

## CAPÍTULO 10

### ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

#### 10.1) INTRODUCCION

En los últimos años se ha desarrollado un enfoque sistémico para el análisis de los impactos ambientales asociados a procesos y productos. Los procesos industriales no sólo generan residuos, sino que también consumen recursos naturales, requieren infraestructura de transporte, utilizan insumos químicos, agua y energía, y generan productos que deben ser transportados, consumidos y, en algunos casos, reutilizados antes de su eliminación final (ver Figura 10.1). En cada una de estas instancias se generan impactos ambientales diversos, los que deben ser tomados en consideración cuando se desea evaluar el efecto de un proceso sobre el medio ambiente. El **análisis del ciclo de vida (ACV)** consiste en evaluar cada uno de los efectos ambientales generados a lo largo de la vida del producto, vale decir, desde las fuentes de recursos primarios (ie. desde su “cuna”), hasta el consumo y disposición final (ie. hasta su “tumba”). Ello permite identificar los impactos sobre los diferentes compartimentos ambientales más allá de los límites de la planta productiva. Dichos impactos inducidos pueden, en muchos casos, ser de mayor relevancia que aquellos ocasionados directamente por el proceso de manufactura del producto. Por ejemplo, la sobre-explotación y una gestión inadecuada del recurso forestal pueden degradar significativamente la calidad del suelo, con los consiguientes impactos negativos sobre la tasa de renovabilidad del recurso y sobre la calidad de las aguas superficiales, debido al arrastre de sedimentos y material orgánico disueltos derivados de procesos erosivos.

El análisis del ciclo de vida fue originalmente desarrollado en la década del 70 a raíz de la crisis energética. Inicialmente, se limitó a simples balances de materia y energía a lo largo del proceso de generación y consumo energético, con vistas a identificar oportunidades de ahorro de energía a través de la cadena de producción y consumo. Dada la estrecha relación existente entre el consumo energético, el consumo de recursos materiales y las emisiones de residuos, no fue difícil evolucionar hacia el ACV tal como se le conoce en la actualidad. De acuerdo a la literatura, el primer ACV fue comisionado por Coca Cola en 1969, para evaluar diferentes tipos de envases desde el punto de vista del consumo de recursos y de la generación de residuos. Dicho estudio fue realizado por el Midwest Research Institute de EEUU y se definió como un análisis de recursos y perfil ambiental. A partir de ese entonces, se sucedieron decenas de estudios similares con vistas a minimizar el consumo de recursos y la generación de residuos. A mediados de la década de los ochenta, se había logrado constituir una buena base de información acerca de los atributos ambientales de diferentes tipos de envases y embalajes, en cuanto al consumo de energía y materiales, y a las emisiones de residuos. En la medida que el requerimiento de minimización de consumo de recursos y de generación de emisiones se generalizó en el mundo industrializado, la herramienta de ACV fue madurando progresivamente. El gran salto metodológico fue dado a comienzos de la presente década, con las contribuciones de la EPA-EEUU, e

instituciones ambientales europeas, tales como la BUWAL-Suiza, el CML-Holanda, el IVL-Suecia, entre otros.

En su forma actual, el ACV constituye una herramienta de gestión ambiental y diseño de procesos menos contaminantes (ver Figura 10.2). Ha sido incorporado en el desarrollo de los sistemas de ecoetiquetado, en la formulación de guías para el desarrollo de “productos ambientalmente favorables” y en las normas ISO. Las normas ISO poseen varios estándares asociados a la conducción de ACV:

Norma ISO 14040:	presenta los principios generales y requerimientos metodológicos del ACV de productos y servicios.
Norma ISO 14041:	guía para determinar los objetivos y alcances de un estudio de ACV y para realizar el análisis de inventario.
Norma ISO 14042:	guía para llevar a cabo la fase de evaluación de impacto ambiental de un estudio de ACV.
Norma ISO 14043:	guía para la interpretación de los resultados de un estudio de ACV.
Norma ISO 14048:	entrega información acerca del formato de los datos que sirven de base para la evaluación del ciclo de vida.
Norma ISO 14049:	posee ejemplos que ilustran la aplicación de la guía ISO 14041.

Junto al ACV existe un conjunto de herramientas complementarias que permiten evaluar las cargas ambientales, con diferente resolución y con distintos límites del sistema estudiado. Algunas de éstas se describen a continuación:

*Evaluación de impacto ambiental:* herramienta para la toma de decisiones que incluye la identificación, cuantificación y valoración de los impactos ambientales asociados a un proyecto (ver Capítulo 7).

*Evaluación de tecnologías:* herramienta de diseño de procesos menos contaminantes, cuyo objetivo es evaluar comparativamente diferentes opciones tecnológicas, sobre la base de sus atributos ambientales, técnicos, económicos, sociales, etc. (ver Capítulo 6).

*Análisis de riesgos:* evalúa posibles accidentes, considerando la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias sobre las personas, las instalaciones y el medio ambiente. Permite identificar y evaluar medidas de prevención y control (ver Capítulo 11).

*Análisis de intensidad de recursos:* evalúa la cantidad de materiales y energía que se utiliza en un sistema de producción asociado a un producto o servicio, a lo largo de su ciclo de vida. Trabaja sobre el total de materia y energía, sin especificar la naturaleza y composición específica.

*Evaluación de desempeño ambiental:* es una herramienta interna que provee al sistema de gestión con información ambiental objetiva y verificable sobre el desempeño de una organización. Se debe seleccionar indicadores ambientales

adecuados para describir la interacción con el medio ambiente. Se aborda en las normas ISO 14031 (ver Capítulo 8).

Las técnicas específicas para el análisis del ciclo de vida de un producto o proceso aún se encuentran en pleno desarrollo. Aspectos tales como el modelamiento y análisis de los flujos de materia y energía a través del ciclo de vida, y su relación con los diferentes compartimentos ambientales, representan un gran desafío de investigación. La *Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)*, la ISO, agencias ambientales y agrupaciones industriales diversas, han desarrollado y propuesto diferentes enfoques para la realización del ACV. En tal sentido, se hace necesario un consenso entre todas las partes interesadas para que la información que se obtenga de los ACV sea comparable sobre una base común. Al respecto, el *Journal of Life Cycle Analysis* y el *Journal of Cleaner Production* se han especializado en la publicación de artículos sobre diferentes aspectos del ACV, constituyendo un foro internacional de reconocido prestigio para la discusión de las herramientas metodológicas y resultados de estudios específicos.

#### **Definición de Análisis del Ciclo de Vida:**

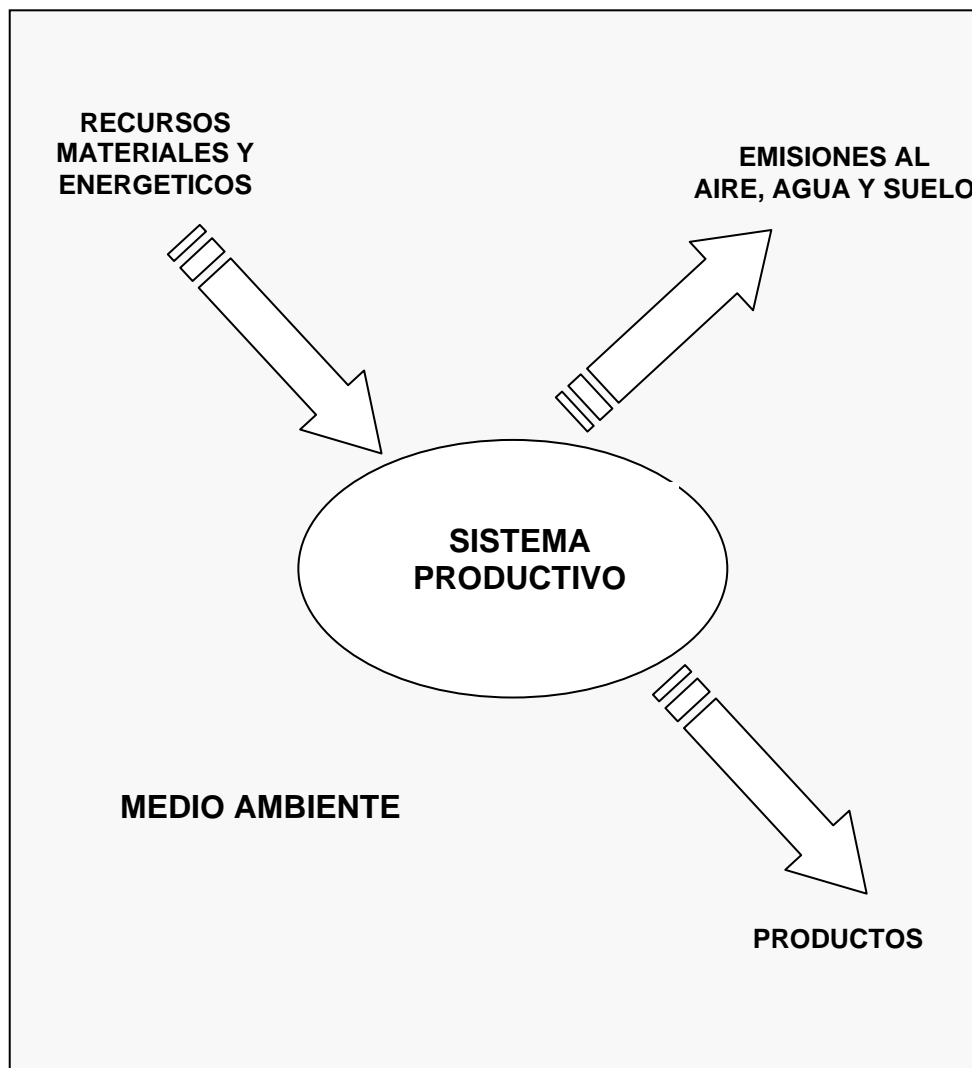
Las definiciones más utilizadas para el ACV, son las siguientes:

Norma ISO 14040: *“el Análisis de Ciclo de Vida es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio”*

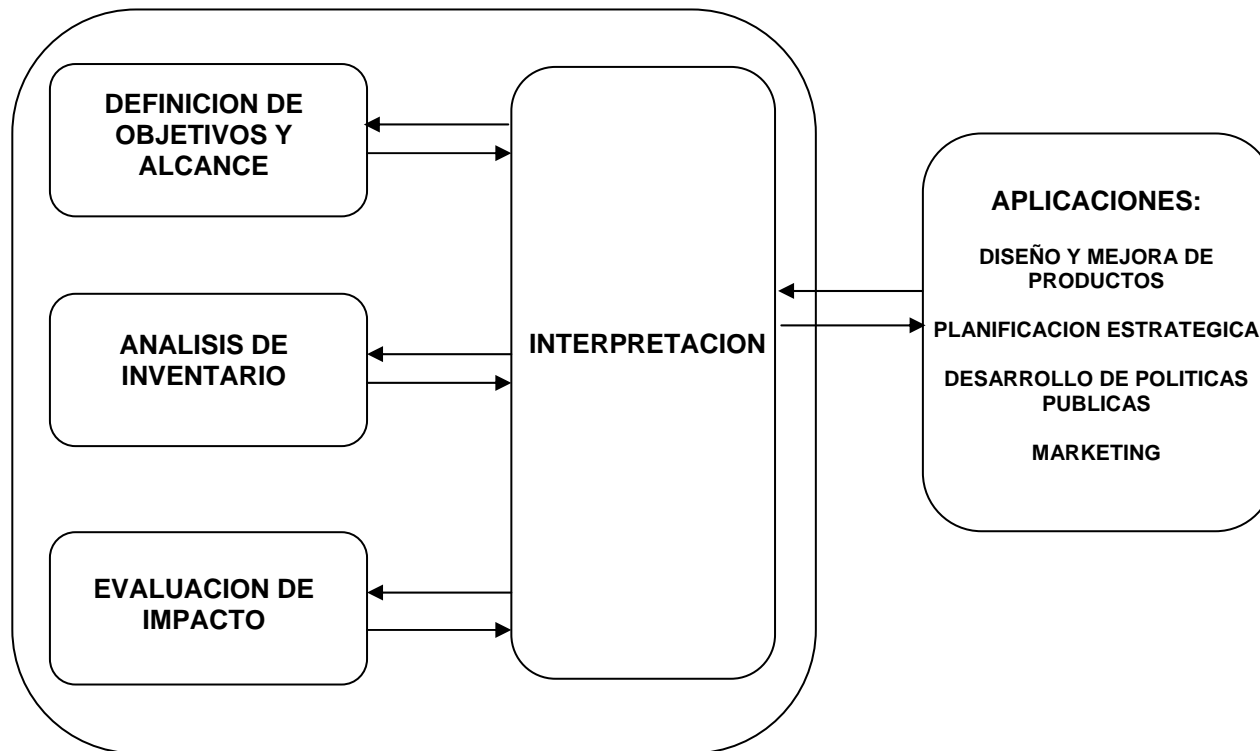
Norma española UNE 150-040-96: *“El Análisis de Ciclo de Vida es una recopilación y evaluación de las entradas y salidas de materia y energía, y de los impactos ambientales potenciales directamente atribuibles a la función del sistema del producto a lo largo de su ciclo de vida”*

Consejo Nórdico de Ministros: *“El Análisis de Ciclo de Vida es un proceso para evaluar las cargas ambientales asociadas a un sistema de producción o actividad, identificando y cuantificando las cantidades de materia y energía utilizados, y los residuos generados, y evaluando los impactos ambientales derivados de estos”.*

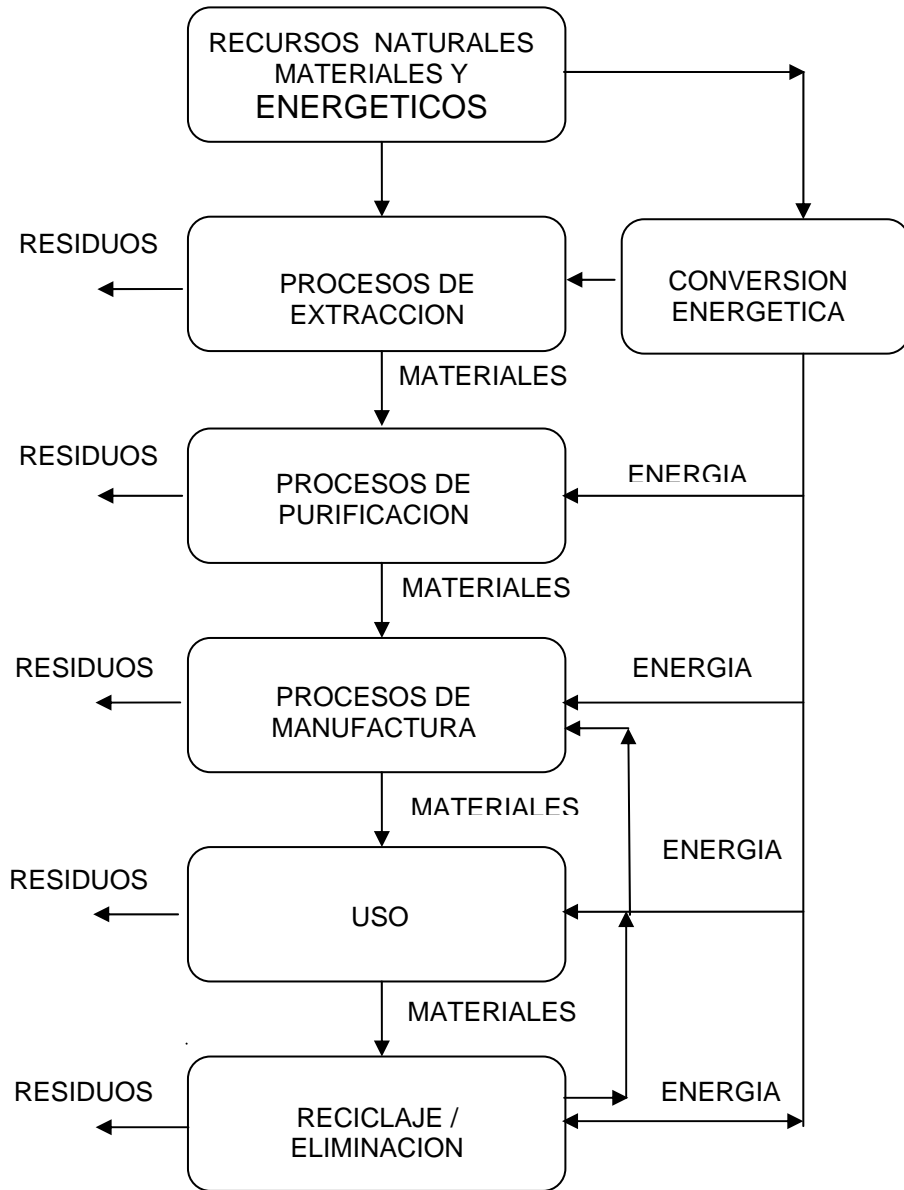
El ACV permite obtener un modelo simplificado de un sistema de producción y de los impactos ambientales asociados; sin embargo, no pretende entregar una representación total y absoluta de cada interacción ambiental. A pesar de postular una cobertura sobre todo el ciclo de vida de un producto, en muchos casos resulta difícil abarcar todas las actividades desde la “cuna a la tumba”, por lo que se debe definir claramente el sistema requerido para que el producto cumpla con una determinada función.



**FIGURA 10.1: CARGAS AMBIENTALES DE UN SISTEMA DE PRODUCCION**



**FIGURA 10.2 MARCO DEL ANALISIS DEL CICLO DE VIDA**



**FIGURA 10.3: CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO**

## 10.2) METODOLOGIA DEL ANALISIS DEL CICLO DE VIDA

En su expresión más general, el análisis del ciclo de vida consiste de 4 componentes:

- a) **Definición de objetivos y alcance:** se debe precisar los objetivos que motivan el estudio, así como los límites del sistema a analizar e identificar los componentes del ciclo de vida (ej. extracción, transporte, almacenamiento, producción, consumo, reciclaje, disposición final de residuos, etc) (ver Figura 10.3).
- b) **Análisis de inventario:** se desarrolla aquí los balances de materia y energía a través de los diferentes componentes del ciclo de vida.
- c) **Evaluación de los impactos ambientales potenciales:** debe considerar la salud y seguridad de las personas, y las cargas ambientales. Se debe identificar y caracterizar, previamente, los compartimentos ambientales a incluir en el análisis y su relación con las etapas del ciclo de vida del producto.
- d) **Interpretación:** en base al análisis anterior, se debe identificar y evaluar medidas de mejoramiento que permitan reducir aquellos impactos de mayor relevancia.

## 10.3) DEFINICION DE OBJETIVOS Y ALCANCE

El primer paso en el desarrollo de un ACV es la definición de los objetivos del estudio. Se debe especificar las razones que impulsaron el trabajo y la información que se espera obtener como resultado. Debido a su naturaleza global, un ACV podría ser interminable y debe establecerse límites a su extensión. La definición de los límites del sistema a estudiar es una de las etapas críticas del ACV. Al respecto, se debe considerar los siguientes aspectos para definir el alcance del ACV:

### a) **Función del sistema:**

Se deben describir las funciones que definen el sistema en estudio. Esto es importante en aquellos casos donde el producto puede cumplir varias funciones. Por ejemplo, un computador multimedia puede ser utilizado como procesador de información y, además, puede servir para comunicación telefónica/fax. Si el ACV se realiza para comparar ambientalmente varios sistemas, se debe garantizar que cumplan la misma función.

### b) **Unidad funcional:**

La unidad funcional se refiere a la base de cálculo sobre la cual se efectuarán los balances de materias y energía. En el caso de ACV comparativos, se debe seleccionar una unidad funcional que refleje la función que interesa comparar. Por

ejemplo, el ACV para comparar dos tipos de detergentes puede considerar, como unidad funcional, el “lavado de 1000 kg de ropa de algodón”.

**c) Límites del sistema:**

Se debe identificar el conjunto de procesos unitarios o subsistemas que permiten producir el producto en estudio. Ello incluye la obtención de los recursos primarios, todos los procesos de fabricación y transporte de los componentes del producto y sus materias primas, además de todas las fases del ciclo de vida del producto terminado (ver Figura 10.3). Es necesario decidir qué procesos y etapas del sistema se van a incluir en el estudio, así como los criterios que se utilizan para tal decisión y su compatibilidad con los objetivos del ACV. Por ejemplo, se puede excluir del análisis los componentes que se encuentren bajo un % límite (ej. menor de 0,5% del peso del producto). Es importante establecer los límites geográficos de las actividades a incluir en el ACV, ya que pueden ser afectadas por condiciones locales (ej. los sistemas de generación de energía eléctrica, los sistemas de transporte, los sistemas de tratamiento y disposición de residuos).

**10.4) ANALISIS DE INVENTARIO**

El análisis de inventario es un balance de materia y energía del sistema, aunque puede incluir otros parámetros, tales como: utilización del suelo, radiaciones, ruido, vibraciones, biodiversidad afectada, etc. Comprende la recopilación de los datos y la realización de los cálculos adecuados para cuantificar las entradas y salidas del sistema estudiado (ver Figura 10.1):

**Entradas:** son las materias primas y las fuentes de energía  
**Salidas:** son las emisiones al aire, al agua y al suelo, y los productos

Parte de los flujos materiales y energéticos proceden de la naturaleza o se destinan a ella, mientras que otros flujos tienen su origen o destino en la tecnósfera. Algunos ejemplos se presentan en la Tabla 10.1 siguiente:

**TABLA 10.1: ORIGEN Y DESTINO DE FLUJOS MATERIALES Y ENERGETICOS**

FLUJO	DESTINO/ORIGEN	MEDIO
Residuo líquido tratado	Destino: Vertido al mar	Natural
Combustible diesel	Origen: Refinería de petróleo	Tecnósfera
Agua de procesos	Origen: Río	Natural
Residuos sólidos	Destino: Procesamiento de residuos	Tecnósfera
Gases de incineración de residuos sólidos	Destino: Emisión a la atmósfera	Natural



El análisis de inventario es un proceso iterativo, ya que existe los nuevos datos y el mayor conocimiento obtenido durante el desarrollo del trabajo permiten redefinir con mayor precisión las fases del ciclo o los flujos materiales y energéticos.

El procedimiento recomendado para realizar el análisis de inventario incluye las siguientes etapas:

- Construcción del diagrama de flujo
- Establecer la calidad de los datos (niveles de precisión requeridos)
- Definir los límites del sistema
- Recolección de los datos y cálculos de balances
- Redefinición de los objetivos y alcances

Una vez construido el diagrama de flujo, el sistema se subdivide en subsistemas y estos a su vez en procesos unitarios, para facilitar los cálculos de balance. Los balances de materia y energía se deben ordenar en forma sistemática, especificando las entradas y salidas, y sus destinos/orígenes, tal como se muestra en la Tabla 10.2.

**TABLA 10.2: BALANCE DE MATERIALES Y ENERGIA EN ANALISIS DE INVENTARIO**

<b>ENTRADAS</b>		
	<b>Desde la Naturaleza</b>	<b>Desde la Tecnósfera</b>
Materias primas		
Insumos		
Agua		
Combustibles		
Electricidad		
<b>SALIDAS</b>		
	<b>Hacia la Naturaleza</b>	<b>Hacia la Tecnósfera</b>
Productos		
Residuos a tratamiento		
Emisiones líquidas		
Emisiones gaseosas		
Emisiones sólidas		

Generalmente, se especifica las unidades de medida (ej., toneladas, kJ), los niveles de incertidumbre de los datos y las fuentes. En el caso de los flujos energéticos, se debe identificar las cantidades de energía térmica y de combustible utilizado, y el consumo eléctrico. Algunos valores típicos de emisiones asociadas al consumo de gas natural y petróleo diesel se presentan en las Tablas 10.3, 10.4 y 10.5.

Es importante señalar que el consumo de combustible en el transporte depende del medio utilizado, del tipo de combustible, de la carga y del recorrido. Por ejemplo, para transporte mediante camiones en base a diesel, se considera un consumo

específico en el rango 0,8-2,2 (MJ /km /ton), mientras que el transporte por ferrocarril eléctrico presenta un consumo de 0,1-0,3 (MJ /km /ton).

**TABLA 10.3: EMISIONES ASOCIADAS A LA OBTENCIÓN Y COMBUSTION DE GAS NATURAL**

<b>EMISIONES AL AIRE</b>		<b>(kg/ ton gas natural)</b>
Material particulado		0,018
CO <sub>2</sub>		2.364
CO		0,58
Hidrocarburos volátiles		28,9
NO <sub>x</sub>		4,3
SO <sub>2</sub>		2,0
N <sub>2</sub> O		3,1
<b>EMISIONES AL AGUA</b>		<b>(kg/ ton gas natural)</b>
Sólidos disueltos		0,16
Aceite		0,04
<b>EMISIONES AL SUELO</b>		<b>(kg/ ton gas natural)</b>
Residuos sólidos		3,5
<b>OTROS DATOS DE INTERES</b>		
Poder calorífico (MJ/m <sup>3</sup> )		36,6
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )		0,795

**TABLA 10.4: EMISIONES ASOCIADAS A LA OBTENCIÓN Y COMBUSTION DE DIESEL**

<b>EMISIONES AL AIRE</b>		<b>(kg/ ton diesel)</b>
Material particulado		4,2
CO <sub>2</sub>		3.341
CO		20,3
Hidrocarburos volátiles		16,8
NO <sub>x</sub>		55,4
SO <sub>2</sub>		7,9
N <sub>2</sub> O		0,05
Aldehidos y otros orgánicos volátiles		0,09
Amoníaco		0,02
<b>EMISIONES AL AGUA</b>		<b>(kg/ ton diesel)</b>
Sólidos disueltos		12,7
Aceites		0,2
Sólidos suspendidos		0,006
DBO		0,006
DQO		0,05
N total		0,008
<b>EMISIONES AL SUELO</b>		<b>(kg/ ton diesel)</b>
Residuos sólidos		1,6
<b>OTROS DATOS DE INTERES</b>		
Poder calorífico (MJ/kg)		42,5
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )		840

**TABLA 10.5 : DATOS PARA EL ANALISIS DE INVENTARIO ASOCIADO AL TRANSPORTE MEDIANTE CAMIONES**

	<b>Larga distancia (20-40 ton)</b>	<b>Transporte local (7-14 ton)</b>	<b>Asociadas a la producción de combustible</b>
Consumo de combustible (kg diesel/ km/ ton carga)	0,02	0,05	2,81 (MJ/kg diesel)
<b>Emisiones</b>	(g / km /ton carga)	(g / km /ton carga)	(g/kg diesel)
Material particulado	0,09	0,22	0,02
CO <sub>2</sub>	66	161	170
CO	0,31	0,75	0,004
NO <sub>x</sub>	0,81	1,98	0,17
SO <sub>2</sub>	0,085	0,21	0,60
Hidrocarburos volátiles	0,08	0,20	0,34

A pesar de que la definición de los límites del sistema es una decisión que se toma al inicio del ACV, es esencial precisar tal definición en el análisis de inventario. Los límites pueden ser fijados de acuerdo a criterios de tipo geográfico. Ello es importante, en la medida que al extender los límites geográficos se pierde precisión y se incrementa la incertidumbre de los resultados. En muchos ACV se prefiere fijar los límites en áreas donde se conozca la naturaleza de las actividades incluidas en el estudio; por ejemplo, considerar solamente aquellas que se realizan dentro del país. La selección de tales fronteras de estudio puede afectar significativamente los resultados del ACV. Por ejemplo, como ya se mencionó, pueden existir grandes diferencias en los consumos energéticos y emisiones asociadas a sistemas de transporte alternativos, o a diversos sistemas de generación de energía eléctrica (ej: termoeléctrica, hidroeléctrica, nuclear). Al respecto, se recomienda separar los resultados relativos a consumo eléctrico y explicitar las fuentes utilizadas.

Junto a los límites geográficos, es importante definir los límites temporales. Por ejemplo, en el caso de los residuos depositados en vertederos, las emisiones gaseosas derivadas de la descomposición de los residuos dependen de la escala de tiempo considerada, ya que los materiales poseen diferente estabilidad frente a la acción microbiana u otros agentes degradativos. Estos aspectos metodológicos aún no han sido resueltos y se encuentran en plena evolución.

Finalmente, se debe mencionar que existe controversia respecto a la inclusión de las emisiones y los requerimientos materiales y energéticos, asociados a la construcción de la infraestructura productiva y a la fabricación de los equipos utilizados en los procesos. En general, tales aspectos ambientales se excluyen de los ACV de productos elaborados, a menos que se desee comparar alternativas que presenten grandes diferencias en la intensidad de recursos infraestructurales y de equipamiento.

## Asignación de Cargas Ambientales

En el caso de sistemas que desarrollan más de una función o que fabrican más de un producto, se debe distribuir los aspectos ambientales entre los productos que genera. La asignación de las cargas ambientales a diferentes productos es necesaria en los siguientes casos:

- Procesos con salidas múltiples, donde se generan diferentes productos, algunos de los cuales cruzan los límites del sistema.
- Procesos con entradas múltiples, donde es difícil establecer relaciones de causalidad entre entradas y emisiones.
- Procesos con reciclo de lazo abierto, donde los residuos que salen de un sistema son utilizados como materias primas para otro sistema, fuera de los límites del sistema en estudio.

Tomemos como ejemplo, una refinería de petróleo que produce gasolinas de diferentes tipos, petróleo combustible, diesel, gas licuado, etileno, propileno, etc., a partir de petróleo crudo ¿Cuál de estos productos es el causante de las emisiones generadas durante el proceso (ej. SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>)? En este caso, las cargas ambientales deben distribuirse entre los productos de acuerdo a criterios de asignación claramente especificados.

Cuando no es posible establecer una relación de causalidad, entre el producto y las cargas ambientales, se debe recurrir a métodos de asignación basados en valor económico, cantidad física (ej. masa, concentración) o una combinación de ambos. Por ejemplo, las cargas ambientales derivadas del proceso de refinación de petróleo se pueden distribuir proporcionalmente a la masa de productos generados, o proporcionalmente al valor comercial de cada producto.

## 10.5) EVALUACION DE IMPACTO AMBIENTAL DEL CICLO DE VIDA

Una vez completada la fase de inventario, es necesario evaluar los impactos producidos por las cargas ambientales identificadas en éste. El inventario puede constar de cientos de datos de consumos y emisiones para un gran número de compuestos, lo que es muy difícil de interpretar. En la práctica del ACV, se habla de **impactos ambientales potenciales**, ya que las actividades o subsistemas del sistema en estudio están ubicadas en diferentes lugares y se pueden llevar a cabo en distintas épocas. En muchos casos, no se trata de sistemas localizados en una ubicación espacial específica, ni de consumos y emisiones que se efectúa en el mismo instante de tiempo. Por lo tanto, no es correcto suponer que los impactos totales se obtienen de una simple sumatoria de los impactos esperados en cada subsistema. Ello es más crítico en el caso de impactos muy locales o de ámbito temporal reducido. Sin embargo, en el caso de impactos globales o de efectos prolongados (ej. calentamiento global, agotamiento del ozono estratosférico), es posible sumar las contribuciones de cada fase del ciclo de vida.

La evaluación de impacto ambiental en el contexto de un ACV aún es materia de debate. Sin embargo, existe cierto consenso respecto a los elementos que constituyen la evaluación de impacto en un ACV, a saber: Clasificación, Caracterización y Valoración.

### 10.5.1) Clasificación

En esta fase las cargas ambientales se clasifican de acuerdo a diferentes categorías de impacto, según el tipo de efecto ambiental esperado. Las categorías de impacto se agrupan de acuerdo a 3 áreas de protección ambiental, según la proposición de SETAC (adoptada por la mayoría de las metodologías de ACV en uso actual):

- Recursos Naturales
- Salud humana
- Salud ecológica

La Tabla 10.6 muestra una lista de categorías de impacto, utilizadas en la fase de clasificación de un ACV, asociadas a las entradas y salidas de materiales y energía.

**TABLA 10.6 CATEGORIAS DE IMPACTO PARA EL ACV**

<b>Categorías de Impacto</b>	<b>Relacionada con:</b>	<b>Alcance Espacial</b>	<b>Unidad de Medida</b>
1. Recursos Abióticos	Entradas	Global, Local	¿?
2. Recursos Bióticos	Entradas	Global, Local	¿?
3. Suelo	Entradas	Local	¿?
4. Salud humana: Impactos toxicológicos	Salidas	Global, Local	¿?
5. Salud humana: Impactos no toxicológicos	Salidas	Global, Local	¿?
6. Impactos ecotoxicológicos	Salidas	Global, Local	¿?
7. Alteración de hábitats /biodiversidad	Salidas	Regional, Local	¿?
8. Calentamiento Global	Salidas	Global	Kg CO <sub>2</sub>
9. Agotamiento de la capa de O <sub>3</sub>	Salidas	Global	Kg CFC 11
10. Acidificación	Salidas	Regional, Local	Kg SO <sub>2</sub>
11. Eutrofización	Salidas	Regional, Local	Kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>
12. Formación de foto-oxidantes	Salidas	Regional, Local	Kg eteno

En el caso de los recursos abióticos, se puede subdividir entre recursos materiales y energéticos, o entre recursos renovables y no renovables, explicitando los recursos hídricos. Los impactos no toxicológicos sobre la salud humana se refieren a impactos físicos, alteraciones psicológicas, efectos por radiación, ruidos, malos olores, infecciones, u otros.

### 10.5.2) Caracterización

En esta fase, se aplica modelos a cada categoría de impacto para obtener indicadores ambientales. Por ejemplo, en la categoría de impacto acidificación, se incluye las emisiones de gases que pueden tener efecto sobre el pH del agua o del suelo, tales como SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl, HF y NH<sub>3</sub>. Cada uno de estos contaminantes posee una capacidad diferente para alterar el pH en un sistema acuático/terrestre. Por lo tanto, se utiliza factores de ponderación, que permiten expresar el potencial acidificante sobre una base común. Dichos factores son estimados en base a las características químicas de los compuestos. Factores similares pueden ser derivados para otras categorías de impacto, tal como se describe más adelante.

Estos factores de ponderación permiten calcular la suma de todos los contaminantes que están dentro de una misma categoría de impacto, obteniendo así un valor total expresado en base a un solo compuesto equivalente. Por ejemplo, la contribución total al impacto acidificación, expresada en términos de kg de SO<sub>2</sub> equivalentes, se calcula como:

$$\text{Acidificación (kg SO}_2\text{)} = m_{\text{SO}_2} + f_{\text{NO}_x} m_{\text{NO}_x} + f_{\text{HCl}} m_{\text{HCl}} + f_{\text{NH}_3} m_{\text{NH}_3}$$

donde  $m_k$  representa la masa del contaminante  $k$  y  $f_k$  es el factor de ponderación correspondiente.

Esta forma de cálculo para estimar la contribución total de las entradas y salidas, a una categoría de impacto dada, se puede generalizar de la siguiente forma:

$$C_M = \sum C_{MK} = \sum M_k f_{MK}$$

donde  $C_M$  es la contribución total a la categoría de impacto  $M$  de todas la entradas y salidas relevantes;  $M_k$  es la masa o energía emitida o consumida por la entrada o salida  $K$ , y  $f_{MK}$  es el factor de ponderación respectivo.

Los diferentes métodos propuestos en la literatura especializada varían en la forma como se calculan los factores de ponderación. A continuación, se revisa brevemente los diferentes enfoques utilizados para llevar a cabo la selección de los factores de ponderación para caracterizar los impactos ambientales en cada categoría.

#### a) Categoría de Impacto: Recursos Materiales y Energéticos:

Generalmente, el agotamiento y uso de los recursos naturales y energéticos se trata en forma separada, especificando la naturaleza renovable o no renovable de tales recursos:

- Recursos materiales renovables
- Recursos materiales no renovables
- Recursos energéticos renovables
- Recursos energéticos no renovables

En cada caso, se puede incluir una gran variedad de materiales y formas energéticas, por lo que se deben agregar utilizando factores de ponderación que reflejen la importancia relativa de cada uno de ellos respecto a su impacto sobre el inventario de recursos naturales.

Las guías nórdicas (Nordic Council, 1995) revisan una serie de enfoques utilizados para llevar a cabo la agregación.

- ***Agregación en base a recursos totales.***

Este método consiste en asignar un factor de ponderación unitario a cada uno de los materiales y formas de energía considerados, de modo que se obtiene la masa (kg) y la energía totales (kJ). A pesar de su simpleza, permite identificar aquellas actividades con mayor importancia en cuanto al uso intensivo de recursos. La debilidad de este enfoque es que no toma en cuenta la fragilidad o estado de escasez de cada recurso.

- ***Agregación, considerando las reservas globales:***

Aquí se calcula el factor de ponderación en base a las reservas físicas existentes en la actualidad, lo que permite considerar la “escasez” del recurso. Existen 4 variantes para el cálculo de los factores de ponderación considerando las reservas:

Considerando sólo las reservas:  $f_{MK} = 1 / R_{MK}$

Considerando las reservas y consumo:  $f_{MK} = U_{MK} / R_{MK}$

Considerando las reservas y consumo(modificado):  $f_{MK} = U_{MK} / R_{MK}^2$

Considerando los costos de reposición del recurso:  $f_{MK} = V_{MK}$

Donde  $R_{MK}$  son las reservas mundiales explotables del recurso K,  $U_{MK}$  corresponde al consumo anual mundial de dicho recurso y  $V_{MK}$  es una función del valor monetario (expresado en UCA, “unidades de carga ambiental”) requerido para recuperar el recurso utilizado.

Algunos valores sugeridos por el Nordic Council of Ministers (NCM) se muestran en la Tabla 10.7 a modo de ilustración.

**TABLA 10.7: DATOS PARA EL CALCULO DE FACTORES DE PONDERACION PARA IMPACTOS SOBRE LOS RECURSOS NATURALES**

	$R_{MK}$	$R_{MK}/U_{MK}$ (años)	$V_{MK}$ (UCA/kg)
Petróleo	$1,24 \cdot 10^{14}$ kg	40	0,4
Gas Natural	$1,09 \cdot 10^{14}$ m <sup>3</sup>	60	0,4
Cobre	$3,50 \cdot 10^{11}$ kg	36	30,2
Zinc	$1,47 \cdot 10^{11}$ kg	21	21,3
Estaño	$4,33 \cdot 10^9$ kg	28	1.170,0

Fuente: NCM (1995)

**b) Categoría de impacto: Salud Humana – Impacto Toxicológico:**

Existen diversos métodos para estimar los factores de ponderación correspondientes a esta categoría de impacto.

• **Enfoque utilizando un concepto de Volumen Crítico:**

El factor de ponderación se calcula como:  $f_k = 1/Q_k$

Donde  $Q_k$  es un estándar de calidad ambiental correspondiente al contaminante K para el medio receptor aire, agua o suelo. En el caso del agua, se utiliza el estándar de calidad de agua potable, mientras que en el caso del aire se usan los niveles máximos de inmisión o los límites de exposición ocupacional.

Normalmente,  $Q_k$  posee unidades de concentración másica (ej. g/m<sup>3</sup>), resultando un factor de ponderación con unidades (m<sup>3</sup>/g); por lo tanto, al multiplicar por la cantidad total de contaminante (g), se obtiene un resultado con unidades de volumen (m<sup>3</sup>). Por esa razón, se denomina método de volumen crítico.

**TABLA 10.8: ESTÁNDARES DE CALIDAD DE AIRE PARA CALCULO DE VOLUMEN CRITICO**

Contaminantes atmosféricos	$Q_k$ (g/m <sup>3</sup> )
Material Particulado	$7,0 \cdot 10^{-5}$
CO	$8,0 \cdot 10^{-3}$
NO <sub>x</sub>	$3,0 \cdot 10^{-5}$
NH <sub>3</sub>	$5,0 \cdot 10^{-5}$
HCl	$1,0 \cdot 10^{-4}$
SO <sub>2</sub>	$3,0 \cdot 10^{-5}$
H <sub>2</sub> S	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Hidrocarburos	$1,5 \cdot 10^{-2}$

Fuente: NCM (1995)



**TABLA 10.9: ESTANDARES DE CALIDAD DE AGUA PARA CALCULO DE VOLUMEN CRITICO**

Contaminantes	$Q_K$ (g/m <sup>3</sup> )
Sólidos suspendidos	$2,0 \cdot 10^{-2}$
DBO <sub>5</sub>	$2,0 \cdot 10^{-2}$
NH <sub>3</sub>	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Grasas y Aceites	$2,0 \cdot 10^{-2}$
Organoclorados lipofílicos	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Compuestos Fenólicos	$5,0 \cdot 10^{-5}$
Hidrocarburos Totales	$1,0 \cdot 10^{-2}$

Fuente: NCM (1995)

• **Enfoque utilizando factores toxicológicos:**

**Método CML:** El Centro de Ciencias Ambientales de Leiden-Holanda (CML) ha desarrollado un conjunto de metodologías para apoyar el ACV. En relación al cálculo de los factores de ponderación para impactos toxicológicos sobre la salud humana, CML sugiere un método basado en criterios toxicológicos (ie. factores de potencia para compuestos cancerígenos, dosis diarias límite). Los factores propuestos, expresados en unidades (kg peso/kg contaminante), cubren un amplio rango de compuestos. La contribución total del contaminante a los impactos toxicológicos humanos,  $C_K$ , se obtiene sumando las contribuciones de dichos efectos en el agua (W), aire (A) y suelo (S):

$$C_K = M_{KA} f_{KAire} + M_{KW} f_{KAgu} + M_{KS} f_{KSuelo}$$

Donde los factores  $f_K$  son los factores de ponderación, para cada compartimento ambiental (ver Tabla 10.10). Al calcular la contribución total de los contaminantes al efecto toxicológico, se obtiene valores con unidades de (kg peso humano). Esto se interpreta como los kilos de peso de un individuo afectados por el contaminante.

**TABLA 10.10: FACTORES DE PONDERACION PARA IMPACTO TOXICOLOGICO (METODO CML)** Fuente: NCM (1995)

	$f_{KAire}$	$f_{KAgu}$	$f_{KSuelo}$
	kg peso/kg contaminante		
As	$4,7 \cdot 10^3$	1,4	$4,3 \cdot 10^{-2}$
Cd	$5,8 \cdot 10^2$	2,9	$1,9 \cdot 10^{-2}$
Hg	$1,2 \cdot 10^2$	4,7	$1,5 \cdot 10^{-1}$
Ni	$4,7 \cdot 10^2$	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$9,1 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	-
NOx	$7,8 \cdot 10^{-1}$	-	-
Fenol	$5,5 \cdot 10^{-1}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-1}$
Clorobencenos	$1,9 \cdot 10^{-1}$	5,7	-
Atracina	6,7	$5,7 \cdot 10^{-1}$	3,2

**Método Tellus:** El Tellus Institute desarrolló un procedimiento basado en el factor de potencia cancerígena (en kg equivalente a isoforeno) y la dosis de referencia oral para contaminantes no-cancerígenos (en kg equivalente a xileno). El método Tellus permite combinar los efectos cancerígenos y no-cancerígenos en un solo factor de ponderación combinado, en base a una equivalencia de 3 unidades de xileno por cada unidad de isoforeno (ver Tabla 10.11).

**TABLA 10.11: FACTORES DE PONDERACION PARA IMPACTO TOXICOLOGICO (METODO TELLUS)**

	$f_{\text{CANCERIGENO}}$	$f_{\text{NO CANCERIGENO}}$	$f_{\text{COMBINADO}}$
	kg isoforeno (equivalente)	kg xileno (equivalente)	
NH <sub>3</sub>	-	2,0	2,0
As	$1,3 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^4$
Benceno	7,0	-	22,0
Cd	$1,6 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^3$	$4,4 \cdot 10^3$
Ni	$2,2 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^2$	$3,7 \cdot 10^2$
Pentaclorofenol	-	67,0	67,0
Fenol	-	3,0	3,0
2,3,7,8 TCDD	$3,9 \cdot 10^7$	-	$1,2 \cdot 10^8$
Tolueno	-	7,0	7,0

Fuente: NCM (1995)

**c) Categoría de impacto: Calentamiento Global.**

Los factores de ponderación utilizados tienen base científica y están ampliamente aceptados. Se expresan en términos de kg de CO<sub>2</sub> equivalente:

**TABLA 10.12: FACTORES PARA CARACTERIZAR EL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL**

Compuesto	Factor de Ponderación (kg CO <sub>2</sub> equiv./kg)
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	62
N <sub>2</sub> O	290
CFC-11	5.000

Fuente: NCM (1995)

**d) Categoría de impacto: Agotamiento de la capa de ozono.**

Al igual que en el caso del calentamiento global, estos factores están avalados por una base científica. Se expresan en base a equivalente de CFC-11, como se muestra en la Tabla 10.13.

**TABLA 10.13: FACTORES PARA CARACTERIZAR LOS IMPACTOS POR AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO**

Compuesto	Factor de Ponderación (kg CFC11 equiv/kg)
CFC 11	1
CFC 114	0,80
HCFC 22	0,055
HCHC 141	0,11

Fuente: NCM (1995)

**e) Categoría de impacto: Acidificación.**

Tal como se mencionó anteriormente, los factores de ponderación permiten expresar el potencial de acidificación en términos de equivalente a kg SO<sub>2</sub> :

**TABLA 10.14: FACTORES PARA CARACTERIZAR LOS IMPACTOS DE ACIDIFICACIÓN**

Compuesto Acidificante	Factor de Ponderación (kg SO <sub>2</sub> equiv./kg)
SO <sub>2</sub>	1
NO <sub>x</sub>	0,70
HCl	0,88
NH <sub>3</sub>	1,88

Fuente: NCM (1995)

**f) Categoría de impacto: Eutrofización.**

Aquí se incluye, además, el efecto de demanda de oxígeno debido a emisiones de compuestos orgánicos biodegradables. Se incluyen las emisiones de DBO<sub>5</sub>, N total al agua, P total al agua y N total al aire:

**TABLA 10.15: FACTORES PARA CARACTERIZAR EL POTENCIAL DE EUTROFIZACION**

Compuesto	Factor de Ponderación (kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> equiv./kg)
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	1
N total al agua	0,42
N total al aire	0,13
DQO	0,022

Fuente: NCM (1995)

**g) Categoría de impacto: Formación de foto-oxidantes.**

En este caso, se considera sólo el potencial para formar ozono en presencia de óxidos de nitrógeno y luz solar. En la Tabla 10.16 se presenta algunos valores típicos para caracterizar el potencial de formación de fotooxidantes:

**TABLA 10.16: FACTORES PARA CARACTERIZAR EL POTENCIAL FORMACION DE FOTOOXIDANTES**

<b>Compuesto</b>	<b>Factor de Ponderación (kg eteno equiv./kg)</b>
Eteno	1
Alcanos (promedio)	0,40
Cetonas (promedio)	0,33
Esteres (promedio)	0,22
Olefinas (promedio)	0,91
Hidrocarbano (promedio)	0,337
Aromáticos (promedio)	0,761

Fuente: NCM (1995)

### **10.6) VALORACIÓN**

Aquí se evalúa cuantitativamente o cualitativamente la importancia relativa de las distintas categorías de impacto. Si la valoración es cuantitativa, se utiliza factores de valoración en base a criterios socioeconómicos. Ello permite obtener un perfil ambiental ponderado que facilita el cálculo de un índice ambiental global para el sistema en estudio. Los factores de ponderación para las distintas categorías pueden basarse en valores monetarios (ej. costos de los daños ocasionados al medio, costos para la prevención de las emisiones). En el seno de ISO se está evaluando si es pertinente incluir la valoración en la evaluación de los impactos en el ACV, dada la falta de rigurosidad científica de esta fase.

### **10.7) UN EJEMPLO: ANALISIS DE INVENTARIO DE LA PRODUCCION DE CELULOSA KRAFT BLANCA**

La producción de celulosa kraft blanca constituye uno de los principales rubros de la industria forestal chilena. Esta actividad implica una intensiva utilización de recursos naturales (ej.: suelo, agua), genera importantes cantidades de residuos, y tiene gran impacto en el ciclo del carbono. A continuación se presentan los resultados del análisis de inventario de esta actividad, recientemente publicado por González (1999)<sup>1</sup>. El objetivo de este análisis de inventario es entregar información sobre los flujos de materiales y energía a través de los principales componentes del ciclo de vida. En este caso, se evalúa comparativamente el uso de pino y eucalipto como materia prima, ya que ambas especies constituyen la única fuente de fibra celulósica en Chile. El estudio considera la utilización de la tecnología de mayor potencial de implementación en la actualidad:

- Cocción extendida
- Predesignificación con oxígeno
- Blanqueo libre de cloro elemental (ECF).

<sup>1</sup> González P. Desarrollo de un Modelo Conceptual para la toma de decisiones en Gestión Ambiental de la Industria de Pulpa Química Kraft Blanca. Tesis para optar al Grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Centro EULA. Universidad de Concepción. Chile. (1999).

Para mayores detalles de la descripción del proceso de producción de celulosa kraft blanca, ver el Capítulo 4.

El ciclo de vida de la celulosa comienza en el recurso forestal, donde los compuestos lignocelulósicos son producidos a partir de la fotosíntesis. Este subsistema forestal provee la materia prima para el procesamiento industrial, donde se genera la pulpa celulósica. En el caso chileno, la celulosa se comercializa principalmente en el extranjero y se destina a diferentes usos como fuente de fibra papelera, material adsorbente u otros. Finalmente, los residuos generados por el consumo final se pueden reciclar, incinerar o disponer en vertederos. En este estudio, los límites del sistema se fijan en aquellas actividades que se realizan en Chile, es decir, la generación de materia prima forestal y la producción de pulpa blanca. Los diferentes componentes de los subsistemas forestal e industrial se ilustran en la Figura 10.4. Los otros componentes del ciclo de vida (ej. producción de reactivos, producción de papel, disposición final de residuos) son evaluados en forma general, con vistas a analizar los consumos energéticos y las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Las Tablas 10.17 y 10.18 resumen los principales resultados del análisis de inventario, correspondientes a los subsistemas forestal e industrial, respectivamente. Estos valores corresponden a las cargas ambientales asociadas al todo el Ciclo de Vida de la producción de pulpa química kraft blanca. Ellos están referidos a una base de cálculo de 365.000 (ton celulosa/año), siendo esta la producción típica de las plantas nacionales actuales. Cabe señalar que más del 50% de la madera de pino cosechada se destina directamente como materia prima para pulpa, mientras que el resto se utiliza en aserrío donde un 30% se puede recuperar como residuo pulpable. Por su parte, casi la totalidad de la madera de eucalipto se destina a producción de pulpa.

En la Tabla 10.17 se observa que las plantaciones de eucalipto demandan sólo un tercio de la extensión de terreno requerida por las plantaciones de pino, para sostener una producción de pulpa similar. Ello se debe al menor ciclo de rotación del eucalipto (10 años, comparados con 20 años para el pino), y a su mayor densidad y contenido de celulosa. Esto último conlleva a que los requerimientos de área a plantar anualmente para el eucalipto son inferiores al 60% de lo necesario para el pino. Por esta misma razón, los consumos de pesticidas y nutrientes usados en establecimiento de una plantación con eucalipto son proporcionalmente menores que para el caso del pino.

El mayor contenido de lignina presentado por el pino resulta en un menor rendimiento de proceso, por lo que se requiere 15% menos madera de eucalipto que de pino, para una misma cantidad de pulpa química blanca. En consecuencia, el procesamiento del pino consume mayores cantidades de reactivos de proceso, principalmente aquellos asociados al blanqueo (ej.: cloro, clorato, metanol, ácido sulfúrico), lo que se traduce en mayores emisiones de contaminantes organoclorados.

**TABLA 10.17 ANÁLISIS DE INVENTARIO. SUBSISTEMA SILVÍCOLA**  
**Base de Cálculo 365.000 (Ton. Pulpa Química Kraft Blanca por Año)**

SUBSISTEMA SILVICOLA	EUCALIPTO	PINO
	(toneladas/año)	(toneladas/año)
<b>Vivero</b>		
<b>Principales entradas:</b>		
Requerimientos de suelo (ha)	2,6	6,7
Agua para riego	1.300	2.300
Fijación Neta de CO <sub>2</sub>	14.300	24.400
Pesticidas (como agente activo)	0,04	0,12
Nutrientes (como NPK)	7,8	13,3
Requerimientos de Energía (MJ/año)	0,1 10 <sup>6</sup>	0,3 10 <sup>6</sup>
<b>Principales Salidas:</b>		
Plantas (plantas/año)	7,8 10 <sup>6</sup>	13,3 10 <sup>6</sup>
Emisión CO <sub>2</sub> (combustible fósil)	6,4	19
Residuos Sólidos	0,1	0,22
<b>Establecimiento de la Plantación</b>		
<b>Principales entradas:</b>		
Uso de Suelo para Rotación Sustentable (ha)	49.000	166.000
Area a plantar (ha / año)	4.900	8.300
Fijación Neta de CO <sub>2</sub>	1.530.000	3.086.900
Pesticidas (como agente activo)	70	170
Nutrientes (como NPK)	190	330
Requerimientos de Energía (MJ/año)	1,8 10 <sup>6</sup>	3,1 10 <sup>6</sup>
<b>Principales salidas:</b>		
Emisión CO <sub>2</sub> (combustible fósil)	115	195
Residuos Sólidos	3,4	8,3
<b>Poda, Raleo y Cosecha</b>		
<b>Principales entradas:</b>		
Requerimientos de Energía (MJ/año)	45 10 <sup>6</sup>	102 10 <sup>6</sup>
Area a cosechar (ha / año)	4.900	8.300
<b>Principales Salidas:</b>		
Madera pulpable (ton ssc/año)	735.000	627.500
Madera a aserradero (ton ssc/año)	0	812.240
Emisiones CO <sub>2</sub> (combustible fósil)	2.700	6.540
Emisiones de CO <sub>2</sub> (renovable)	26.800	383.000
Emisiones de NO <sub>x</sub>	16	39

Fuente: González (1999)

**TABLA 10.18. ANÁLISIS DE INVENTARIO. SUBSISTEMA INDUSTRIAL**  
**Base de Cálculo 365.000 (Ton. Pulpa Química Kraft Blanca por Año)**

SUBSISTEMA PROCESAMIENTO INDUSTRIAL	EUCALIPTO	PINO
	Tonelada/año	Tonelada/año
<b>Principales Entradas</b>		
Requerimientos de Terreno (hectáreas)	50	50
Requerimientos de Madera de pulpable (ton)	735.000	871.000
Requerimientos de agua de Proceso	14 10 <sup>6</sup>	16 10 <sup>6</sup>
Requerimientos de Energía Neta (MJ/año):		
Industria de Proceso	670 10 <sup>6</sup>	910 10 <sup>6</sup>
Transporte de Materias Primas y Productos	156 10 <sup>6</sup>	309 10 <sup>6</sup>
Producción de Reactivos Químicos	95 10 <sup>6</sup>	138 10 <sup>6</sup>
Sulfato de Sodio	1.800	1.800
Hidróxido Sodio	8.000	9.900
Carbonato de Calcio	8.000	9.900
Oxido de Calcio	730	730
Cloro	0	0
Clorato de Sodio	3.520	6.700
Metanol	1.070	2.050
Acido Sulfúrico	3.600	6.900
Oxígeno	7.420	7.600
Peróxido de Hidrógeno	730	730
<b>Principales Salidas</b>		
Pulpa	365.000	365.000
Madera Aserrada	0	406.000
Venta Energía Eléctrica (MJ/año)	432 10 <sup>6</sup>	972 10 <sup>6</sup>
Descarga de Residuos Líquidos	13 10 <sup>6</sup>	15 10 <sup>6</sup>
DQO en RIL	3.080	7.595
AOX en RIL	81	144
Emisiones de CO <sub>2</sub> (fósil)	68.830	100.120
Emisiones de CO <sub>2</sub> (renovable)	813.100	1.490.000
Emisiones de SO <sub>2</sub>	790	940
Emisiones de Material Particulado	440	550
Emisiones de TRS	170	200
Emisiones de NO <sub>x</sub>	1.310	1.500
Emisiones de HAP	110	180
Residuos Sólidos	11.000	12.400

Fuente: González (1999)

Por su parte, los requerimientos de agua del procesamiento industrial son responsables de la casi totalidad del consumo en todo el ciclo de vida. Se debe señalar que el agua requerida para mantener el crecimiento de los árboles se obtiene en su totalidad de los procesos hidrológicos naturales (ej. lluvias, escorrentía); los valores mostrados en la Tablas 10.17 y 10.18 sólo incluyen el agua suministrada artificialmente. Por otro lado, las principales emisiones atmosféricas se generan en el subsistema industrial y corresponden a SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, TRS y compuestos orgánicos volátiles peligrosos (HAP).

La actividad forestal tiene una gran importancia en el ciclo del carbono ya que durante el crecimiento del árbol se fija el CO<sub>2</sub> atmosférico en la biomasa forestal, gracias al proceso de fotosíntesis. Por otra parte, durante las actividades de cosecha, procesamiento industrial, y transporte se genera CO<sub>2</sub> debido principalmente al consumo de combustibles fósiles y derivados de la madera. La Tabla 10.19 presenta el balance de CO<sub>2</sub> asociado al sistema de estudio. En ella se puede observar que existe un excedente de fijación mayor para el pino que para el eucalipto. La mayor captación neta de CO<sub>2</sub> en el pino se debe a que se requiere una mayor cantidad de biomasa para elaborar los productos y, además, se genera una gran cantidad de producto aserrado que mantiene el carbono fijado. Estos excedentes representan una interesante contribución al ciclo global del carbono y son equivalentes al CO<sub>2</sub> emitido anualmente por un parque automotriz de 83.000 y 152.000 vehículos, para el caso del eucalipto y pino, respectivamente (lo cual es equivalente a la combustión de 214.000 y 400.000 toneladas de gasolina, respectivamente). Si se considera las emisiones generadas en la producción de papel (fuera del sistema en estudio), el excedente de CO<sub>2</sub> fijado se reduce en 28% y 16% para eucalipto y pino, respectivamente.

**TABLA 10.19. BALANCE CO<sub>2</sub>, CONSIDERANDO EL CICLO DE VIDA COMPLETO**

Etapa del Ciclo	CO <sub>2</sub> (ton/año)	
	Eucalipto	Pino
Subsistema Silvícola	-1,515 10 <sup>6</sup>	-2,72 10 <sup>6</sup>
• Fijación	-1,544 10 <sup>6</sup>	-3,11 10 <sup>6</sup>
• Emisión	+0,029 10 <sup>6</sup>	+0,39 10 <sup>6</sup>
Transporte	+0,009 10 <sup>6</sup>	+0,019 10 <sup>6</sup>
Subsistema Industrial	+0,872 10 <sup>6</sup>	+1,568 10 <sup>6</sup>
Balance sin producción de papel	<b>-0,633 10<sup>6</sup></b>	<b>-1,137 10<sup>6</sup></b>
Producción de papel	+0,18 10 <sup>6</sup>	+0,18 10 <sup>6</sup>
Balance con producción de papel	<b>-0,453 10<sup>6</sup></b>	<b>-0,957 10<sup>6</sup></b>

Fuente: González (1999)

Para efectos de completar el ciclo del carbono dentro del concepto “de la cuna a la tumba”, se considera las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por la incineración final de la totalidad de la pulpa celulósica. Estas emisiones corresponden a 0,54 ton CO<sub>2</sub>/año, para ambas materias primas. Por lo tanto, el balance global de CO<sub>2</sub> para todo el ciclo es de +0,087 y -0,417 ton CO<sub>2</sub>/año, para el eucalipto y pino respectivamente. Para el caso del eucalipto, el CO<sub>2</sub> emitido a lo largo de todo el ciclo de vida supera en



5,5% al CO<sub>2</sub> fijado en el subsistema silvícola. Por el contrario, el pino mantiene un excedente de fijación neto de CO<sub>2</sub> correspondiente a un 14% del CO<sub>2</sub> total emitido en el ciclo de vida, aún cuando se incinere el 100% del papel producido. Dicho excedente de fijación de CO<sub>2</sub> se reduciría a cero con la incineración de 0,21 10<sup>6</sup> (ton madera/año), es decir, un 52% de la madera aserrada producida en el subsistema industrial del pino.

La Tabla 10.20 presenta los consumos y generación de energía para todo el ciclo de vida de producción de pulpa. Es importante tener en cuenta que en el procesamiento industrial, una parte de la energía se obtiene de la combustión de los residuos combustibles y licor negro generados en el procesamiento de las materias prima. Además, se genera un excedente energético que es exportado como energía eléctrica.

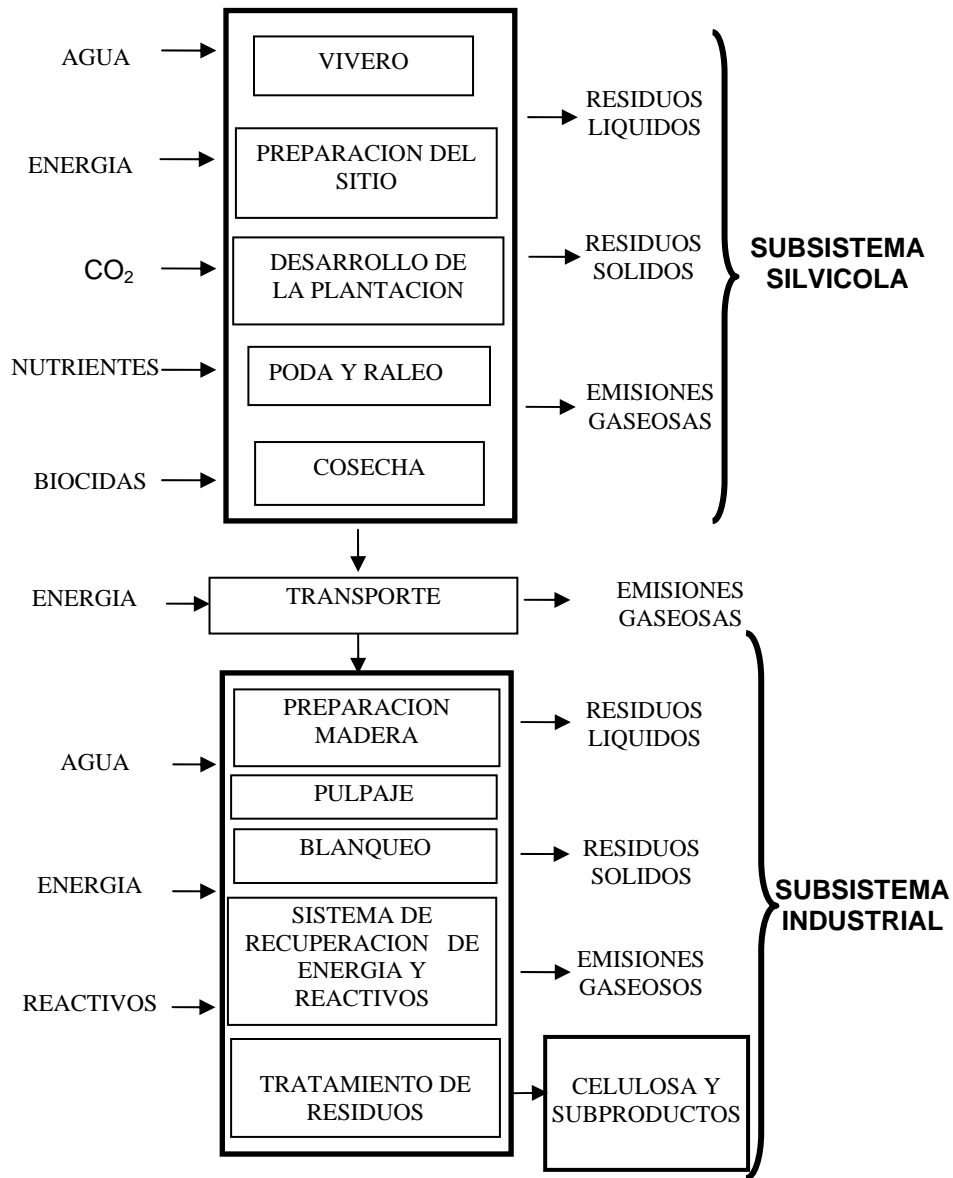
**TABLA 10.20. BALANCE DE ENERGÍA, CONSIDERANDO EL CICLO DE VIDA COMPLETO**

Etapa del Ciclo	ENERGIA (MJ/año)	
	Eucalipto	Pino
Consumo subsistema silvícola	-46,9 10 <sup>6</sup>	-105,4 10 <sup>6</sup>
Consumo Transporte	-156 10 <sup>6</sup>	-309 10 <sup>6</sup>
Consumo en producción de celulosa	-670 10 <sup>6</sup>	-910 10 <sup>6</sup>
Consumo en producción de químicos	-95 10 <sup>6</sup>	-138 10 <sup>6</sup>
<b>Total Consumo</b>	<b>-967,9 10<sup>6</sup></b>	<b>-1462,4 10<sup>6</sup></b>
Generación excedente en producción de celulosa	+432 10 <sup>6</sup>	+972 10 <sup>6</sup>
<b>Balance neto</b>	<b>-535 10<sup>6</sup></b>	<b>-490 10<sup>6</sup></b>

Fuente: González (1999)

Se observa que el procesamiento de pino requiere 30% más energía que el eucalipto. Por su parte, una planta de pulpa en base a pino puede generar el doble de energía eléctrica excedente que en el caso del eucalipto, debido a la mayor cantidad de residuos sólidos combustibles y al mayor contenido orgánico del licor negro generado por el procesamiento del pino. Sin embargo, el balance total de energía del sistema estudiado demuestra que existe un déficit energético a lo largo de todo ciclo de vida, equivalente a 1,47 y 1,34 GJ/ton de pulpa, para eucalipto y pino respectivamente.

A partir de este análisis de inventario se puede completar las siguientes fases del ACV. Este ejemplo permite visualizar la importancia de tipo de análisis ya que entrega información acerca de la relevancia ambiental de cada una de las actividades del ciclo de vida, facilitando la identificación de medidas de mejoramiento en las áreas de mayor impacto.



**FIGURA 10.4: PRODUCCION DE PULPA KRAFT BLANCA**

## BIBLIOGRAFIA

Fullana P., Puig R. "Análisis del Ciclo de Vida". Ed. Rubes. Barcelona (1997).

González P. Desarrollo de un Modelo Conceptual para la toma de decisiones en Gestión Ambiental de la Industria de Pulpa Química Kraft Blanca. Tesis para optar al Grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Centro EULA. Universidad de Concepción. Chile (1999).

Heijungs R. *Environmental Life Cycle Assessment of Products*, Centre of Environmental Science, Leiden (1992)

Henn C., Fava J, "LCA and Resource Management", cap. 14 en "Environmental Strategies Handbook", R.V. Kolluru, McGraw Hill NY (1994).

Nordic Council of Ministers, "Nordic Guidelines on Life Cycle Assessment", The Nordic Council, Stockholm (1995).

SETAC, "Guidelines for LCA: A Code of Practice", Society for Environmental Toxicology and Chemistry, Bruselas, (1993).