

Análisis del Ciclo de Vida

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.

Ciclo de vida de un producto

La vida de un producto empieza en el diseño y desarrollo del producto y finaliza al final-de-vida de las actividades (reutilización, reciclaje, etc.) a través de las siguientes etapas:

- Adquisición de materias primas: Todas las actividades necesarias para la extracción de las materias primas y las aportaciones de energía del medio ambiente, incluyendo el transporte previo a la producción.

- Proceso y fabricación: Actividades necesarias para convertir las materias primas y energía en el producto deseado. En la práctica esta etapa se compone de una serie de sub-etapas con productos intermedios que se forman a lo largo de la cadena del proceso.
- Distribución y transporte: Traslado del producto final al cliente.
- Uso, reutilización y mantenimiento: Utilización del producto acabado a lo largo de su vida en servicio.
- Reciclaje: Comienza una vez que el producto ha servido para su función inicial y consecuentemente se recicla a través del mismo sistema de producto (ciclo cerrado de reciclaje) o entra en un nuevo sistema de producto (ciclo de reciclaje abierto).
- Gestión de los residuos. Comienza una vez que el producto ha servido a su función y se devuelve al medio ambiente como residuo.

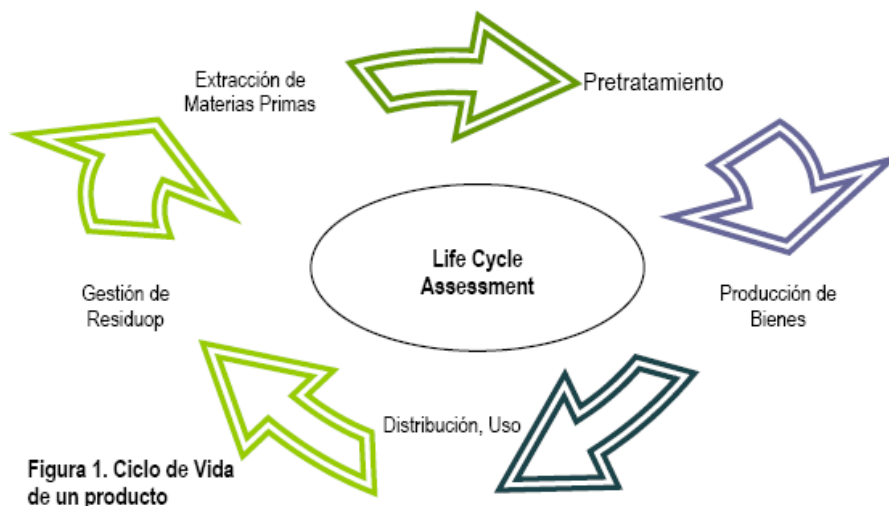
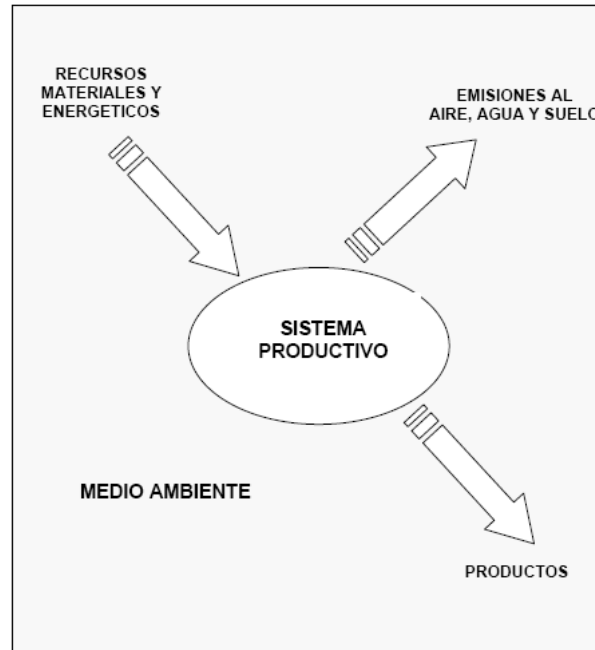


Figura 1. Ciclo de Vida de un producto

Breve reseña del ACV

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



Cargas ambientales de un sistema de producción

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 (desde su "cuna"), hasta el consumo y disposición final (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 disuelto 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.

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. 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:

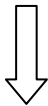
- Norma ISO 14040: presenta los principios generales y requerimientos metodológicos del ACV de productos y servicios.
- Norma ISO 14041: guía para determinar los objetivos y alcances de un estudio de ACV y para realizar el análisis de inventario.
- Norma ISO 14042: guía para llevar a cabo la fase de 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
- *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.
- *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.

- *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

La siguiente tabla muestra las aplicaciones de un ACV:

Aplicaciones	Análisis y Valoración
Minimización de residuos	Cambios en las materias primas Modificación de equipos Nuevas tecnologías de proceso Tecnologías Limpias (BATs)
Diseño de Productos	Nuevos materiales Nuevos procesos de fabricación Nuevas características de uso Nueva presentación Ecoetiqueta
Proyectos y procesos	Características propias Alternativas Opciones de mejora
Materias primas	Opciones de mejora Cambios de fabricación Cambios de uso Nuevos combustibles
Consecuencia:	 MENOR IMPACTO AL MEDIO AMBIENTE

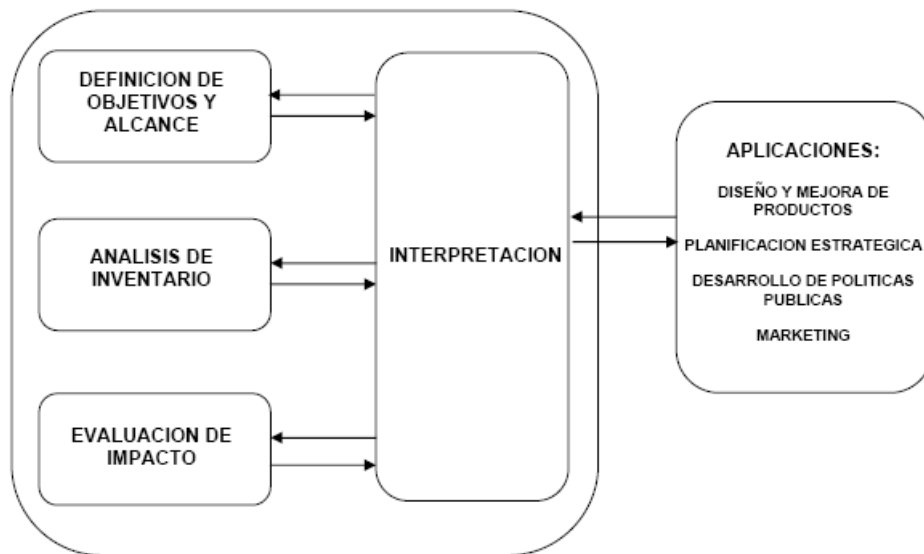
Las técnicas específicas para el análisis del ciclo de vida de un producto o proceso aún se encuentran en pleno desarrollo. Aspectos tales como el modelamiento y análisis de los flujos de materia y energía a través del ciclo de vida, y su relación con los diferentes compartimentos ambientales, representan 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.

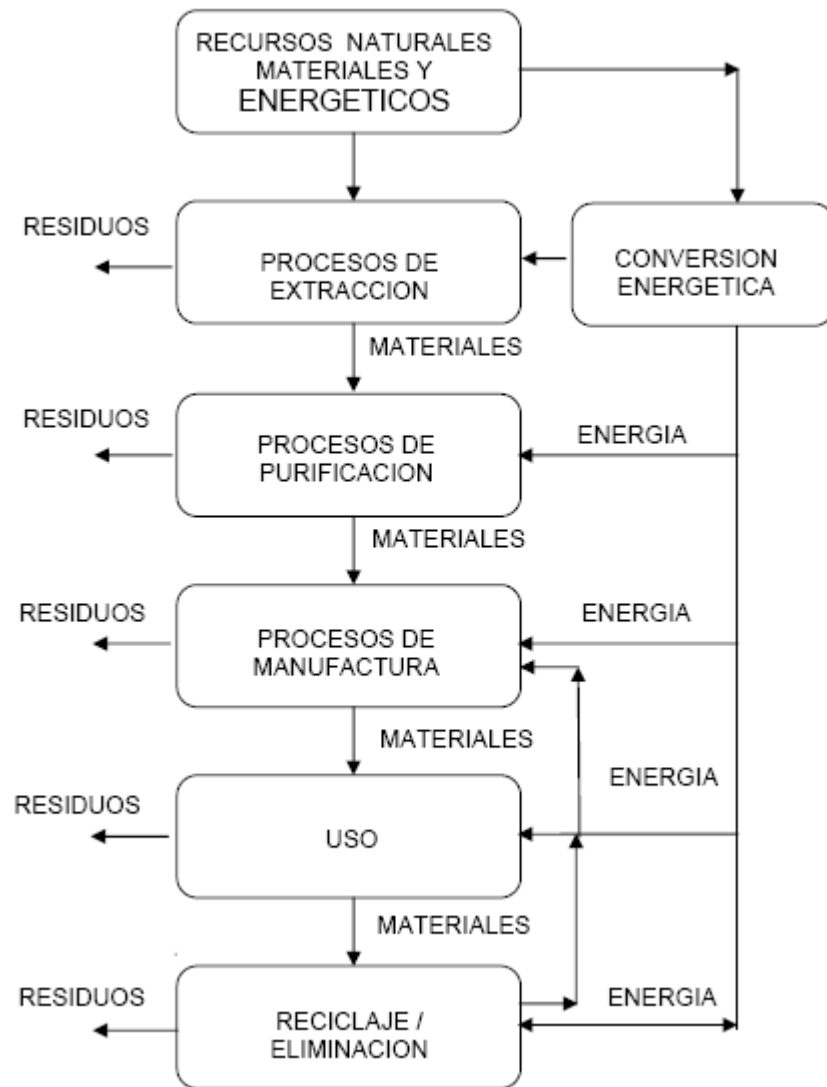
Metodología del Análisis del Ciclo de Vida

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



Marco del Análisis del Ciclo de Vida

- 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).
- 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



Ciclo de Vida de un Producto

a) Definición 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:

- **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.
- **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”.
- **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. 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).

b) Análisis 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:

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 tecnosfera.¹ Algunos ejemplos se presentan en la siguiente tabla:

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

Origen y destino de flujos materiales y energéticos

El análisis de inventario es un proceso iterativo, ya que la existencia de 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 (Ecobalances)
- 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 siguiente:

ENTRADAS		
	Desde la Naturaleza	Desde la Tecnosfera
Materias primas		

¹ **Tecnosfera**, es el conjunto de los medios artificiales que soportan el desarrollo de la sociedad humana y que evoluciona hacia una analogía de la biosfera con la que interactúa. Los seres humanos actúan sobre el ambiente para satisfacer distintos tipos de necesidades y crear o fabricar paisajes agrarios, industriales, viales, urbanos.

Insumos		
Agua		
Combustibles		
Electricidad		
SALIDAS		
	Hacia la Naturaleza	Hacia la Tecnosfera
Productos		
Residuos a tratamiento		
Emisiones líquidas		
Emisiones gaseosas		
Emisiones sólidas		

Balance de materiales y energía en análisis de inventario (Ecobalances)

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.

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).

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 reciclaje 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_2 , CO_2)?

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.

c) Análisis de los impactos

Es un proceso cuantitativo y/o cualitativo mediante el que se caracterizan y evalúan los efectos de las intervenciones medioambientales identificadas en el inventario. También pueden incluir juicios y aspectos sobre beneficios medioambientales relativos, así como una comparativa de los inconvenientes de los diferentes sistemas.

La SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 1993) considera tres pasos en la evaluación de impactos:

1. Clasificación. Es un paso cualitativo mediante el cual las entradas y salidas se asignan a diferentes categorías de impacto basadas en el tipo de impacto esperado sobre el ambiente.

La asignación ha de fundamentarse en el análisis científico de los procesos medioambientales relevantes y debe permitir responder a la pregunta: ¿Cuáles son los impactos medioambientales esperados de cada entrada y salida del sistema?.

El propósito principal de esta actividad es describir los efectos medioambientales potenciales de las entradas y salidas, y decidir qué impactos medioambientales se consideran en la evaluación.

Existen tres grandes categorías de impactos:

- Recursos Naturales
- Salud humana
- Salud ecológica

2. Caracterización. Es un paso cuantitativo en el que se evalúa la contribución relativa de cada entrada y salida en su categoría de impacto asignado y se totalizan las contribuciones dentro de cada categoría.

La caracterización también se tiene que fundamentar en el análisis científico de los procesos medioambientales relevantes y tiene que permitir responder a las preguntas: ¿Cuál es la contribución potencial de una entrada o salida específica a diferentes impactos medioambientales? y ¿cuál es la contribución potencial total del sistema a diferentes impactos medioambientales?.

3. Valoración.: Es un paso que puede ser cualitativo o cuantitativo, y en el que se pondera la importancia relativa de los diferentes impactos medioambientales. La valoración puede no estar necesariamente fundamentada en el análisis científico, se pueden incluir valores de tipo ético, socioeconómico, etc.

La valoración es una herramienta formal que transforma el perfil medioambiental (consistente en un conjunto de "n" efectos cuantificados, describiendo el potencial del impacto sobre "n" problemas tipo seleccionados) en un índice medioambiental.

Un método sencillo y rápido de aplicación es el de *aproximación a los volúmenes críticos*, donde se valora la cantidad de contaminante emitida al medio durante el ciclo de vida. El volumen crítico de cada emisión es la dilución necesaria de cada contaminante disuelto en aire o agua hasta su límite legal. Cada país tiene sus propios límites y los impactos en este caso no son comparables; además muchos contaminantes no tienen establecidos sus límites ni se conocen sus consecuencias.

El método de los **ecopuntos** está basado en el concepto de singularidad ecológica. Los ecopuntos evalúan la contribución de los diversos compuestos contaminantes a las diferentes categorías de impacto consideradas: efecto invernadero, ozono estratosférico, acidificación, eutrofización, niebla fotoquímica, metales pesados, sustancias carcinógenas, radiaciones ionizantes, generación de residuos, residuos radiactivos y agotamiento de los recursos energéticos. El impacto total será la suma de los ecopuntos asociados a todo el conjunto de sustancias emitidas consideradas bajo cada categoría de impacto.

Esta cuantificación de los impactos en ecopuntos para cada categoría y tecnología es extraordinariamente potente. A partir de esta información es posible deducir un buen número de pautas y definir las acciones más adecuadas al cumplimiento de los objetivos que se pretenden. De forma esquemática y a modo de ejemplo, puede indicarse que si se desea reducir la emisión de sustancias generadoras de la lluvia ácida, debería señalarse, dentro de una cierta ley de proporcionalidad, a aquellos sistemas energéticos responsables de las emisiones que contribuyen en mayor medida a tal impacto.

La siguiente figura representa en forma esquemática los pasos seguidos para la obtención de la penalización de ecopuntos a partir del daño ocasionado por las diferentes sustancias de referencia: cada una de las categorías de impacto sobre las que actúan las distintas sustancias contaminantes, supone un daño medioambiental que debe valorarse según la probabilidad de causar un deterioro del ecosistema y de provocar enfermedades importantes o incluso la muerte. El resultado final, el daño medioambiental causado por cada sistema energético y cada categoría de impacto considerada, se expresa en ecopuntos.

Los ecopuntos se calculan para cada sustancia emitida y categoría de impacto, a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Ecopuntos} = \text{CS} \times \text{FC} \times \text{FN} \times \text{FE}$$

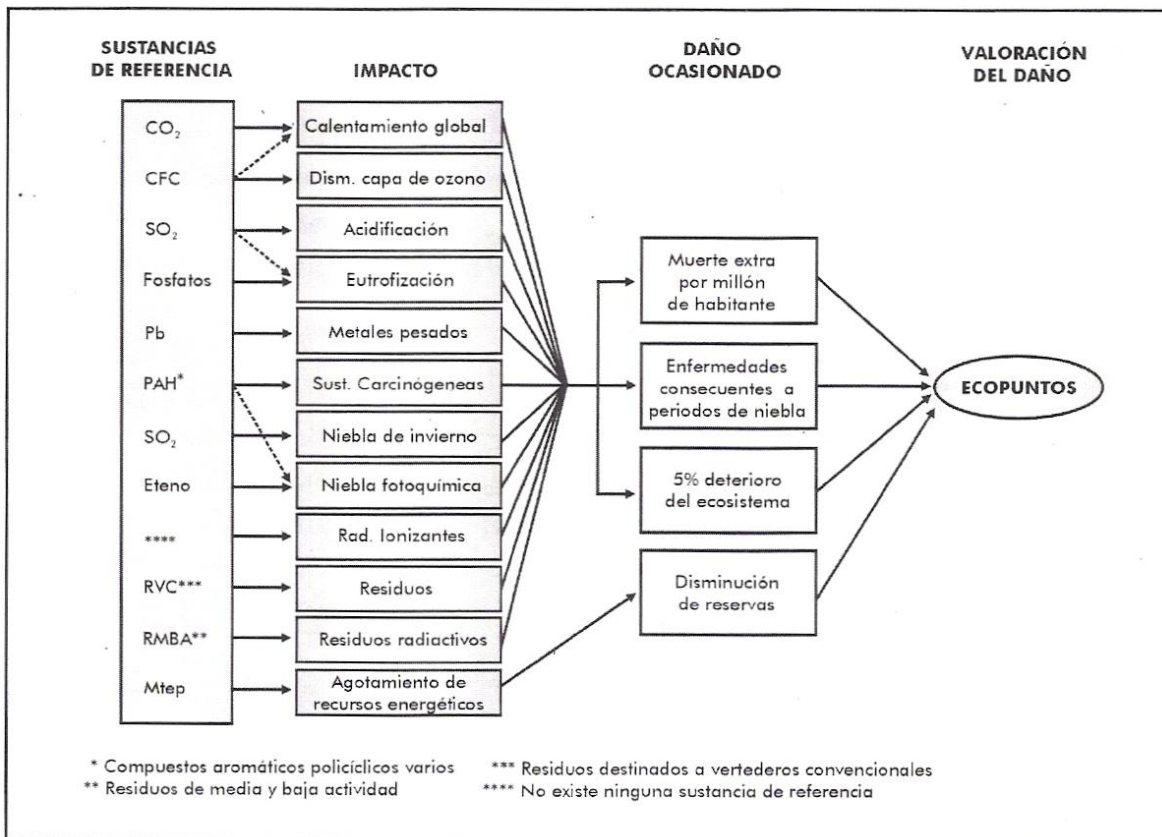
Donde::

CS es la cantidad de sustancia emitida

FC es un factor de caracterización

FN es un factor de normalización

FE es un factor de evaluación



Fuente: FUNIBER Capítulo *Herramientas de Gestión Ambiental*

d) Interpretación

La última etapa de un ACV y la menos desarrollada, es la de Evaluación de Mejoras, donde se identifican y evalúan las opciones para reducir el impacto o las cargas ambientales del sistema en estudio.