varias rutas, de las cuales la más frecuente es la polimerización de la azidrina. Las poliaminas tienen un peso molecular considerablemente más bajo que los polímeros de la acrilamida. La carga de las poliaminas depende del pH del medio. Por otra parte, también pueden crear poliaminas cuaternarias para que su carga sea independiente del pH. En la figura 2.8. se muestra una amina de Mannich cuaternaria y en la tabla 2.1. se muestran algunas poliaminas (Kroschwitz, 1998).



**Figura 2.8. Amina de Mannich cuaternaria.**  
(Tomado de Kroschwits, 1998).

**Tabla 2.1. Poliaminas.**

Dietilenetriamina bis(2-amino-etil)amina	$(\text{H}_2\text{NCH}_2\text{CH}_2)_2\text{NH}$
Trietilenetramina bis(2-amino-etil)etilenediamina	$\text{H}_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{NH---CH}_2\text{CH}_2\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$
Tetraetilenepentamina	$\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH})_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$
Dipropilnetriamina 1-amino-3-(3-aminopropil)-aminopropano	$\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{NH}(\text{CH}_2)_3\text{NH}_2$
N-metildipropilnetriamina, 1-amino-3-N-metil-N-(3-aminopropil)-amino-propano	$\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{N}(\text{CH}_3)(\text{CH}_2)_3\text{NH}_2$
3-(2-aminoetil)-aminopropilamina, N-(2-aminoetil)-1,3-diaminopropano	$\text{H}_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{NH}(\text{CH}_2)_3\text{NH}_2$
N,N'-bis(3-aminopropil)-1,2-diaminoetano N,N'-bis(3-aminopropil)etilenediamina	$\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{NH}(\text{CH}_2)_3\text{NH}_2$

(Tomado de Elvers, 1996).

### 2.2.5. Problemas asociados a las PTAR.

En general las PTARs requieren poco mantenimiento, sin embargo, en muchas ocasiones no se les da el adecuado, lo cual resulta en un mal funcionamiento de las mismas. Estas fallas en los sistemas de las PTARs generan problemas ambientales localizados. Debido al incremento en el desarrollo de actividades y a que los sistemas se diseñan en un espacio cada vez más reducido, actualmente se presentan más incidentes que impactan adversamente el medio al generar contaminación del manto freático, áreas insalubres y en ocasiones problemas de salud a la comunidad. Para evitar fallas en los sistemas es necesario realizar inspecciones periódicas y un mantenimiento en dichas PTARs (Crites, 1998).

La mayoría de las fallas que generan problemas ambientales son ocasionadas en sistemas descentralizados localizados en la fuente de generación del agua residual. Las fallas se deben principalmente al alcanzar una sobrecapacidad del sistema de filtrado por no estar diseñado u operado adecuadamente para el flujo diario a tratar, al asolvamiento de los tanques debido a los lodos generados y los propios tanques sépticos, así como por fugas

de agua residual en diversas etapas del sistema. En cuanto a los sistemas de gran escala únicamente deben ser permitidos cuando exista una institución que sea responsable de su administración (Crites, 1998).

Cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales puede ser ambientalmente seguro y responsable, sólo si existe una supervisión y un mantenimiento adecuado. Al planear los nuevos desarrollos de sistemas de tratamiento de aguas residuales, es necesario considerar los conceptos ambientales de responsabilidad de diseño. El reuso del agua y el reciclado de los lodos generados debe ser incorporado a la administración del sistema de tratamiento de aguas residuales para asegurar que se proteja la calidad del medio ambiente y del agua (Crites, 1998).

El conocimiento científico sobre los sistemas de tratamiento de aguas residuales ha avanzado mucho gracias a la investigación de las características del agua, y sobre las técnicas para analizar los constituyentes específicos y su potencial sobre la salud y sus efectos ambientales (Tchobanoglous, 2003).

Muchos de los nuevos métodos de tratamiento han sido diseñados considerando la salud y el medio ambiente. Sin embargo, el desarrollo de tecnologías de tratamiento no ha avanzado tan rápido como la tecnología para detectar concentraciones cada vez menores de los contaminantes, por lo que se tienen sistemas de tratamiento que no pueden garantizar la remoción de dichos contaminantes (Tchobanoglous, 2003). Por esta razón las evaluaciones de los efectos sobre la salud y el medio ambiente de la comunidad han incrementado su importancia en la administración del manejo de aguas residuales.

La importancia de la calidad del agua ha aumentado debido a que se ha incrementado la cantidad de aguas residuales tratadas que son vertidas a cuerpos receptores (ríos, lagos, etc.), que después son usados como fuentes de agua para las actividades humanas. Por ejemplo, en zonas semiáridas de California, se están usando las aguas tratadas para recargar los mantos de las reservas de agua del subsuelo (Tchobanoglous, 2003).

Existen diversos puntos de vista dentro del ámbito científico en cuanto al uso directo de las aguas tratadas para consumo humano o en actividades que puedan afectar su salud. Algunos de los puntos que se debate son: (1) no se cuenta con suficiente información sobre los riesgos a la salud ocasionados por organismos microbianos patógenos y constituyentes químicos de las aguas tratadas, (2) se desconoce la naturaleza de constituyentes químicos o que no son identificados, de patógenos potenciales, así como de la efectividad de los procesos de tratamiento para la remoción de dichos organismos y químicos (Tchobanoglous, 2003).

Algunas sustancias encontradas en las aguas tratadas afectan el sistema endocrinológico de los vertebrados. Dichas sustancias son de especial interés ya que pueden imitar a las hormonas producidas por los vertebrados causando respuestas biológicas exageradas o bloqueando los efectos hormonales del cuerpo (Trussell, 2000, en Tchobanoglous, 2003). Estas sustancias pueden causar problemas en el desarrollo,

comportamiento y reproducción de una variedad de especies, como por ejemplo cáncer de mama o próstata (Roeder, 2000, en Tchobanoglous, 2003).

Otros problemas sobre la salud humana y el medio ambiente se relacionan con la liberación de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y contaminantes tóxicos atmosféricos (TACs) generados en las PTARs y la desinfección con cloro y la liberación de los coproductos de dicha desinfección. Los olores son uno de los aspectos ambientales más serios para la comunidad (Tchobanoglous, 2003).

Muchos residuos industriales contienen VOCs que pueden ser inflamables, tóxicos y olorosos y pueden contribuir al esmog fotoquímico y a la formación del ozono troposférico. Muchos TACs son descargados a la atmósfera y transportados hacia receptores en la localidad y hacia otras regiones (Tchobanoglous, 2003). También muchos efluentes que contienen residuos de cloro son tóxicos para la vida acuática y otros coproductos de la desinfección son carcinógenos potenciales que se forman al reaccionar con la materia orgánica.



## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

- 3.1.1. Realizar una visita de campo a la PTAR de la EPP en la cual se realizó la presente investigación, con el fin de obtener los datos de los procesos biológicos, químicos y físicos que se llevan a cabo en dicha PTAR, así como los parámetros de entrada y salida de calidad del agua y su uso o disposición final. También se obtendrán datos sobre el funcionamiento propio de la planta considerando sus requerimientos energéticos y de materiales.
- 3.1.2. Revisar y analizar cada uno de los modelos que se llevan a cabo durante el funcionamiento de la PTAR para poder integrar dicha información al algoritmo para dicha PTAR en lenguaje Matlab, con el cual se podrán obtener de forma rápida y precisa los valores de los indicadores ambientales de impacto ambiental y el índice global.
  - 3.1.2.1. Entender claramente cada uno de los procesos que se llevan a cabo en la PTAR para describir específicamente cada uno de ellos y poder identificarlos en la bibliografía.
  - 3.1.2.2. Revisar en los libros de plantas de tratamiento y de procesos físico-químicos cada uno de los procesos para establecer claramente los modelos que se desarrollan en cada proceso a un nivel matemático.
  - 3.1.2.3. Establecer cuales serán los eco-balances de materia y energía para cada proceso con el objetivo de desarrollarlos más adelante.
- 3.1.3. Analizar detalladamente las metodologías realizadas por diferentes autores en la aplicación del análisis del ciclo de vida de un producto, con el fin de definir la propuesta metodológica que se aplicará para análisis del ciclo de vida del agua tratada en la PTAR de la EPP.
- 3.1.4. Definir la propuesta metodológica particular del análisis del ciclo de vida para el agua tratada en la PTAR de la EPP a fin de aplicarla en la misma.
- 3.1.5. Aplicar la metodología propuesta del ciclo de vida del agua tratada en la PTAR de la EPP para obtener los valores de los eco-balances particulares de esta PTAR en México, y así obtener los indicadores ambientales por categorías ambientales y el Índice Global de Impacto Ambiental de la PTAR.

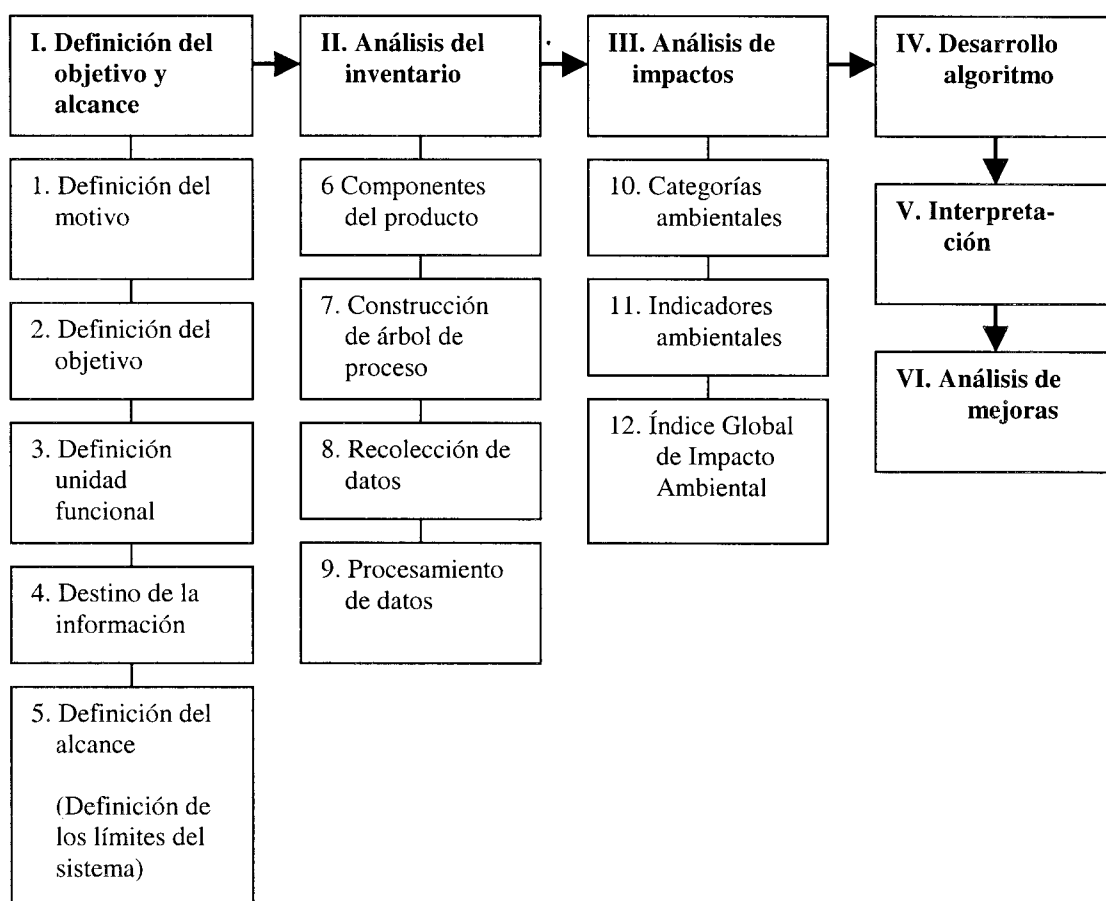
- 3.1.6. Desarrollar el algoritmo que defina particularmente el análisis del ciclo de vida del agua tratada en la PTAR de la EPP con el fin de utilizarlo para obtener fácil y con precisión los valores de indicadores ambientales y el Índice Global de Impacto Ambiental de la PTAR en estudio.

## CAPITULO 4

### RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN:

#### DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL AGUA TRATADA EN LA PTAR.

A continuación se presenta la metodología general propuesta para realizar el análisis del ciclo de vida del agua tratada por la PTAR para evaluar el impacto ambiental de la misma (Figura 4.1.), la cual está basada en la metodología de desarrollo del ACV propuesta por Van Hoof (2002). En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos al aplicar esta metodología.



**Figura 4.1. Metodología propuesta para realizar el ACV del Agua tratada en la PTAR.**

## **4.1. Definición del objetivo y el alcance.**

### **4.1.1. Definición del motivo.**

Definir las razones por los que se pretende realizar el ACV de la PTAR, que se pretende obtener.

### **4.1.2. Definición del objetivo.**

Definir el objetivo de acuerdo a los motivos para determinar si se compararán productos con un estándar, para mejorar el producto o diseñar un nuevo proceso de PTAR, para establecer estrategias o simplemente para tener información de la misma.

### **4.1.3. Definición de la unidad funcional.**

Definir la unidad funcional para realizar los cálculos en base a ésta y simplificarlos, así como obtener los componentes y cuantificación de los mismos.

### **4.1.4. Destino de la información.**

Definir a quien van dirigidos los resultados para poder elaborar la presentación de los mismos de forma adecuada para su entendimiento por parte de los usuarios de dicha información.

### **4.1.5. Definición del alcance.**

Definir el alcance para establecer el detalle y calidad de los datos, la capacidad disponible para realizar este estudio y realizar preguntas de ayuda.

## 4.2. Análisis del inventario.

### 4.2.1. Componentes del producto.

En la tabla 4.1. se vacían los datos correspondientes a los componentes del producto y los auxiliares.

**Tabla 4.1. Componentes del producto.**

Componentes	Cantidad (peso/volumen)

### 4.2.2. Árbol de Procesos.

Generar un árbol de procesos de todas la etapas del análisis del ciclo de vida de la planta para realizar un análisis sistémico y así evitar sub-optimizaciones y poder definir el ciclo de vida global de las aguas de la PTAR.

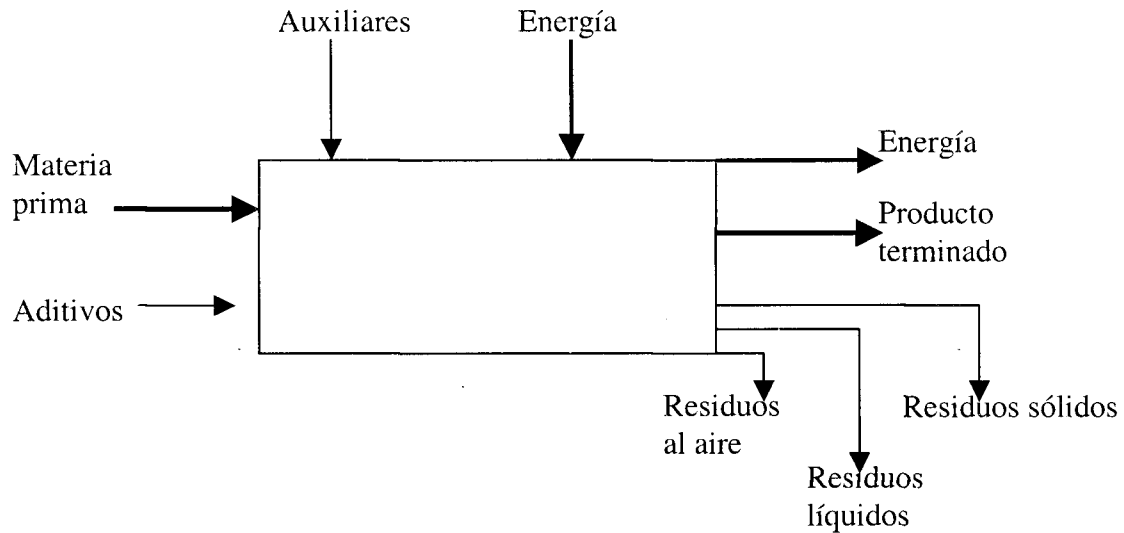
Abrir cajas en cada una de las etapas: procuración de materiales, producción, distribución, uso y fin de vida de la PTAR para priorizar etapas principales.

### 4.2.3. Recolección de datos.

En este etapa se recolectarán los datos de todos los impactos durante todo el ciclo de vida del agua tratada por la empresa.

La estructura para los diferentes tipos de datos que se buscan en esta fase del inventario está dada por los ecobalances. Los ecobalances son un cálculo donde se especifican todas las entradas y salidas (materias y energía) de un proceso específico. Todos los ecobalances de los procesos “desde la cuna hasta la tumba” del árbol de procesos anteriormente descrito forman el análisis del ciclo de vida del agua tratada. En la figura 4.2. se muestra la estructura general de los ecobalances.

Para todos los procesos del árbol del agua tratada se calculan todas las entradas y salidas con respecto a los materiales, energía y emisiones.



**Figura 4.2. Estructura general de un ecobalance.**  
(Tomado de Van Hoof, 2002).

A continuación se describe cada uno de los rubros que deben de considerarse:

1. Materias primas y aditivos. Materias primas que se transforman en el producto final del proceso.
2. Energía. Se busca información detallada de las cantidades de los diferentes tipos de energía y sus fuentes. Se expresa en MJ. Debe distinguirse entre fuentes renovables (energía hidroeléctrica) y no renovables (combustibles fósiles).
3. Auxiliares. Materiales que son necesarios en el proceso de transformación pero no forman parte del producto final. Estos materiales funcionan como facilitadores para el proceso.
4. Residuos sólidos. Se busca información detallada sobre las cantidades y diferentes tipos de residuos sólidos. Estos pueden categorizarse en diferentes tipos como residuos del proceso (materia prima sobrante), residuos de productos (productos en el fin de su vida útil), residuos de empaques (materias primas o componentes) y residuos diversos (polvos en filtros, etc.).
5. Residuos líquidos. Se busca información sobre las cantidades, concentraciones y diferentes tipos de vertimiento. Se distingue entre soluciones y suspensiones.
6. Residuos a la atmósfera. Se busca información detallada sobre las cantidades y tipos de emisiones. La mayor parte de las emisiones ocurren como resultado de procesos como

la combustión de combustibles fósiles para la producción de energía, el uso de solventes y el uso o la producción de productos volátiles.

7. Producto terminado. Producto principal del proceso de transformación. Esto puede ser el producto terminado, un subproducto, un compuesto o material refinado. Todas las cantidades de los componentes del ecobalance se relacionan con este producto final.

La información recolectada se vaciará en una matriz conocida como MED (Van Hoof, 2002) la cual se muestra en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2. Matriz MED.**

	MATERIALES Tipo Cantidad	ENERGÍA ELÉCTRICA Tipo Cantidad	RESIDUOS Tipo Cantidad
Materia prima			
Producción			
Distribución			
Uso			
Fin de vida			

#### 4.2.4. Procesamiento de datos.

##### 4.2.4.1. Cálculo de energía libre de Gibbs de los compuestos químicos empleados en el tratamiento del agua residual.

Se realizarán los cálculos necesarios para obtener las energías Gibbs de los compuestos químicos para poder identificar cuales son las energías necesarias en su formación y saber cuanto CO<sub>2</sub> generarán en su producción.

##### 4.2.4.2. Tratamiento estadístico de datos.

El tratamiento estadístico de los datos depende del tipo de datos que se utilicen en cada estudio particular. Para alcanzar el objetivo de este trabajo los datos que serán relevantes son la DBO<sub>5</sub> de entrada y salida de la PTAR.

Con la cantidad y relación entre los datos proporcionados por la empresa productora de papel se realizarán pruebas de estadística descriptiva, análisis de varianza y regresión.

### **4.3. Análisis de impactos.**

En este rubro se analizan los impactos y se traducen en eco-indicadores o índices ambientales de impacto particulares de cada una de las categorías ambientales definidas para calcular el efecto que tiene esos impactos sobre los problemas ambientales y finalmente calcular el índice global de impacto ambiental.

#### **4.3.1. Categorías ambientales.**

Actualmente existen varias aproximaciones para un análisis de ciclo de vida pero en cualquier caso lo principal es acotar el problema de estudio ya que se tiene la experiencia de que el desarrollo de este tipo de análisis puede durar muchos años.

Uno de los acercamientos es analizar las diferentes categorías de impacto que produce cada producto, pudiendo impactar éste en varias categorías. El análisis de cada categoría implica una investigación de cada uno de sus componentes y procesos involucrados, desde la generación de insumos para dicho producto, por lo que los estudios se vuelven más detallados conforme se consideran más categorías y también dependiendo del tipo de producto.

Entre las diferentes categorías de impacto que puede involucrar el tratamiento de aguas residuales están el de cambio climático global, el agotamiento de recursos naturales, específicamente de hidrocarburos, y contaminación biológica del agua.

Para este estudio en especial se acotará el ACV del agua tratada de la PTAR a las categorías de cambio climático y de agotamiento de recursos naturales. No se desarrollará la categoría de contaminación biológica debido a que la EPP trata en la PTAR únicamente las aguas derivadas de los procesos industriales que lleva a cabo.

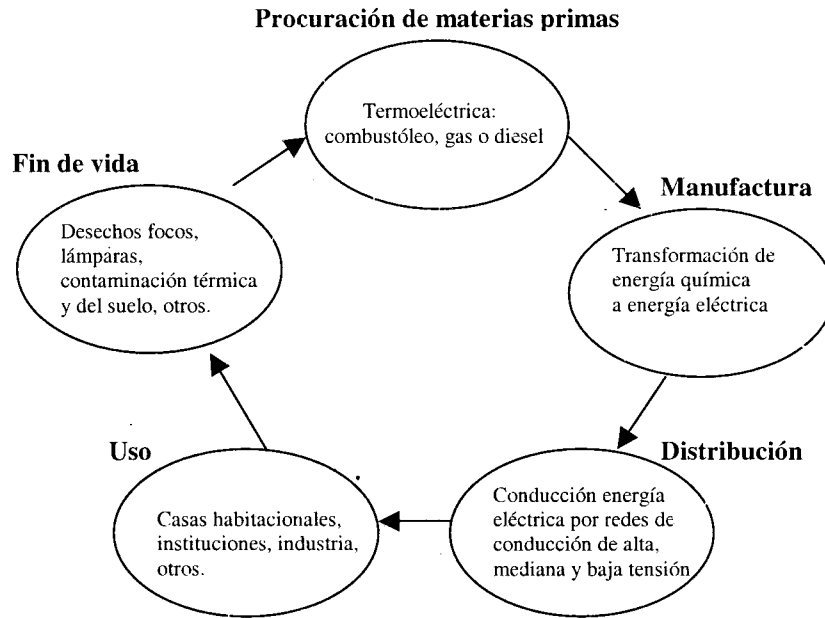
##### **4.3.1.1. Categoría de cambio climático global.**

Esta categoría se refiere a la cantidad de CO<sub>2</sub> que se produce indirectamente por el consumo de energía eléctrica en la PTAR desde su producción, a través de su transporte, y hasta su uso. Así mismo, el uso de compuestos químicos en el módulo físico-químico también genera indirectamente emisiones de CO<sub>2</sub>.



#### 4.3.1.1.1. Generalidades del ciclo de vida de la energía eléctrica.

En la figura 4.3. se presenta el diagrama del ciclo de vida general de la energía eléctrica.



**Figura 4.3. Diagrama del Ciclo de Vida General de la Energía Eléctrica.**

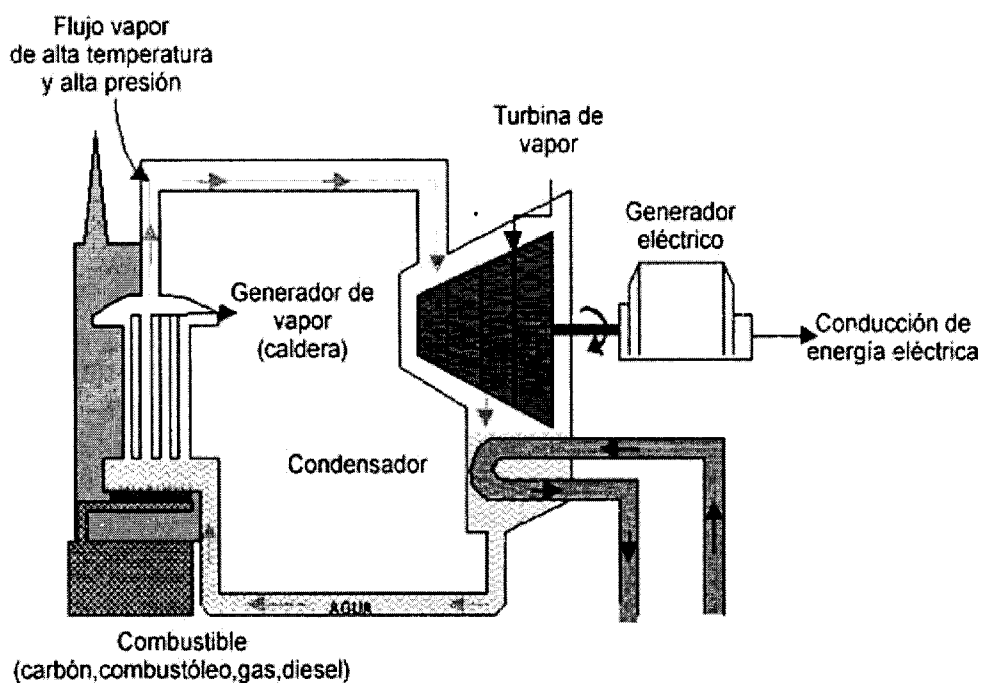
La Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2001) cuenta con diferentes procesos de generación de electricidad, entre los cuales, el proceso termoeléctrico es el que aporta la mayor cantidad de la energía producida. En la Tabla 4.3. se muestran los diferentes procesos y la capacidad proporcionada.

**Tabla 4.3. Procesos de generación de energía eléctrica y su capacidad proporcionada.**

Tipo	Cap. Efectiva, MW	Porcentaje
Hidroeléctricas	9,389.80	25.98%
Termoeléctricas	24,421.37	67.57%
Geotermoeléctricas	827.90	2.29%
Carboeléctricas	134.31	0.37%
Nucleoeléctricas	1,364.88	3.78%
Eoloeléctricas	2.18	0.01%

El estudio se limitará a analizar el proceso termoeléctrico, puesto que es el más utilizado, y además el que produce emisiones de CO<sub>2</sub>, el cual es nuestro indicador para la categoría de cambio climático global.

Existen varias clasificaciones del proceso termoeléctrico, y para este estudio consideraremos una central termoeléctrica de tipo vapor, la cual es una instalación industrial en la que la energía química del combustible se transforma en energía calorífica para producir vapor, este se conduce a la turbina donde su energía cinética se convierte en energía mecánica, la que se transmite al generador, para producir energía eléctrica (CFE, 2001). Este proceso se muestra en la Figura 4.4.



**Figura 4.4. Esquema de una central termoeléctrica tipo vapor.**

Una vez generada la energía eléctrica, el transporte se lleva a cabo mediante una gran red de cableado que cubre gran parte del país para finalmente llegar a los consumidores, que en este caso es la empresa generadora de papel.

#### **4.3.1.2. Categoría de agotamiento de recursos naturales.**

Esta categoría, específicamente para el tratamiento de aguas residuales de la PTAR, está relacionada con la utilización de hidrocarburos y la generación y reuso de lodos estabilizados y agua, respectivamente.

Para este estudio se consideró el agotamiento de los hidrocarburos, la formación de lodos estabilizados (Tierra enriquecida o insumo para otras actividades) y ahorro de agua por reuso.

#### 4.3.2. Indicadores de impacto ambiental.

Se deben obtener los indicadores de impacto ambiental para cada categoría ambiental determinada, así como la normalización para poder comparar las diferentes categorías ambientales y determinar cual impacta más en todo el proceso del uso de la PTAR. Los indicadores de impacto ambiental se calcularon tomando como base lo propuesto por Dante (2000).

Para poder obtener un indicador de impacto ambiental de la PTAR es necesario tener un punto de referencia con respecto al ACV del agua tratada en la PTAR, por lo que se realizará el ACV de la misma unidad funcional para el caso en el que no se trata el agua residual.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por la PTAR que se considerarán en este estudio pueden ser indirectas o directas. Las indirectas son generadas por el consumo de energía para el funcionamiento del equipo de la PTAR y para producir los compuestos químicos usados en la misma, y las directas son las generadas por las bacterias al realizar descomposición de la materia orgánica del agua residual. A continuación se muestran los cálculos para cada una de ellas.

##### 4.3.2.1. Cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por el equipo empleado en la PTAR.

La energía total empleada por el equipo está dada por la potencia de cada uno de los equipos empleados por el tiempo de uso de ellos al día, es decir:

$$E = \sum_i P_i \Delta t_i, \quad (4.1)$$

donde  $E$  es la energía (MJ/día) usada por la PTAR;  $\Delta t$  el tiempo que es usado cada equipo y  $P$  es la potencia de cada equipo usado.

En México la energía eléctrica al ser transportada se pierde en un 30% por lo que el total de energía generada es mayor que la que aparentemente se emplea en la PTAR.

Aunado a este factor, en México la eficiencia de las plantas es de 35%. Debido a la ineficiencia es necesario emplear mayor cantidad de hidrocarburos para producir la cantidad de energía requerida por la PTAR.

De acuerdo a la CFE (2001), la generación de energía eléctrica en México proviene de varios tipos de fuentes como lo son, las hidroeléctricas, geotermoeléctricas, nucleoeeléctricas, eoloeléctricas, termoeléctricas y carboeléctricas. Ya que la categoría de impacto que vamos a utilizar es de cambio global climático es necesario identificar cuanta de esta energía proviene de energía generada por combustibles fósiles, es decir en las termoeléctricas, la cual está referida para México como el 70.7%.

En cada país las eficiencias de transporte y de generación en plantas será diferente por lo que la siguiente ecuación está expresada de forma que pueda ser aplicada a cualquier país:

$$E' = \frac{E}{\eta_1 \cdot \eta_2}, \quad (4.2)$$

donde  $E'$  se refiere a la energía (MJ/día) realmente generada en la planta para abastecer la energía requerida en la PTAR;  $\eta_1$  es la eficiencia (%) del transporte de energía eléctrica; y  $\eta_2$  es la eficiencia (%) de la generación de energía eléctrica por las plantas.

En la ecuación (4.3) se obtiene la cantidad de energía generada por la fuente más usada en México, sin embargo también está expresada en forma general para que pueda ser empleada en cualquier país:

$$h = E' \cdot f, \quad (4.3)$$

donde  $h$  se refiere a la energía (MJ/día), en este caso de estudio, a la producida por hidrocarburos; y  $f$  corresponde a la fracción de electricidad (%) generada por los hidrocarburos, con respecto al total de energía generada para satisfacer a la PTAR.

Dentro de los combustibles fósiles la energía se puede obtener a partir de combustóleo, gas natural o carbón. Ya existen porcentajes reconocidos en México de cuanta energía proviene de cada uno, como se muestra en la tabla 4.4. Este cálculo es importante ya que se generan diferentes cantidades de carbono a partir de cada uno de ellos. Para este estudio consideraremos que el uso total de combustible fósil requerido en las termoeléctricas comprende los tres tipos de combustibles.

De esta forma se puede expresar la siguiente ecuación para obtener la fracción de energía producida por cada tipo de combustible:

$$e_i = h \cdot \chi_i, \quad (4.4)$$

donde  $e_i$  es la fracción de energía (MJ/día) producida por cada combustible; y  $\chi_i$  representa la fracción de energía (%) producida por el tipo de combustible fósil.

**Tabla 4.4. Por ciento de energía proveniente de diferentes tipos de combustibles fósiles.**

Combustible	Por ciento energía proveniente
Combustóleo	68.20%
Gas natural	18.20%
Carbón	13.60%

Cada tipo de combustible produce diferentes cantidades de carbón por la generación de cada MJ, las cuales se presentan en la tabla 4.5.

**Tabla 4.5. Cantidad de carbón producido por cada MJ generado por los diferentes tipos de combustibles fósiles.**

Combustible	gC/MJ producido
Combustóleo	20.0
Gas natural	14.3
Carbón	25.8

La ecuación del cálculo de la cantidad de carbón producida por cada tipo de combustible fósil ( $q_i$ ) (grC) es:

$$q_i = e_i \cdot g_i, \quad (4.5)$$

donde  $g_i$  corresponde a los gramos de CO<sub>2</sub> generados por MJ por el cada tipo de combustible fósil.

En este trabajo se asume que todo el carbón generado reaccionará completamente con el oxígeno, ya que la diferencia observada en la estequiometría de formación del CO<sub>2</sub> la consideramos despreciable, lo cual simplifica los cálculos.

El total de gramos de CO<sub>2</sub> ( $q$ ) producidos por todos los tipos de combustibles fósiles al usar la energía eléctrica requerida por la PTAR queda:

$$q = \sum e_i \cdot g_i, \quad (4.6)$$

Finalmente agrupando las ecuaciones (4.1-4.6), se expresa una ecuación general para la generación de CO<sub>2</sub> (expresado en kg.) por la generación de la energía eléctrica requerida por la PTAR para el funcionamiento de la maquinaria necesaria para el tratamiento de las aguas residuales de la siguiente forma:

$$kgCO_2 = 10^{-3} q = 10^{-3} \sum \left( \frac{\sum P_j \Delta t_j}{\eta_1 \eta_2} \cdot f \right) \chi_i g_i \quad (4.7)$$

Con este dato podemos evaluar posteriormente el impacto en el cambio climático global del uso de la energía eléctrica requerida por la maquinaria de la PTAR.

#### 4.3.2.2. Cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por los químicos empleados en la PTAR.

Para poder cuantificar la cantidad de CO<sub>2</sub> producida por la generación de las sustancias químicas empleadas en la PTAR es necesario hacer equivalente la energía requerida para formar dichas moléculas en energía eléctrica. A partir de este valor se calcula el CO<sub>2</sub> bajo las mismas especificaciones descritas a partir de las ecuaciones (4.2-4.6). Cuando se cuenta con el valor en energía eléctrica necesario para producir estas sustancias, se usa directamente para calcular el CO<sub>2</sub> producido.

Para calcular el CO<sub>2</sub> generado indirectamente por los compuestos químicos empleados en la PTAR, se requiere tener el equivalente de la energía eléctrica necesaria para su formación. Existen varios modelos para calcular dicha energía la cual se conoce como energía libre de formación de Gibbs (Lehninger, 1995; Keenan, 1999).

La energía libre de Gibbs está dada por la siguiente ecuación (Snoeyink, 1987):

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (4.8)$$

donde  $\Delta G$  es el cambio en la energía libre (kcal);  $\Delta H$  el cambio de entalpías (kcal);  $\Delta S$  cambios de entropías (kcal/°K); a temperatura ( $T$ ) (°K) y presión constante.

Esta energía también es referida como simplemente energía libre de acuerdo a Umland, (1999).

En este estudio se proponen tres métodos para obtener los valores de energía libre de Gibbs, de acuerdo a la información con la que se cuente de los compuestos, para alcanzar el objetivo de mismo y para otros estudios.

##### 4.3.2.2.1. Cálculo de la Energía libre de Gibbs a partir de la energía libre estándar de formación.

Son los cambios de energía libre los de interés ya que son los que acompañan a los cambios químicos y físicos. Estos cambios de energía libre pueden ser calculados en base a

los valores que existen ya tabulados de energía libre estándar de formación (Dean, 1992; Dean, 1998; Lide, 1999).

La energía libre estándar de formación ( $G^\circ_f$ ) de una sustancia es el cambio de la energía libre que resulta cuando un mol de una sustancia es formada por sus elementos con todas las sustancias en sus estados estándares (Umland, 1999).

Entonces el cambio de la energía libre ( $\Delta G^\circ_k$ , expresado en KJ/mol) está dado por:

$$\Delta G^\circ_k = \sum n_p \Delta G^\circ_{f(prod)} - \sum n_r \Delta G^\circ_{f(react)}, \quad (4.9)$$

donde  $n_p$  es el número de moles de cada producto;  $\Delta G^\circ_{f(prod)}$  (KJ/mol) es la energía libre de formación del producto;  $n_r$  es el número de moles de cada reactante y  $\Delta G^\circ_{f(react)}$  (KJ/mol) es la energía libre de formación del reactante.

#### 4.3.2.2.2. Cálculo de la energía libre de Gibbs a partir de las contribuciones de los grupos componentes.

Cuando no se cuenta con la energía libre de Gibbs de un compuesto se puede calcular sumando las contribuciones de los grupos componentes, como lo formularon Krevelen y Chermin (en Dean, 1998):

$$\Delta G_f = \sum \text{contribuciones} + RT \ln \sigma, \quad (4.10)$$

donde  $RT \ln \sigma$  representa la corrección por asimetría. Las contribuciones de los grupos se representan en función lineal de la temperatura en intervalos de 300 a 600 °K y de 600 a 1500 °K.

#### 4.3.2.2.3. Cálculo de la energía libre de Gibbs por el método de Joback.

En este método se calculan las energías de formación de Gibbs y de entalpía a partir de los grupos estructurales de los compuestos (Elvers, 1996) de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$\Delta G^\circ_{f298} = 53.88 + \sum s_i I_{Gi}, \quad (4.11)$$

$$\Delta H^\circ_{f298} = 68.29 + \sum s_i I_{Hi}, \quad (4.12)$$

donde  $s_i$  es el número de grupos estructurales de los diferentes tipos en el compuesto e  $I_{Gi}$  (KJ/mol) e  $I_{Hi}$  (KJ/mol) son los incrementos de todos los grupos estructurales de Gibbs y entalpía, a 298.15 °K.

Una vez que ha sido determinada la energía libre de formación de Gibbs de cada compuesto se procede a calcular la energía que se requiere en la PTAR por día con la siguiente expresión:

$$E_k = \Delta G_k^\circ \times \frac{kg_k / día(1000)}{PM_k}, \quad (4.13)$$

donde  $E_k$  se refiere a la energía requerida para formar los compuestos químicos y el subíndice  $k$  indica el compuesto utilizado (más adelante se muestran los compuestos usados en la PTAR en estudio);  $kg_k$  son los kilogramos usados al día del compuesto y  $PM_k$  es el peso molecular del compuesto (gr/mol).

Con el dato obtenido se calcula el  $CO_2$  generado por la producción de cada uno de los compuestos químicos, a partir de las ecuaciones (4.2-4.6), con la siguiente ecuación:

$$kgCO_{2k} = 10^{-3} \Sigma \left( \frac{E_k}{\eta_1 \eta_2} \cdot f \right) \chi_i g_i, \quad (4.14)$$

y la cantidad total de  $CO_2$  generado por todos los compuestos químicos ( $kgCO_{2T}$ ) de la siguiente forma:

$$kgCO_{2kT} = \Sigma kgCO_{2k}, \quad (4.15)$$

Agrupando las ecuaciones (4.2-4.6) y (4.10-4.12) queda la expresión para la emisión total indirecta ( $ETI$ ) de kilogramos de  $CO_2$  generada por el tratamiento del agua residual de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$ETI_{kgCO_2} = 10^{-3} \cdot \frac{f}{n_1 n_2} \Sigma \chi_i g_i (E + \Sigma E_k), \quad (4.16)$$

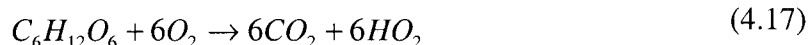
#### **4.3.2.3. Cálculo de las emisiones directas de $CO_2$ producidas por la descomposición de la materia orgánica por las bacterias en el módulo biológico.**

Las emisiones directas se refieren a las emisiones generadas durante el tratamiento del agua residual en la PTAR debido a la descomposición de la materia orgánica. La materia orgánica sirve como energía a los organismos heterotróficos (bacterias) en el proceso de la



respiración y descomposición. Durante estos procesos se consume oxígeno y se libera  $\text{CO}_2$  (Chapra, 1997).

La representación química general del proceso de respiración/descomposición de la materia orgánica es la siguiente según Chapra, (1997):



Es importante mencionar que las aguas residuales no están compuestas por simple azúcar como se representa en la ecuación (4.17). Sin embargo, si quisiéramos aplicar un acercamiento riguroso, tendríamos que caracterizar todos los compuestos orgánicos en cada muestra del agua residual. Obviamente este riguroso acercamiento sería impráctico.

Una forma de cuantificar la cantidad de materia orgánica en agua residual es midiendo la cantidad de oxígeno consumido. Este resultado es lo que se conoce como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) (Chapra, 1997). Sabiendo la cantidad de oxígeno consumido podemos calcular la cantidad de  $\text{CO}_2$  que están emitiendo las bacterias al degradar la materia orgánica del agua residual.

De acuerdo al modelo simplista presentado en Chapra (1997), se puede definir una variable  $L$  ( $\text{mgO L}^{-1}$ ) que se refiere a la cantidad de materia orgánica oxidable en una botella expresada en equivalentes de oxígeno. Entonces si  $L_0$  es el nivel inicial, la ecuación de primer grado quedaría de la siguiente forma:

$$L = L_0 e^{-kt}, \quad (4.18)$$

donde  $k$  es la constante de decaimiento y  $t$  es el tiempo de residencia. De esta forma el oxígeno consumido durante el proceso de la descomposición ( $y$ ) se define como:

$$y = L_0 - L, \quad (4.19)$$

y substituyendo en la ecuación (4.18)

$$y = L_0 (1 - e^{-kt}), \quad (4.20)$$

Ya que resulta impráctico realizar la prueba de DBO para  $t = 95$  para obtener una estimación de respuesta del 95%, se emplea una prueba de incubación de 5 días ( $\text{DBO}_5$ ) de la cual se extrapola al nivel último de DBO (Chapra, 1997).

A partir de la ecuación (4.20) se obtiene entonces que la cantidad de materia orgánica oxidable en unidades de oxígeno en  $t = 5$  días queda como:

$$L_0 = \frac{y_5}{1 - e^{-k(5)}}, \quad (4.21)$$

donde  $y_5$  es la  $DBO_5$  días

Finalmente, el valor de DBO que estará decayendo en la PTAR por la descomposición de la materia orgánica esta dado por:

$$\Delta DBO = DBO_{entrada} - DBO_{salida}, \quad (4.22)$$

Otro método para calcular la cantidad de oxígeno requerido para descomponer la materia orgánica del agua residual, el cual se utilizará en este estudio, emplea las ecuaciones referentes al requerimiento de oxígeno en el proceso de lodos activados (Ramalho, 1991; Crites, 1998; Tchobanoglous, 2003).

Los kilogramos de oxígeno por día requerido para oxidar el sustrato (materia orgánica) se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$kgO_2 = -a(S_i - S_e)Q_o = aS_r Q_o, \quad (4.23)$$

donde  $a$  es la relación entre  $kg O_2$  y  $kg DBO$  consumido,  $S_r = S_i - S_e$  es el DBO o sustrato consumido ( $mg/l$ ), y  $Q_o$  es el flujo de entrada del influente al reactor biológico ( $m^3/s$ ).

En el modelo propuesto para este trabajo se considerará un valor de 0.60 como valor que indica la cantidad de DBO consumido en 5 días ya que se desconoce la relación entre  $kg$  de  $O_2$  y  $kg$  de DBO. Este es un valor establecido en laboratorio el cual describe que el 60% de la materia orgánica es removida en los 5 días de incubación de la DBO (Tchobanoglous, 2003). La ecuación de acuerdo a esta consideración queda de la siguiente forma:

$$kgO_2 = -\frac{(S_i - S_e)}{0.6}Q_o = -\frac{S_r}{0.6}Q_o, \quad (4.24)$$

Cuando son utilizadas las unidades descritas en la ecuación (4.23) es necesario utilizar un factor cuyo valor es 86.4. Para las aguas residuales típicas se supone que su densidad es la del agua ( $1 kg/l$ ) y en ese caso la ecuación (4.23) quedaría expresada de la siguiente forma:

$$kgO_2 = \frac{kgO_2}{kgDBO} * \frac{mgDBO}{kg_{infl}} * \frac{m^3_{infl}}{seg} * \frac{10^3 kg}{m^3} * \frac{10^{-6} kg}{mg} * 86400 \frac{seg^{-6}}{dia} = -86.4 \frac{S_r}{0.6} Q_o, \quad (4.25)$$

Por otra parte se debe considerar que no toda la materia o biomasa se oxida en el sistema. En Ramalho (1991) se deduce que teóricamente serían necesarios 1.42 kilogramos de oxígeno para oxidar cada kilogramo de esa biomasa ( $\Delta X_v$ , expresada en  $kg/día$ ). De acuerdo con esto, la expresión corregida de consumo de oxígeno ( $kg/día$ ) quedaría de la siguiente forma:

$$kgO_2 = -86.4 \frac{(S_i - S_e)}{0.6} Q_o - 1.42(\Delta X_v) = -86.4 \frac{S_r}{0.6} Q_o - 1.42(\Delta X_v), \quad (4.26)$$

Para transformar la cantidad de oxígeno requerido en CO<sub>2</sub> generado se considera la siguiente expresión:



en la cual se asume que cada mol de carbón reacciona con un mol de O<sub>2</sub> ya que la diferencia estequiométrica es despreciable.

Para simplificar el modelo de este trabajo se hizo la consideración de que todo el CO<sub>2</sub> producido en la PTAR es emitido en su totalidad a la atmósfera, aunque en realidad se da una especiación de éste en el agua, es decir, una porción del CO<sub>2</sub> se transporta hacia el sustrato, otra hacia la atmósfera y otra hacia el agua (Thibodeaux, 1996).

Continuando, una vez obtenida la cantidad de gramos de O<sub>2</sub> utilizado, se obtienen los kilogramos de CO<sub>2</sub> generados por la emisión total directa (ETD) de la siguiente forma:

$$ETD_{kgCO_2} = \frac{grO_2 \times PMCO_2}{PMO_2 \times 1000}, \quad (4.28)$$

Y finalmente la emisión total de kilogramos de CO<sub>2</sub> de la PTAR (ETP) se expresa con la siguiente ecuación:

$$ETP_{kgCO_2} = ETI + ETD, \quad (4.29)$$

#### 4.3.2.4. Cálculo del agotamiento de hidrocarburos por el tratamiento del agua residual.

El agotamiento de hidrocarburos se considera como un impacto negativo al ambiente. Para poder cuantificar que cantidad de hidrocarburos se está agotando es necesario convertir la energía eléctrica total requerida por la PTAR a equivalentes de kilogramos de crudo. Para ello consideraré el valor presentado por Master (1998) de la energía producida por 1 kg de crudo (*Ec*) la cual es igual a 42.3 MJ/kg.

La ecuación que expresa esta cuantificación es:

$$kgCrudo = \frac{E + \sum E_k}{n_1 n_2 \cdot Ec}, \quad (4.30)$$

#### 4.3.2.5. Cálculo de producción de lodos activados estabilizados por el tratamiento del agua residual.

Los lodos activados son considerados en general como un residuo del proceso de tratamiento de aguas residuales, sin embargo, son tierras ricas en nutrientes que sirven como fertilizante o como insumos para otras actividades.

La formación de tierra o de insumos para otra actividad por día está dada por la siguiente expresión:

$$kg_{\text{lodos}} = kg_{\text{lodos\_insumos}}, \quad (4.31)$$

#### 4.3.2.6. Cálculo de ahorro de agua por el tratamiento del agua residual.

El ahorro de agua se cuantifica de la siguiente forma:

$$Lts_{\text{agua}} = Lts_{\text{agua tratada y usada en otra actividad}} \quad (4.32)$$

#### 4.3.2.7. Cálculo de las emisiones directas de CO<sub>2</sub> producidas por la descomposición de la materia orgánica por las bacterias al verter el agua residual sin previo tratamiento a un cuerpo receptor natural.

Las emisiones directas producidas por la descomposición de la materia orgánica en el medio natural, dependen de varias variables dependiendo de las características del cuerpo receptor.

En el modelo propuesto en este trabajo se considerará que el agua es vertida a un río. Para poder cuantificar la cantidad de O<sub>2</sub> requerido se necesitan conocer variables como el flujo de agua del río, la remoción por sedimentación, la concentración de DBO en dicho flujo, entre otros. Debido a que no siempre se cuenta con todas las variables, para este modelo propuesto en este trabajo se harán varias consideraciones.

Primero es necesario sacar un balance de masas para la entrada del agua residual al cuerpo receptor el cual queda de la siguiente forma:

$$C_r Q_r + C_w Q_w = C(Q_r + Q_w), \quad (4.33)$$

$$C = \frac{C_r Q_r + C_w Q_w}{Q_r + Q_w}, \quad (4.34)$$

donde  $C_w$  es la concentración del constituyente del agua residual (en este modelo DBO<sub>5</sub> expresado en mg/l) y  $Q_w$  el flujo del agua residual (en el algoritmo representado como Vol. y expresado en m<sup>3</sup>/día o lt/día),  $C_r$  es la concentración del constituyente en el agua del río (mg/l) y  $Q_r$  el flujo del río (m<sup>3</sup>/día o lt/día), y  $C$  la cantidad de DBO<sub>5</sub> diluida en el cuerpo receptor.

Para el modelo de este trabajo se considerará que  $C_r$  tiene un valor de 30 mg/l DBO<sub>5</sub>. Este valor está sustentado en los valores establecidos por la EPA y usados en otros países, como la CNA en sus normas, sobre la aceptación de la razón entre DBO y sólidos suspendidos de un agua sin problemas. De ahí se considera que el mínimo de materia orgánica que trae un río sin contaminación es de 30 mg/l y la mínima de un río contaminado de 60 mg/l.

Con la cantidad diluida de DBO<sub>5</sub> en el río se calcula entonces la cantidad de oxígeno requerido para degradar esa cantidad de materia orgánica con la ecuación (4.26) sustituyendo  $S_e$  por la  $C$  que se representará como  $S_d$  (kg/día).

$$kgO_2 = -86.4 \frac{(S_i - S_d)}{0.6} Q_r - 1.42(\Delta X_v), \quad (4.35)$$

donde para  $Q_r$  se considerará, en este trabajo, como 1 m<sup>3</sup>/min. El segundo término de la ecuación se elimina de la misma para el caso del río ya que no se está considerando el sustrato remanente no oxidado, por lo que la ecuación para determinar la cantidad de O<sub>2</sub> requerido para descomponer la materia orgánica vertida con el agua residual sin tratar al río es:

$$kgO_2 = -86.4 \frac{(S_i - S_d)}{0.6} Q_r, \quad (4.36)$$

Por último, aplicamos la ecuación (4.28) para obtener la emisión total de CO<sub>2</sub> sin PTAR:

$$ETS_{kgCO_2} = \frac{grO_2 \times PMCO_2}{PMO_2 \times 1000}, \quad (4.37)$$

#### 4.3.2.8. Cálculo del agotamiento de recursos naturales cuando no es considerado el tratamiento del agua residual.

En el caso en el que el agua residual no sea tratada se considera que habrá un agotamiento del agua igual a la cantidad de litros que se viertan sin tratar al río ya que no será reusada en otras actividades. Por otra parte, se considera que no habrá agotamiento de

los hidrocarburos, ni tampoco habrá formación de tierra fértil o insumos para otras actividades.

#### 4.3.2.9. Desarrollo de Indicadores de Impacto Ambiental.

Como se mencionó anteriormente, para poder obtener un indicador de impacto ambiental de la PTAR es necesario tener un punto de referencia con respecto al ACV del agua tratada en la PTAR, por lo que en éste se comparan los resultados de los indicadores de impacto ambiental para cada categoría obtenidos en el ACV del agua tratada por la PTAR y el ACV del agua no tratada. El ACV se realizará sobre la misma unidad funcional. Este Indicador de impacto ambiental (IIA) para cada categoría ambiental está definido de la siguiente forma:

$$IIA_i = s \frac{(Wp - Ws)}{Wp}, \quad (4.38)$$

donde  $Wp$  son los valores obtenidos en el tratamiento del agua residual para cierta categoría ambiental y  $Ws$  son los valores obtenidos si el agua no fuera tratada, y  $s$  es un indicador que vale +1 cuando se considera que el impacto sobre el medio debido al tratamiento del agua residual es negativo (emisión de  $CO_2$  y agotamiento de hidrocarburos) y -1 cuando se considera que el impacto sobre el medio debido al tratamiento del agua residual es positivo (formación de tierra o insumo y ahorro de agua).

#### 4.3.3. **Índice Global de Impacto Ambiental.**

El Índice Global de Impacto Ambiental (*IGIA*) esta definido como la sumatoria de todos los indicadores de impacto ambiental como se muestra en la ecuación

$$IGIA = \sum IIA_i \quad (4.39)$$

#### 4.4. Desarrollo del algoritmo

Para este fin se programará en el lenguaje Matlab cada uno de los procesos involucrados en el tratamiento del agua residual de la PTAR de la empresa productora de papel de tal forma que pueda ser usado en el ACV de otras PTARs que cuenten con los módulos biológico y físico químico en México. Este mismo programa puede ser adaptado para otros países únicamente cambiando los valores de algunas variables.

% Tesis de Angélica Canales López.  
 % VERSIÓN FINAL ALGORITMO ACV AGUA TRATADA PTAR.

clc  
 clear all  
 close all

%%%

% CONSTANTES:

PMC = 12; % [gr/mol]  
 PMO2 = 32; % [gr/mol]  
 PMCO2 = 44; % [gr/mol]  
 E = 24.2; % [MJ] Cálculo: 1050kW\*1000\*24/1000000  
 Ec = 42.3; % [MJ/kg]  
 e1 = 0.700; % Eficiencia transporte energía.  
 e2 = 0.350; % Eficiencia de las plantas.  
 f = 0.707; % Porcentaje energía combustibles fósiles.  
 xi = [0.682 0.182 0.136]'; % Porcentaje de energía para diferentes combustibles.  
 gi = [20.0 14.3 24.8]'; % [gr C/MJ]  
 Vol = 4808; % [m3/día]  
 Xv = 1600000; % [gr/día]  
 DBO5\_r = 30; % [mg/lt] DBO mínimo carga orgánica en río sin  
 Qr = 1560; % [m3/día] Unidad establecida de flujo río.

%%%

E1 = E/(e1\*e2); % [MJ]  
 h = E1\*f; % [MJ]  
 ei = h\*xi; % [MJ]  
 qi = ei.\*gi; % [gr C]  
 q = sum(qi); % [gr C]  
 kgCO2\_1 = q\*PMCO2/(PMC\*1000) % [kg CO2]

%%%

kgCO2\_1 = q\*PMCO2/(PMC\*1000); % [kg CO2]  
 % Orden compuestos: Poliacrilamida, aminapolicuaternaria,  
 % poliacrilamida a, ácido fosfórico y urea.  
 PM = [1.5e7 1.5e7 1.5e7 97.973 60]'; % [gr/mol]  
 kg = [14.3712 144.1728 420 144 144]'; % [lt/día]  
 kg = kg.\*PM/(22.4\*1000); % [kg/día]  
 dG = [-43183333.33 14417644.3 -43183333.33 1362.878 -289.31]'; % [kJ/mol]  
 dG = dG/1000; % [MJ/mol]  
 Ek = -(1000\*dG.\*kg./PM); % [MJ]  
 for i = 1:length(Ek)  
 kgCO2\_2(i) = PMCO2\*sum(Ek(i)\*f\*xi.\*gi/(e1\*e2))/(PMC\*1000) % [kg CO2]  
 end







% FIGURA:

```

Ind = [IIA_H2O IIA_mud IIA_crudo IIA_CO2 IGIA];
bar(Ind);
axis([0 6 -1.5 1.5]);
set(gca,'FontSize',8);
hold on
l1 = [0 6];
l2 = [0 0];
plot(l1,l2,'k');
xtick = [];
xlabel('Indicador');
ylabel('Impacto del indicador sobre el medio ambiente');
title('IMPACTOS SOBRE EL MEDIO AMBIENTE');

text(0.8,-1.2,'H2O','FontSize',8);
text(1.8,-1.2,'lodo','FontSize',8);
text(2.8,-0.2,'crudo','FontSize',8);
text(3.8,-0.2,'CO2','FontSize',8);
text(4.8,-0.2,'PTAR','FontSize',8);

print -dbitmap impactos

```

%%%

#### **4.5. Interpretación**

Se desarrollará en el capítulo 5 de este trabajo.

#### **4.6. Análisis de mejoras**

En esta etapa, una vez desarrollado el modelo particular del ACV, se eligen diferentes variables y se cambian sus valores para buscar nuevas alternativas de mejoramiento.

Existen varios niveles para alcanzar un mejoramiento del proceso del uso de la PTAR considerando el ACV que se ha planteado en este estudio. La reducción de residuos e impactos adversos al medio se puede dar por tres avenidas: el diseño de procesos ecoeficientes, por la reingeniería o por la optimización o mejora continua. Ésta última es la de menor costo y más sencilla de implementar por lo que se realizará el análisis de mejoras en esa área.

En la información recavada para este ACV se detectó que únicamente el 50% de los lodos producidos es reutilizado en otras actividades y el resto es dispuesto en el relleno sanitario. Por lo anterior, en el análisis de mejoras se considerará que el 100% de los lodos es reutilizado en diversas actividades.

## CAPITULO 5

### RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA DE ACV

#### **5.1. Definición del objetivo y el alcance.**

##### **5.1.1. Definición del motivo.**

Identificar si la PTAR genera impactos adversos al medio y si son compensados por los beneficios generados por la misma, así como identificar las áreas de oportunidad para minimizar los impactos adversos y maximizar los beneficios de la PTAR.

##### **5.1.2. Definición del objetivo.**

Determinar el impacto ambiental del ciclo de vida del agua tratada por la PTAR a partir de un Índice Global de Impacto Ambiental (IGIA) considerando los Indicadores de Impacto Ambiental de las categorías ambientales (IIA) de cambio climático global (CO<sub>2</sub>) y de agotamiento de recursos naturales (hidrocarburos, lodos y agua). Para obtener este IGIA se analizará también el ACV del agua residual sin ser tratada por la PTAR.

##### **5.1.3. Definición de la unidad funcional.**

Litros totales del agua residual generada en un día.

##### **5.1.4. Destino de la información.**

Los resultados que se obtengan en el ACV será para uso de la empresa productora de papel por lo que deben ser claros y concisos. Se presentarán los Indicadores de Impacto Ambiental y el Índice Global de Impacto Ambiental de acuerdo a cinco vectores de ponderación para facilitar la toma de decisiones de mejoras a la empresa según sus políticas y según el valor de cada indicador para la región en la cual se localiza la empresa.

### 5.1.5. Definición del alcance.

En el estudio únicamente se analizará el ciclo de vida del agua tratada. Es decir, abarcará todos los procesos unitarios biológicos y químicos, así como las operaciones unitarias físicas que se llevan a cabo en los módulos biológico y físico-químico de la PTAR para tratar el total de litros generados de agua residual en un día por la empresa, y la etapa de disposición final del agua tratada, así como todos los residuos generados.

El estudio no abarcará el análisis de ciclo de vida de la PTAR como tal.

## 5.2. Análisis del inventario.

### 5.2.1. Componentes del producto.

**Tabla 5.1. Componentes y materias auxiliares para el tratamiento del agua residual.**

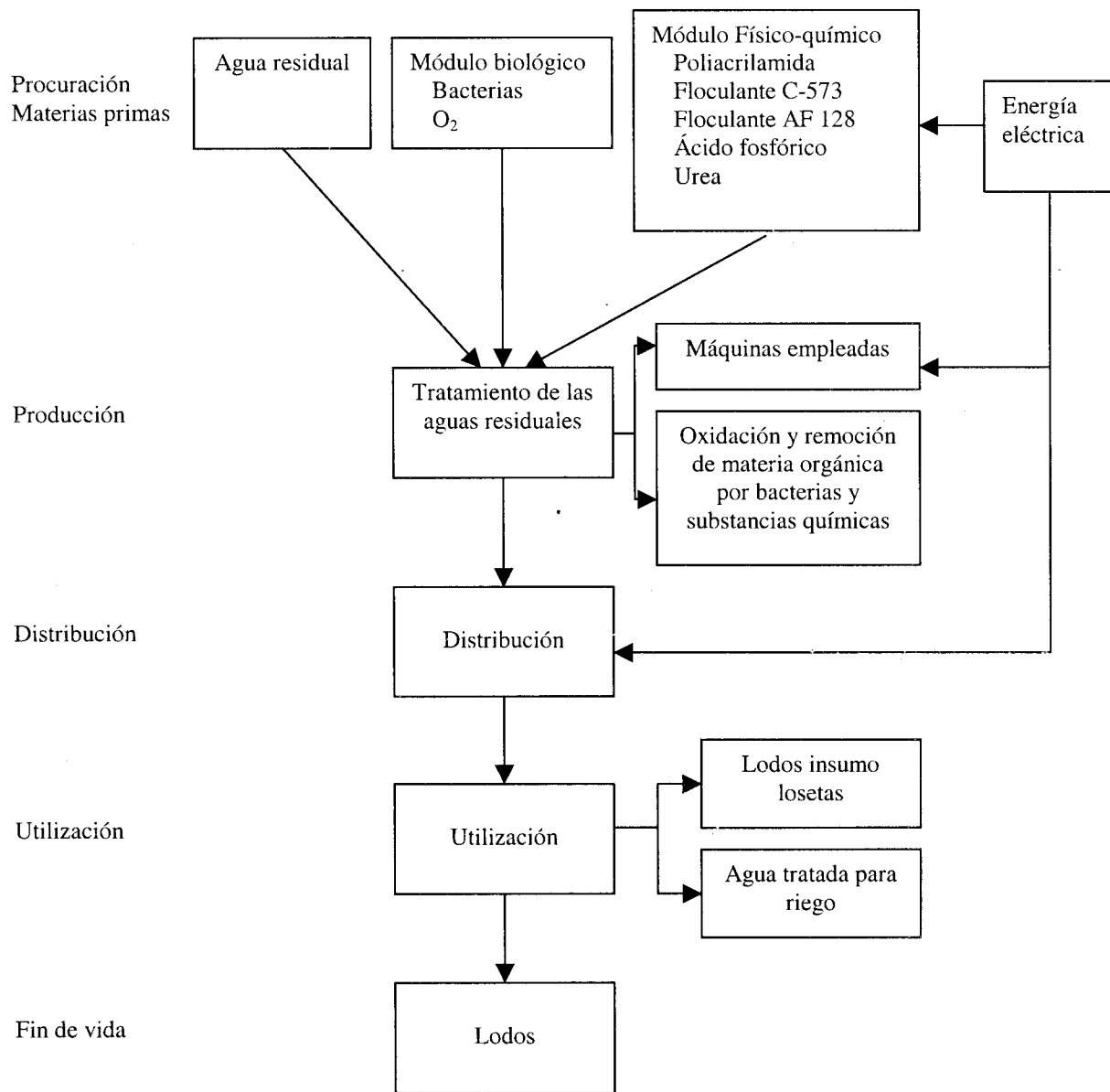
Componentes y auxiliares	Tasas de adición/flujo	Cantidad (peso/volumen)
Agua residual	4,808 m <sup>3</sup> /día	4,808,000 lt/día
Poliacrilamida	9.98 ml/min	14.3712 lt /día
Floculante aniónico C-573 diluido al .4 %	25.03 lt/min	144.1728 lt/día
Floculante prensas lodos AF-120 diluido al .35 %	5 m <sup>3</sup> /hr	420 lt/día
Mezcla ácido fosfórico y urea		
Ácido fosfórico	100 ml/min	144 lt/día
Urea	100 ml/min	144 lt/día

### 5.2.2. Árbol de Procesos.

El árbol de procesos del ACV del tratamiento del agua residual de la PTAR se muestra en la figura 5.1.

### 5.2.3. Recolección de datos.

Al final del punto 5.2.3.1. se presenta la Tabla 5.9. en la que se muestra la matriz MED en la cual se vaciaron los datos requeridos.



**Figura 5.1. Árbol de procesos del ciclo de vida del agua tratada de la PTAR.**

### 5.2.3.1. Descripción de la planta de tratamiento de la empresa productora de papel

En este estudio se evaluará el impacto ambiental de una PTAR de una empresa productora de papel, a través del ACV del agua tratada por la misma.

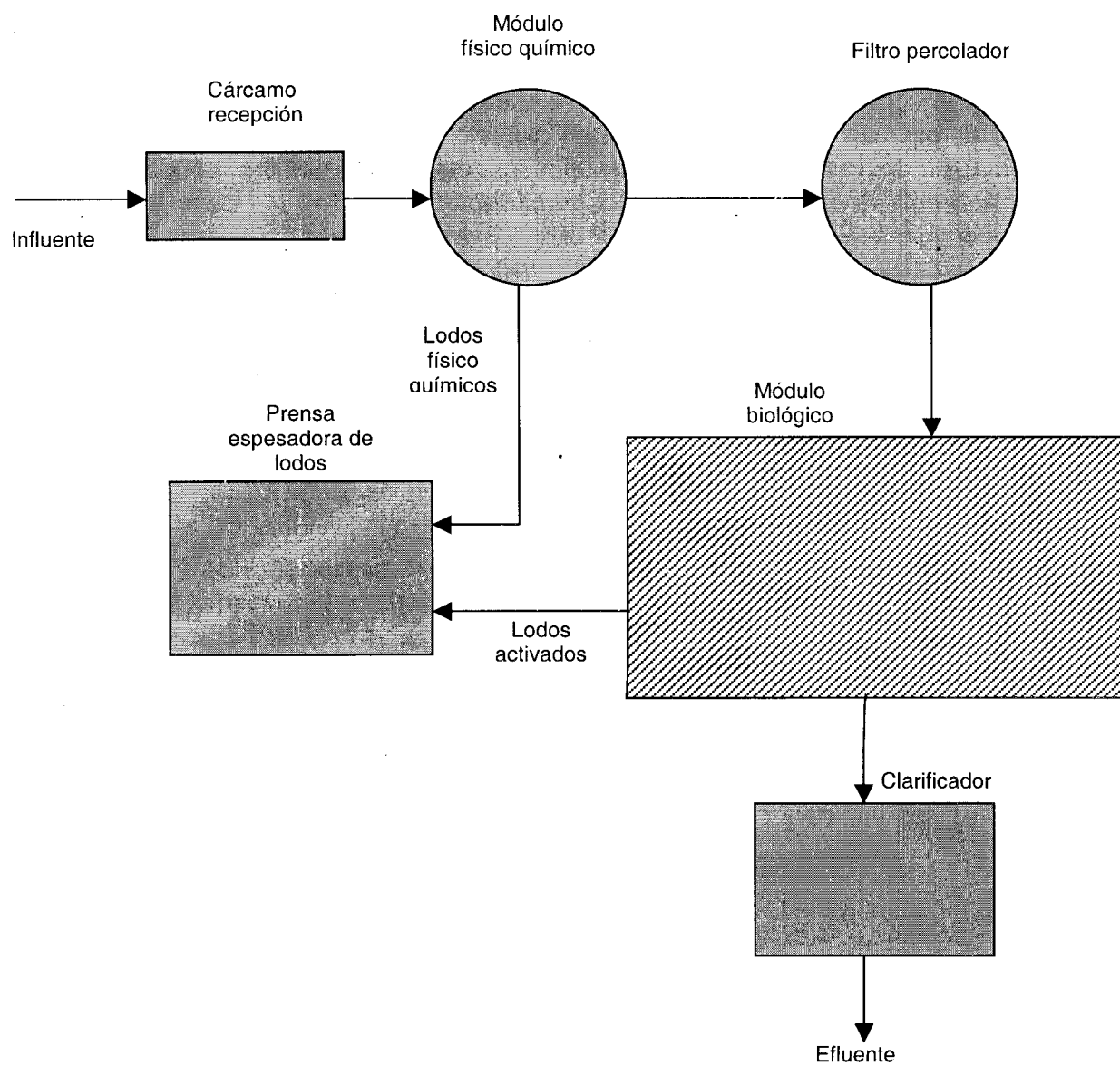
Por solicitud de la empresa los datos proporcionados serán usados únicamente para fines académicos y por confidencialidad su identificación quedará anónima. Por lo anterior, a lo largo de este estudio a la empresa se le nombra como “Empresa Productora de Papel (EPP)”.

#### **5.2.3.1.1. Descripción de los procesos productivos de la empresa productora de papel que generan aguas residuales.**

Los procesos que llevan a cabo en esta empresa es el reciclado de papel para generar nuevo papel. Debido a eso, es necesario llevar a cabo un proceso físico químico para remover las fibras que ya no son utilizables en el proceso principal de generación de nuevo papel; también se requiere eliminar tanto sólidos como grapas y otros, así como una gran cantidad de sólidos suspendidos. Esta cantidad de sólidos suspendidos se debe al tratamiento que se le da al papel para su reciclado y generación en la cual se desprende una gran cantidad de materia orgánica.

#### **5.2.3.1.2. Diagrama de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).**

El diagrama se presenta en la Figura 5.2.



**Figura 5.2. Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de aguas residuales.**

### 5.2.3.1.3. Descripción de procesos y operaciones unitarias de la PTAR.

#### 5.2.3.1.3.1. Descripción de procesos y operaciones unitarias del módulo físico-químico.

Como se muestra en el diagrama de la PTAR, las aguas residuales son dirigidas hacia un cárcamo de recepción y posteriormente pasan al módulo físico químico en el cual se lleva a cabo un proceso de remoción de sólidos suspendidos y fibras no utilizadas en el proceso principal de la empresa, a través de la operación unitaria de flotación por aire disuelto y por los procesos de remoción por la adición de los siguientes químicos: 9.98 ml/min de Poliacrilamida, 5 m<sup>3</sup>/hr de floculante para prensas de lodos AF 120 (diluido al 0.35%) y 25.03 lt/min. (diluido al 0.4%) del floculante C-573 de la marca Cytec.

El proceso físico químico consta de un sistema de aeración por aire disuelto. La alimentación se realiza por un sistema de bombeo desde un cárcamo. La dosificación de los floculantes se realiza desde contenedores de 1 m<sup>3</sup> de capacidad. El sistema cuenta también con un compresor para disolver el aire que forma las burbujas para flotar los contaminantes.

Posteriormente las aguas residuales son dirigidas hacia el filtro percolador donde se lleva a cabo la operación unitaria del filtrado de las aguas.

Antes de que el agua residual sea transportada hacia el módulo biológico, se le adiciona una mezcla de 200 ml/min. de ácido fosfórico y urea como nutrientes para su asimilación por bacterias para facilitar la oxidación de la materia orgánica.

#### 5.2.3.1.3.2. Descripción de procesos y operaciones unitarias del módulo biológico.

Después de haber sido tratada en el proceso físico-químico, el agua es transferida hacia el sistema de lodos activados mediante bombeo. El reactor de aireación tiene capacidad para 24 horas de residencia hidráulica del agua. Tres sopladores alimentan el aire al reactor, con un soplador de refacción. Al reactor se agregan también los nutrientes mediante bombas dosificadoras. Después del aireador, el agua es transferida por gravedad a un sedimentador. En este último proceso, el agua tratada es vertida hacia un tanque final (clarificador) donde se le agrega hipoclorito de sodio como desinfectante. Las cantidades de este último compuesto no fueron proporcionadas por lo que no se incluirá en el cálculo.

Finalmente sale el efluente del agua tratada la cual es dirigida hacia un cuerpo receptor de donde posteriormente es utilizada para riego de cultivos en zonas aledañas.



#### 5.2.3.1.4. Equipo.

El equipo mencionado en los puntos 5.2.3.1.2. y 5.2.3.1.3. de este capítulo, requiere un total de 1050 kw/hr para el funcionamiento de la PTAR.

#### 5.2.3.1.5. Volumen y calidad del agua.

El flujo promedio de agua residual recibida en la PTAR es de 4808 m<sup>3</sup>/día. La información proporcionada por la empresa consiste en los valores mensuales, de julio de 2001 a junio de 2002, de la calidad de entrada al módulo físico químico (Tabla 5.2.) (Figura 5.3.), la calidad a la salida del mismo (Tabla 5.3.) (Figura 5.4.), la calidad de entrada al reactor biológico (Tabla 5.4.) (Figura 5.5.) y la calidad de otros parámetros en el reactor (Tabla 5.5.) (Figura 5.6.), así como la calidad de salida del clarificador (Tabla 5.6.) (Figura 5.7.). Los parámetros que se presentan son T<sup>o</sup> (Temperatura), conductividad, pH (Potencial de hidrógeno), SST (Sólidos suspendidos totales), DQO (Demanda bioquímica de oxígeno), DBO (Demanda bioquímica de oxígeno), S.SED (Sólidos sedimentables), y Ret. de Lodos (Retención de lodos).

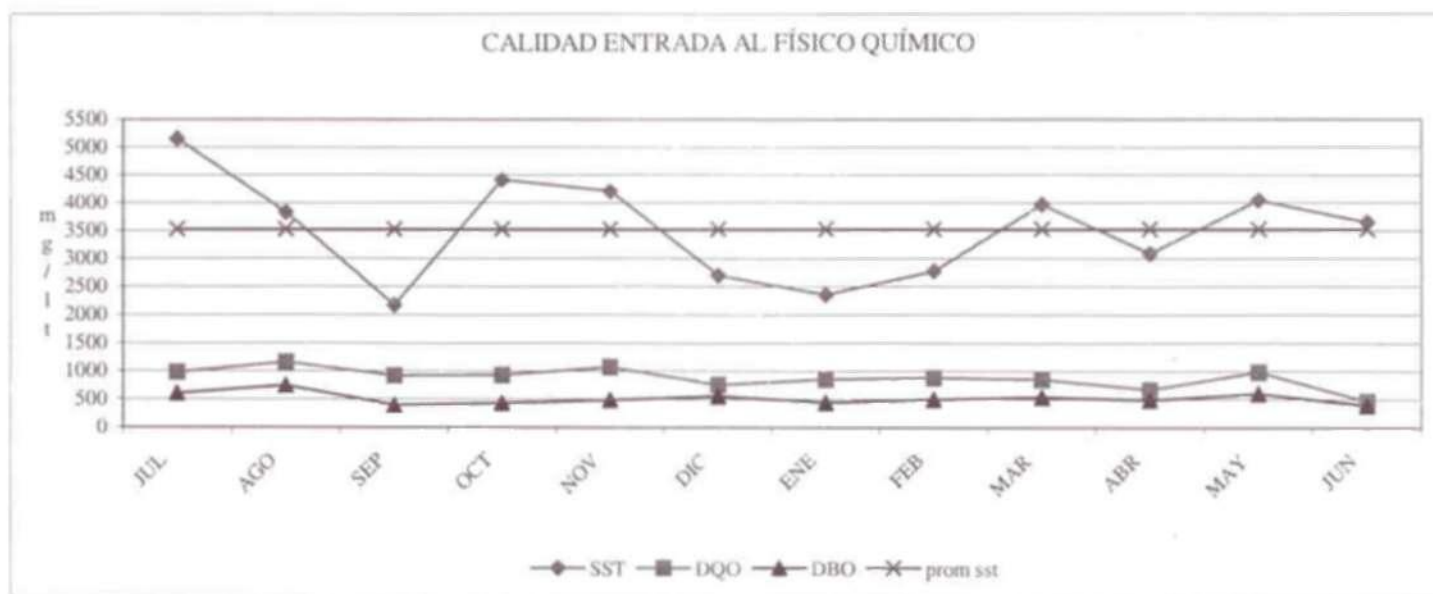
#### 5.2.3.1.6. Volumen y calidad de los residuos.

Los lodos generados tanto en el proceso físico-químico como en el biológico son bombeados hacia un tanque de almacenamiento de lodos. Desde este tanque, los lodos son bombeados a las prensas espesadoras. Existen tres prensas espesadoras en total (2 en operación, 1 en espera) en donde se le adiciona el floculante AF 128 de la marca Cytec. Estas prensas son del tipo banda. El lodo espesado se deposita en un patio donde un trascabo lo recoge y carga en camiones de volteo para ser transportados a reciclaje en una actividad de construcción (50%) y a disposición final en un relleno sanitario (50%). Estos últimos son considerados residuos no peligrosos de acuerdo al análisis CRETIB.

La cantidad total de lodos generados por la PTAR es de 80 ton/día base seca, de los cuales el 98% corresponde a los lodos producidos en el módulo físico-químico. Los valores que se tiene de los lodos presentan valores mensuales de los parámetros de humedad y SST para el tanque de los lodos (Tabla 5.7.) (Figura 5.8.) y de SST para la calidad de drenado de las prensas (Tabla 5.8.) (Figura 5.9.).

**Tabla 5.2. Datos de calidad del agua residual al entrar al módulo físico-químico.**

PARÁMETRO	UNIDAD	OBJ	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	PROM
T	° C		33	30	28	28	25	25	22	24	26	28	28	30	27
conductividad	uS/cm		744	663	663	807	747	956	781	1752	1847	2048	2239	1960	1267
pH	unidades		7.3	7.3	7.56	7.9	7.7	7.9	7.7	7.7	7.9	7.5	6.9	6.7	7.5
SST	mg/lt	3500	5154	3836	2170	4416	4215	2699	2359	2783	3967	3082	4048	3653	3532
			3532	3532	3532	3532	3532	3532	3532	3532	3532	3532	3532	3532	3532
DQO	mg/lt	2700	984	1162	921	936	1074	758	858	880	854	670	992	468	880
DBO	mg/lt	1500	608	753	397	433	491	557	444	498	539	489	609	391	517



**Figura 5.3. Parámetros de calidad del agua al entrar al módulo físico-químico.**

Tabla 5.3. Datos de calidad del agua residual al salir del módulo físico-químico.

PARÁMETRO	UNIDAD	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	PROM
SST	mg/lt	198	133	76	104	137	116	169	110	185	109	165	147	137
PROM		137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137



Figura 5.4. Parámetros de calidad del agua al salir del módulo físico-químico.

Tabla 5.4. Datos de calidad del agua residual al entrar al módulo biológico.

PARÁMETRO	UNIDAD	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	PROM
T	° C	27	25	24	23	22	21	21	23	23	25	25	26	24
conductividad	uS/cm	787	688	644	748	759	859	767	1744	1797	2054	2191	2006	1254
pH	unidades	6.9	7.1	7	6.8	7.1	7.3	7.2	7.5	7.4	7.6	7.6	7.3	7.2
SST	mg/l	430	286	156	223	221	223	249	226	343	200	167	174	242
DQO	mg/l	737	742	578	613	747	631	650	886	877	667	586	655	697
DBO	mg/l	361	381	175	248	279	358	288	291	367	305	171	199	285

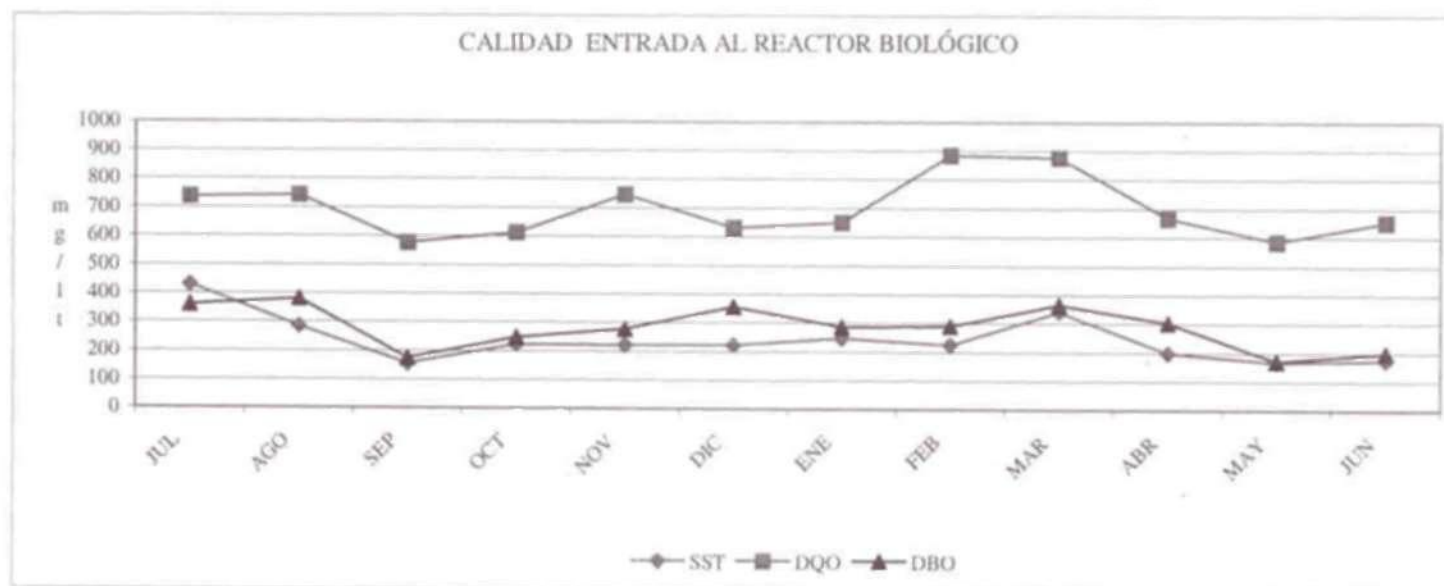
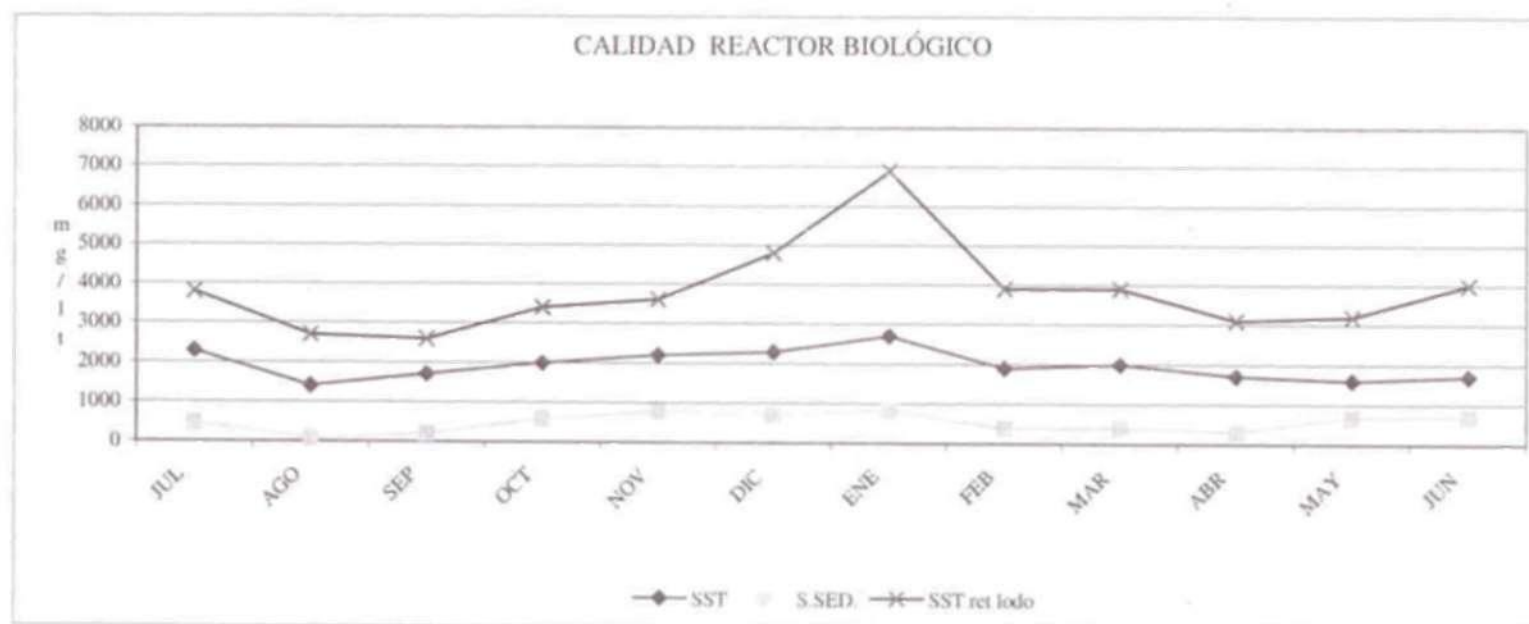


Figura 5.5. Parámetros de calidad del agua al entrar al módulo biológico.

**Tabla 5.5. Datos de otros parámetros de calidad del módulo biológico.**

PARÁMETRO	UNIDAD	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	PROM
SST	mg/lt	2300	1400	1700	2000	2200	2300	2700	1900	2000	1700	1600	1700	1958
S.SED.	ml/lt	462	85	211	582	775	711	833	388	411	318	668	695	512
RET. LODOS	mg/lt	3800	2700	2600	3400	3600	4800	6900	3900	3900	3100	3200	4000	3825



**Figura 5.6. Parámetros de calidad del módulo biológico.**

Tabla 5.6. Datos de calidad del agua residual al salir del clarificador.

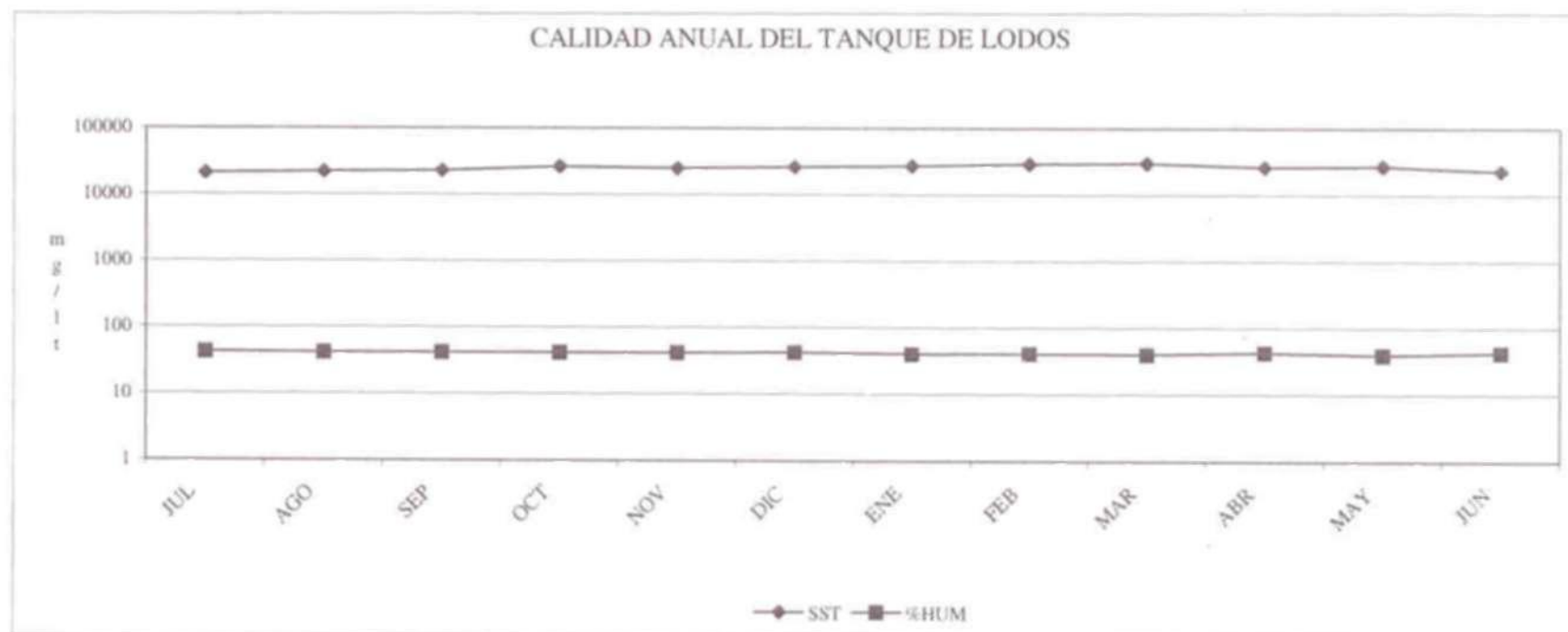
PARÁMETRO	UNIDAD	OBJ	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	PROM
T	° C		29	28	26	26	24	24	24	24	26	26	26	27	26
conductividad	uS/cm		804	720	720	803	829	913	816	1782	1967	2258	2159	1939	1309
pH	unidades		7.5	7.7	7.5	7.6	7.4	7.6	7.4	7.6	7.7	7.6	7.1	7.1	7.5
SST	mg/lt	30	50	86	33	15	20	19	33	41	37	33	17	17	33
DQO	mg/lt	250	149	161	127	139	160	126	163	178	170	147	129	119	147
DBO	mg/lt	10	27	97	28	6	6	6	11	23	21	22	12	6	22



Figura 5.7. Parámetros de calidad del agua al salir del clarificador.

Tabla 5.7. Datos de calidad del tanque de lodos.

PARÁMETRO	UNIDAD	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	PROM
SEQUEDAD	%	42.6	41.7	41.3	41.7	41.6	42	40.5	41.1	40.4	43.4	39.4	43.3	42
SST	mg/lt	21000	22000	23000	26000	25000	26000	27000	29000	30000	26000	27000	23000	25417



a 5.8. Parámetros de calidad del tanque de lodos.

Figur



Tabla 5.8. Datos de calidad del drenado de prensas.

PARÁMETRO	UNIDAD	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	PROM
SST	mg/lt	360	394	253	303	246	188	192	157	584	388	165	106	278



Figura 5.9. Parámetros de calidad del drenado de prensas.



Tabla 5.9. Resultados Matriz MED.

	MATERIALES Cantidad	ENERGÍA* Cantidad	RESIDUOS Cantidad
<b>Materia prima</b>			
Agua residual	4,808,000 lt/día	NA	NA
DBO <sub>5</sub> entrada	517 mg/lt	NA	NA
DBO <sub>5</sub> salida	22 mg/lt	NA	NA
Módulo biológico			
	NA	NA	NA
Módulo físico-químico			
Poliacrilamida	14.3712 lt/día	-43,183,333.33 kJ/mol **	NA
Floculante aniónico C-573 diluido al .4 %	144.1728 lt/día	14,417,644.30 kJ/mol **	NA
Floculante prensas lodos AF-120 diluido al .35 %	420 lt/día	-43,183,333.33 kJ/mol **	NA
Ácido fosfórico	144 lt/día	1,362.878 kJ/mol **	NA
Urea	144 lt/día	-289.31 kJ/mol **	NA
<b>Producción (tratamiento agua residual)</b>			
Maquinaria	NA	1,050 KW/hr ***	NA
Remoción mat. org. por bacterias (lodos activados)	NA	NA	1.6 ton/día
Remoción mat. org. por químicos (lodos)	NA	NA	78.4 ton/día
CO <sub>2</sub>	NA	NA	Por calcular ****
<b>Distribución</b>	NA	Considerado en maquinaria producción.	NA
<b>Uso</b>			
Agua en riego	4,808,000 lt/día	NA	NA
Lodos en empresa construcción	40 ton/día	NA	NA
<b>Fin de vida</b>			
Lodos en relleno sanitario	NA	NA	40.0 ton/día

\* Las consideraciones y cálculo de la energía eléctrica para este estudio se describe en el apartado de indicadores de impacto ambiental del presente trabajo.

\*\* El procedimiento para calcular las energías libres de formación Gibbs está descrito en el siguiente punto.

\*\*\* Este dato no representa la energía realmente generada en una termoeléctrica para el funcionamiento de la maquinaria. La energía real se presenta en los resultados del algoritmo desarrollado.

\*\*\*\* El resultado se presenta en los resultados del algoritmo desarrollado.

## 5.2.4. Procesamiento de datos.

### 5.2.4.1. Cálculo de energía libre de Gibbs de los compuestos químicos empleados en el tratamiento del agua residual.

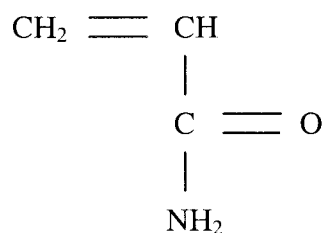
Los compuestos químicos empleados en el tratamiento del agua residual de la empresa generadora de papel son distribuidos por una empresa química. En general todas las empresas químicas que venden compuestos químicos como floculantes y coagulantes guardan con mucha seguridad sus fórmulas, por lo que la única información proporcionada acerca de éstos fueron sus hojas de seguridad en las cuales se indica el tipo de sustancia de forma general.

Para cumplir con el objetivo de este trabajo, era necesario obtener la energía libre de formación de Gibbs para cada compuesto por lo que se realizó una investigación sobre los métodos que pudieran servir al objetivo dada la información proporcionada.

Lo primero fue determinar cual era la forma molecular de los compuestos, los cuales para este trabajo son: dos tipos de poli(acrilamida), una amina policuaternaria, ácido fosfórico y urea.

De acuerdo a la Enciclopedia of Chemical Technology (Kroschwitz, 1998) existen varios tipos de floculantes clasificados como inorgánicos u orgánicos, siendo las poli(acrilamidas) y las poliaminas, junto con sus derivados, compuestos orgánicos de tipo sintético.

Como se mencionó en el apartado que trata el tema de floculantes, existen varios tipos de acrilamidas dependiendo del grupo que sustituya a R'. Para lograr el objetivo de este trabajo se consideró la molécula más sencilla de la poli(acrilamida) para obtener su energía libre de formación de Gibbs. El monómero principal de la poli(acrilamida) es el siguiente:



**Figura 5.10. Estructura del monómero principal de la poli(acrilamida).**

De acuerdo al método de Joback en Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry (Elvers, 1996) esta molécula cuenta con:

**Tabla 5.10. Incrementos del monómero de la poliacrilamida.**

Número de grupo	Tipo de grupo	I <sub>G</sub> (KJ/mol)
1	- NH <sub>2</sub>	14.07
1	O = C <	-120.50
1	= CH <sub>2</sub>	3.77
1	= O	-250.83
1	= C <	92.36
Sumatoria =		-261.16

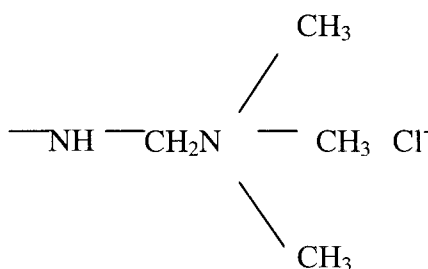
Entonces  $\Delta G^{\circ}_{f298} = -207.28$  KJ/mol

Con este dato podemos calcular cuanta energía se requiere para formar un polímero de acrilamida ya que de acuerdo a Kroschwitz (1998) los pesos moleculares de los floculantes comerciales van de 10 a 15 millones.

Si el peso molecular de esta molécula de poliacrilamida es 72, entonces tenemos 208,333.3333 moléculas por lo que la energía libre de Gibbs requerida para formar esta poliacrilamida es de  $-43,183,333.33$  KJ/mol.

Es importante mencionar que este es un método de aproximación ya que no están reportados todos los tipos de enlace existentes. Para esta molécula desconocemos los incrementos de energía Gibbs relacionados con el enlace -H por lo que hay que considerar que se está introduciendo un pequeño error al cálculo. Sin embargo es una muy buena aproximación dados los datos proporcionados y el objetivo de este trabajo.

De la misma forma procedemos para calcular la energía libre de Gibbs de la poliamina cuaternaria. El monómero principal de una poliamina cuaternaria de Mannich es el siguiente:



**Figura 5.11. Estructura del monómero principal de una poliamina cuaternaria de Mannich.**

De acuerdo al método de Joback en Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry (Elvers, 1996) esta molécula cuenta con :

**Tabla 5.11. Incrementos del monómero de la amina cuaternaria.**

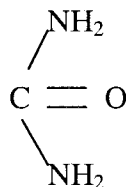
Número de grupo	Tipo de grupo	I <sub>G</sub> (KJ/mol)
1	> NH	89.39
1	> N -	163.16
3	CH <sub>3</sub> -	-43.96
1	Cl -	-64.31
1	- CH <sub>2</sub> -	8.42
Sumatoria =		64.78

Entonces  $\Delta G^{\circ}_{f298} = 118.66$  KJ/mol

Si el peso molecular de esta molécula de poliamina cuaternaria de Mannich es 123.4529, entonces tenemos 121503.8286 moléculas por lo que la energía libre de Gibbs requerida para formar esta poliamina cuaternaria es de 14,417,644.3 KJ/mol.

En el caso de esta molécula también se incluye un pequeño error ya que no se proporciona en la literatura la información de todos los incrementos de energía Gibbs para los enlaces >N< y -NH -.

Para la Urea se considera una molécula de la siguiente forma (Elvers, 1996):

**Figura 5.12. Estructura molecular de la urea.**

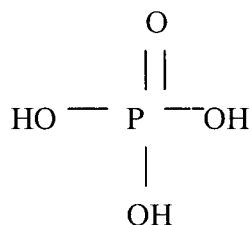
Aplicando el mismo procedimiento anterior, los incrementos se muestran en la tabla 5.5.

**Tabla 5.12. Incrementos de la urea.**

Número de grupo	Tipo de grupo	I <sub>G</sub> (KJ/mol)
2	- NH <sub>2</sub>	14.07
1	= O	-250.83
1	> C =O	-120.50
Sumatoria =		-343.19

Entonces  $\Delta G^{\circ}_{f298} = -289.31$  KJ/mol

Para el ácido fosfórico se considera la siguiente molécula de acuerdo a McKetta (1999):



**Figura 5.13. Estructura molecular del ácido fosfórico.**

Para obtener la energía libre de formación Gibbs del ácido se empleó el método propuesto por varios autores donde ésta es el resultado de la sumatoria de la energía de formación de todos los moles de los productos menos la sumatoria de la energía de formación de todos los moles de los reactantes. Esto se considero así ya que el grupo de enlace del fósforo no se proporciona en Elvers (1996) y el método escogido para el cálculo no incluye error al modelo.

De acuerdo a la reacción dada en Elvers (1996) la formación del ácido fosfórico sigue las siguientes reacciones:



y de acuerdo a Dean (1998) la formación del ácido fosfórico se muestra en la tabla 5.6.

**Tabla 5.13. Energías de formación del ácido fosfórico.**

Número moles	Molécula	$\Delta G^\circ_f$ (KJ/mol)
4	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	-265.9
1	P <sub>4</sub> O <sub>10</sub>	-639.4
6	H <sub>2</sub> O	-56.687

Entonces  $\Delta G^\circ = 1,362.878$  KJ/mol

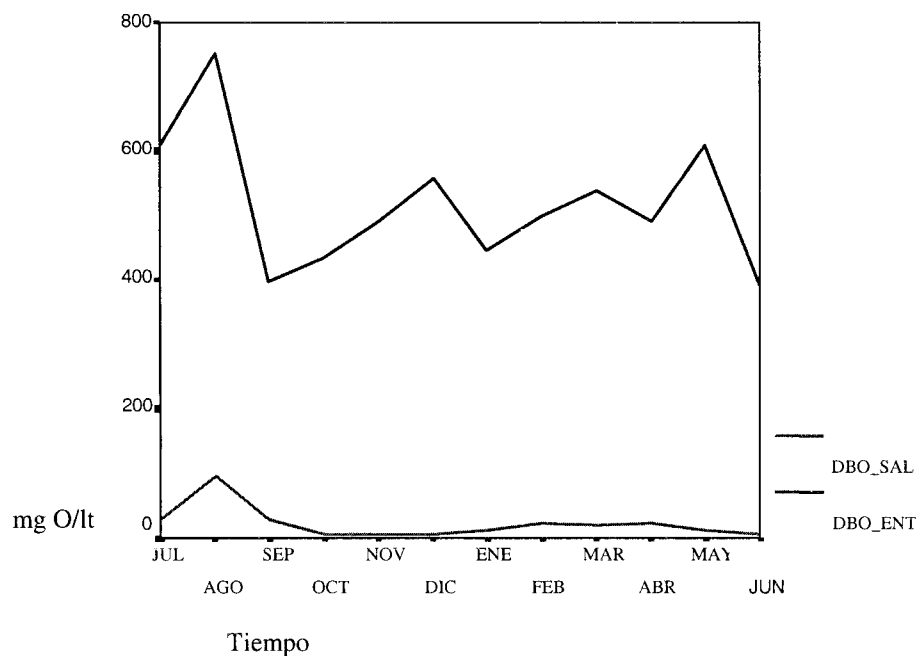
### 5.2.4.2. Tratamiento estadístico de datos.

El tratamiento de los datos estadísticos se realizó con el programa SPSS.

Primero se generó una gráfica comparativa de los datos proporcionados de DBO<sub>5</sub> de entrada y salida (Tabla 5.14) para obtener un acercamiento para distinguir si pudiese existir algún tipo de correlación entre ellas (Figura 5.14).

**Tabla 5.14. Datos de entrada y salida de DBO<sub>5</sub> de la PTAR.**

MESES	DBO_ENT	DBO_SAL
JUL	608	27
AGO	753	97
SEPT	397	28
OCT	433	6
NOV	491	6
DIC	557	6
ENE	444	11
FEB	498	23
MAR	539	21
ABR	489	22
MAY	609	12
JUN	391	6



**Figura 5.14. Comparación de valores de DBO<sub>5</sub> de entrada y salida de la PTAR.**

En la figura 5.14 se observa un valor de  $DBO_5$  disparado en el mes de agosto comparación con los demás meses. De esta observación se pensó que pudiera haber un tipo de correlación entre la entrada y la salida de los valores de  $DBO_2$ , y que probablemente hubiera un sesgo en la curva.

Posteriormente se realizó una prueba de estadística descriptiva para todas las variables (Tabla 5.15.). Debido al objetivo de este trabajo se hizo hincapié en los datos de  $DBO_5$  de entrada del influente y de la  $DBO_5$  del efluente. La media obtenida para la entrada de  $DBO_5$  fue de 22.0833 y para la salida de 147.3333.

**Tabla 5.15. Datos de la estadística descriptiva.**

	N Estd.	Mínimo Estd.	Máximo Estd.	Media Estd.	Desviación Estd.	Sesgo Estd.	Error Estd.	Curtosis Estd.	Error Estd.
DBO_SAL	12	6.00	97.00	22.0833	25.1051	2.770	.637	8.579	1.232
DQO_SAL	12	119.00	178.00	147.3333	19.3688	.020	.637	-1.335	1.232
SST_SAL	12	15.00	86.00	33.4167	19.9475	1.786	.637	3.989	1.232
PH_SAL	12	7.10	7.70	7.4833	.2038	-1.123	.637	.395	1.232
CND_SAL	12	720.00	2258.00	1309.1667	640.4446	.477	.637	-1.940	1.232
TMP_SAL	12	24.00	29.00	25.8333	1.6422	.465	.637	-.358	1.232
DBO_ENT	12	391.00	753.00	517.4167	104.0126	.955	.637	1.039	1.232
DQO_ENT	12	468.00	1162.00	879.7500	184.6924	-.836	.637	1.243	1.232
SST_ENT	12	2170.00	5154.00	3531.5833	910.8257	.044	.637	-.820	1.232
PH_ENT	12	6.70	7.90	7.5050	.3912	-1.008	.637	.238	1.232
CND_ENT	12	663.00	2239.00	1267.2500	634.2280	.456	.637	-1.904	1.232
TMP_ENT	12	22.00	33.00	27.2500	3.0189	.117	.637	.015	1.232

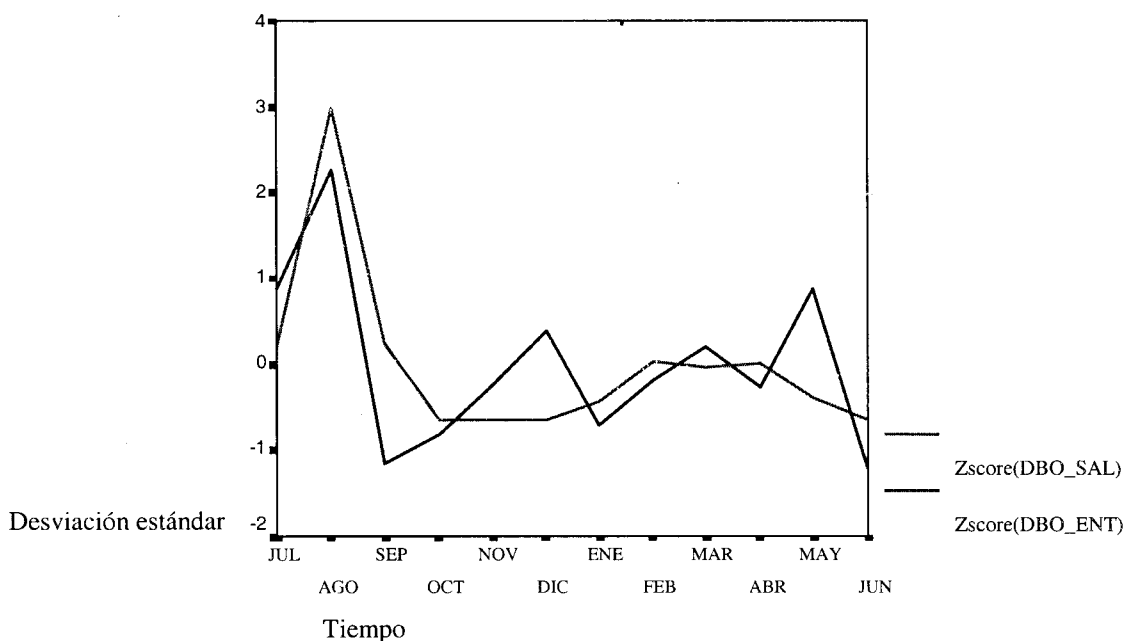
En la Tabla 5.15. se muestra el estadístico de sesgo para la  $DBO_5$  de salida de 2.770 y un error estándar de 0.637. A partir de estos datos se puede concluir que efectivamente hay un sesgo hacia la derecha en la curva de los datos.

Los datos fueron estandarizados (Tabla 5.16.) y se graficaron los valores de  $DBO_5$  de entrada y de salida para compararlos y determinar si podían considerarse confiables para ser usados. En la Figura 5.15. se muestra dicha comparación.

En la figura 5.15. se puede observar que la mayoría de los datos de  $DBO_5$  se encuentran alrededor de la media y que en su mayoría, no sobrepasan dos desviaciones estándar, por lo que se concluye que los datos son adecuados para ser utilizados en este trabajo debido a que este intervalo representa el 95% de confianza. Se realizó también esta comparación con la DQO y los resultados también fueron satisfactorios.

**Tabla 5.16. Datos estandarizados de los valores de DBO<sub>5</sub> de entrada y salida de la PTAR.**

MESES	DBO_ENT	DBO_SAL	zdbo_ent	zdbo_sal
JUL	608	27	0.8709	0.1958
AGO	753	97	2.2650	2.9841
SEPT	397	28	-1.1577	0.2357
OCT	433	6	-0.8120	-0.6406
NOV	491	6	-0.2540	-0.6406
DIC	557	6	0.3806	-0.6406
ENE	444	11	-0.7058	-0.4415
FEB	498	23	-0.1867	0.0365
MAR	539	21	0.2075	-0.0432
ABR	489	22	-0.2732	-0.0033
MAY	609	12	0.8805	-0.4017
JUN	391	6	-1.2154	-0.6406



**Figura 5.15. Comparación de los datos estandarizados de la DBO<sub>5</sub> de entrada y salida.**

Como siguiente paso se realizó una regresión lineal tipo eliminación (Tabla 5.17.) para observar la correlación entre los datos y determinar cual variable fue la que determinó los valores de salida de la DBO<sub>5</sub>. También se realizó un análisis de varianza ANOVA (Tabla 5.18.), donde la significancia fue de 0.01 para la DBO<sub>5</sub> de entrada y salida.



**Tabla 5.17. Variables de entrada y eliminadas durante el método de eliminación.**

Modelo	Variables de entrada	Variables eliminadas	Método
1	TMP_ENT, CND_ENT, DBO_ENT, SST_ENT, PH_ENT, DQO_ENT		
2		PH_ENT	Eliminación
3		CND_ENT	Eliminación
4		DQO_ENT	Eliminación
5		TMP_ENT	Eliminación
6		SST_ENT	Eliminación

1 Variables de entrada.

Variable dependiente: DBO\_SAL

**Tabla 5.18. Datos estadísticos de la ANOVA.**

Modelo		Suma de cuadrados	Media cuadrada	F	Sig.
1	Regression	5132.956	855.493	2.376	.180
	Residual	1799.961	359.992		
	Total	6932.917			
2	Regression	5131.391	1026.278	3.418	.083
	Residual	1801.526	300.254		
	Total	6932.917			
3	Regression	5112.583	1278.146	4.915	.033
	Residual	1820.333	260.048		
	Total	6932.917			
4	Regression	4672.289	1557.430	5.511	.024
	Residual	2260.627	282.578		
	Total	6932.917			
5	Regression	3893.668	1946.834	5.765	.024
	Residual	3039.248	337.694		
	Total	6932.917			
6	Regression	3501.314	3501.314	10.203	.010
	Residual	3431.603	343.160		
	Total	6932.917			

1 Predictores: (Constantes), TMP\_ENT, CND\_ENT, DBO\_ENT, SST\_ENT, PH\_ENT, DQO\_ENT

2 Predictores: (Constantes), TMP\_ENT, CND\_ENT, DBO\_ENT, SST\_ENT, DQO\_ENT

3 Predictores: (Constantes), TMP\_ENT, DBO\_ENT, SST\_ENT, DQO\_ENT

4 Predictores: (Constantes), TMP\_ENT, DBO\_ENT, SST\_ENT

5 Predictores: (Constantes), DBO\_ENT, SST\_ENT

6 Predictores: (Constantes), DBO\_ENT

Variable dependiente: DBO\_SAL

Los datos obtenidos señalan que los valores están correlacionados, ya que el coeficiente de correlación muestral (R) se aproxima a 1.0 como se observa en el resumen del modelo (Tabla 5.19.). También se observa que el valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es 0.5 lo cual indica que el 50% de los datos de la variable de salida es explicado por los datos de entrada, lo que apoya nuevamente que los datos generan un modelo adecuado.

**Tabla 5.19. Resumen del modelo estadístico.**

Modelo	R	$R^2$	$R^2$ ajustada	Error estándar del estimado
1	.860	.740	.429	18.9735
2	.860	.740	.524	17.3278
3	.859	.737	.587	16.1260
4	.821	.674	.552	16.8101
5	.749	.562	.464	18.3765
6	.711	.505	.456	18.5246

- 1 Predictores: (Constantes), TMP\_ENT, CND\_ENT, DBO\_ENT, SST\_ENT, PH\_ENT, DQO\_ENT
- 2 Predictores: (Constantes), TMP\_ENT, CND\_ENT, DBO\_ENT, SST\_ENT, DQO\_ENT
- 3 Predictores: (Constantes), TMP\_ENT, DBO\_ENT, SST\_ENT, DQO\_ENT
- 4 Predictores: (Constantes), TMP\_ENT, DBO\_ENT, SST\_ENT
- 5 Predictores: (Constantes), DBO\_ENT, SST\_ENT
- 6 Predictores: (Constantes), DBO\_ENT

En la tabla de coeficientes de esta prueba (Tabla 5.20.) se puede observar que la variable independiente que regula la salida de  $DBO_5$  es la  $DBO_5$  de entrada. El modelo de estos datos está dado por

$$DBO_{5salida} = -66.668 + 0.172 * DBO_{5entrada} \quad (6.3)$$

Esto quiere decir, que por cada unidad más de entrada de  $DBO_5$  habrá 0.17 de la unidad, más en la salida de  $DBO_5$ . El modelo está sustentado en que su significancia es 0.01 lo que significa que la prueba pasa el 99% de confianza.

De acuerdo a la prueba P-value se puede rechazar la hipótesis nula de que  $p \geq 0.05$ , por lo tanto los datos que conforman el modelo son significativos y es aceptado, es decir, los datos son adecuados para realizar el ACV.

La prueba de regresión se pudo realizar debido a que los datos de DBO<sub>5</sub>, ya sean de entrada o de salida de cada mes, no dependen uno del otro. De no haber sido así, no habría sido posible hacer este tipo de prueba.

**Tabla 5.20. Tabla de coeficientes del modelo estadístico.**

Modelo		Coefficientes Inestandarizados B	Error Estad.	Coefficientes Estandarizados Beta	t	Sig.
1	(Constantes)	-158.206	230.208		-687	.523
	DBO_ENT	.146	.079	.606	1.847	.124
	DQO_ENT	3.764E-02	.054	.277	.701	.515
	SST_ENT	-1.627E-02	.009	-.590	-1.778	.136
	PH_ENT	1.417	21.490	.022	.066	.950
	CND_ENT	-2.320E-03	.013	-.059	-.176	.867
	TMP_ENT	4.450	3.315	.535	1.342	.237
2	(Constantes)	-143.851	68.241		-2.108	.080
	DBO_ENT	.146	.072	.606	2.022	.090
	DQO_ENT	3.750E-02	.049	.276	.765	.473
	SST_ENT	-1.614E-02	.008	-.586	-1.979	.095
	CND_ENT	-2.706E-03	.011	-.068	-.250	.811
	TMP_ENT	4.318	2.418	.519	1.786	.124
	3	(Constantes)	-153.222	53.095		-2.886
DBO_ENT		.140	.063	.579	2.229	.061
DQO_ENT		4.540E-02	.035	.334	1.301	.234
SST_ENT		-1.668E-02	.007	-.605	-2.277	.057
TMP_ENT		4.477	2.172	.538	2.061	.078
4	(Constantes)	-122.097	49.413		-2.471	.039
	DBO_ENT	.187	.053	.774	3.500	.008
	SST_ENT	-1.394E-02	.007	-.506	-1.906	.093
	TMP_ENT	3.552	2.140	.427	1.660	.136
5	(Constantes)	-54.239	30.344		-1.787	.108
	DBO_ENT	.196	.058	.813	3.384	.008
	SST_ENT	-7.138E-03	.007	-.259	-1.078	.309
6	(Constantes)	-66.668	28.295		-2.356	.040
	DBO_ENT	.172	.054	.711	3.194	.010

Variable Dependiente: DBO\_SAL

### 5.3. Análisis de impactos.

#### 5.3.1. Categorías ambientales.

Como se describió en la metodología propuesta, se utilizaron para este estudio las categorías ambientales de cambio climático global y de agotamiento de recursos naturales. No se consideran otras categorías como contaminación del medio debido a que por el tipo de giro industrial y por las características del agua residual de la empresa productora de papel, no fue relevante dicha información.

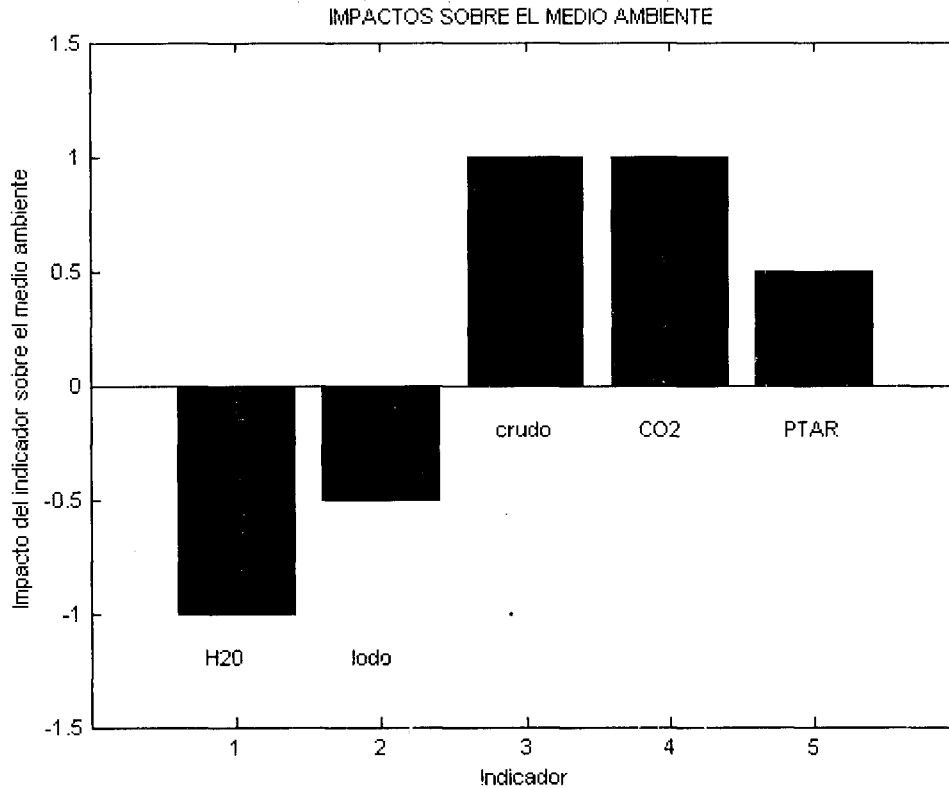
El indicador de la categoría de cambio climático global fue la producción de kg de CO<sub>2</sub>. Para el agotamiento de recursos se consideraron tres indicadores: (1) el ahorro ( $s=-1$ ) o agotamiento del agua ( $s=+1$ ), expresado en lt/día de agua que se trata o deja de tratar, (2) el agotamiento de hidrocarburos ( $s=+1$ ), expresado en kg crudo y (3) la formación de lodos como tierra fértil o como insumo para otra actividad ( $s=-1$ ) o su disposición final ( $s=+1$ ) en algún relleno sanitario, expresados en ton/día.

#### 5.3.2. Indicadores de impacto ambiental e índice global de impacto ambiental.

**Tabla 5.21. Resultados finales del algoritmo numérico.**

1. Indicador de impacto ambiental de ahorro de agua:	-1.000
2. Indicador de impacto ambiental de producción de lodos fértiles:	-0.500
3. Indicador de impacto ambiental de disminución de crudo:	+1.000
4. Indicador de impacto ambiental de emisiones de CO <sub>2</sub> :	+0.997
5. Índice Global de Impacto Ambiental de la PTAR:	+0.497

El impacto de la PTAR sobre el medio ambiente fue negativo cuando la importancia relativa de cada uno de los indicadores fue la misma. (Figura. 5.16.).



**Figura 5.16. Indicadores de Impacto Ambiental e Índice Global de Impacto Ambiental del ACV del agua tratada por la PTAR.**

#### Resultados para diferentes importancias relativas de los Indicadores de Impacto Ambiental

Se emplearon cuatro vectores de ponderación para obtener el IGIA del agua tratada en la PTAR cuando cada indicador tiene una importancia relativa diferente. Esto se realizó con el fin de obtener el IGIA al considerar la importancia que tiene cada uno de los indicadores en diferentes regiones de nuestro país.

En regiones donde exista una gran abundancia de agua, la importancia del indicador de ahorro de agua será pequeño, comparado con la importancia que tenga el mismo en una región donde haya escasez. En la Tabla 5.22. se presentan los cuatro vectores de ponderación utilizados para la evaluación del IGIA.

**Tabla 5.22. Vectores de ponderación utilizados para la evaluación del IGIA.**

Vector	IIA_H <sub>2</sub> O	IIA_CO <sub>2</sub>	IIA_Lodos	IIA_Crudo
1	0.7	0.1	0.1	0.1
2	0.1	0.7	0.1	0.1
3	0.1	0.1	0.7	0.1
4	0.1	0.1	0.1	0.7

En la Tabla 5.23. se presentan los resultados obtenidos al aplicar los vectores de ponderación a los indicadores obtenidos por el algoritmo. Los resultados corresponden a los pesos atribuidos por los indicadores para los cuatro vectores de ponderación y el IGIA correspondiente a cada uno de ellos.

**Tabla 5.23. Pesos atribuidos a cada indicador para los 4 vectores y el IGIA correspondiente a cada caso.**

Vector	1	2	3	4
IIA_H <sub>2</sub> O	-0.7	-0.1	-0.1	-0.1
IIA_CO <sub>2</sub>	0.0997	0.6979	0.0997	0.0997
IIA_Lodos	-0.05	-0.05	-0.35	-0.05
IIA_Crudo	0.1	0.1	0.1	0.7
IGIA	<b>-0.5503</b>	<b>0.6479</b>	<b>-0.2503</b>	<b>0.6497</b>

#### 5.4. Resultados del análisis de mejoras.

Tabla 5.24. Resultados finales del algoritmo numérico para el análisis de mejoras.

1. Indicador de impacto ambiental de ahorro de agua:	-1.000
2. Indicador de impacto ambiental de producción de lodos fértiles:	-1.000
3. Indicador de impacto ambiental de disminución de crudo:	+1.000
4. Indicador de impacto ambiental de emisiones de CO <sub>2</sub> :	+0.997
5. Índice Global de Impacto Ambiental de la PTAR:	-0.003

El impacto de la PTAR sobre el medio ambiente fue positivo cuando la importancia relativa de cada uno de los indicadores fue la misma (Figura 5.17.).

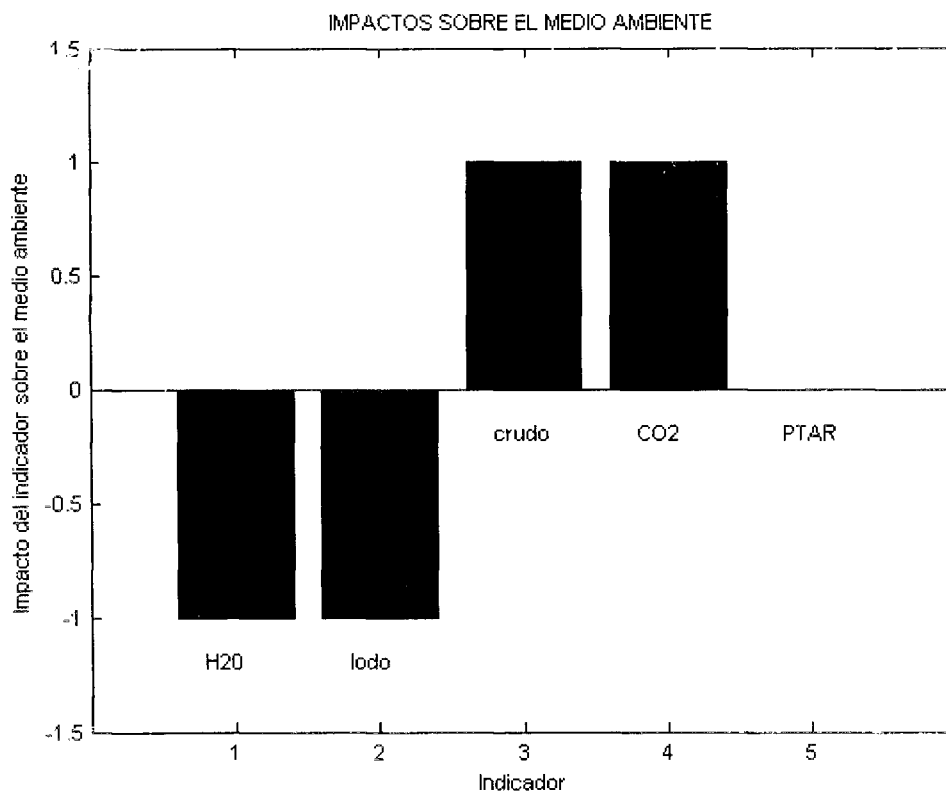


Figura 5.17. Indicadores de Impacto Ambiental e Índice Global de Impacto Ambiental del ACV del agua tratada por la PTAR en el análisis de mejoras.

Resultados para diferentes importancias relativas de los Indicadores de Impacto Ambiental

En la Tabla 5.25. presentan los cuatro vectores de ponderación utilizados para la evaluación del IGIA en el análisis de mejoras.

**Tabla 5.25. Vectores de ponderación utilizados para la evaluación del IGIA en el análisis de mejoras.**

Vector	IIA_H <sub>2</sub> O	IIA_CO <sub>2</sub>	IIA_Lodos	IIA_Crudo
1	0.7	0.1	0.1	0.1
2	0.1	0.7	0.1	0.1
3	0.1	0.1	0.7	0.1
4	0.1	0.1	0.1	0.7

En la Tabla 5.26. se presentan los resultados obtenidos al aplicar los vectores de ponderación a los indicadores obtenidos por el algoritmo. Los resultados corresponden a los pesos atribuidos por los indicadores para los 4 vectores de ponderación y el IGIA correspondiente a cada uno de ellos en el análisis de mejoras.

**Tabla 5.26. Pesos atribuidos a cada indicador para los 4 vectores y el IGIA correspondiente a cada caso en el análisis de mejoras.**

Vector	1	2	3	4
IIA_H <sub>2</sub> O	-0.7	-0.1	-0.1	-0.1
IIA_CO <sub>2</sub>	0.0997	0.6979	0.0997	0.0997
IIA_Lodos	-0.1	-0.1	-0.7	-0.1
IIA_Crudo	0.1	0.1	0.1	0.7
IGIA	<b>-0.6003</b>	<b>0.5979</b>	<b>-0.6003</b>	<b>0.5997</b>



### **5.5. Comentarios e Interpretación.**

En la actualidad existen algunos acercamientos para realizar un ACV, pero en general constan de las mismas etapas fundamentales. Las etapas en general consisten en definir el objetivo y el alcance, en realizar un análisis de inventario, en evaluar los impactos y en realizar la interpretación. La metodología propuesta en este estudio consideró las etapas fundamentales para un ACV.

Es importante reconocer que los resultados obtenidos en este estudio corresponden al ACV bajo las consideraciones que se realizaron para alcanzar el objetivo del mismo.

Durante la etapa del análisis del inventario se llevó a cabo la recolección de la información necesaria para realizar el ACV. En este estudio se detectó que la adquisición de la información fue un factor limitante para la realización de este tipo de análisis, lo que confirmó lo expuesto por algunos autores.

La fuente principal para recopilar la información fue la EPP. Se observó que aún cuando la propia empresa estaba interesada en la realización de este ACV, no pudieron proporcionar la totalidad de los datos indispensables para la investigación, por lo que se tuvieron que omitir en el análisis, como lo fue la cantidad de hipoclorito de sodio que se utiliza en la etapa final del módulo biológico. Por lo anterior, se debe tener presente que en los resultados obtenidos no se consideró la generación de CO<sub>2</sub> por la producción de dicho compuesto. Para estudios posteriores se podría considerar dentro del algoritmo simplemente incluyéndolo en el cálculo respectivo.

Por otra parte, es importante mencionar que debido a que como la información referente a la composición de los compuestos químicos empleados durante el tratamiento del agua residual tampoco fue proporcionada por la empresa química que los distribuye a la EPP, se tuvo que tomar como base para el estudio la estructura molecular básica de los monómeros que conforman los compuestos para calcular la energía de formación de cada uno de los polímeros.

Para calcular la energía de formación de los compuestos se emplearon dos métodos. (1) El que considera la energía libre estándar de formación fue utilizado para obtener la energía del ácido fosfórico debido a que en este caso se contó con la información requerida en la literatura y (2) se empleó el método de Joback para el resto de los compuestos por no contar con los valores de las energías libres estándar de formación de dichos compuestos.

La utilización del método de Joback dio la aproximación más exacta de la energía de formación de la poliacrilamida, de la poliamina y de la urea. Para este método como para el propuesto en Dean (1998) se tiene documentada la energía de las contribuciones por

cada tipo de enlace o grupos estructurales, sin embargo, no se cuenta con todos los existentes.

En la aproximación de la formación de energía de los compuestos químicos que se realizó no se incluyó la contribución del enlace de  $-H$  para la poliacrilamida y los enlaces  $>N<$  y  $-NH-$  para la poliamina, de forma aislada pero si se consideró en otros grupos estructurales de forma agrupada.

El modelo de la generación de  $CO_2$  al disponer el agua residual sin tratar, consideró como cuerpo receptor un río. Para obtener los datos de requerimiento de  $O_2$  en un río, para la oxidación de la materia orgánica del agua residual, se deben conocer entre otros parámetros: su flujo, la cantidad de materia orgánica en el mismo y la relación de uso de  $O_2$  por kilogramo de materia orgánica.

Debido a que no se contó con esta información se tomaron los datos preestablecidos por los expertos sobre el contenido de la materia orgánica en un río y de la razón de decaimiento del oxígeno. También ese definió el flujo del río para el cual corresponden los resultados obtenidos. Para poder aplicar el modelo propuesto en condiciones diferentes de flujo sólo es necesario proporcionar al algoritmo la información pertinente.

Con la metodología de ACV propuesta fue posible relacionar los impactos adversos y beneficios que se generan durante el tratamiento del agua residual de la empresa a través de los IIA y del Índice Global de Impacto Ambiental. También fue posible desarrollar un algoritmo que calcula de forma rápida, exacta y precisa el IGIA del agua tratada por la PTAR.

Dicho IGIA indicó que los impactos adversos generados por el tratamiento del agua residual durante la operación de la PTAR de la empresa productora de papel no son compensados por los beneficios generados por la misma cuando los 4 indicadores tienen la misma importancia relativa. En la gráfica obtenida del ACV se puede observar que el indicador de la producción de  $CO_2$  durante el tratamiento del agua residual ( $IIA_{CO_2}=+0.9970$ ) y el de agotamiento del crudo para la generación de la energía eléctrica requerida durante dicho tratamiento ( $IIA_{crudo}=+1$ ) no es compensada por el beneficio de generar lodos como insumos para otra actividad ( $IIA_{lodos}=-0.5$ ) ni el ahorro de agua por realizar el tratamiento ( $IIA_{H_2O}=-1$ ) ya que el IGIA fue de  $+0.4976$ . Para esta ponderación, se considera que el tratamiento del agua residual en la PTAR genera impactos adversos al medio por lo que no es sustentable .

En este caso se puede identificar que las categoría que impactan al medio son el agotamiento de hidrocarburos y la categoría de cambio climático global debido a la producción de  $CO_2$ .

Sin embargo, es importante mencionar que el tratamiento del agua residual si tiene impactos positivos sobre el medio como el ahorro de agua y generación de lodos. Por esto,

se emplearon 4 vectores de ponderación para evaluar los IIA de acuerdo a diferentes pesos para cada uno de ellos.

Para diferentes regiones de nuestro país y del mundo en general, cada IIA tendrá diferente importancia relativa con respecto a los otros, dependiendo de la abundancia de cada recurso o implicaciones de salud para la comunidad específica donde se realiza el ACV.

El análisis de los IIA con diferente importancia relativa señala que para regiones en las cuales el agua es un recurso escaso (Vector 1), el IGIA (-0.5503) indica que el uso de la PTAR es sostenible para el medio. Así mismo, cuando es importante la generación de lodos para abono de tierras infértiles o uso en otras actividades (Vector 3), el uso de la PTAR también lo es.

En los casos donde es más importante la generación de CO<sub>2</sub> (Vector 2) y de agotamiento de hidrocarburos (Vector 4), el IGIA indicó que el uso de la PTAR no es sostenible para el medio.

Por otra parte, no es posible determinar que tan significativo es el impacto del uso de la PTAR debido a que no se cuenta con datos de otros ACV de este tipo de procesos para tener un marco de referencia con el cual comparar.

Para realizar un análisis de mejoras fue necesario considerar la factibilidad de llevar a cabo los cambios que se proponen en el mismo. Existen diversos niveles para alcanzar un mejoramiento en cualquier proceso o actividad, los cuales requieren de diferentes montos de inversión y de complejidad para su implementación. La más cara y compleja es el diseño de procesos ecoeficientes, seguido por la reingeniería y la de optimización, siendo esta última la más sencilla y barata.

En el análisis de mejoras realizado en este estudio se consideró la optimización del proceso del uso de la PTAR. El reuso del 100% de los lodos generados durante el uso de la PTAR es la alternativa a implementar más barata y sencilla. Inclusive representaría una ganancia para la EPP. En la actualidad la EPP únicamente reusa el 50% de los lodos generados por lo que el otro 50% es considerado como residuo que se dispone finalmente en el relleno sanitario y pierde su valor (IIA=0.5).

El análisis de mejoras realizado consideró que el 100% de los lodos es reusado y en los resultados se observa que cuando los IIA tienen la misma importancia (IGIA=-0.003) y cuando se aplican los vectores 1 (IGIA=-0.6003) y 3 (IGIA=-0.6003) de ponderación, el funcionamiento de la PTAR es sustentable para el medio, por lo que se puede afirmar que con este cambio el uso de la PTAR incrementaría los beneficios que proporciona al medio y el impacto ambiental generado por la misma sería positivo.

El algoritmo particular desarrollado para este estudio puede ser usado en México para cualquier PTAR que cuente con los mismos procesos de la PTAR aquí estudiada.

Cualquier otra PTAR en México que cuente tanto de un módulo biológico como de uno físico-químico puede utilizar este algoritmo incorporando la información referente a los compuestos químicos que utilice en sus procesos en el área correspondiente. Además de la consideración anterior, si se quiere utilizar este algoritmo en algún otro país, es necesario que se estandarice de acuerdo a las eficiencias en la producción, transporte y tipo de energía eléctrica generada en dicho país.

## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

En este trabajo se detectó que el factor crítico en el desarrollo del ACV del agua tratada durante el funcionamiento de la PTAR fue la adquisición de la información requerida. Este factor determinó las consideraciones que se realizaron durante el ACV para alcanzar los objetivos de la investigación.

La metodología propuesta sirvió para evaluar el impacto de la PTAR a través del ACV del tratamiento del agua residual, en la cual se relacionaron los impactos adversos y beneficios de las categorías ambientales de cambio climático global y de agotamiento de recursos naturales a través del Índice Global de Impacto Ambiental de la PTAR. Los cálculos fueron obtenidos de forma rápida y sencilla a través del algoritmo generado.

El Índice Global de Impacto Ambiental, obtenido a partir del vector de ponderación 1, en el cual el agua es un recurso valioso y necesario para la región (IGIA=-0.5503), indicó que los impactos adversos durante la operación de la PTAR son compensados por los beneficios generados por la misma. De acuerdo a dicho vector el funcionamiento de la PTAR durante el tratamiento del agua residual fue sustentable para el medio.

En el análisis de mejoras realizado se consideró el reuso del 100% de los lodos generados durante el tratamiento del agua residual por la PTAR. El IGIA obtenido cuando los PIA tiene la misma importancia mejoró de +0.4970 a -0.003 unidades, lo cual indica un incremento en los beneficios por el uso de la PTAR. También se observó un incremento en el IGIA obtenido al utilizar el vector de ponderación 1, el cual fue de -0.6003.

Por medio del análisis de mejoras se determinó una alternativa para mejorar el desempeño hacia el medio del PTAR, que es sencilla y no implica una inversión sino una ganancia para la empresa.

Durante el desarrollo del ACV del agua tratada en la PTAR se determinó que los impactos adversos generados al medio están asociados a las categorías ambientales de agotamiento de hidrocarburos y de cambio climático global, por lo que en investigaciones futuras se deberán realizar análisis de mejoras en los procesos que intervienen en dichas categorías.

El algoritmo numérico desarrollado para este estudio puede ser usado para el ACV de cualquier PTAR en México que lleve a cabo los mismos procesos evaluados en los módulos biológico y físico-químico en este trabajo.

## **6.2. Recomendaciones**

Se recomienda tener acceso a toda la información necesaria para realizar un ACV dentro de los límites del estudio previamente establecidos. De no ser posible se deben definir claramente las consideraciones que se tomaran para el desarrollo del ACV. Por lo mismo, los ACV deben ser acotados para obtener resultados útiles que sirvan para tomar decisiones.

Se le recomienda a la empresa productora de papel que busque alternativas para reusar los lodos que son dispuestos en el relleno sanitario en otra actividad productiva. Por ejemplo una opción podría ser su utilización como fertilizante de jardines o de cultivos, lo que sería aun más beneficioso al medio ya que las plantas al realizar su proceso de respiración fijan el  $\text{CO}_2$  y de esta forma se podría compensar más la generación del mismo durante el tratamiento del agua residual, así como también representaría un beneficio económico para la empresa.

También se le recomienda realizar diversos análisis de mejoras para poder determinar en que otras áreas de oportunidad se puede mejorar el desempeño de la PTAR, especialmente en los procesos relacionados con la generación de  $\text{CO}_2$  y de agotamiento de hidrocarburos.

Es importante realizar otros ACV referentes al funcionamiento de otras PTARs bajo las mismas condiciones para poder generar una un marco de referencia del grado en el que impacta al medio una PTAR en particular.

**APÉNDICE 1**  
**INFORMACIÓN SOBRE EL ACV**

### Sitios de interés en Internet.

- *Centre of Environmental Science (CML)*  
<http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/index.html>
- *Life Cycle Assessment Links*  
<http://www.life-cycle.org/>
- *Centre for Design at Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT)*  
<http://www.cfd.rmit.edu.au/dfe/lca.html>
- *LCA Hotlist: Links about LCA, collected and annotated by G. Doka*  
<http://www.doka.ch/lca.htm>
- *IVF - LCA: Life Cycle Assessments*  
[http://www.ivf.se/industrial\\_environment/omraden/lca/sida1LCA.htm](http://www.ivf.se/industrial_environment/omraden/lca/sida1LCA.htm)
- *RTI's Life Cycle Assessment Program*  
<http://www.rti.org/index.cfm>
- *Business and Sustainable Development: A Global Guide*  
[http://www.bsdglobal.com/tools/systems\\_lca.asp](http://www.bsdglobal.com/tools/systems_lca.asp)
- *Eco-Efficiency and Cleaner Production*  
<http://www.ea.gov.au/industry/eecp/>
- *The ATHENA™ Sustainable Materials Institute*  
<http://www.athenasml.ca/index.html>
- *InLCA - International Conference & Exhibition on Life Cycle Assessment: Tools for Sustainability* <http://www.iere.org/InLCA/agenda.htm>
- *EcoSite: The World Wide Resource for LCA*  
<http://www.ecosite.co.uk>
- *International Society for Industrial Ecology*  
<http://www.yale.edu/is4ie>
- *Industrial Ecology Dissertation Database.*  
<http://www.yale.edu/is4ie/thesis/dissert1.htm>
- *Ecocycle*  
[ec.gc.ca/ecocycle/english](http://ec.gc.ca/ecocycle/english)
- *SETAC Life-Cycle Assessment (LCA) Advisory Group*  
<http://www.setac.org/lca.htm>
- *The Association of Plastics Manufacturers in Europe (APME)*  
<http://www.apme.org>
- *American Plastics Council - Abstract*  
[http://www.plastics-car.com/resources/life\\_cycle.html](http://www.plastics-car.com/resources/life_cycle.html)
- *Environmental Expert.com - Articles*  
<http://www.environmental-expert.com/article-index.htm>
- *International Iron and Steel Institute (IISI)*  
[http://www.worldsteel.org/env\\_lca.php](http://www.worldsteel.org/env_lca.php)
- *German Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt)*  
<http://www.umweltbundesamt.de/index-e.htm>
- *World Business Council on Sustainable Development (WBCSD).*  
<http://www.wbcd.org>



- *United Nations Environmental Program (UNEP) Division of Technology, Industry and Economy*. <http://www.unepie.org/home.html>
- *Environment Canada*.  
<http://www.ec.gc.ca/envhome.html>
- *Environmental Protection Agency (US)*.  
<http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/LCaccess>
- *American Center for Life Cycle Assessment*  
<http://www.lcacenter.org>
- *World Resources Institute* <http://www.wri.org>
- *World Summit on Sustainable Development, August 26 - September 4 2002. Taking stock and looking forward, ten years after Rio*  
<http://www.johannesburgsummit.org>
- *Technical University of Delft, Clean Technology Institute*  
<http://www.interduct.tudelft.nl>
- *Canfor* <http://www.canfor.com/4000asp>
- *Five Winds International* <http://www.fivewinds.com>
- *Nortel Networks*  
<http://www.nortel.com/corporate/community/environment/index.html>
- *PRe, Product Ecology Consultants* <http://www.pre.nl/lca.html>
- *Journal of Industrial Ecology*  
<http://www.mitpress.mit.edu/journal-home.tcl?>
- *The International Journal of Life Cycle Assessment*  
<http://www.ecomed.de/journals/lca>
- *Tomorrow* <http://www.tomorrow-web.com>

#### **SETAC. <http://www.setac.org/lca.html>**

- Allen, D.T., et al. (ed.) 1997. *Public Policy Applications of Life-Cycle Assessment*. SETAC.
- Barnthouse, L. 1998. *Life-Cycle Impact Assessment: The State-of-the-Art*, 2nd edition. SETAC.
- Christiansen, K. (ed.). 1997. *Simplifying LCA: Just a Cut?* SETAC - Europe.
- Consoli, F., et al., 1993. *Guidelines for Life Cycle Assessment: A Code of Practice*. Proceedings of a workshop in Sesimbra, Portugal. SETAC.
- Curran, M.A., and J.A. Todd. 1999. *Streamlined Life-Cycle Assessment: A Final Report from the SETAC North America Streamlined LCA Workgroup*. SETAC and SETAC Foundation for Environmental Education, Inc.
- Fava, J., et al. 1993. *A Conceptual Framework For Life-Cycle Impact Assessment*. Workshop Report. Sandestin, Florida: SETAC and SETAC Foundation for Environmental Education, Inc.
- Fava J., et al. (eds.). 1991. *A Technical Framework for Life-Cycle Assessment*. Washington, D.C.: SETAC and SETAC Foundation for Environmental Education, Inc.
- Huppel, G. and F. Schneider. 1994. *Allocation in LCA*. SETAC - Europe.

- SETAC. 1994. Life-cycle Assessment Data Quality: A Conceptual Framework. SETAC.
- SETAC. 1997. Fifth LCA Symposium for Case Studies. SETAC - Europe.
- SETAC. 1997. Sixth LCA Symposium for Case Studies. SETAC - Europe.
- SETAC. 1999. Seventh LCA Case Studies Symposium. SETAC - Europe.
- SETAC - Europe. 1992. Life Cycle Assessment. Brussels, Belgium.
- Udo de Haes, H.A. (ed.). 1994. Integrating Impact Assessment into LCA. SETAC - Europe.
- Udo de Haes, H.A. (ed.). 1996. Towards a methodology for life cycle impact assessment. Brussels, Belgium: SETAC - Europe.

**EPA. <http://www.epa.gov/ncepihom/orderpub.html>**

- Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. 1996. *Life Cycle Assessment for Chemical Agent Resistant Coating*. EPA/600/R-96/104.
- Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. 1996. *Life Cycle Assessment for PC Blend 2 Aircraft Radome Depainter*. EPA/600/R-96/094.
- Environmental Protection Agency. Office of Enforcement and Compliance. 1995. *Federal Facility Pollution Prevention Project Analysis: A Primer for Applying Life Cycle and Total Cost Assessment Concepts*.
- Environmental Protection Agency. Office of Pollution Prevention and Toxics. 1995. *Incorporating Environmental Costs and Considerations into Decision-Making: Review of Available Tools and Software. A Guide for Business and Federal Facility Managers* <http://www.epa.gov/opptintr/acctg/rev/toc.htm>
- Environmental Protection Agency. Office of Solid Waste. 1995. *Guidelines for Assessing the Quality of Life Cycle Inventory Analysis*. EPA/530/R-95/010.
- Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning and Standards. 1994. *Life Cycle Impact Assessment: A Conceptual Framework, Key Issues, and Summary of Existing Methods*. EPA/452/R-95/002.
- Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. 1994. *Development of a Pollution Prevention Factors Methodology Based on Life-Cycle Assessment: Lithographic Printing Case Study*. EPA/600/R-94/157.
- Environmental Protection Agency. Office of Solid Waste. 1994. *Life Cycle Assessment: Public Data Sources for the LCA Practitioner*. EPA/530/R-95/009.
- Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. 1993. *Life Cycle Design Guidance Manual*. EPA/600/R-92/226.
- Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. 1993. *Life Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles*. EPA/600/R-92/245
- Environmental Protection Agency, Vigon B., et al. 1992. *Product Life-Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles*. Battelle and Franklin Associates Ltd. EPA/600/R-92/036.

**ISO. <http://www.iso.ch/iso/en/>**

- *Environmental Management - Environmental Performance Evaluation - Guidelines* (ISO 14031: 1999).
- *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework* (ISO 14040: 1997).
- *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Goal and Scope Definition and Inventory Analysis* (ISO 14041: 1998).
- *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Life Cycle Impact Assessment* (ISO 14042: 2000).
- *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Life Cycle Interpretation* (ISO 14043: 2000).
- *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Life Cycle Assessment Data Documentation Format* (ISO 14048). [not yet published]
- *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Examples of Application of ISO 14041 to Goal and Scope Definition and Inventory Analysis* (ISO 14049: 2000).

**Standards Sales. Canadian Standards Association. 178 Rexdale Blvd. Rexdale (Toronto), Ontario. Canada M9W 1R3.**

- *Life Cycle Assessment*, Standard CAN/CSA-Z760, 1994.
- *Life Cycle Review* (supporting CAN/CSA-Z760), 1994.
- *Design for Environment*, Standard CAN/CSA-Z762, 1995.

**Documentos, artículos, libros y resúmenes de conferencias.**

- Azapagic, A. 1999. Life Cycle Assessment and Its Application to Process Selection, Design and Optimisation. *Chem. Eng. J.*, 73, 1-21.
- Azapagic, A. and R. Clift. 1999. The Application of Life Cycle Assessment to Process Optimisation. *Comp. & Chem. Eng.*, 23, 1509-1526.
- Azapagic, A. and R. Clift. 1999. Life Cycle Assessment and Multiobjective Optimisation. *Journal of Cleaner Production*, 7(2), 135-143.
- Azapagic, A. and R. Clift. 1999. Life Cycle Assessment as a Tool for Improving Process Performance: A Case Study on Boron Products. *Int. J. LCA*, 4(3), 133-142.
- Azapagic, A. and R. Clift. 1998. Linear Programming as a Tool in Life Cycle Assessment. *Int. J. LCA*, 3(6), 305-316.
- Azapagic, A., Clift, R., Petrie, J.G. and M. Stewart. 1998. *Process Design and Operation for the Environment*. Institution of Chemical Engineers.
- Centre for Environmental Science. 1993. *Environmental Life Cycle Assessment of Products*. Leiden University, The Netherlands.
- Ciambrone, D.F. 1997. *Environmental Life Cycle Analysis*. Lewis Publishers, Inc.
- Curran, M.A. (ed.). 1996. *Environmental Life Cycle Assessment*. McGraw-Hill, New York.

- Dennison, F.J., Azapagic, A., Clift, R., and C.R.I. Clayton. 1999. Life Cycle Assessment: Comparing Strategic Options for the Mains Infrastructure. *Water Sci. & Technol.*, 39(10/11), 315-319.
- Dennison, F.J., Azapagic, A., Clift, R. and J.S. Colbourne. 1998. Assessing Management Options for Wastewater Treatment Works in the Context of Life Cycle Assessment. *Water Sci. & Technol.*, 38(11), 23-30.
- Environment Canada - National Office of Pollution Prevention and the Hazardous Waste Branch. Environmental Life Cycle Management: A Guide for Better Business Decisions. <http://www.ec.gc.ca/ecocycle/english/pubs.cfm>
- Frankl, P. and F. Rubik. 1999. *Life Cycle Assessment in Industry and Business: Adoption Patterns, Applications and Implications*. Springer Verlag.
- Graedel, T.E. 1998. *Streamlined Life-Cycle Assessment*. Prentice Hall.
- Guinee, J.B., et al. 2001. *The New LCA Guide* Kluwer Academic Publishers. <http://www.leidenuniv.nl/cml/lca2/index.html>
- Guinée, J.B. (ed.) Report of a Danish-Dutch workshop on LCA methodologies held on 16-17 September 1999 at CML, Leiden <http://www.leidenuniv.nl/cml/lca2/workshopreportfinalversion.pdf>
- Guinee, J.B., Udo de Haes, H.A., and G. Huppes. 1993. Quantitative life cycle assessment of products. 1: Goals definition and inventory. *Journal of Cleaner Production*, 1(1), 3-13.
- Guinée, J.B., Heijungs, R., Udo de Haes, H.A., and G. Huppes. 1993. Quantitative life cycle assessment of products. 2: Classification, valuation and improvement analysis. *Journal of Cleaner Production*, 1(2), 81-91.
- Guinée, J.B., et al. 1996. *LCA Impact Assessment of Toxic Releases*. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, Netherlands.
- Heijungs R, et al. 1992. *Environmental Life Cycle Assessment of Products. Vol. I: Guide, and Vol. II: Backgrounds*. Leiden: CML Center for Environmental Studies, Leiden University.
- Hofstetter, P. 1998. *Perspectives in Life Cycle Impact Assessment: A Structured Approach to Combine Models of the Technosphere, Ecosphere, and Valuesphere*. Kluwer Academic Publishers.
- Huijbregts, M.A.J. 1999. Priority Assessment of Toxic Substances in the Frame of LCA - Development and Application of the Multi-Media Fate, Exposure and Effect Model USES-LCA. University of Amsterdam. <http://www.leidenuniv.nl/cml/lca2/index.html>
- Huijbregts, M.A.J. 1999. Ecotoxicological Effect Factors for the Terrestrial Environment in the Frame of LCA. University of Amsterdam. <http://www.leidenuniv.nl/cml/lca2/index.html>
- Huijbregts, M.A.J. Life-Cycle Impact Assessment of Acidifying and Eutrophying Air Pollutants. Calculation of Equivalency Factors with RAINS-LCA (Draft Version). University of Amsterdam. <http://www.leidenuniv.nl/cml/lca2/index.html>
- International Institute for Sustainable Development. 1996. *Global Green Standards: ISO 14000 and Sustainable Development*. Winnipeg, Canada.
- Jensen, A.A., et al. 1997. *Life Cycle Assessment (LCA): A guide to approaches, experiences and information sources* Report to the European Environment

- Agency. Copenhagen, Denmark.  
<http://themes.eea.eu.int/showpage.php/improvement>
- Keoleian, G.A. and D. Menerey. 1994. *Product Life Cycle Assessment to Reduce Health Risks and Environmental Impacts*. Noyes Publications.
  - Lindfors L-G, et al. 1995. *Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment*. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, report # Nord 1995:20.
  - Nicholas, M.J., Clift, R., Walker, F.C., Azapagic, A. and D.E. Porter. 2000. Determination of 'Best Available Techniques' for Integrated Pollution Prevention and Control: A Life Cycle Approach. *ICHEME Trans. Part B*, Vol. 78, No. 3, 193-203.
  - Ryding, S.O. 1992. *Environmental Management Handbook : The Holistic Approach from Problems to Strategies*. IOS Press.
  - Schaltegger, S. and A. Braunschweig (eds.). 1997. *Life Cycle Assessment (LCA)*. Birkhauser Publishing.
  - Seppala J. 1997. *Decision Analysis as a Tool for Life Cycle Impact Assessment*. Finnish Environment Institute. Helsinki, Finland.
  - SAE International. 1998. *Proceedings of the 1998 Total Life Cycle Conference*.
  - SAE International. 2000. *Proceedings of the 2000 Total Life Cycle Conference*.
  - Steen, B. and S.O. Ryding. 1994. *The EPS Enviro-Accounting Method*. Swedish Environmental Research Institute, Göteborg, Sweden.
  - Sustainability and Society for the Promotion of Life Cycle Development. 1993. *The LCA Sourcebook*. London, England.
  - United Nations Environmental Programme. 2000. *Towards the Global Use of Life Cycle Assessment*. United Nations Publications.
  - Van den Berg, N.W, et al. 1995. *Beginning LCA : A Guide into environmental Life Cycle Assessment*. National Reuse of Waste Research Programme, Netherlands.
  - Weidema, B. 1998. *Environmental Assessment of Products*. 3<sup>rd</sup> Edition. Helsinki: UETP-EEE.
  - Yimbo, P.O. *ISO 14040 - Environmental Management: Life Cycle Assessment*. Stadler-Burgess.

**Journal of Industrial Ecology. Yale University.**  
<http://www.yale.edu/is4ie/thesis/dissert3.htm#LCA>.

- Baumann, Henrikke 1998. *Life Cycle Assessment and Decision Making: Theories and practices*. Chalmers University of Technology, Sweden.
- Ciantar, Christopher. 2000. *Sustainable Development of Refrigerator Systems Using Replacement Environmentally Acceptable Refrigerants*. Bournemouth University, UK.
- Cowell, Sarah J. 1998. *Environmental Life Cycle Assessment of Agricultural Systems: Integration Into Decision-Making*. University of Surrey, Guildford, Surrey, UK.
- Ekvall, Tomas. 1999. *System Expansion and Allocation in Life Cycle Assessment - With Implications for Wastepaper Management*. Technical Environmental Planning, Chalmers University of Technology, Sweden.

- Finnveden, Goran. 1998. *On the Possibilities of Life-Cycle Assessment: Development of Methodology and Review of Case Studies*. Department of Systems Ecology, Stockholm University, Sweden.
- Frischknecht, Rolf. 1998. *Life Cycle Inventory Analysis for Decision-Making: Scope-Dependent Inventory System Models and Context-Specific Joint Product Allocation*. Energy Technology Department, ETH Zuerich (now: ESU-services, Uster), Switzerland.
- Georgakellos, Dimitris. 1997. *Packaging Waste Management: Life Cycle Analysis of Various Packaging Materials in Greece and their Consequences on the Quality of the Environment*. Department of Business Administration, University of Piraeus, Greece.
- Giudice, Fabio. 2000. *Life-Cycle Design for Environmental Quality of Products: Integrated Design System*. Department of Industrial and Mechanical Engineering, University of Catania, Italy
- Hertwich, Edgar. 1999. *Toxic Equivalency: Addressing Human Health Effects in Life Cycle Impact Assessment*. Energy and Resources Group, University of California, Berkeley, USA.
- Hofstetter, Patrick. 1998. *Perspectives in Life Cycle Impact Assessment A Structured Approach to Combine Models of the Technosphere, Ecosphere and Valuesphere*. ETH Zurich (Swiss Federal Institute of Technology).
- Horvath, Arpad. 1997. *Estimation of Environmental Implications of Construction Material and Designs Using Life Cycle Assessment Techniques (Bridges and Pavement)*. Carnegie Mellon University, USA.
- Jungbluth, Niels. 2000. *Environmental consequences of food consumption: A modular life cycle assessment to evaluate product characteristics*. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland.
- Jönsson, Åsa. 1998. *Life Cycle Assessment of Building Products - Case studies and methodology*. Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- Joshi, Satish. 1998. *Comprehensive Product Life-Cycle Analysis Using Input-Output Techniques*. Carnegie Mellon University, USA.
- Karlsson, Reine. 1998. *Life Cycle Considerations in Sustainable Business Development. Eco-efficiency studies in Swedish industries..* Department of Physical Resource Theory, School of Environmental Sciences, Chalmers University of Technology and Göteborg University, Sweden.
- Krikke, Harold. 1998. *Recovery Strategies and Reverse Logistic Network Design*. University of Twente, Enschede, The Netherlands.
- Lankey, Rebecca. 1998. *Materials Management and Recycling for Nickel-Cadmium Batteries*. Carnegie Mellon University, USA.
- Lundie, Sven. 1997. *Life Cycle Assessment and Decision Making Theory - Practice-oriented*.
- *Product Assessment on the Basis of Societal Values*. Universität Lüneburg, Fachbereich Betriebswirtschaftslehre.
- Matthews, H. Scott. 1999. *The External Costs of Air Pollution and the Environmental Impact of the Consumer in the US Economy*. Carnegie Mellon University, USA.

Carleton University. <http://www.carleton.ca/tse/tse407/refs407.htm>

Grouped by decade to give a sense of the continuing evolution of thinking.

1940s, 50s and 60s

- Carson, R. *The Sea Around Us*, Oxford University Press, 1950 and 1989
- Carson, R. *Silent Spring* 1962, *Silent Spring Revisited* 1987, *Beyond Silent Spring* 1996
- Leopold, A. *A Sand County Almanac*, Oxford University Press, 1949 and 1987
- Packard, V. *The Waste Makers*, Pocket Books, 1960 and 1975
- Sloane, E. *A Reverence for Wood*, Ballantine, 1965
- Laslett, P. *The World We Have Lost*, Scribner 1965

1970s

- Schumacher, E.F. *Small is Beautiful* 1971, *A Guide for the Perplexed* 1974, Abacus
- Commoner, B. *The Closing Circle*, Knopf, 1971
- The Club of Rome (Meadows et al). *The Limits to Growth*, Universe Books, 1972
- Toffler, A. *Future Shock*, Bantam, 1975

1980s

- World Commission on Environment and Development. *Our Common Future (The Brundtland Report)*, Oxford University, 1987
- North, R. *The Real Cost*, Chatto and Windus, 1986
- Fox, A. and Murrell, R. *Green Design*, Architectural Design and Technical Press, 1989

1990s and 2000s

- Benyus, Janine, *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, Quill, 1997
- Botkin, D.B. *Environmental Science*, J.Wiley & Sons, 1998
- Club of Rome. *Taking Nature into Account; a Report to the Club of Rome: toward a Sustainable National Income*, Copernicus, 1995
- Daly, H.E. *Beyond Growth; the Economics of Sustainable Development*, Beacon, 1996
- Dawkins, Richard, *Climbing Mount Improbable*, Penguin, 1996
- Drengson, A.R. *Ecoforestry; the Art and Science of Sustainable Forest Use*, New Society, 1997
- Hawken, P. *The Ecology of Commerce*, Harper Collins, 1993
- Hawken, P., A. Lovins and H. Lovins, *Natural Capitalism, Creating the next Industrial Revolution*, Little, Brown & Co., 1999
- Hauschild, M. and I. Alting. *Environmental Assessment of products - methodology, tools and techniques, and case studies in product development*, Chapman and Hall (UK) 1997
- Holtz Kay, J. *Asphalt Nation*, Crown, 1997
- MacEachern, D. *Save our Planet*, Dell, 1990

- Packard, V.O. *The Ultra Rich; how much is too much*, Little, 1990
- Petroski, Henry, *The Evolution of Useful Things*, Pavilion, 1993.
- Rathje, W. and Cullen, M. *Rubbish: The Archeology of Garbage*, Harper Collins, 1992
- Rowledge, Lorinda, Russell Barton and Kevin Brady, *Mapping the Journey*, Greenleaf, 1999
- Safdie, M. and Kohn, W. *The City after the Automobile*, Stoddart, 1997
- Starke, L. *Signs of Hope*, Oxford University, 1990
- Toffler, A. *Creating a New Civilisation; the Politics of the Third Wave*, Turner, 1995
- UNEPIE (United Nations Environment Program Industry and Environment Centre), CP16. *Eco-Efficiency and Cleaner Production, Charting the Course to Sustainability*, 1996
- UNEPIE, CP14. *Life Cycle Assessment and How to do it*, 1996
- UNEPIE, CP 18. Cleaner Production List of Publications CP18. *Ecodesign, a promising approach to sustainable production and consumption*, 1997
- UNIPIE, *Towards the Global Use of Life Cycle Assessment*, 1999, Anthony@smibooks.com.
- Wackernagel, Mathis, *Our Ecological Footprint*, New Society Publishers, 1996
- Weizaecker, Lovins, and Lovins. *Factor Four - Doubling Wealth, Halving Resource Use*. Report to Club of Rome, Earthscan Publication, 1997
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), *Walking the Talk: the Business Case for Sustainable Development*, Greenleaf, 2002.
- World Resources Institute, *World Resources 2000 - 2001*, Oxford University, September 2000
- Worldwatch Institute, *Vital Signs 2002*, Norton, 2002
- Worldwatch Institute, *State of the World 2002*, Norton, 2002

**European Environment Agency. <http://www.eea.eu.int>**

- *EEA - Het milieu in Europa: de tweede balans - 6. Chemische stoffen*  
... van meerdere stoffen tegelijk/mengsels aanpak in het eindstation van producten schone productie en geïntegreerde bestrijding van verontreiniging, LCA etikettering en gebruiksinstructies informeren van publiek over het vrijkomen van chemische stoffen en het transport ervan productieprocessen  
<http://reports.eea.eu.int/92-828-3351-8/nl/page006.html> 31-Aug-2002
- *EEA - The EEA and its role in encouraging better water management - Systems & tools for environmental management*  
... Some EEA Products, 1997 Environmental Management Systems (Handbook) Policy Performance Reporting Ecoauditing Management tools (Guidebooks) LCA Clean Production Risk Assessment Corporate Environmental Reporting Company Performance Ranking Previous Table of contents  
<http://reports.eea.eu.int/SPE19961113/en/page008.html> 31-Aug-2002



- *EEA - Europe's Environment - The Dobris Assessment - Acronyms and Abbreviations*  
 ... Union IWC International Whaling Commission IWIC International Waste Identification Code IWRB International Waterfowl and Wetlands Research Bureau LCA life-cycle analysis LRTAP Long-Range Transboundary of Air Pollution (Convention) MAP Mediterranean Action Plan MARS Major Accident Reporting System MCBSF  
<http://reports.eea.eu.int/92-826-5409-5/en/page041.html> 31-Aug-2002
- *EEA - Are we moving in the right direction? Indicators on transport and environmental integration in the EU: TERM 2000 - Glossary*  
 ... product HSR high-speed railway ICAO International Civil Aviation Organization IEA International Energy Agency km kilometers ktonnes thousand tonnes LCA life-cycle assessment MARPOL International Convention for the Prevention of Pollution from Ships MEET methodologies for estimating emissions from transport  
<http://reports.eea.eu.int/ENVISSUENo12/en/page040.html> 31-Aug-2002
- *EEA - Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896-2000 - Chapter 16 - Twelve late lessons*  
 EEA - TopMenu EEA Top Banner Logo EEA Top Banner Headline Search Go and Search Advanced search >> Home > Reports > Late lessons from early ... > English > Chapter 16 - Twelve late ... > Previous Table of contents Next 16. TWELVE LATE LESSONS Editorial team ');">Editorial team Editorial team  
[http://reports.eea.eu.int/environmental\\_issue\\_report\\_2001\\_22/en/page016.html](http://reports.eea.eu.int/environmental_issue_report_2001_22/en/page016.html) 31-Aug-2002
- *EEA - Life Cycle Assessment (LCA) - A guide to approaches, experiences and information sources - English*  
 ... Assessment ... > English > Related resources \* Resource Keywords/subjects Environmental Analysis: \* Risk Assessment English LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) - A GUIDE TO APPROACHES, EXPERIENCES AND INFORMATION SOURCES Environmental issue report No 6 This guide, together with the meta-database containing  
<http://reports.eea.eu.int/GH-07-97-595-EN-C/en/> 31-Aug-2002
- *EEA - The development of Environmental Indicators and Contribution to Green Accounting - Entire speech*  
 EEA - TopMenu EEA Top Banner Logo EEA Top Banner Headline Search Go and Search Advanced search >> Home > Reports > The development of ... > English > Entire speech > Table of contents Börsen Center for erhvervsinformation The Environmental Report in a Future Perspective The development of Environmental  
<http://reports.eea.eu.int/SPE19951003/en/page001.html> 31-Aug-2002
- *EEA - Organisation - awp99\_annex3.html*  
 ... on the monitoring implications of Tradable Permits, but potential duplication of other work on Tradable Permits had to be avoided. \* Further work on LCA and Clean production was not considered a priority except in so far as monitoring the use of such tools could be useful. \* The Agency should remain

- [http://org.eea.eu.int/documents/awp99/awp99\\_annex3.html](http://org.eea.eu.int/documents/awp99/awp99_annex3.html) 31-Aug-2002
- *EEA - Life Cycle Assessment (LCA) - A guide to approaches, experiences and information sources - English*  
 ... Assessment ... > English > Related resources \* Resource Keywords/subjects Environmental Analysis: \* Risk Assessment English LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) - A GUIDE TO APPROACHES, EXPERIENCES AND INFORMATION SOURCES Environmental issue report No 6 This guide, together with the meta-database containing  
<http://reports.eea.eu.int/GH-07-97-595-EN-C/en> 31-Aug-2002
  - *EEA - Sortable list of all reports*  
 EEA Top Banner Logo EEA Top Banner Headline Search Go and Search Advanced search >> Home > Reports > Sortable list of all ... > List reports Sort on title Sort on serial title Sort on publish date Sort on language Notification service Enter your e-mail to receive notification on new reports  
[http://reports.eea.eu.int/index\\_table?sort=Published](http://reports.eea.eu.int/index_table?sort=Published) 31-Aug-2002
  - *EEA - Sortable list of all reports*  
 EEA Top Banner Logo EEA Top Banner Headline Search Go and Search Advanced search >> Home > Reports > Sortable list of all ... > List reports Sort on title Sort on serial title Sort on publish date Sort on language Notification service Enter your e-mail to receive notification on new reports  
[http://reports.eea.eu.int/index\\_table](http://reports.eea.eu.int/index_table) 31-Aug-2002
  - *EEA - Sortable list of all reports*  
 ... Local Authorities - Approaches, Experiences and Sources 1999-Oct-27 Environmental issue report No 5 English management, urban Life Cycle Assessment (LCA) - A guide to approaches, experiences and information sources 1999-Oct-27 Environmental issue report No 6 English management Sludge Treatment and Disposal  
[http://reports.eea.eu.int/index\\_table?sort=Serial](http://reports.eea.eu.int/index_table?sort=Serial) 31-Aug-2002
  - *EEA - Organisation - Activities in 1999*  
 EEA Top Banner Logo EEA Top Banner Headline Search Go and Search Advanced search >> Home > About EEA > Documents > Annual Work Programme ... > Activities in 1999 > Press room \* News releases \* Announcements \* New reports \* Speeches Contents \* Organisation \* Documents \* Key partners \* Job opportunities  
[http://org.eea.eu.int/documents/awp99/awp99\\_activities.html](http://org.eea.eu.int/documents/awp99/awp99_activities.html) 31-Aug-2002
  - *EEA - Organisation - Products and services 1999*  
 EEA Top Banner Logo EEA Top Banner Headline Search Go and Search Advanced search >> Home > About EEA > Documents > Annual Work Programme ... > Products and services ... > Press room \* News releases \* Announcements \* New reports \* Speeches Contents \* Organisation \* Documents \* Key partners  
[http://org.eea.eu.int/documents/awp99/awp99\\_products.html](http://org.eea.eu.int/documents/awp99/awp99_products.html) 31-Aug-2002
  - *EEA - Organisation - awp99\_annex4.html*

... are composing the Joint Research Centre of the European Communities. They are located in Belgium, Germany, Italy, Spain and The Netherlands. LCA Life Cycle Analysis Main Component Elements MCE - national bodies appointed by EEA member countries as units in the EIONET Management Board The EEA Management

[http://org.eea.eu.int/documents/awp99/awp99\\_annex4.html](http://org.eea.eu.int/documents/awp99/awp99_annex4.html) 31-Aug-2002

- *EEA - Sortable list of all reports*

EEA Top Banner Logo EEA Top Banner Headline Search Go and Search Advanced search >> Home > Reports > Sortable list of all ... > List reports Sort on title A B C D E G H I L M N O P Q R S T U W Sort on serial title Sort on publish date Sort on language Notification service Enter your e-mail

[http://reports.eea.eu.int/index\\_table?sort=Report](http://reports.eea.eu.int/index_table?sort=Report) 31-Aug-2002

- *EEA - Organisation - National monitoring to European reporting: From data to efficient information*

EEA Top Banner Logo EEA Top Banner Headline Search Go and Search Advanced search >> Home > About EEA > Documents > 1998 Annual Report > National monitoring to ... > Press room \* News releases \* Announcements \* New reports \* Speeches Contents \* Organisation \* Documents \* Key partners \* Job opportunities

[http://org.eea.eu.int/documents/ar1998/ar98\\_monitoring.html](http://org.eea.eu.int/documents/ar1998/ar98_monitoring.html) 31-Aug-2002

- *EEA - Sortable list of all reports*

EEA Top Banner Logo EEA Top Banner Headline Search Go and Search Advanced search >> Home > Reports > Sortable list of all ... > List reports Sort on title Sort on serial title Sort on publish date Sort on language Bulgarian Czech Danish Dutch English Finnish French German Greek Hungarian Icelandic

[http://reports.eea.eu.int/index\\_table?sort=Language](http://reports.eea.eu.int/index_table?sort=Language) 31-Aug-2002

- *EEA - Organisation - Glossary*

... Institutes. They are located in Belgium, Germany, Italy, Spain and the Netherlands.(web reference: <http://www.jrc.org/jrc/index.asp>) LC Landcover LCA Life-Cycle Analysis LRTAP Long Range Transboundary Air Pollution Management Board The EEA's management Board. MAP UNEPs Mediterranean Action Plan MAWP <http://org.eea.eu.int/documents/ar1998/glossary.html> 31-Aug-2002

- *EEA - Organisation - glossary.htm*

... Institutes. They are located in Belgium, Germany, Italy, Spain and the Netherlands.(web reference: <http://www.jrc.org/jrc/index.asp>) LC Landcover LCA Life-Cycle Analysis LRTAP Long Range Transboundary Air Pollution Management Board The EEA's management Board. MAP UNEPs Mediterranean Action Plan MAWP

<http://org.eea.eu.int/documents/ar1998/glossary.htm>

31-Aug-2002

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, David, and Kirsten Sinclair, Pollution Prevention for Chemical Processes, John Wiley & Sons, Inc., USA, 1996.

BENTRUP, Frank, Jürgen Küsters, Joachim Lammel and Hermann Kuhlmann, Life Cycle Impact Assessment of Land Use Based on the Hemerby Concept, The International Journal of Lice Cycle Assessment, USA, 2002, On line publication, URL (<http://dx.doi.org/10.1065/lca2002.07.087>).

CHAPRA, Steven C., Surface Water-Quality Modeling, McGraw Hill, USA, 1997.

CFE, Comisión Federal de Electricidad, México, 2001, URL (<http://www.cfe.gob.mx>)

CIROTH, Andreas, Marcel Hagelüken, Guido W. Sonnemann, Francesc Castells and Günter Fleischer, The International Journal of Lice Cycle Assessment, USA, 2002, On line publication, URL (<http://dx.doi.org/10.1065/lca2002.10.095.2>).

CRITES, Ron and George Tchobanoglous, Small and Decentralized Wastewater Management Systems, McGraw Hill, USA, 1998.

CURRAN, Mary Ann, Using Life Cycle Assessment Tools for Integrated Product Evaluation, US Environmental Protection Agency, Office of Research & Development, USA, 2000.

DANTE, R., et al., "Environmental Impact Assessment of a Wastewater Treatment Plant through Life Cycle Analysis." Diss. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Ciudad de México, 2000.

DEAN, John A., Lange: Manual de Química, Tomo IV, Traductor: María del Jesús Rosales, McGraw Hill, 13<sup>va</sup> edición, 1<sup>era</sup> edición en español, México, 1998.

DEAN, John A., Lange's Handbook of Chemistry, McGraw Hill, 14<sup>th</sup> edition, USA, 1992.

DETZEL, Andreas and Jürgen Giegrich, "The Basics of LIFE CYCLE ASSESSMENT." Diss. Ifeu.Institut, 1996.

ECOBILAN, Life Cycle Assessment, 2002, URL ([http://www.ecobalance.com/uk\\_lca01.php](http://www.ecobalance.com/uk_lca01.php)).

ELVERS, Barbara and Stephen Hawkins eds., ULLMAN'S Encyclopedia of Industrial Chemistry, Fifth revised edition, Germany, 1996.

EPA, LCA 101, U.S. Environmental Protection Agency and Science Applications International Corporation, LCAccess, USA, 2001, On line publication, URL (<http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/lcaccess/lca101.htm>).

EPA, LCA Resources, U.S. Environmental Protection Agency, USA, 2002, URL (<http://www.epa.gov>).

FUKUSHIMMA, Yasuhiro and Masahiko Hirao, A structured Framework and Language for Scenario-Based Life Cycle Assessment, The International Journal of Life Cycle Assessment, USA, 2002, On line publication, URL (<http://dx.doi.org/10.1065/lca2002.06.085>).

HELLWEG, Stephanie, Thomas Hofstetter and Konrad Hungerbühler, Geographical and Technological Differences in Life Cycle Inventories Shown by the Use of Process Models for Waste Incinerators. Part 2: Technological and Geographical Differences, The International Journal of Life Cycle Assessment, USA, 2002, On line publication, URL (<http://dx.doi.org/10.1065/lca2002.09.097>).

HOFSTETTER, Patrick, Perspectives in Life Cycle Impact Assessment. A Structural Approach to combine Models of the Technosphere, Ecosphere and Valuesphere, Kluwer Academic Publishers, USA, 1998.

IFEU Institut für Umweltinformatik. 2002, URL (<http://www.ifu.com/software/umberto-e/>).

ISO, International Organization for Standardization, 2002, URL (<http://www.iso.ch/iso>).

JUNGMEIER, Gerfried, Frank Werner, Anna Jarnehammar, Catharina Hohenthal and Klaus Richter, Allocation in LCA of Wood-based Products-Experiences of Cost Action E9-Part II. Examples, The International Journal of Life Cycle Assessment, USA, 2002, On line publication, URL (<http://dx.doi.org/10.1065/lca2002.08.091.2>).

KEENAN, Charles W., Donald C. Kleinfelter y Jese H. Wood, Química General Universitaria, Traductor: Antonio Eroles Gómez, CECSA, Tercera edición, México, 1999.

KROSCWITZ, Jacqueline I. and Mary Howe-Grant eds., Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley and Sons Inc, Forth edition, 1998.

LA GREGA, Michael, et al., Hazardous Waste Management, McGraw-Hill, USA, 1995.

LEIDEN, 2002, URL (<http://www.leidenuniv.nl>)

LIDE, David R., CRC Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press, 81<sup>st</sup> edition, USA, 2001.

LEHNINGER, Albert L., Bioquímica: las bases moleculares de la estructura y función celular, Traductor: Fernando Calvet Prats, Ediciones Omega, Segunda edición, España, 1995.

MACKAY, Donald, Wan-Ying Shiu and Kuo-Ching Ma, Physical-Chemical Properties and Environmental Fate Handbook, CRC netBase, Chapman and Hall, USA, 2000.

MCKETTA, John J., Encyclopedia of Chemical Processing and Design, Marcel Dekker Inc., USA, 1999.

MARDONES, I., El Impacto de las Energías Fósiles, Madrid, 2000.

MASTERS, Gilbert M., Introduction to Environmental Engineering and Science, Prentice Hall, Second edition, USA, 1998.

MEIER, Markus, A. ed., Evaluation and Reporting Guidelines for Life-Cycle Assessments Case-Studies, Report of the SETAC-Europe Case-Studies Working-group, Europe, 1997.

PRE PRODUCT ENGINEERING URL ([http://www.pe-product.de/englisch/frame\\_e.ht](http://www.pe-product.de/englisch/frame_e.ht) ), 2002

PRÉ Page, Product Ecology Consultants, 2002, URL (<http://www.pre.nl/default.htm>).

RAMALHO, R. S., Tratamiento de Aguas Residuales, Traductor: Domingo Jiménez Beltrán, Editorial Reverté, España, 1991.

SEPALA, Jyri, Lauren Basson and Gregory A. Norris, Decision Analysis Frameworks for Life-Cycle Impact Assessment, Journal of Industrial Ecology, Vol. 5, Issue 4, fall 2001, pp. 45-68.

SETAC. Society of Environmental Toxicology and Chemistry. "Guidelines for Life-Cycle Assessment: A `Code of Practice'." Sesimbra: Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 1993.

SETAC, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 2002, URL (<http://www.setac.org/lca.html>)

SNOEYINK, Vernon L. y David Jenkins, Química del Agua, Traductor: María Cristina Sangines Franchini, Editorial Limusa, Primera edición, México, 1987.

TCHOBANOGLIOUS, George, Franklin L. Burton, H. Davis Stensel, Eds., METCALF & EDDY, Inc.: Wastewater Engineering Treatment and Reuse, McGraw Hill, Forth edition, USA, 2003.

THIBODEAUX, Louis J., Environmental Chemodynamics: Movement of Chemicals in Air, Water and Soil, John Wiley and Sons, Inc., Second edition, USA, 1996.

THE ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE, 2002, URL (<http://www.athenasmi.ca/>).

UMLAND, Jean B. and Jon M. Bellama, General Chemistry, Brooks/Cole Publishing Co., Third edition, USA, 1999.

VAN HOOFF, Bart. "El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como Herramienta de la Gestión Ambiental para la Industria Colombiana." Diss. Universidad de los Andes, 1997.

VAN HOOFF, Bart. "Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y su aplicación." Diss. UNAM, México, 2002.

WERNER, Frank, and Roland Scholz, Ambiguities in Decision-Oriented Life Cycle Inventories: The Role of Mental Models, The International Journal of Life Cycle Assessment, USA, 2002, On line publication, URL (<http://dx.doi.org/10.1065/lca2002.11.098>).

WILL, H. "Produkt-Ökobilanzen am Fallbeispiel der Automobil-Lackierung." Lehrstuhl für Ökologische Chemie und Umweltanalytik der Technischen Universität München. Diss. 1996.



