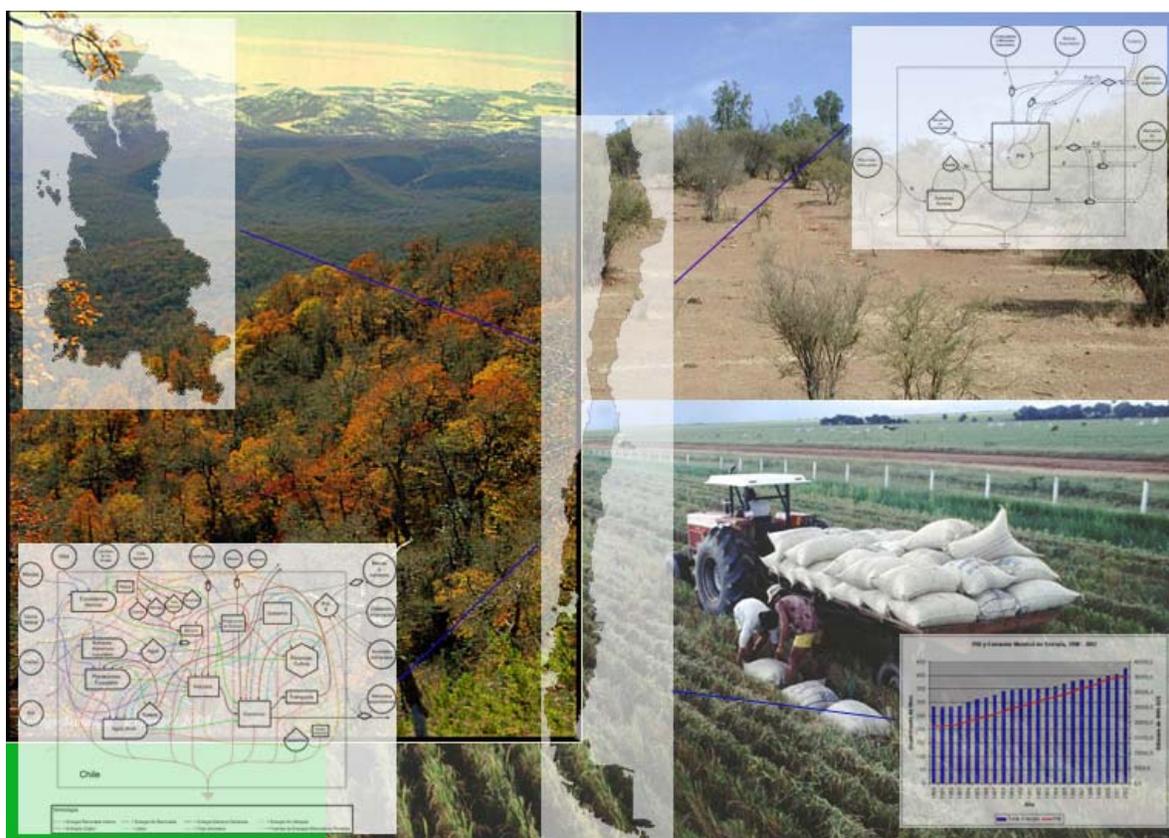




Pontificia Universidad Católica de Chile  
Facultad de agronomía e Ingeniería Forestal  
Departamento de Ciencias Forestales

## “Análisis Emergético: metodología para la evaluación de la sustentabilidad territorial. Estudio de casos de Chile y la Provincia de Palena”.



PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL

Profesor Guía:  
Profesor Co-guía:  
Alumno:

Juan Gastó C.  
Eduardo Arellano O.  
Gonzalo Reyes S.

Septiembre del 2004

*A la Madre Tierra, a ver si esta pequeña gota de agua aporta en su comprensión y cuidado.*

## **Agradecimientos**

Al Laboratorio de Ecosistemas de la Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal de la Pontificia Universidad Católica de Chile, por el espacio físico e intelectual con el cual conté desde los inicios del desarrollo de este proyecto.

A todas las personas que integran el taller, en especial a Consuelo Gálvez, Cristóbal Gatica y Joan Lavandeira, quienes me entregaron apoyo y amistad incondicional

A todos quienes integraron la campaña de terreno del proyecto (en orden alfabético); Majid Dehghanmans, Melisa Soublett, Joan Lavandeira, Daniela León, Javier Rau, Leonardo Rodríguez, Leonardo Vera y Ursula Wilmanns, con quienes compartí una experiencia académica y personal increíble.

A la Fundación The Conservation Land Trust, por su apoyo en recursos en las etapas de terreno y gabinete del proyecto.

A Bernardita Ramírez, por brindarme apoyo espiritual incondicional.

A mi profesor y maestro, Don Juan Gastó, quien me entregó guía y apoyo incondicionales.

A Eduardo Arellano, por sus enseñanzas y revisión del documento maestro, sin las cuales no hubiese podido contextualizar mi proyecto.

A mis padres y hermanos, quienes han hecho posible mi educación y el desarrollo de mi vida, junto al infinito amor y cariño que me han entregado siempre.

A todos quienes de alguna manera forman parte de mi vida y que no han sido mencionados

Muchas gracias

# INDICE DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	6
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	12
2.1 GENERAL .....	12
2.2 ESPECÍFICOS .....	12
<b>3. MARCO TEÓRICO</b> .....	13
3.1 SISTEMAS .....	13
<b>3.1.1 Principios de sistemas</b> .....	14
<b>3.1.2 Patrones en sistemas</b> .....	18
<b>3.1.3 Cibernética</b> .....	20
<b>3.1.4 Cambios de estado</b> .....	21
<b>3.1.5 Principios espaciales</b> .....	29
<b>3.1.6 Modelo Homomórfico para la simulación de sistemas</b> .....	35
3.2 ENERGÍA .....	39
<b>3.2.1 Energía como concepto</b> .....	39
<b>3.2.2 Principios básicos de la termodinámica</b> .....	39
<b>3.2.3 El concepto de máxima potencia.</b> .....	40
<b>3.2.4 Jerarquía en los flujos de energía e información</b> .....	42
<b>3.2.5 Calidad de la energía</b> .....	45
<b>3.2.6 La energía en los sistemas humanos</b> .....	45
<b>3.2.7 Ecología de sistemas</b> .....	49
3.3 EMERGIA .....	49
<b>3.3.1 Orígenes del concepto emergencia</b> .....	49
<b>3.3.2 Introducción al término "emergencia"</b> .....	49
<b>3.3.3 Relaciones entre Energía y Emergencia</b> .....	51
<b>3.3.4 EmPower (Potencia emergética)</b> .....	59
<b>3.3.5 Densidad de la potencia emergética y jerarquía emergética del uso de la tierra.</b> .....	60
<b>3.3.6 Teoría emergética del valor</b> .....	62
<b>3.3.7 Tendencia emergética</b> .....	62
<b>3.3.8 Conceptos principales asociados al análisis emergético</b> .....	63
3.4 SUSTENTABILIDAD .....	64
<b>3.4.1 Sustentabilidad de qué y para quién</b> .....	64
<b>3.4.2 Sustentabilidad: desarrollo del concepto y definiciones</b> .....	65
<b>3.4.3 Disponibilidad de recursos energéticos</b> .....	69
<b>3.4.4 Uso sustentable de los recursos naturales</b> .....	69
<b>4. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	72
4.1 PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN EMERGÉTICA .....	72
<b>4.1.1 Diagramas de sistemas energéticos</b> .....	73
<b>4.1.2 Tabla de evaluación emergética</b> .....	75
<b>4.1.3 Diagramas resúmenes</b> .....	76

4.2 ÍNDICES Y TASAS DE EMERGÍA .....	78
<b>4.2.1 Índices de sustentabilidad</b> .....	79
<b>4.2.2 Cálculo y explicación de los índices de sustentabilidad</b> .....	79
<b>5. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b> .....	<b>81</b>
5.1 EVALUACIÓN EMERGÉTICA DE CHILE .....	81
<b>5.1.1 Descripción del sistema</b> .....	81
<b>5.1.2 Análisis emergético de Chile, 2001</b> .....	83
5.2 EVALUACIÓN EMERGÉTICA DE PALENA .....	88
<b>5.2.1 Descripción del sistema</b> .....	88
<b>5.2.2 Análisis emergético de Palena, 2001</b> .....	90
5.3 ÍNDICES COMPARATIVOS .....	95
<b>5.3.1 Índices basados en la sustentabilidad emergética de la economía Chilena</b> .....	95
<b>5.3.2 Índices basados en la sustentabilidad emergética de la economía de la provincia de Palena</b> .....	98
<b>6. DISCUSIONES</b> .....	<b>102</b>
6.1 ACERCA DEL ANÁLISIS EMERGÉTICOS DE CHILE .....	102
6.2 ACERCA DEL ANÁLISIS EMERGÉTICOS LA PROVINCIA DE PALENA .....	102
<b>7. CONCLUSIONES</b> .....	<b>105</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>107</b>
<b>9. ANEXOS</b> .....	<b>110</b>
ANEXO A: EL ÁLGEBRA DE LA EMERGÍA .....	110
ANEXO B: FUENTES DE LAS TRANSFORMIDADES UTILIZADAS EN LAS TABLAS DE EMERGÍA. ....	115
ANEXO C: FÓRMULAS Y CÁLCULOS DE LOS FLUJOS DE ENERGÍA .....	116

# 1. INTRODUCCIÓN

Los avances conseguidos en el desarrollo global de las sociedades han provocado un incremento general en el consumo de energía que implica la necesidad de plantear cambios en el uso de la misma. La posición a la hora de utilizar las fuentes energéticas, debe implicar los conceptos de eficiencia y responsabilidad para que este desarrollo sea sostenible. (AVEN, 2003)

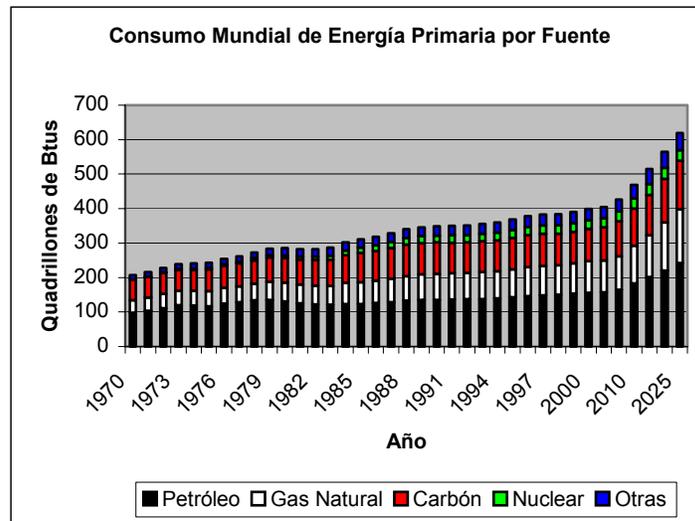


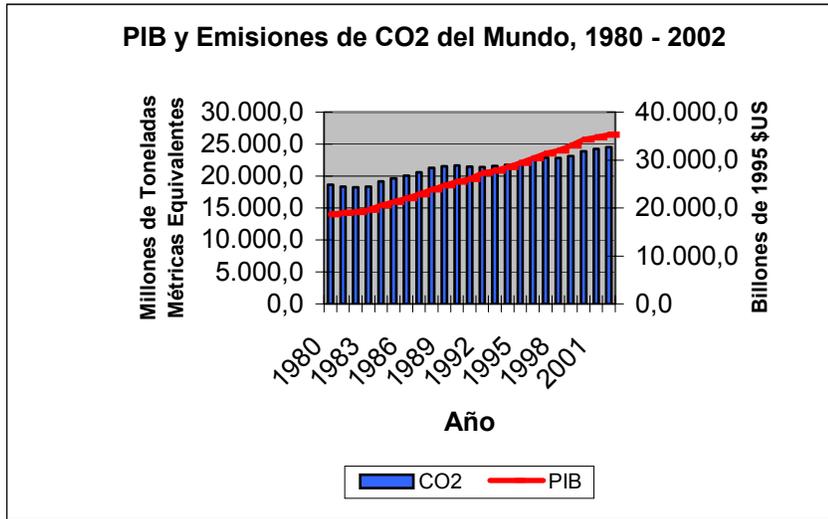
Gráfico 1.1- Consumo mundial de energía fósil de acuerdo a la fuente. (Fuente de datos: EIA, 2004)

La energía es un elemento clave dentro del desarrollo sostenible: es la causa de algunos de los problemas ambientales más graves del Planeta, pero también es el motor que mueve el desarrollo. No cabe hablar de desarrollo sostenible sin cambiar el modelo energético actual. (AVEN, 2003)

El agotamiento de las reservas de combustibles fósiles y la concentración de éstas en unas pocas regiones del Mundo, hacen que el modelo actual sea inseguro. La capacidad de carga de la atmósfera, que ya está dando síntomas de un deterioro progresivo de su salud ambiental, representa otro límite de la sostenibilidad del modelo. De hecho, el crecimiento económico está fuertemente ligado al aumento de emisiones de CO<sub>2</sub> (Gráfico 2).

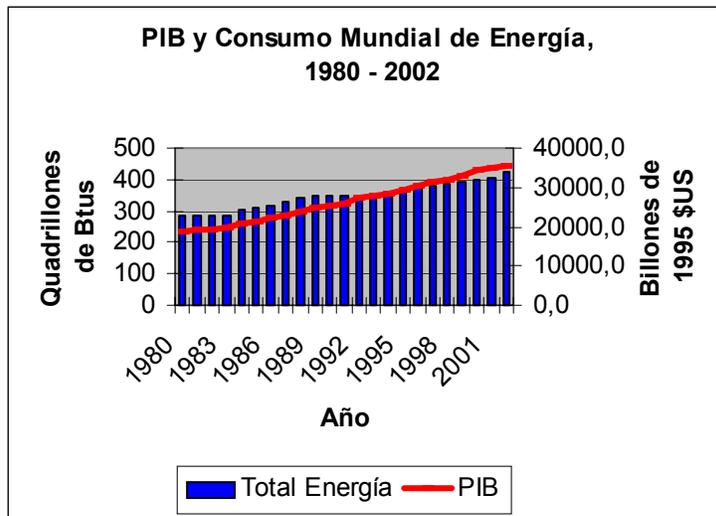
Actualmente existen unas 2.000 millones de personas sin un suministro de energía fiable, frente a una minoría mundial que consume tres cuartas partes de los recursos energéticos totales. (AVEN, 2003)

Por otro lado, en la actualidad el concepto de crecimiento económico esta ligado a las políticas de todos los países del mundo. Sin embargo, existe un elemento que esta oculto



**Gráfico 1.2.- Emisiones de CO2 históricas y Producto Interno Bruto mundial. Como se puede apreciar existe una alta relación entre el aumento de emisiones y el crecimiento económico bruto. (Fuente de datos: EIA, 2004)**

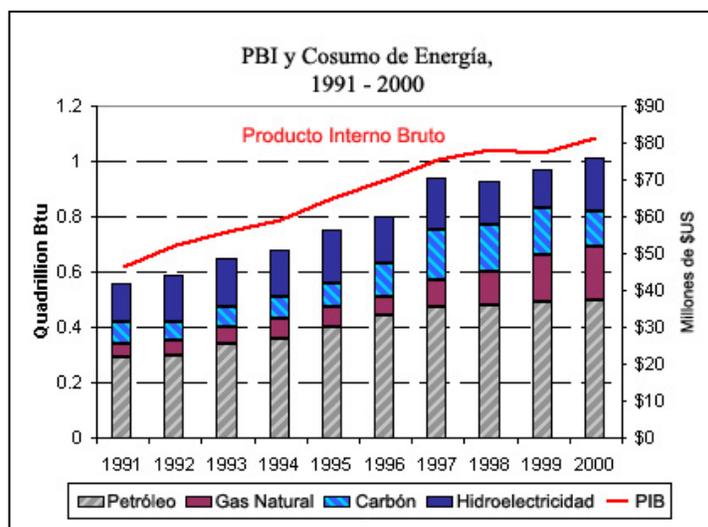
tras la economía del crecimiento, y es que para poder crecer se necesita aumentar el consumo de energía. Como se puede ver en el Gráfico 1, el consumo de energía fósil en el mundo ha estado aumentando constantemente a través de los años. Por otro lado, se puede apreciar que el Producto Bruto Mundial, ha aumentado de manera proporcional al consumo de energía (ver Gráfico 3).



**Gráfico 1.3.- El consumo mundial de energía fósil esta directamente relacionado con el crecimiento económico. (Fuente de datos: EIA, 2004).**

El comportamiento que la sociedad tiene frente al consumo de la energía no ha cambiado, y de acuerdo con las proyecciones de crecimiento que figuran entre los principales objetivos de los gobernantes de los países en vías de desarrollo y desarrollados, no debería cambiar.

En Chile, la situación es un claro reflejo de lo expresado en los párrafos anteriores. El Gráfico 4 muestra el consumo histórico de energía junto al Producto Interno Bruto (PIB). Como se puede apreciar, al igual que en el caso de todo el mundo, el crecimiento económico ha implicado un necesario aumento en el consumo de energía fósil.



**Gráfico 1.4.- Consumo histórico de combustible fósiles en Chile y crecimiento económico, PIB. (Fuente de datos: EIA, 2004).**

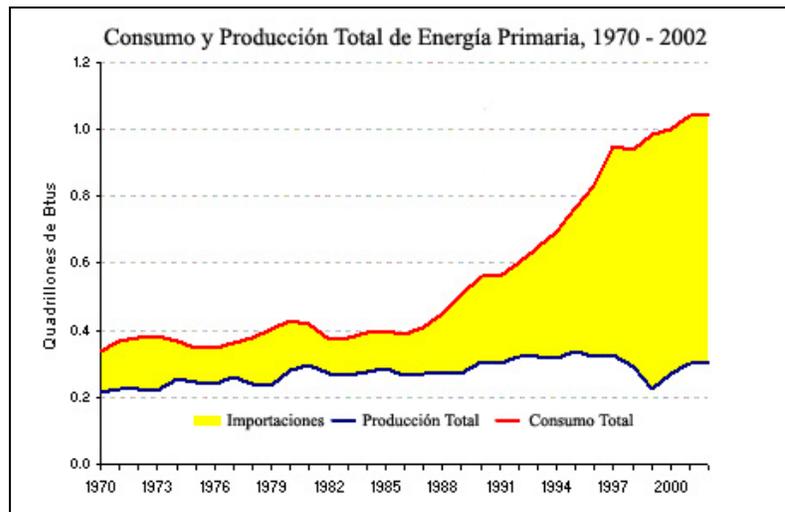
La optimización en el uso de la energía se ha convertido en la actualidad en un objetivo primordial en todos los ámbitos tanto sociales como empresariales. Este uso racional tiene como consecuencia fuertes implicaciones en los marcos ambientales, económicos, técnicos, etc.

Tomando como referencia las disposiciones del Protocolo de Kioto, el conjunto de políticas y medidas a adoptar pasan inevitablemente por el fomento de la eficiencia energética. Esta medida debe estar presente en las nuevas actuaciones adoptadas con el fin de obtener los resultados perseguidos.

La sustentabilidad, de acuerdo a la definición dada por la comisión Brundtland (UNWCED, 1987), es función de la disponibilidad de recursos en calidad y cantidad para las futuras generaciones. Esto implica que el mundo está bastante mal encaminado hacia el desarrollo sustentable, ya que se sabe que los recursos fósiles no son infinitos y que las tasa

de consumo de estos aumentan progresivamente. Por otro lado, el patrón de sustentabilidad en términos generales, estará dado por aquellas sociedades que funcionen bajo un consumo de energías y materiales renovables (Haden, 2003).

En el caso de Chile, se tiene que una pequeña parte del total de consumo de energía son recursos propios. Cerca del 70% de los combustibles consumidos anualmente son importados (CNE, 2004), lo que hace al país extremadamente sensible a los cambios que ocurren fuera de sus fronteras. La dependencia energética hace que Chile, a pesar de tener una gran cantidad de recursos naturales, se encuentre en una posición que esta bastante lejos de ser sustentable. Como se puede ver en el Gráfico xx, la energía importada ha tenido un aumento del tipo exponencial, mientras que la energía local a aumentado en una medida mucho menor.



**Gráfico 1.5.- Consumo y producción históricos de energía en Chile. Se puede apreciar la alta dependencia por importaciones de energía. (Fuente de datos: EIA, 2004).**

Todo lo dicho anteriormente hace referencia a la energía utilizada directamente, es decir, la energía contenida en un litro de petróleo, o la energía que tiene en una tonelada de carbón, etc. Por otra parte, la manera actual con que la economía valora los recursos naturales esta asociada al concepto de “costo cero”, en el cual el costo de un producto natural, como por ejemplo un árbol en metros cúbicos, esta dado por los fertilizantes, pesticidas, riego en el período de viverización, la mano de obra asociada a la extracción, la amortización de la maquinaria utilizada, el combustible que las máquinas utilizan, etc. Todos estos ítem pertenecen a una etapa posterior al crecimiento del árbol, a excepción de

la viverización y la aplicación de fertilizantes, pero el trabajo que lleva a cabo el ecosistema no se considera.

El conflicto surge debido a que no hay una conexión plausible entre los problemas ambientales que generan ciertas actividades y los flujos monetarios de dichas actividades. La forma actual de ver a los recursos naturales es asignándoles un valor de externalidad, lo que en términos del sistema implicado en la producción de cualquier cosa, significa no asumir costos. El desarrollo del país, que en términos comunes se representa por el crecimiento económico que ha experimentado, a implicado un abandono y sobre explotación del territorio, caracterizándose por un desorden total del sistema social y territorial. Al parecer uno de los fenómenos que explica lo anterior es que al ser la variable de mercado el principal patrón direccionador de las decisiones político, económicas, sociales y ambientales, el uso del territorio presenta una distribución caótica, acorde con el comportamiento de los mercados a través de la historia.

La aplicación de la teoría general de sistemas en diferentes campos de las actividades humanas en las últimas décadas, ha permitido aumentar los grados de libertad con los que se visualizan las realidades de interés a analizar. Un aserradero forestal no se constituye únicamente por las partes que lo integran, sino que existen relaciones entre las partes que afectan el al conjunto y que le dan características propias. Es decir, en la actualidad el aserradero es visto como un sistema para faenar los troncos. Al poder plantear como sistemas todos los fenómenos que el ser humano percibe, se pueden relacionar diferentes sistemas entre sí. De esta manera, el sistema económico puede ser perfectamente relacionado con el sistema ambiental.

Una de las restricciones que puede llegar a tener el relacionar dos sistemas diferentes, es la diferencia en los flujos que se consideran dentro de cada sistema. Es así como el sistema económico solo considera el flujo de capitales, que se expresa en algún tipo de moneda. Sin embargo, este flujo no tiene una relación real con los flujos del medio ambiente, por lo que para poder relacionarlos con el punto de vista actual (sistema económico) se han tenido que desarrollar métodos de valoración del medio ambiente, basados principalmente en como la sociedad evalúa los recursos, en vez de analizar cual es el trabajo que se realiza en todos los procesos que ocurren para poder llegar a tener algún recurso.

En este documento se presenta un modelo de evaluación llamado “Emergy”, palabra que proviene de la unión de “Energy memory”. Dicho modelo utiliza como variable principal los costos energéticos que ocurren en el ecosistema para poder mantenerlo funcionando en la manera en que se conoce y aprecia. Este modelo fue creado por H.T. Odum (1996), y ha sido aplicado en Dinamarca (Haden, 2003), en la Provincia de Bologna, Italia (Tiezzi et al., 2002) y Brasil (Safonov et al., 1999). Al valorar los flujos energéticos que se utilizaron para poder lograr un producto o servicio, se logran dos objetivos. El primero es que se relacionan las actividades económicas del hombre con la producción del ecosistema, al ser la energía un idioma común. El segundo tiene que ver con la integración de la teoría general de sistemas a la evaluación económica, ya que al considerar la “memoria energética”, es decir la energía que se ha utilizado para producir otra unidad de energía (que para el caso del hombre son las energías concentradas; combustibles fósiles, leña, alimentos, etc.), se integran todas las partes que integran al ecosistema en el cual el hombre vive, permitiendo de esta manera buscar soluciones que sean más reales de acuerdo al funcionamiento natural de los sistemas.

Mediante los flujos de energía que se evalúan, se realiza un balance energético, con el cual se determina el estado de la sustentabilidad del sistema en evaluación. La sustentabilidad dependerá de la proporción de recursos renovables que se utilizan, que es un reflejo de la definición Brundtland ya que para que las futuras generaciones cuenten con el recurso este no se puede agotar, y por otra parte considera la proporción de energía que es propia del sistema y la parte que es importada al sistema, de acuerdo con la definición entregada por Haden (2003). De esta manera se pretende obtener una valoración más real del uso del territorio, permitiendo en una primera etapa comprender de una mejor forma el sistema en el cual el ser humano se desenvuelve, lo que posteriormente se podría traducir en una toma de decisiones multicriterio y de mayor plazo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 General**

El objetivo general de este trabajo es evaluar la sustentabilidad de la utilización del territorio, basándose en el modelo de flujos de energía de sistemas desarrollado por Howard T. Odum para la comprensión y manejo de los sistemas de los cuales el hombre vive y depende.

### **2.2 Específicos**

- 1.-Proponer una metodología de contabilidad energética para Chile y la Provincia de Palena basándose en los trabajos de H.T.Odum.
- 2.-Generar diagramas de flujo que representen a Chile y la Provincia de Palena bajo un enfoque ecosistémico.
- 3.-Realizar un análisis de sustentabilidad basándose en los modelos desarrollados de Chile y la Provincia de Palena.

## **3. MARCO TEÓRICO**

### **3.1 Sistemas**

Sistema es una porción de energía y materia que está fuera del equilibrio con el ambiente que lo rodea y que se puede distinguir de dicho ambiente (Césarman, 1997), o un set de partes y sus relaciones de conexiones (Odum, 2000). Esto quiere decir que cualquier elemento material que exista forma un sistema. Es así como se tienen los átomos, moléculas, proteínas, células, plantas, animales, el cuerpo humano, etc. Todos estos elementos forman parte de un sistema mayor con el cual intercambian materia y energía. El átomo con la molécula, la molécula con la proteína, la proteína con la célula, etc. En un nivel de componentes de mayor escala, se encuentran los organismos que habitan la tierra.

En su sistema y función, la naturaleza está formada por animales, plantas microorganismos y sociedades humanas. A su vez, estas partes vivas están enlazadas por trayectorias invisibles por las que circulan los materiales químicos que siguen ciertos ciclos una y otra vez, siendo utilizados y reutilizados y por las que discurren energías potenciales que no se pueden reutilizar (Odum, 1980). Estas trayectorias en conjunto conforman una red que es un gran sistema organizado de sus partes componentes. Si se hace un “zoom out” (Figura 3.10), se puede ver la superficie de la tierra como un gran sistema organizado, al cual se le denomina ecósfera. Ésta se puede explicar como un sistema cerrado en cuanto al flujo de materiales y abierto en cuanto al flujo de energía. Es decir, la Tierra es un sistema autónomo ya que genera sus propios componentes, pero que depende de la energía que el sol emite y de las mareas que genera la relación de masa entre la Tierra y la Luna. La energía ingresa (input) al sistema terrestre mediante su captación por los productores primarios (plantas y bacterias fotoquímicas). Además, es la fuente motriz de los factores del clima como lo son las corrientes marinas, el viento y los ciclos hidrológicos, los que en conjunto crean las condiciones para que se desarrollen los elementos bióticos de la Tierra, entre los cuales se encuentran las sociedades humanas.

### **3.1.1 Principios de sistemas**

#### **3.1.1.1 Sistemas Abiertos**

Tanto los ecosistemas naturales como los sistemas económicos humanos deben ser considerados sistemas abiertos debido a que intercambian materia y energía con el medioambiente que lo rodea (Jorgensen et al., 1999 citado por Haden, 2003). A pesar de que la mayoría de los ecosistemas de la biosfera son materialmente cerrados, o están cerca de serlos, siempre están importando y exportando algo de energía atravesando los límites de sus sistemas, razón por la cual se clasifican como sistemas abiertos.

Los sistemas silvoagropecuarios son mucho más que los ecosistemas naturales. Dependen de energías y materiales naturales de origen antrópico que fluyen atravesando sus límites desde múltiples escalas temporales y espaciales. En sistemas abiertos, todas las estructuras ordenadas requieren de alguna fuente de energía disponible para mantener su orden y construir estructuras (Odum, 1996). La ingestión de energía disponible implica una “abertura” y es entonces considerada como una condición necesaria para el desarrollo estructural y cambio organizacional en cualquier sistema real (Brown & Ulgiati, 1999, citado por Haden, 2003). Sin un flujo constante de materia y energía que cruce sus límites, un sistema se degradará. Eventualmente comenzará a inducirse hacia un equilibrio termodinámico, el cual podría considerarse como el único atractor global verdadero (Jorgensen et al., 1999 citado por Haden, 2003).

La exportación de entropía a través de los límites de un sistema es otra condición necesaria para sistemas abiertos. Como los sistemas silvoagropecuarios importan bienes y servicios para mantener su orden y estructura, exportan entropía (energía degradada no utilizable para realizar trabajo) a través de los límites de cada subsistema y a través del límite del sistema como un todo. En términos generales, la creación de entropía puede ser considerada como una consecuencia del trabajo (Odum, 1996). Dado que la producción silvoagropecuaria requiere de un trabajo desarrollado por organismos del suelo, plantas, animales, personas y máquinas así como por los largos procesos de la biosfera conducidos por energía solar (radiación, viento, lluvia, etc.) además de importaciones de energía concentrada en forma de fertilizantes, pesticidas y semillas, la entropía es continua y necesaria en todos los sistemas productivos silvoagropecuarios.

El desarrollo de la información en la cultura y el conocimiento ecológico de los sistemas humanos, tales como la agricultura, son una parte de la estructura y función del ecosistema, y también requieren trabajo, o la ingestión de energía disponible y la exportación de entropía, para mantenerse.

### **3.1.1.2 Desequilibrio termodinámico**

La termodinámica es la ciencia de las dinámicas del calor y de las relaciones cuantitativas entre el calor y otras formas de energía (Haden, 2003). Es la base para el análisis y estudio de la transformación de la energía de una forma en otra, la energía disponible para desarrollar trabajo, y la estabilidad y equilibrio asociados a las sustancias químicas.

Las leyes de la termodinámicas (ver capítulo 3.2.2) implican entre otras cosas la irreversibilidad de los procesos, y han sido definidas como “la dirección del tiempo” (Straskraba et al., 1999 citado por Haden, 2003). La segunda ley se aplica por ejemplo a la concentración y almacenamiento de energía en los sistemas, la cual se esta depreciando continuamente (Odum, 1996). La entropía, medida de desorden del sistema, se refiere a la energía degradada que no está disponible para realizar trabajo y que siempre se esta incrementando.

Si en un sistema no existen gradientes de calor o energía se dice que el sistema esta en un equilibrio termodinámico (Haden, 2003). Sin embargo, todos los sistemas reales están en algún estado de desequilibrio termodinámico, o mejor dicho, no-equilibrio. Como se mencionó anteriormente, en cualquier sistema la importación de energía a través de sus límites está dada por la exportación de entropía. La energía disponible en un sistema que condicione procesos de trabajo es una función del gradiente que existe entre el sistema y su medioambiente. La medición de la energía disponible en un sistema da como resultado cuan lejos del equilibrio termodinámico esta el sistema con su entorno (Kay, 2000 citado por Haden, 2003). Debido a que las estructuras ordenadas de un sistema se desarrollan en la interfase de gradientes diferenciales de energía y son dependientes de estos gradientes para mantener su estructura, se dice que el no equilibrio en si mismo es una fuente de orden (Schneider & Kay, 1994 citado por Haden, 2003). Dado que en los sistemas agrícolas se

utilizan muchas fuentes de energía almacenada o concentrada que varían en cantidad y calidad, los sistemas agrícolas existen en un desequilibrio termodinámico.

### **3.1.1.3 Auto organización**

La auto organización es un proceso de orden emergente en el nivel del sistema, generado por interacciones no lineales entre los componentes del sistema (Levin, 2000 citado por Haden, 2003). En cambio, las propiedades del nivel macro del sistema influyen el conocimiento de los componentes individuales. Mientras algunos consideran la auto organización es el proceso de desarrollo de las estructuras y funcionamiento del sistema basado solamente en las interacciones locales (Levin, 1980 citado por Haden, 2003), otros creen que existen presiones de selección en distintos niveles actuando en sistemas que gobiernan los procesos de auto organización.

El concepto de auto organización provee una línea base para entender como los sistemas crecen y se desarrollan a través de tiempo. Se determina por las restricciones internas y pone atención a los límites de la termodinámica y su relación entre la habilidad del sistema para construir y mantener sus estructuras, organización y distancia del equilibrio (Muller & Nielsen, 2000, citado por Haden, 2003). Es importante establecer que aunque el concepto de auto organización nace a partir de las ciencias naturales, actualmente es usado para interpretar fenómenos sociales. Sin embargo, la principal característica que distingue a mecanismos de evolución de retroalimentación, procesos de auto organización en sistemas biológicos y químicos con sistemas humanos sociales y económicos, es que en sistemas controlados por humanos las innovaciones son el resultado de la toma de decisiones de forma conciente (Buenstorf, 2000 citado por Haden).

### **3.1.1.4 Disipación**

La disipación se define como un cambio espontáneo desde una forma mas organizada y ordenada a un estado mas disperso y aleatorio (Straskraba et al, 1999 citado por Haden). El proceso se explica mediante procesos de descarga del ecosistema (ver capítulo 3.1.4). Cuando la energía ha sido disipada ningún componente del ecosistema terrestre la puede aprovechar para generar trabajo útil, de acuerdo a la segunda ley de la termodinámica. Una estructura que emerge para disipar energía, llamada estructura

disipativa, puede ser definida como estructura de incremento de complejidad desarrolladas por un sistema abierto en base a intercambios de energía con su entorno (Nicolis & Prigogine, 1977 citado por Haden, 2003). El ecosistema puede entonces ser considerado como un sistema de estructuras que disipan energía solar y que en procesos de construcción incrementan los niveles de la estructura y función del sistema. Este incremento se traduce en un ciclo más grande de los nutrientes y energía, mayor cantidad de niveles tróficos y una elevada cantidad de niveles de organización, información y complejidad del sistema.

El análisis emergético se basa en la cuantificación de la cantidad de energía disipada de una forma, producto o sistema organizado. Para los fisicoquímicos, los procesos aleatorios que no tienen una causalidad implican que mientras más rápido ocurre la disipación, más estructuras se generan. Lo anterior equivale a decir que la auto organización maximiza la tasa de generación de entropía (Odum, 1996). Por otra parte los biólogos piensan que en el desarrollo de estructuras vivas, a mayor cantidad de estructuras en un sistema, se genera más disipación y más estructuras se generan. Ambas interpretaciones son básicamente lo mismo desde diferentes puntos de vista, pero se complementan cuando se analizan bajo la perspectiva de las leyes de la termodinámica (Odum, 1996). La disipación de la energía sin una contribución útil que incremente los ingresos de energía al sistema no se está generando un reforzamiento, por lo que no dicho sistema no puede competir con sistemas que usen las entradas de energía en rutas de auto reforzamiento (Brown & Ulgiati, 1999 citado por Haden, 2003).

#### **3.1.1.5 Crecimiento, retroalimentación y autocatálisis**

El crecimiento de los almacenamientos en un sistema se considera auto catalítico cuando la cantidad almacenada se retroalimenta para incrementar el flujo de carga de energía del sistema. El incremento en el flujo produce la construcción de más estructuras y cataliza mas entrada de energía. La cantidad almacenada puede estar contenida en materiales, estructuras o información. Dentro de la teoría general de sistemas, el proceso se conoce como feedback positivo. Si un sistema esta disponible para utilizar algún tipo de energía disponible para construir estructuras y funciona de tal manera que capta mas energía y resulta en un incremento en el crecimiento, este crecimiento puede ser auto

catalítico y exponencial mientras suficientes fuentes de energía estén disponibles para el sistema (Haden, 2003).

#### **3.1.1.6 Anidamiento**

La aproximación clásica a los sistemas los interpreta como una red compuesta de relaciones lineales. Otra manera de enfocar los sistemas, es interpretarlos como una composición jerárquica de sistemas anidados, o sistemas dentro de sistemas (Nielsen, 2000 citado por Haden, 2003). El concepto de sistemas anidados proviene de del termino “holon”, que significa “el todo y sus partes”, y describe como varias formas de manifestación son simultáneamente entidades de un todo y son partes integrales de un sistema mayor en el cual están anidadas. La jerarquía de los holones se denomina holarquía (Koestler, 1978 citado por Haden, 2003). Esta manera de ver a los sistemas comienza con una aproximación jerárquica de los sistemas los sistemas que trascienden son los de orden mayor con sus subsistemas, y que cada sistema es en alguna medida dependiente de los sistemas que están sobre él y responsable de los sistemas que están bajo él. A diferencia de las descripciones de sistemas tradicionales, la descripción de sistemas en forma de jerarquías anidadas implica una relación “top-down” de la dinámica del sistema, lo que hace que el análisis no se base únicamente en jerarquías de organización vertical (Nielsen, 2000 citado por Haden, 2003).

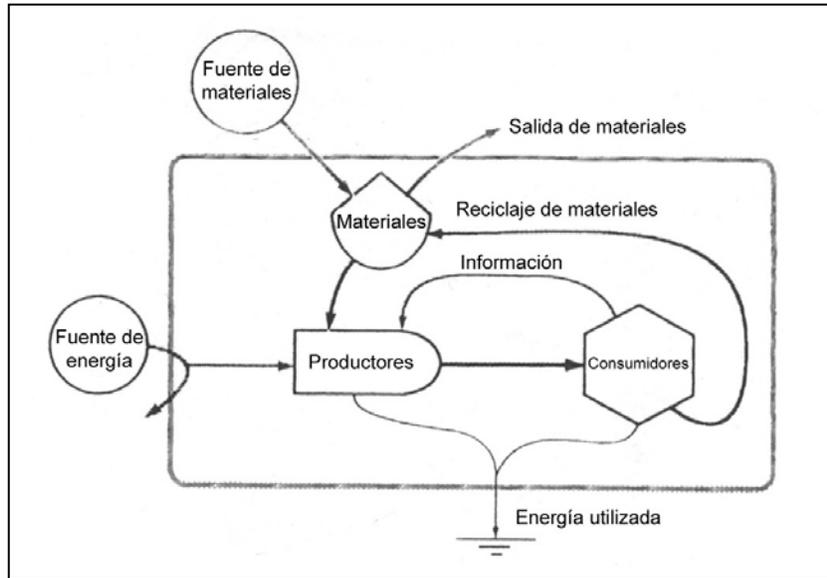
#### **3.1.2 Patrones en sistemas**

Si se centra la atención en sistemas de muchos tipos y tamaños se pueden encontrar relaciones y patrones similares. Lo anterior toma mayor sentido ya que la auto organización hace que cualquier sistema que es productivo y competitivo tenga diseños similares. La mayoría de los sistemas presentan estructuras, transformaciones y retroalimentación.

##### **3.1.2.1 Estructuras y almacenamiento**

En vez de desarrollar una distribución de la materia constante y uniforme, la auto organización desarrolla unidades discretas que se interrelacionan para hacer el sistema operativo. Por ejemplo, la biogeósfera contiene organismos, nubes, rocas, lagos, autos y bancos. Se pueden entender sistemas complejos de manera más fácil utilizando pocos símbolos genéricos que representen unidades del sistema (ver anexo símbolos de sistemas).

Bajo las leyes de la perspectiva de los ecosistemas (Figura 3.1) los símbolos de productores representan a las plantas, y los símbolos de consumidores representan a los insectos, gusanos, microorganismos del suelo, y todo el reino animal (Odum, 2001).



**Figura 3.1.- Diagrama genérico de cualquier ecosistema terrestre. (Fuente: Modificado de Odum, 2001)**

### 3.1.2.2 Transformaciones de la energía

Todos los sistemas transforman energía desde una forma a otra, en un proceso llamado “trabajo” (Odum, 2001). Para lograr esto el sistema debe tener una fuente de energía no utilizada. Los científicos denominan a la energía que puede realizar trabajo como “disponible”. Mientras más energía este disponible para un proceso, más trabajos pueden ser realizados. Una vez terminado el trabajo, la mayoría de la energía disponible a sido degradada. Esta energía degradada, que es la de menor calidad en la tierra, se dispersa como pérdidas de calor en el medio ambiente y se va hacia fuera desde la tierra hacia el espacio. Un sistema debe recibir ingresos de energía fresca disponible para continuar operando (Odum, 2001).

### 3.1.2.3 Refuerzo por retroalimentación

Una vez que la energía ha sido transformada, una parte de ésta se almacena y refuerza mediante retroalimentación los procesos que llevan a cabo las transformaciones. Por ejemplo en la Figura 3.2, una vez que la energía solar ha sido transformada en pasto verde las hojas se expanden y capturan más luz solar, amplificando de esta manera los

procesos mediante retroalimentación. Los sistemas que refuerzan sus procesos productivos se desarrollan y desplazan a aquellos que no lo hacen (Odum, 2001).

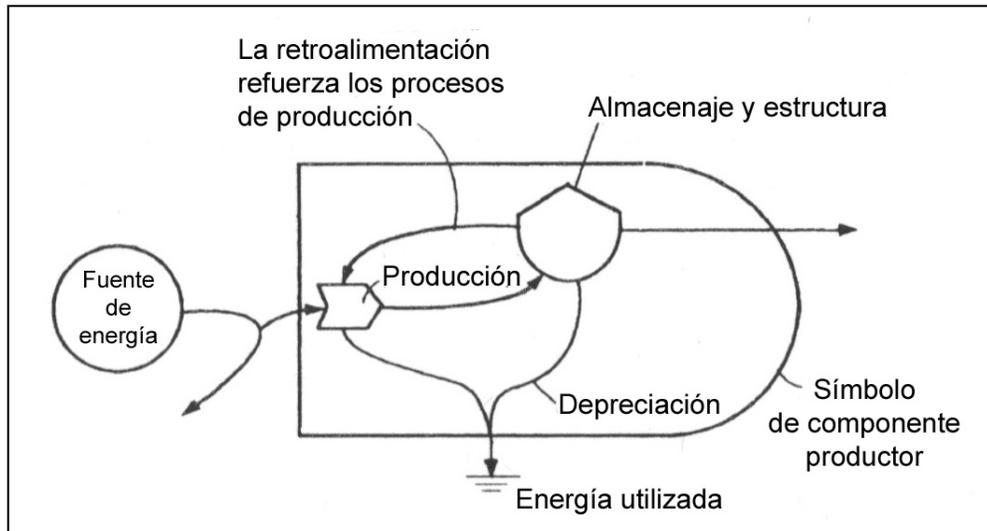


Figura 3.2.- Diagrama base de la transformación de la energía, almacenamiento y *feedback*. (Fuente: Modificado de Odum, 2001.)

En la polinización de flores, las abejas refuerzan los procesos que producen el néctar del cual se alimentan. En el largo plazo, los agricultores que mantienen sus suelos desplazan a aquellos que no retroalimentan la fertilidad de las tierras mediante servicios.

### 3.1.3 Cibernética

La cibernética se refiere a los sistemas. Todos los sistemas son un set de diferentes elementos, compartimentos o unidades, donde cualquiera de estos pueden existir en muchos estados diferentes, y la selección del estado es influenciado por los estados de otros componentes del sistema. Los elementos que se relacionan por influencias recíprocas constituyen una relación de retroalimentación (Margalef, 1993). Esta relación puede ser negativa o estabilizadora, como uno formado por una unidad de calentamiento y un termostato o el mecanismo regulatorio del nivel de azúcar en la sangre. También la retroalimentación puede ser positiva, o disruptiva, como la expansión de una epidemia aniquiladora.

Una característica del *feedback* negativo es que, no solo el sistema entero sino que también algunos estados seleccionados de el sistema, presentan una considerable persistencia a través del tiempo (Margalef, 1993). Un sistema cibernético influencia el futuro, o conecta el tiempo, en el sentido que el estado presente establece los límites o

patrones para estados futuros. Por ejemplo, el estado actual de una especie arbórea determina las posibilidades de desarrollo de la generación venidera. Lo que hace la información es realizar restricciones *a posteriori* a partir de probabilidades *a priori* (Margalef, 1993). Cualquier sistema cibernético, a través de interacciones entre sus partes, restringen un número inmensamente largo de posibles estados *a priori* y, en consecuencia, transmiten información.

La información contenida en la naturaleza, aceptando que la naturaleza es como ésta es y no de otra forma, nos permite hacer una parcial reconstrucción del pasado. Solo en un universo hipotético compuesto de pura energía podría existir sin un pasado. En cualquier sistema material aparecen interacciones y mecanismos cibernéticos, y con ellos acumuladores de información. Los organismos constituyen un ejemplo maravilloso. El desarrollo de los meandros en un río, el incremento de la complejidad de los estratos de la tierra a través de sucesivas épocas de orogénesis, son dispositivos de almacenamiento de información en la misma manera que lo son los sistemas genéticos. Además, cada uno de todos los sistemas cibernéticos son sistemas de auto-organización. La información es expresada mediante un mecanismo, y el almacenaje de la información implica un incremento en la complejidad del mecanismo.

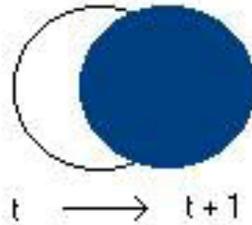
Las maquinas son normalmente armadas con alguna finalidad en la mente del constructor o diseñador. Una maquina sin finalidad es meramente un objeto de arte. Los organismos son objetos de arte sólo fuera de su medioambiente. En sistemas cibernéticos que ocurren naturalmente, como una planta, el único examen para pasar es la habilidad de permanecer (Margalef, 1993).

### **3.1.4 Cambios de estado**

#### **3.1.4.1 Sistemogénesis**

En la naturaleza los estados del sistema son variables en sus componentes y constantes en su funcionamiento. Es decir, el sistema en el momento  $t$  difiere del mismo sistema en el instante  $t+1$  (Figura 3.3). Sin embargo, el sistema " $t$ " es el generador del sistema " $t+1$ ". En definitiva, "la naturaleza se justifica en la medida que está en constante cambio, destruyendo y creando nuevos sistemas a través del tiempo" (Césorman, 1997), o bien, "la génesis de la naturaleza nunca termina. Los componentes del ecosistema están ligados por un proceso basado en la creación y destrucción de los propios componentes.

Las transformaciones ocurridas a este nivel permiten configurar la morfología instantánea del ecosistema, como así mismo mediante la generación de su secuencia morfológica explicar su origen y tendencia” (Prado, 1983). Dentro de este contexto, la estabilidad de los sistemas naturales se atribuye a su funcionamiento, ya que pensar en un sistema natural no dinámico, es decir, que no cumpla con ninguna de las dos leyes básicas de la termodinámica, no tiene sentido.



**Figura 3.3.** El sistema en el momento  $t+1$  deja de ser el que era en el momento  $t$ . (Fuente: El autor)

La arquitectura del ecosistema en un instante dado, es la resultante del proceso dinámico de funcionamiento del ecosistema. Su evolución se desarrolla en forma ordenada a través de complejas, pero explicables, cadenas de comportamiento.

“La producción de nuevas arquitecturas, como así mismo su modificación en el tiempo, está asociada a los tipos de componentes en un instante  $t_i$  y las relaciones de comportamiento producidas a través de la matriz de conectividad, en ese mismo instante. La morfología del ecosistema completo y su evolución temporal, obedece a los procesos anamórficos y catamórficos que se desarrollan mediante las interacciones. Los estímulos exógenos y endógenos permiten ir alterando a través del funcionamiento, la arquitectura, la cual a su vez, debido a la variación cualitativa, cuantitativa y espacial de los componentes, modifica las relaciones de conectividad y en consecuencia el comportamiento” (Prado, 1983).

La sistemogénesis entonces puede ser definida como “el proceso de cambio en el tiempo de las variables de estado del ecosistema; es decir, las relaciones dinámicas de las formas y su ambiente, incluyendo por lo tanto, a la variación de la arquitectura y de los estímulos” (Nava et al, 1979). De esto se desprende que el problema en los procesos sistemogénicos corresponde al estudio de las trayectorias más que a la definición de estados terminales, esto dentro del contexto de la ecología en el cual el objeto esencial de análisis

no es el individuo aislado, sino el comportamiento del sistema global y la forma continua en la que se ligan las relaciones internas de éste a través del tiempo.

#### **3.1.4.2 Artificialización**

En la naturaleza el territorio toma forma y se modela de acuerdo a muchos factores, tales como el clima imperante, las catástrofes (volcanismos, terremotos), la geografía, y los elementos que lo integran; dinámica de poblaciones, evolución, etc. Cuando se incluye al hombre dentro del proceso de modelación del territorio, las condiciones cambian abruptamente. Tanto así, que los científicos han llamado a dicho proceso como “artificialización de la naturaleza”. En este concepto hay que tener en cuenta un elemento que aparece un poco oculto. El separar al hombre de la “naturaleza común” tiene una razón teórico-práctica, más que ser un planteamiento filosófico. Si el hombre forma o no parte de la naturaleza es un tema en discusión que ha generado muchas teorías y discusiones y se escapa de los objetivos de este trabajo.

“El hombre, constituido en sociedad, es un factor de aumento de la entropía. No se puede considerar al hombre como algo separado de la materia y de la energía. La existencia humana es un factor más dentro de la naturaleza, para que se cumpla la segunda ley de la termodinámica. Es una curiosa ilusión del ser humano creer que la naturaleza se subordina a él gracias a su inteligencia. Por el contrario, esta inteligencia que también es producto de la naturaleza puesto que el hombre es materia viva, lo hace ser parte intrínseca de este flujo continuo de la materia” (Césarman, 1997).

Hay quienes afirman que el hombre es un experimento que llegó de otra civilización, lo que explicaría su comportamiento no armónico con el resto de la naturaleza, que es lo que ocurre cuando se introduce una especie a un ecosistema al cual no pertenece. (ejemplo: castores en el sur de Chile, sin controladores biológicos y otros factores, destruyen su entorno, o la polilla del brote, también en Chile). Por lo tanto, el separar al hombre de la naturaleza no es pertinente en el estudio del territorio. Lo importante es que al identificar un proceso de artificialización permite establecer las condiciones iniciales con las cuales se analiza un determinado sistema. Es así como cuando se visita una zona rural, las plantaciones forestales son claramente un proceso de artificialización. De esto se pueden establecer elementos de dicho sistema y sus funciones en él (por ejemplo, camión de

transporte de trozas), la manera como afectan dichos elementos a su sistema (el de las plantaciones para el ejemplo) y de cómo, a su vez, afectan los subsistemas y sistemas imperantes que lo rodean y que lo limitan.

### **Mecanismos generales de la artificialización**

La artificialización opera mediante los procesos de carga y descarga del ecosistema. Cualquier transformación de éste, está circunscrita dentro de una u otra de estas categorías (Prado, 1983).

En el ecosistema, la arquitectura puede ser considerada como una unidad susceptible de almacenar y entregar materia y energía. Por lo tanto, el ecosistema se caracteriza por presentar una capacidad de almacenamiento, una eficiencia de la conservación de la carga, un costo de almacenamiento y una tasa de carga y descarga (Gastó, 1979).

#### **Carga del ecosistema**

Se denomina carga  $Q$  al valor total de los diversos tipos de energía contenida en el ecosistema, en un determinado instante. La carga del ecosistema está dada por la siguiente ecuación (Nava et al, 1979):

$$Q(t) = \sum c_i U_i(t)$$

Donde:

$U_i$ : representa una cantidad de energía tipo  $i$  contenida en el ecosistema

$C_i$ : constituye el coeficiente del valor ecológico de la calidad de energía.

Existen tres formas generalizadas que incluyen todas las posibles modalidades de carga del ecosistema, a saber:

i) crecimiento exponencial, donde se considera un medio con recursos ilimitados. Este proceso es descrito por la siguiente función:

$$Q = Q_0 e^{kt}$$

Donde:

$Q$  = carga del ecosistema en  $t_i$

$Q_0$  = carga inicial

$K$  = tasa intrínseca de crecimiento

$T$  = tiempo

ii) crecimiento asintótico, donde el proceso está regulado por ciertas restricciones que limitan hasta una capacidad máxima la carga del ecosistema. La ecuación que describe este proceso está dada por:

$$Q = Q_{\max} (1 - e^{-kt})$$

Donde:

$Q_{\max}$  = carga máxima regulada por las características propias del ecosistema. Este valor determina un comportamiento asintótico de la ecuación.

$k$  = tasa intrínseca de crecimiento

$t$  = tiempo

iii) crecimiento sigmoideo: Este tipo de proceso se caracteriza por presentar dos tipos de comportamiento. En una primera etapa, el proceso de carga es exponencial, y luego, en una segunda etapa se comporta de manera asintótica.

$$\partial Q / \partial t = rQ - Q^2/k$$

Donde:

$r$  = tasa intrínseca de crecimiento

$k$  = capacidad sustentadora del ecosistema

$Q$  = carga del ecosistema en un instante dado

$\partial Q / \partial t$  = variación de la carga en función del tiempo

Descarga del ecosistema

El proceso de descarga del ecosistema corresponde a la liberación de energía acumulada (Odum, 1980) o la fracción de respuesta que es retirada como producto de un proceso de cosecha (Nava et al, 1979).

Los procesos de descarga del ecosistema se describen por una ecuación del siguiente tipo:

$$Q(t) = Q_0 e^{-kt}$$

Donde:

$Q(t)$  = carga del sistema en el tiempo  $t$

$Q_0$  = carga inicial del sistema previo a la descarga

$k$  = tasa intrínseca de descarga

$t$  = tiempo

## **Grado de artificialización**

El grado de artificialización representa una medida de la magnitud y dirección del proceso de artificialización al cual es sometido el ecosistema. Como tal es una evaluación sintética que integra los valores de magnitud y ángulo de dirección. La consideración del ecosistema en un espacio de estado  $S$ , permite realizar el análisis en un espacio de coordenadas conocidas. Lo anterior da cabida a establecer un ordenamiento de los distintos grados de artificialización, considerando un punto de referencia (el cero de las coordenadas de  $S$ ) establecido (Prado, 1983).

## **Procesos de artificialización**

“La artificialización del ecosistema puede estar orientada hacia la modificación de todas las variables del ecosistema, o sólo a afectar algunas componentes que permitan la obtención del estado  $E_i$  esperado. De acuerdo al tipo de variables en las cuales opera la transformación será posible generar distintos tipos de procesos, cuya secuencia y meta terminal son ampliamente diferentes” (Prado, 1983).

El proceso de artificialización se define en base a una secuencia de operadores de transformación que, al ser aplicados sobre  $\Omega = (\beta^*; S)$ , permiten cambiar el curso probable de la trayectoria sistemogénica, es decir,  $A : \beta^* \longrightarrow \beta'$ . La modificación de  $\beta^*$  opera en la mayoría de los casos mediante una primera etapa de descarga catastrófica. Luego, en una segunda etapa, se produce una carga anastrófica, ya sea por la incorporación de arquitecturas previamente cargadas en otro ecosistema -como por ejemplo la incorporación de ganado- o debido al aumento de estímulos en términos de información genética, por ejemplo la incorporación de semillas. La segunda etapa representa el proceso mediante el cual el ecosistema es reorganizado en términos de sus componentes  $\eta = (\eta_T, \eta_Q)$  y su arreglo  $\sigma$ , con objeto de generar la función  $\beta^*$  transformada en  $\beta'$ . Una vez se ha definido una cierta arquitectura transformada, se produce un proceso de carga anabólica, donde el ecosistema se comienza a cargar en forma gradual hasta llegar a un estado  $E_j$ , definido como óptimo (Prado, 1983).

El proceso general descrito anteriormente es válido para cualquier proceso de artificialización. La secuencia  $\beta'$  artificializada depende de los niveles de estímulo utilizados, como así mismo, del tipo de componentes a los cuales es dirigida con mayor én-

fasis la artificialización. La consideración a esto último y con base en las categorías autótrofas, heterótrofas y del recurso, es posible concebir dos tipos de procesos de artificialización bien definidos. A saber, procesos bióticos y procesos abióticos. Los primeros se caracterizan por un mayor desarrollo de las componentes vivas autótrofas y heterótrofas del ecosistema. Los procesos abióticos representan aquellos donde se estimula el desarrollo de los caracteres no vivos del ecosistema (Prado, 1983).

### 3.1.4.3 Operadores

Cambio de estado del ecosistema es la modificación en el tiempo de cualquiera de las variables de estado (Nava et al, 1979). Para que el cambio de estado ocurra es necesaria la aplicación de un operador funcional. Una operación funcional es una transformación que se lleva a cabo en un espacio cuyos elementos son funcionales (Nava et al, 1979). Conceptualmente, los ecosistemas están definidos dentro de un espacio de estado, en el cual “cada estado es en sí una función que depende del estímulo, del comportamiento y de la respuesta en un tiempo dado” (Nava et al, 1979). En base a lo anterior, se puede definir una operación funcional ecosistémica a través de un operador  $\pi_{ij}$  que permita efectuar un cambio de estado desde uno inicial,  $E_i$ , a un estado deseado final  $E_j$ .

En general se tiene que si  $E_i$  ( $t_i$ ) es el estado inicial del sistema y  $E_k$  ( $t_k$ ) el estado final, el cambio de estado de  $E_i \rightarrow E_k$  requiere de la aplicación de un operador funcional  $\pi^{\ell}_{ij}$  definido para la ruta  $\ell$ . La ruta de transformación  $\ell$  se define como el conjunto de estrategias *em* utilizadas en la transformación (Nava et al, 1979). En esta forma se tiene:

$$E_i \xrightarrow{\pi^{\ell}_{ij}} E_k$$

En vista que los estímulos corresponden a la adición de materia, energía e información al sistema, involucran, por lo tanto, la aplicación de un trabajo. La dependencia del operador funcional  $\pi^{\ell}_{ij}$  con los estímulos, implica la existencia de una función  $\omega_{ij}$  que mide la cantidad de trabajo requerido para lograr la transformación. El término trabajo se utiliza bajo la acepción de energía generalizada, incluyendo a la energía aplicada como tal al ecosistema y a la materia cuantificada en términos de energía requerida para su transformación y aplicación. Este trabajo se puede cuantificar en unidades de energía empleadas en la transformación ecosistémica, pudiéndose expresar en joules, ergios, calorías o en cualquier otra unidad energética (Nava et al, 1979).

La transformación de un estado del ecosistema en otro es en sí un proceso probabilístico, lo cual implica considerar la probabilidad de efectuar el cambio. Lo anterior hace necesario llegar a la siguiente definición: Sea  $P_{ij}$  la probabilidad de llegar de un estado  $E_i$  a un estado  $E_k$  a través de una ruta con la aplicación de un operador funcional  $\pi^{\ell}_{ij}$ , esta probabilidad estadística está dada por:

$$P_{ij} = P(\Delta E_{ij}; \pi^{\ell}_{ij}) = \frac{N(E_j)}{N(E_k)} \text{ para } \pi^{\ell}_{ij}, \text{ con}$$

$\Delta E_{ij}$  representando el cambio de estado producida con  $\pi^{\ell}_{ij}$

$N(E_j)$  es el número de casos en el cual se llega al estado  $j$ , a través de la aplicación de  $\pi^{\ell}_{ij}$ , y

$N(E_k)$  es el número de casos que se llega a un estado  $k$  cualquiera incluyendo al estado  $j$  meta.

En general, el operador ecosistémico  $\pi^{\ell}_{ij}$ , que permite transformar de  $E_i \rightarrow E_j$ , está dado por una relación  $Re$  tal que:

$$\pi^{\ell}_{ij} = Re(\omega_{ij}; t_{ij}; P_{ij}) \text{ con,}$$

$\omega_{ij}$  trabajo requerido para transformar el ecosistema desde el estado  $i$  al  $j$

$t_{ij}$  tiempo para efectuar la transformación del estado  $i$  al  $j$

$P_{ij}$  probabilidad de efectuar la transformación desde el estado  $i$  al  $j$

$p^{\ell}$  relación entre  $\omega_{ij}$ ,  $t_{ij}$ ,  $P_{ij}$  al seguir una ruta  $\ell$  y pasar del estado  $i$  al  $k$  (Figura 3.4)

Un operador funcional es, por lo tanto, el estímulo que debe aplicarse a un ecosistema en un estado  $E_i$  para transformarse en un estado  $E_j$ , en un tiempo  $t_{ij}$ , con cierta probabilidad  $P_{ij}$  de éxito de transformación y con cierto trabajo  $\omega_{ij}$  (Navas et al, 1979). El concepto de operador funcional permite trabajar con mayor claridad cambios de estado ecosistémicos. La aplicación de  $\pi$  involucra necesariamente la utilización de cierta cantidad de energía con el fin de cambiar  $\sigma(\eta)$ . Una parte de la energía empleada se disipa, luego de ser utilizada para cambiar el arreglo topológico  $\sigma(\eta)$  y corresponde a la energía de activación.

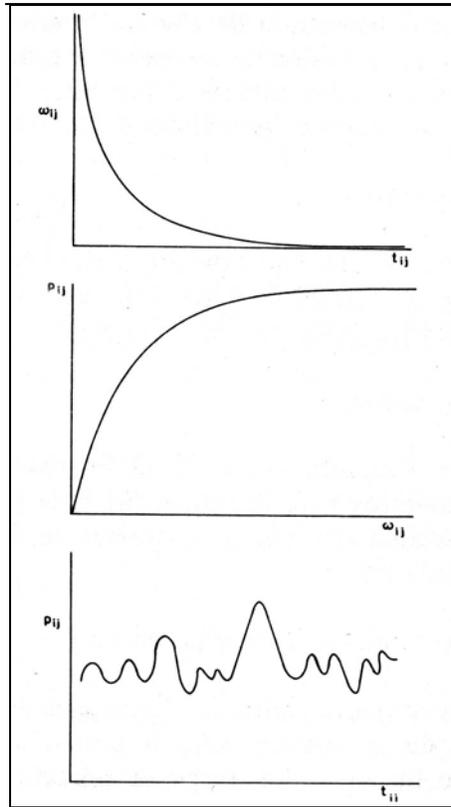


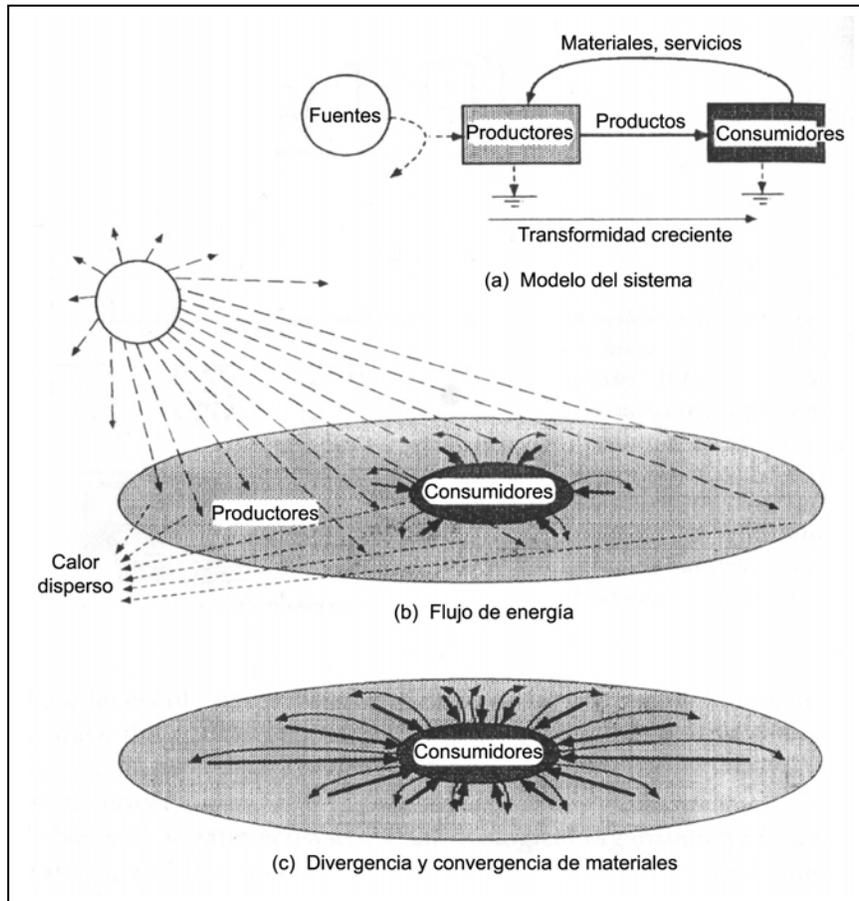
Figura 3.4.- Relaciones paramétricas hipotéticas entre  $\omega_{ij}$ ,  $t_{ij}$  y  $P_{ij}$  (Fuente: Navas et al, 1979)

Otra parte de esta energía puede ser almacenada en el sistema, siendo susceptible a liberarse posteriormente. La energía retenida en el ecosistema implica un cambio en su comportamiento. Sin embargo, un cambio en el comportamiento no necesariamente implica un cambio en el contenido de energía interna del ecosistema, requiriendo lo anterior la aplicación de un operador funcional.

### 3.1.5 Principios espaciales

#### 3.1.5.1 Producción, consumo y reciclaje

En cualquier lugar que se fije el foco de atención en un sistema, siempre se encuentran subsistemas de producción, consumo y reciclaje de materiales (Odum, 2001). Cuando la fuente de energía que está entrando al sistema se esparce de manera uniforme en una superficie amplia, la producción que captura esta energía tienen que estar dispersa también. Por ejemplo, los campos agrícolas capturan la energía solar. Una vez que la energía ha sido capturada en productos más valorables, converge espacialmente hacia los centros para ser consumida (Figura 3.5 b ).



**Figura 3.5.- Arreglo espacial de la producción y consumo de los ecosistemas. (Fuente: Modificado de Odum, 2001.)**

En muchos territorios agrícolas antes de la revolución industrial, la agricultura que rodeaba a las ciudades abastecía de alimentos para las personas y avena para los caballos. La energía utilizada por los consumidores era mucho menos que la energía solar original, es decir, tenía una alta calidad.

Para un máximo desempeño, la parte central del consumo del sistema regresa servicios para reforzar los sistemas rurales. Por ejemplo, trabajadores diarios y equipos se mueven desde la ciudad hacia las granjas. Los centros de consumo también devuelven los desechos materiales dejados durante los procesos de consumo. Siguiendo con el ejemplo anterior, la ciudad agraria devolvía los desechos animales hacia las granjas que la rodeaban. La Figura 3.5 c muestra el flujo de materiales desde el centro fluyendo hacia los productores en rutas divergentes y dispersoras, cerrando de esta manera el ciclo necesario para continuar la producción. El consumo y la producción son simbióticos. Ambos están

mutuamente estimulados por los productos que convergen hacia los centros y los materiales y servicios que divergen de vuelta (Odum, 2001).

Este diseño de convergencia y divergencia se observa en muchos tipos de sistemas. Las nubes del tipo cúmulos están en los centros de convergencia y divergencia de flujos de aire. Algunos hábitats de animales tales como los arrecifes de corales son centros de consumo que capturan y concentran la materia orgánica proveniente de grandes áreas de producción de plantas, dejando desechos que son dispersados en su entorno. Las hormigas acarrear alimentos a su hormiguero desde las áreas que lo rodean, arrastrando los desperdicios hacia fuera. Los volcanes son centros en donde convergen las energías geológicas que lo rodean, y dispersan materiales cuando hacen erupciones (liberación de la energía).

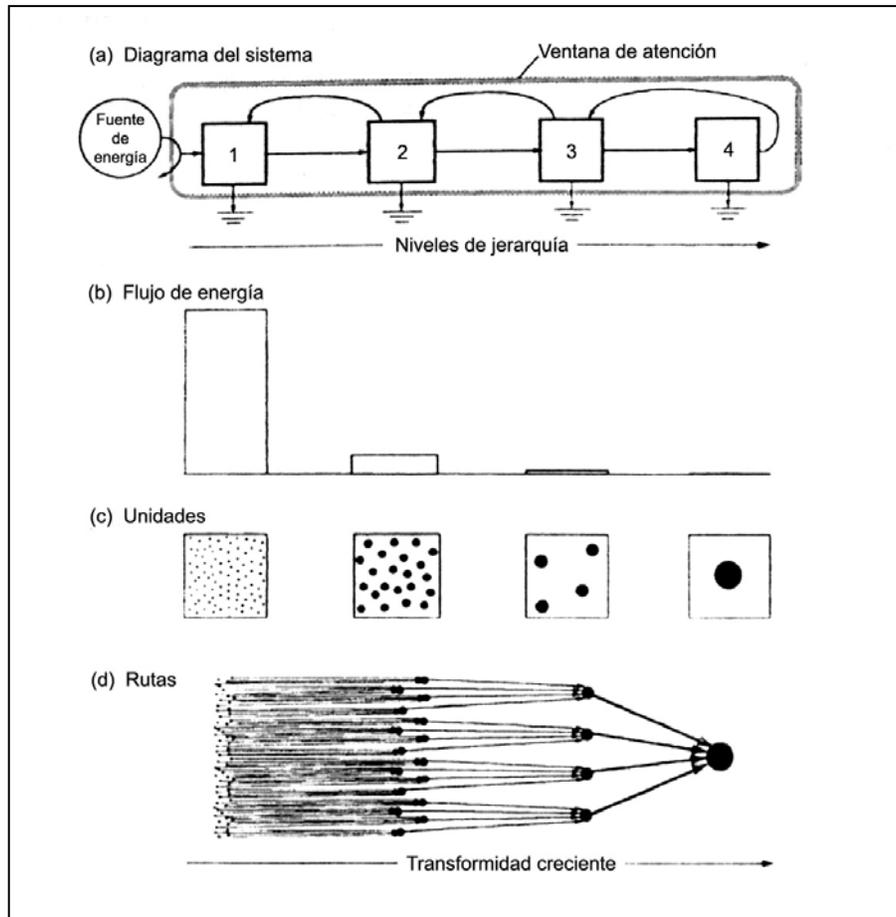
Una buena política de planificación territorial es la que permite la convergencia y divergencia de materiales en ciclos complejos (Odum, 2001). El gasto en la dispersión de desechos hacia los sistemas rurales debe ser importante en el largo plazo así como se paga por traer productos hacia los centros de una economía. Por ejemplo, los desechos orgánicos que quedan en las aguas producto de la manufactura del papel necesitan regresar hacia las plantaciones de pinos. El transporte urbano está organizado para que la gente converja hacia los centros de las ciudades y las devuelva hacia sus hogares dispersos.

### **3.1.5.2 Muchos niveles de jerarquía**

Con el modelo de producción y consumo, la ventana de atención a los sistemas tiene dos niveles jerárquicos. Sin embargo, el mundo real tiene muchas escalas de tiempo y tamaño. Cada nivel recibe productos convergiendo desde pequeñas unidades y los esparce sobre grandes áreas. Cada nivel en cambio, crea productos desde el centro más concentrado hacia el próximo nivel más alto.

El uso de las palabras consumidor o productor dependerá de la ventana de atención (Odum, 2001). Por ejemplo, fijando la atención en una ventana de interés ecológico, los peces son consumidores que reciben energía desde unidades productoras pequeñas más dispersas, que son el plankton en el mar. La ventana de atención para una familia que vive de la pesca mira a los peces como productores y a la familia como el elemento consumidor.

En una escala más larga con la atención centrada en el uso económico, los pescadores son los productores y las personas en las ciudades son los consumidores.



**Figura 3.6.- Propiedades de un sistema con cuatro niveles de jerarquías. (Fuente: El Autor.)**

La cadena energética que se muestra en la Figura 3.13, describe la ruta de disminución de la cantidad de energía a través de niveles sucesivos pero con un incremento en las transformidades de los productos. La energía solar mantiene el fitoplankton, el cual hace de alimento para el zooplankton, quien a su vez sustenta a peces pequeños.

En la Figura 3.6 se muestran cuatro niveles de jerarquía energética y tamaño que representan el patrón espacial que surge. De izquierda a derecha, Figura 3.6c, unidades pequeñas se tornan más grandes, con un mayor territorio de influencia, largas tasas de recambio y elevadas transformidades.

Ejemplos de lo anterior son las cadenas alimenticias de los sistemas acuáticos, la organización ecológica de ecosistemas terrestres y la organización espacial de granjas, villorrios, y ciudades en el caso de la economía agraria antigua.

La transformidad se incrementa con cada paso desde pequeñas unidades geográficamente dispersas a la izquierda hacia unidades más centralizadas hacia la derecha. El flujo de energía total declina, pero los patrones convergentes entregan grandes flujos de energía concentrada hacia los centros. La Figura 3.6d muestra la convergencia de las rutas que atraviesan la jerarquía de escalas.

### **3.1.5.3 Jerarquía global**

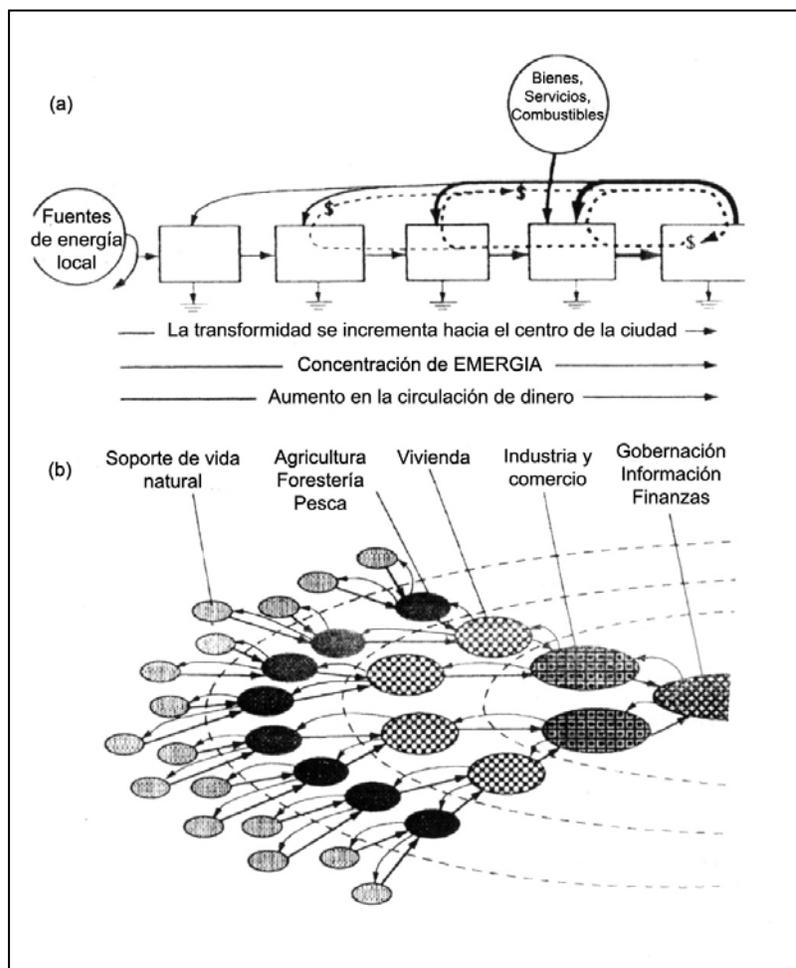
Las tres fuentes principales de energía para la biogeósfera de la tierra son: (1) la luz solar directa, (2) la energía de las mareas transferida al mar por la fuerza de gravedad de el sol y la luna, (3) y los procesos geológicos causados por el calor que emerge de las profundidades de la tierra (Odum, 2001). Los procesos de la atmósfera, los océanos y la tierra interactúan operando como un sistema global en el cual los océanos ayudan tierras, y estas generan montañas. La energía solar es absorbida por los mares, en donde se transforma en calor y agua evaporada. El calor solar y el vapor de agua producen los vientos, tormentas, corrientes oceánicas y la lluvia sobre las tierras. Es aquí en donde la nieve y la lluvia producen glaciares y ríos. Desde una perspectiva de larga escala, los lentos ciclos de la tierra son impulsados por los ríos fluyendo desde las montañas, y el calor interno de la tierra produce los movimientos internos.

### **3.1.5.4 Establecimientos humanos**

La organización jerárquica y espacial de los establecimientos humanos se ha reconocido desde hace tiempo. Las personas de zonas rurales esparcidas mantienen una villa, de la cual reciben comercio y servicios como pago. Las villas mantienen poblaciones, y las poblaciones mantienen ciudades. Flujos grandes y de baja transformidad de los sistemas rurales son transformados en ingresos de alta transformidad hacia las villas, en donde los productos son transformados en ingresos de aún mayor transformidad hacia las ciudades. EL transporte y los servicios son efectivos cuando se organizan jerárquicamente, convergiendo hacia los centros de alta transformidad. Las personas y los productos

circulan hacia estos centros recorriendo rutas de convergencia, y regresan a zonas de divergencia por los mismos corredores.

La distribución jerárquica de los establecimientos humanos y la economía de un territorio se resume en la Figura 3.7. Hay más es más concentración de gente e información en los centros, en donde las transformidades son más altas. En los centros circula más dinero que en las áreas rurales. La tasa de emergencia / dinero es mayor en las áreas rurales en donde el dinero compra más bienestar real, ya que muchos recursos ambientales pueden ser usados directamente sin la circulación de mucho dinero. En los centros urbanos, todas las personas compran los bienes que necesitan.



**Figura 3.7.- Concentración y dispersión de energías desde lo natural hacia lo urbano. (Fuente: Modificado de Odum, 2001.)**

El dinero compra menos en las ciudades debido a que una elevada proporción de los bienes comprados consisten en servicios humanos, los que deben ser pagados para obtenerlos

(Odum, 2001). Conocimiento, información y transacciones financieras se concentran en los centros. Dinero, materiales e información convergen, circulan y divergen.

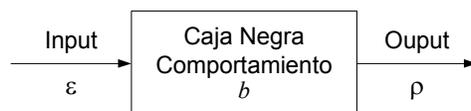
### 3.1.6 Modelo Homomórfico para la simulación de sistemas

El universo en el cual habitan los seres humanos es demasiado grande y complejo como para ser visualizado en detalle, de una sola vez, por la mente de estos. Es por lo anterior que se requiere hacer simplificaciones. El concepto simplista por medio del cual el hombre piensa es normalmente llamado *modelo*. Los modelos representan sistemas. Para hacerlos, lo primero es imaginarse una caja alrededor de los sujetos de nuestro interés. Luego se dibujan símbolos que representan las influencias externas, las partes internas, y las líneas conectadas que representan interacciones y flujos. Posterior a esto se agregan valores numéricos para hacer que el modelo sea cuantitativo. Finalmente, se elige un método para simular el modelo en un computador.

#### 3.1.6.1 Caja Negra

Dada la complejidad de los fenómenos prediales, resulta en extremo difícil elaborar modelos que reproduzcan las estructuras y procesos involucrados tal como ocurre con los modelos a escala y los isomórficos. De ahí que sea a menudo preferible elaborar modelos homomórficos o de caja negra.

Las teorías del tipo de caja negra consideran al elemento que puede ser una variable de estado o conjuntos de variables de estado, constituyendo un sistema cualquiera o ecosistema, como si estuviera desprovisto de estructura interna; de manera de considerar sólo su comportamiento global al ser tratado como una unidad simple (Figura 3.8).



**Figura 3.8. Teoría del tipo Caja Negra que considera al elemento como desprovisto de estructura donde intervienen variables periféricas  $\varepsilon$ ,  $\rho$  vinculadas mediante la variable  $\beta$ . (Fuente: El Autor)**

Dada las características propias de la caja negra de presentar paredes no transparentes, no es posible conocer directamente su contenido. Su estructura interna puede inferirse al hacerse variar y cuantificarse los estímulos y las respuestas de manera de lograr

finalmente establecer su función de comportamiento. Consecuentemente y de manera hipotética, es posible en etapas sucesivas construir la imagen conceptual de su estructura interna (Nava et al, 1996).

Las propiedades más sobresalientes de las cajas negras, en relación con la resolución de problemas ecosistémicos, son (Bunge, 1969 citado por Gastó, 1979):

- Su alta generalidad, siendo coherentes con un número ilimitado de mecanismos de la más diversa índole;

- Su holismo y capacidad de resolver problemas globales, sin prestar atención a detalles de su contenido interior;

- Sencillez epistemológica, lo cual permite resolver eficientemente problemas no observables; y

- Su precisión, pues a través del ajuste y reajuste de parámetros permiten cubrir mayor cantidad de información que las teorías representacionales; y su mayor seguridad, debido a la falta de explicitación acerca de los mecanismos interiores de la caja negra.

En la resolución de problemas ecosistémicos debe buscarse las variables y vectores de estado que permitan establecer las relaciones propias de los elementos y conexiones del mundo empírico, dentro del cual se encuentra el predio.

En la búsqueda del marco teórico general donde se ubican los ecosistemas de recursos naturales, con el fin de elaborar la imagen o modelo, se procede describiéndose como un sistema cada vez más general, lo cual implica necesariamente una reducción de su contenido, ya que existe una relación inversa entre contenido y generalización (Boulding, 1956 citado por Gastó, 1979)

En el paso desde el fenómeno o predio al modelo representacional del fenómeno deben eliminarse los componentes y conexiones que sean de ínfima o nula relevancia, lo cual no es otra cosa que quitarle ruido al sistema. El ecosistema, por lo tanto, debe estar definido por las variables y vectores de estado que constituyan la esencia de sus componentes y conexiones. Todos ellos son los que determinan los grados de libertad del sistema, debiendo estar contenidos en cualquier modelo del fenómeno.

### **3.1.6.2 Elementos de la Caja Negra**

El conjunto de elementos que constituyen el modelo homomórfico de un predio están dados por los siguientes (Odum, 1972): arquitectura predial, estructura, unidades espaciales y componentes.

#### **Arquitectura Predial**

Es la modalidad de ordenación espacial de las estructuras ecosistémicas conectadas a través de patrones definidos de flujo.

Simbólicamente se tiene que:

$$\Lambda = G(\sigma, k)$$

Donde:

$\sigma$ : representa el arreglo topológico de las diversas estructuras del ecosistema predial, siendo, por lo tanto, la parte estática espacial; y

$k$ : representa el patrón de conectividad entre las estructuras o relaciones de flujo.

#### **Estructura**

Son las partes en que se descompone la arquitectura de un ecosistema predial. Las categorías de estructuras son las siguientes:

Biogeoestructura;

Tecnoestructura; y

Socioestructura.

Dentro de la biogeoestructura se tiene, a manera de ejemplo, los bosques, praderas, tierras, aire, agua, ganado, lomeríos y matorrales, entre otros. Algunos elementos de la tecnoestructura son las bodegas, corrales, maquinaria, canales, caminos, viviendas y teléfonos, entre otros. En el último caso se tiene al hombre organizado social, laboral y culturalmente.

#### **Unidades Espaciales**

Son divisiones de un predio en las cuales los atributos originales del predio no se pierden, tales como divisiones de usos específicos del campo en: potreros, cultivos, localidades de trabajo, áreas de habitación y otros.

## Componentes

Son las partes en que se puede separar un ecosistema predial, que incluye tanto a las estructuras como a las unidades. Los componentes que se emplean para establecer relaciones entre las estructuras y unidades son los siguientes: conexiones, conectores, impedancia, interruptor, válvula unidireccional.

**-Conexiones:** Son estructuras que permiten establecer el flujo entre dos o más unidades o estructuras, tales como caminos, canales, cables eléctricos y otros.

**-Conectores:** Son elementos estructurales a través de los cuales se establecen las conexiones. El conector cuenta con conductores y nodos.

**-Unión:** Es la contigüidad espacial de unidades o elementos sin que implique necesariamente un flujo. A manera de ejemplo se puede citar dos campos agrícolas contiguos, uno de maíz y otro de alfalfa, entre los cuales no existe flujo, ni necesariamente, conexiones o conectores.

**-Impedancia:** Son las estructuras que se oponen al flujo en forma selectiva. La naturaleza de estas estructuras puede ser física, ecológica, legal, u otras. Un ejemplo de impedancia puede ser un alambrado o un farellón que se oponga al paso del ganado, entre otros.

**-Interruptor:** Son estructuras que pueden activarse o desactivarse permitiendo u oponiéndose a un flujo. El mecanismo de activación puede estar sujeto a un programa de control. Ejemplos de interruptores prediales son las compuertas de canales y las puertas de los campos de cultivos

**-Válvula Unidireccional:** Es una estructura que permite el flujo de elementos en una sola dirección.

**-Conexión Aditiva:** Esta estructura permite la fusión de dos o más flujos análogos, tal como juntar ganado de dos o más corrales diferentes.

Las características que describen los enlaces entre las partes del sistema son el flujo, la fuente y el destino:

**-Flujo:** Es el transporte de materia, energía o información.

**-Fuente:** Es el origen del flujo, tales como el sol produce energía solar, una cuenca produce agua y un pastizal produce forraje.

**-Destino:** Es la meta de un flujo, tal como ocurre con los almacenadores pasivos: un estanque destinatario de un flujo de agua, una bodega-destinataria de forraje y un corral-destinatario del flujo de ganado.

## **3.2 Energía**

### **3.2.1 Energía como concepto**

La palabra energía se utiliza comúnmente y nadie, independientemente de su educación, profesión o educación vacila en utilizarla. Sin embargo, no serían pocas las personas que quedarían desconcertadas si se les preguntara la definición exacta de este concepto. Lo anterior demuestra varias cosas. Una es que la energía es parte de nuestra vida diaria. Otra es que la gente es más o menos consciente de su existencia. Y por último, la palabra puede usarse ampliamente, a pesar de que su definición no sea completamente conocida (Odum, 1980).

Existen dos definiciones clásicas de energía:

- La energía es la capacidad de realizar trabajo.
- La energía es lo que debe cederse a un sistema material para transformarlo.

Las formas más comunes en las cuales se manifiesta la energía son: la radiante, química, mecánica, térmica y eléctrica.

La unidad básica de energía más comúnmente utilizada es la caloría, que es la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura de un gramo de agua de 14,5° Celsius a 15,5° Celsius, a una presión atmosférica normal. (MOPT,1991)

### **3.2.2 Principios básicos de la termodinámica**

Para entender el concepto de energía es necesario entender los dos principios básicos que regulan las leyes de la termodinámica. El primer principio básico dice que la energía, en los procesos en los que no se produce una conversión apreciable de energía y materia, no se crea ni se destruye. (MOPT, 1991) Por ejemplo, si se quema una tonelada de carbón en una central térmica, la energía contenida en el carbón al combustionarse pasará a otras formas como calor liberado, movimiento de turbinas, electricidad producida.

El segundo principio de la termodinámica dice que en un sistema que no puede intercambiar energía con el exterior, la calidad de la energía tiende a transformarse en una forma más degradada. (MOPT, 1991) Esto quiere decir que en todo proceso generador de trabajo u otra forma de energía, una parte de la energía original no es aprovechable ya que se disipa en forma de calor. Dicho calor es el costo de lograr algún trabajo. Es decir, no existen procesos conversores de energía 100% eficientes. La parte de energía no aprovechable (calor) se denomina energía degradada o entropía. Esta fracción de la energía no se destruye, sino que imprime a miles de millones de moléculas una velocidad con la que se aceleran, vibran, rebotan y entorchocan cada una en una dirección. Pero este movimiento es desorganizado y no se puede utilizar, salvo cuando un objeto tiene más energía de este tipo que otro que esté junto a él. (Odum, 1980)

### **3.2.3 El concepto de máxima potencia.**

Alfred Lotka fue un matemático científico que ayudo en la creación del campo de la ecología de poblaciones, sistemas ecológicos, bioquímica y termodinámica ecológica. En 1922 sugirió el concepto de máxima potencia como una ley fundamental de la energía. Adaptado del texto original, la idea dice así: “En los procesos de auto organización, los sistemas desarrollan sus partes y procesos, y los relaciona para lograr la mayor captura y uso de la energía con la mejor eficiencia posible, sin reducir la potencia” (Lotka, 1922).

El principio del máximo poder (PMP) establece que los sistemas que se auto organizan para desarrollar el mayor trabajo con a partir de entradas de energía de diferentes fuentes, mediante la retroalimentación de procesos productivos y las limitaciones surgentes producto de la organización del sistema, prevalecerán en competición con otros sistemas (Brown & Ulgiati, 1999 citado por Haden, 2003). Este principio es el concepto teórico fundamental detrás del análisis emergético.

Mediante prueba y error muchas estructuras comienzan funcionando, pero solo aquellas que tienen un diseño que contribuye con un mayor flujo de energía utilizable se refuerzan y de esta manera son seleccionadas par continuar. Los motores antiguos son reemplazados constantemente por motores más eficientes en el uso del combustible.

Los diseños que son reforzados maximizan la potencia extraída desde los recursos naturales disponibles. El sistema puede entonces utilizar más recursos, producir más, y

eliminar patrones alternativos que refuerzan menos (Odum, 2001). En otras palabras, los sistemas exitosos desarrollan estructuras que maximizan la producción y consumo de recursos utilizables.

Un diseño usual de sistema que tiene producción, consumo y reciclaje (figura 4.2 hacer), usa los ciclos de materiales para reforzar la captura de energía. Este diseño general se encuentra en reacciones bioquímicas, sistema climático, océanos, procesos geológicos, ecosistemas, y la economía humana. La unidad de consumo ayuda a la producción mediante servicios de retroalimentación. Por ejemplo, los árboles con muchas hojas para capturar luz desplazan a los pastos del suelo debido a que tienen un soporte de tronco y ramas. En este caso, los troncos y las ramas son los consumidores que proveen de servicios a las hojas.

Potencia se define como el flujo de energía útil por unidad de tiempo. Potencia emergética es el flujo de energía por unidad de tiempo. Existe un postulado (Odum, 1996) que todos los sistemas auto organizados evolucionan en la dirección que maximiza la potencia emergética. El principio de máxima potencia emergética (PMPE) se considera como la ley termodinámica que gobierna la auto organización en todos los sistemas (Odum, 1996). Este principio es muy controversial y puede ser una hipótesis muy inestable, pero existen muchos ejemplos en la naturaleza y sociedad en los cuales el PMPE puede ser visto como operacional (Hall, 1995). Este principio tiene sus orígenes en el trabajo de Lotka (1922) en el cual se considera la energía como un elemento motriz de la selección natural. Lotka argumenta que la dirección de la evolución debería ser entendida como un proceso de los sistemas y sugiere que la selección natural tiende a maximizar el flujo de energía a través de estos.

### **3.2.3.1 EL concepto de máxima potencia emergética**

Aparentemente los procesos de auto organización se llevan a cabo en todas las escalas al mismo tiempo (Odum, 2001). La rápida organización en las escalas pequeñas es parte de lo que mantiene a las escalas más grandes, pero a la vez las escalas pequeñas son controladas por las más grandes. La organización para una máxima potencia se conserva en todas las escalas simultáneamente. La bioquímica en el cuerpo humano se auto organiza para un máximo desempeño minuto a minuto, mientras que el organismo humano entero, es

decir como persona, participa en la auto organización de la economía en una escala mucho mayor. En cada caso los materiales y energía han sido procesados para una máxima producción y uso.

### **3.2.3.2 Regulación de la tasa de carga**

Los sistemas pueden operar ineficientemente o sobrecargados. Por ejemplo, un camión sobrecargado puede moverse pero haciendo mucho esfuerzo. Un camión que no lleva carga puede moverse rápidamente, pero nunca llevara la suficiente carga en comparación a uno que lleva una carga intermedia. La auto organización encuentra la carga intermedia, velocidad y eficiencia que maximiza la potencia. La carga óptima para una máxima potencia es el “*time speed regulator*” (Odum, 2001).

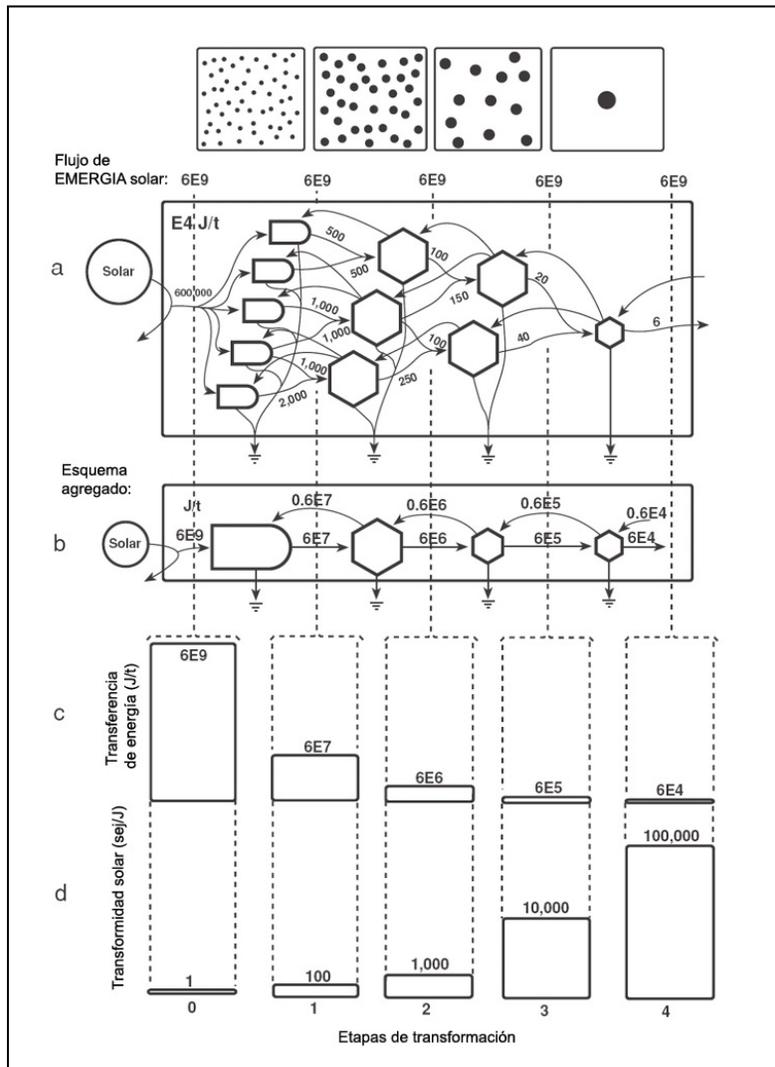
Durante la auto organización, los procesos de selección desarrollan al mismo tiempo una carga óptima en los procesos de todos los tamaños en un sistema. Es decir, los sistemas organizan la carga y eficiencia para maximizar la potencia emergética (Odum, 2001).

### **3.2.4 Jerarquía en los flujos de energía e información**

La energía fluye a través de los ecosistemas desde los productores hacia los consumidores. En cada etapa de la cadena de consumo de energía la cantidad disponible disminuye. Sin embargo, los consumidores actúan de manera de retroalimentación modificando a los productores, por lo que se habla de que los elementos del sistema que consumen menor energía están en una posición jerárquica mayor que los consumidores de grandes cantidades de energía, ya que modifican (por retroalimentación) utilizando mucho menos energía. (Odum, 2001)

La observación que en el ecosistema, sistemas terrestres, sistemas astronómicos y posiblemente todos los sistemas están organizados en jerarquías debido a que sus diseños maximizan el procesamiento de la energía utilizable, ayuda a entender las bases conceptuales que están detrás de la manera de ver el mundo mediante la ecología de sistemas (Odum, 1988 citado por Haden, 2003). En esta afirmación se reconoce que en sistemas abiertos que existen lejos del equilibrio termodinámico, las jerarquías energéticas se desarrollan como consecuencia de la auto organización para la maximización de la potencia emergética (Odum, 1995 citado por Haden, 2003). El término jerarquía energética

se utiliza para indicar que en todos los sistemas, una gran cantidad de energía debe ser disipada en orden para producir un producto que contenga menos energía de alta calidad (Odum, 2000).



**Figura 3.9.- Diagrama energético de la jerarquía en la transformación de la energía. (a) Red de flujos energéticos medidos en Joules. (b) Cadena de transformación de la energía producto de la agregación de la red por la posición jerárquica. (c) Gráfico de los flujos en cada etapa de la jerarquía energética. (d) Transformidad solar en cada nivel de transformidad. (Fuente: Modificado de Haden, 2003.)**

La observación de estos procesos de transformación de energía en todos los sistemas, indica que existe un orden natural en el cual las energías de diferentes calidades pueden ser agrupadas. La Figura 3.9 muestra esta idea de manera clara. El entendimiento de los ordenes jerárquicos naturales que se desarrollan en sistemas auto organizados puede

llevar a conclusiones acerca de cómo manejar ecosistemas naturales y agrícolas de tal manera de maximizar la potencia energética y los beneficios mutuos para los humanos y la naturaleza (Haden, 2003).

La energía de cualquier tipo, como la química, eólica, solar, carbón, calor, mareas o energía en información es encontrada en todas las cosas. Cualquier transformación de energía usa una cantidad de energía de un tipo para producir una cantidad menor de energía de otro tipo. Esto significa que todos los tipos de energía pueden ser agrupadas en series de acuerdo a las calorías de un tipo requeridas para hacer energía del siguiente tipo (Odum, 2001). Por ejemplo, muchas calorías solares son requeridas para hacer una caloría de viento, y muchas calorías de viento son requeridas para hacer una caloría de onda acuática. En otra escala, un ejemplo puede ser el de la cadena alimenticia de una laguna. Muchas calorías de energía solar son requeridas para hacer una caloría de plantas acuáticas, muchas calorías de plantas acuáticas son requeridas para hacer una caloría de plankton animal, muchas calorías de plankton animal se requieren para hacer una caloría de peces pequeños, y así sucesivamente. (Odum, 2001)

La jerarquía es usada cuando muchas cosas de un tipo son requeridas para mantener unas pocas de otro tipo. Por ejemplo, en la jerarquía militar, muchos soldados mantienen un sargento, muchos sargentos mantienen un teniente, y así hasta llegar a la cadena de comando. Cuando la energía de cada nivel mantiene menos energía en el próximo nivel, resulta apropiado nombrar las series de transformaciones en jerarquías de energía (Odum, 2001).

En los procesos de auto organización, los componentes que requieren mucha energía no deberían seguir produciéndose por mucho tiempo si no tienen un efecto positivo que justifique la gran cantidad de recursos requeridos para su manufactura. Cada transformación es acompañada por un canal de reforzamiento mediante retroalimentación.(Odum, 2001)

En la auto organización se generan unidades en diferentes niveles de usos de energía. Cada unidad en las series jerárquicas provee una división de labor. Cada nivel puede hacer algo para reforzar los procesos del sistema que el nivel previo no pudo hacer. Por ejemplo, la energía contenida en el zooplankton alimenta al pez. Como el pez se come al zooplankton, controla la cantidad, calidad y distribución de la población de zooplankton.

Ocurre lo mismo cuando la energía solar es transformada en pasto verde, las hojas se expanden y capturan mas luz solar, amplificando de esta manera los procesos mediante la acción de la retroalimentación. Los sistemas que refuerzan sus procesos productivos desarrollan y desplazan a aquellos que no lo hacen. Por ejemplo, en la polinización de flores, las abejas refuerzan los procesos que producen el néctar del cual se alimentan. En el largo plazo, agricultores que mantienen el suelo, desplazan a aquellos que no retroalimentan con servicios para reforzar la fertilidad de las tierras. En resumen, “la auto organización genera una jerarquía en la transformación de la energía” (Odum, 2001).

### **3.2.5 Calidad de la energía**

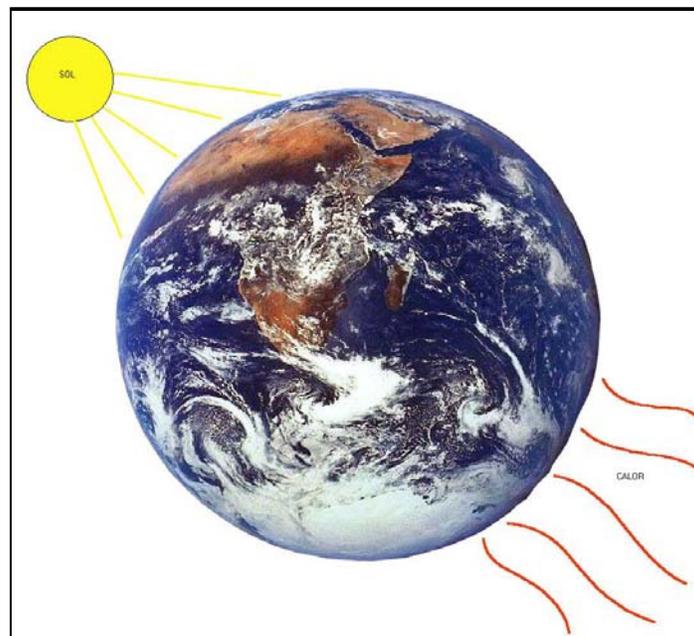
La calidad de la energía es una observación que hace referencia a que distintos tipos de energía varían en su habilidad para realizar trabajo útil. Este principio se puede ilustrar usando como ejemplo el carbón y la electricidad, en el cual se necesitan cuatro joules de energía del carbón para generar un joule de potencia eléctrica. Debido a lo anterior, la electricidad ocupa una posición más alta en la Jerarquía energética que el carbón por lo que se considera que tienen una mayor calidad. La mayoría de la energía del carbón se transforma en calor con el propósito de calentar un espacio que genera un diferencial de potencial, con el cual se impulsan turbinas que generan electricidad. La energía generada (eléctrica) es mas versátil, fácil de transportar y puede potenciar una gran cantidad de sistemas de alta tecnología (Odum, 1996).

### **3.2.6 La energía en los sistemas humanos**

Los sistemas humanos se basan en flujos de materia, energía e información. El hombre modifica y transforma su entorno al igual que los elementos que utiliza en su vida cotidiana. Sin embargo existe una diferencia entre el manejo que el hombre le da a la energía y a la materia. Desde este punto de vista, el ser humano no crea materia ni la destruye, solo la transforma. Esto, basándose en los principios básicos de la termodinámica, equivale al uso que el hombre le da a la energía. Sin embargo, prácticamente toda la materia que el hombre utiliza, dejando de lado el flujo por meteoritos, esta contenida dentro de la ecósfera. La energía en cambio, proviene del Sol y de las mareas producto del movimiento de rotación lunar, siendo absorbida en un primer nivel por los organismos

autótrofos, que dan pie a las cadenas tróficas que les siguen aguas abajo. De esta manera, se entiende que el hombre no es un ser que creador de materia ni de energía, y que solamente su intervención produce cambios de estado. Pero al evaluar al hombre desde la perspectiva de los sistemas, el hombre si los crea y destruye. Desde este punto de vista, el hombre es un artífice; a partir de lo que existe desarrolla sistemas que no existían, así como destruye otros, a saber, los ecosistemas.

Si se viese la Tierra desde un satélite en órbita, la capa viviente del planeta parecería muy sencilla. La delgada capa bañada por el agua y el aire que cubre la Tierra circunda una masa de sólidos densos y está rodeada por el vacío del espacio. Del sol proviene la energía radiante, forma por la cual entra a la biosfera, saliendo la misma cantidad de energía en forma de radiación térmica, de acuerdo al primer principio de la termodinámica (Figura 3.10).



**Figura 3.10.- La cantidad de energía que entra en forma de radiación solar, sale en forma de calor o energía dispersa. (Fuente: El Autor)**

La ecósfera es el mayor de los ecosistemas, pero los bosques, los mares y las grandes ciudades son otros tantos sistemas. Estos a su vez se dividen en subsecciones, partes grandes y pequeñas que se atienen a su disponibilidad de energía. Todo fenómeno está regulado tanto por el funcionamiento de sus partes menores como por el papel que desempeña en el sistema más amplio del que constituye una división. La Tierra es entonces,

un sistema cerrado en el cual el único input es la energía solar y el movimiento de las mareas (Odum, 1980).

De esto se puede deducir el punto de mayor interés del autor: si el único flujo incidente en el planeta (despreciando la caída de meteoritos) es la energía proveniente del sol, entonces los flujos de energía que pasan al ecosistema son la principal fuente que determina el funcionamiento de dicho sistema y por ende de sus subsistemas, como lo son las ciudades y los bosques, por nombrar algunos.

De lo anterior se desprende que el estudio de cada pequeño sistema integrante de otro sistema mayor, como lo sería un rodal dentro de un bosque nativo de la cordillera de la X Región, si es analizado desde el punto de vista energético se puede entender su funcionamiento de una manera mucho más integral al ser el flujo de energía un componente mínimo necesario para la existencia de cualquier sistema vivo. Entonces el flujo de energía pasa a ser un idioma común, lo que permite no sólo establecer el comportamiento del sistema en cuestión, sino además del comportamiento del sistema como un elemento integral de otros sistemas más grandes.

### **3.2.6.1 Evolución de la relación hombre energía**

Las primeras sociedades, basadas en la caza y recolección y en las primeras formas de agricultura, se desarrollaron utilizando fuentes de energía naturales, locales y disponibles. Estas eran sol, suelo, viento, lluvia, en combinación con la labor humana y animal (Odum, 1980). La revolución industrial, asociada a un incremento en el uso de combustibles de alta calidad, expandió la magnitud de los gradientes de energía que la sociedad podía manejar. Estas nuevas fuentes de energía auxiliares difieren substancialmente de aquellas que estaban antes disponibles debido a que fueron “descubiertas” en la biosfera por seres humanos y, mientras su formación ocurrió a través de procesos naturales, la tasa de devolución, la calidad con la que se transformó, y los procesos mediante los cuales acoplaron la energía, son muy diferentes al resto de la naturaleza, razón por la cual se denominan a estos procesos como fenómenos antropológicos. La Figura 3.16 describe dicha transformación como un proceso que va desde una sociedad cazadora / recolectora a una sociedad del tipo actual centradas en las urbes. Lo anterior se esquematiza usando diagramas sistémicos basados en los flujos de energía. En dicho

esquema, se resaltan los cambios desde una sociedad altamente relacionada con el ecosistema salvaje a un sistema social que se caracteriza por una dominancia de cultivos domesticados y el uso de minerales y combustibles fósiles.

### **3.2.6.2 Los sistemas humanos actuales: relación entre los sistemas agrícolas y urbanos**

Para entender los sistemas agrícolas, es necesario comprender que estos están anidados y han coevolucionado junto a los sistemas sociales. En la sociedad actual, los sistemas agrícolas están asociados a sistemas industriales y comerciales principalmente mediante la transacción. La fuerza y carácter de dicha relación se incrementa para la agricultura y comunidades rurales. (Haden, 2003)

Un sistema agrícola es aquel que reside en la interfase de sistemas humanos y agrícolas y que sostiene la vida humana mediante la canalización de flujos de alimentos, energía y materiales en la sociedad. (Haden, 2003). Desde el punto de vista de la conectividad y feedback, los sistemas urbanos generalmente retroalimentan maquinaria, información, materiales de desecho y dinero a los sistemas agrícolas en intercambio por su producción.

Desde una perspectiva de transformaciones de energía y las características de los sistemas vivientes, es decir la perspectiva que esta detrás del concepto de emergencia, los sistemas agrícolas y urbanos se auto organizan, son sistemas abiertos que existen lejos del equilibrio termodinámico y que deben disipar energía y materiales para mantener su orden y su estructura. (Jorgensen et al., 1999 citado por Haden, A 2003). Además, al igual que los sistemas ecológicos, los sistemas agrícolas y urbanos son dependientes de la información para la mantención de la organización del sistema. En términos generales, en sistemas humanos organizados la información toma forma en el conocimiento y la cultura. Como los procesos de urbanización han ocurrido globalmente, la organización cultural y el conocimiento se han ido concentrando cada vez mas en los centros urbanos. Esta ruta lleva a la humanidad a un planeta dominado por las urbes, lo que predice una extensa apropiación de los recursos de la biosfera pasada así como de las futuras generaciones que “inhabiten” la tierra.

### **3.2.7 Ecología de sistemas**

La ecología de sistemas puede definirse como el campo que proviene de la unión de la teoría de sistemas y ecología que permite la aproximación para muchas escalas de análisis emergético (Odum, 1996). Los fundamentos teóricos de los sistemas ecológicos y el análisis emergético nacen de la observación de sistemas ecológicos, sociales y económicos, los cuales presentan características de diseño que refuerzan el uso de la energía. La dinámica de estos sistemas puede ser medida y comparada en una base común usando medidas de energía.

## **3.3 Emergía**

### **3.3.1 Orígenes del concepto emergía**

El concepto de emergía tienen sus orígenes en los estudios de patrones en los flujos de energía que los ecosistemas desarrollan durante su auto organización (Odum, 1988 citado por Haden, 2003). Formalmente conocido como energía contenida (Costanza, 1980 citado por Haden, 2003), la emergía representa entre la ecología de sistemas y el análisis energético (Hall, 1995). La publicación "Ambiente, Energía y Sociedad" (Odum, 1980) desarrolla el lenguaje de sistemas energéticos y la teoría de la máxima potencia en donde se combinan los sistemas humanos con los naturales. El concepto de emergía se desarrolla de manera integral en el libro "Environmental Accounting" (Odum, 1996) en el cual se detallan metodologías e investigaciones acerca del análisis emergético.

### **3.3.2 Introducción al término "emergía"**

En la tierra la fuente más abundante de energía es la luz solar, pero debido a que fluye en el tiempo y espacio, tiene una baja calidad en comparación a otras formas de energía de la tierra derivadas desde esta. Muchas calorías solares son requeridas para hacer otros tipos de energías más concentradas, de los tipos que el hombre necesita.

Es conveniente expresar todas los otros tipos de energía de la tierra en términos de la energía solar requerida directamente e indirectamente. Se usa la emergía para comparar las cantidades de energía de varios tipos, todas expresadas en equivalentes solares, que han sido utilizadas en la realización de productos y servicios.

Un producto del ecosistema, como por ejemplo un tronco de madera, contiene energía disponible, es decir, energía potencial con la cual se puede realizar trabajo.

Mediante la quema de la madera, esta energía puede ser liberada y degradada en forma de calor. De esta manera, la energía disponible puede ser medida en calorías.

En contraste, la emergía es una medida de la energía disponible que ha sido previamente ocupada, y por lo tanto degradada, para hacer el tronco de madera. La emergía es un registro de la energía utilizada para producir una pequeña cantidad de energía disponible en el tronco. Puede verse como la “memoria de energía” de un producto.

La emergía, deletreada con una “m”, es la energía disponible un tipo que tiene que ser usada directamente e indirectamente para hacer un producto o servicio (Odum, 2001). Es la energía directa e indirecta de un tipo requerida para producir un producto o servicio, expresada en emjoules (Odum, 1996).

La idea es describir sistemas mediante flujos de energía, pero como existe más de un tipo de energías, como por ejemplo la energía eólica, la energía eléctrica, la energía de las mareas, petróleo, etc, se utiliza un solo tipo de energía; la solar. Para lograr esto, se requiere un transformador que deje todos los tipos de energía en términos de unidades solares. Dicho transformador recibe el nombre de “transformidad”, que se define como “la emergía de un tipo necesaria para generar una unidad de energía de otro tipo” (Odum, 1996).

**Tabla 3.1.- Ejemplo de algunas transformidades**

<i>Item</i>	<i>Emcalorías solares por caloría</i>
Energía solar	1
Energía del viento	1.500
Materia orgánica, madera, suelo	4.400
Potencial de agua elevada	10.000
Energía química del agua	18.000
Energía mecánica	20.000
Energía de un río extenso	40.000
Combustibles fósiles	50.000
Alimentos	100.000
Energía eléctrica	170.000
Proteínas de los alimentos	1.000.000
Servicios humanos	100.000.000
Información	1 x 10 <sup>11</sup>
Formación de especies	1 x 10 <sup>15</sup>

Fuente: Modificado de H.T. Odum 1996

La transformidad aumenta a través de las cadenas tróficas, por lo que una mayor transformidad implica una mayor calidad de la energía. La transformidad solar de un producto es la energía solar por unidad de energía (energía solar dividida por la energía). Estas unidades son emcalorías solares/caloría o emjoules solares/joules si se están utilizando joules.

Para calcular la transformidad de un producto se evalúan los distintos tipos de energías previamente utilizadas directamente e indirectamente para hacerlo. Se expresa cada uno de los inputs contribuidos en unidades de un tipo de energía, energía solar.

### 3.3.3 Relaciones entre Energía y Emergía

Para entender la relación de energía con la emergía, se va a utilizar como ejemplo un proceso de almacenamiento en forma de madera de un bosque en crecimiento.

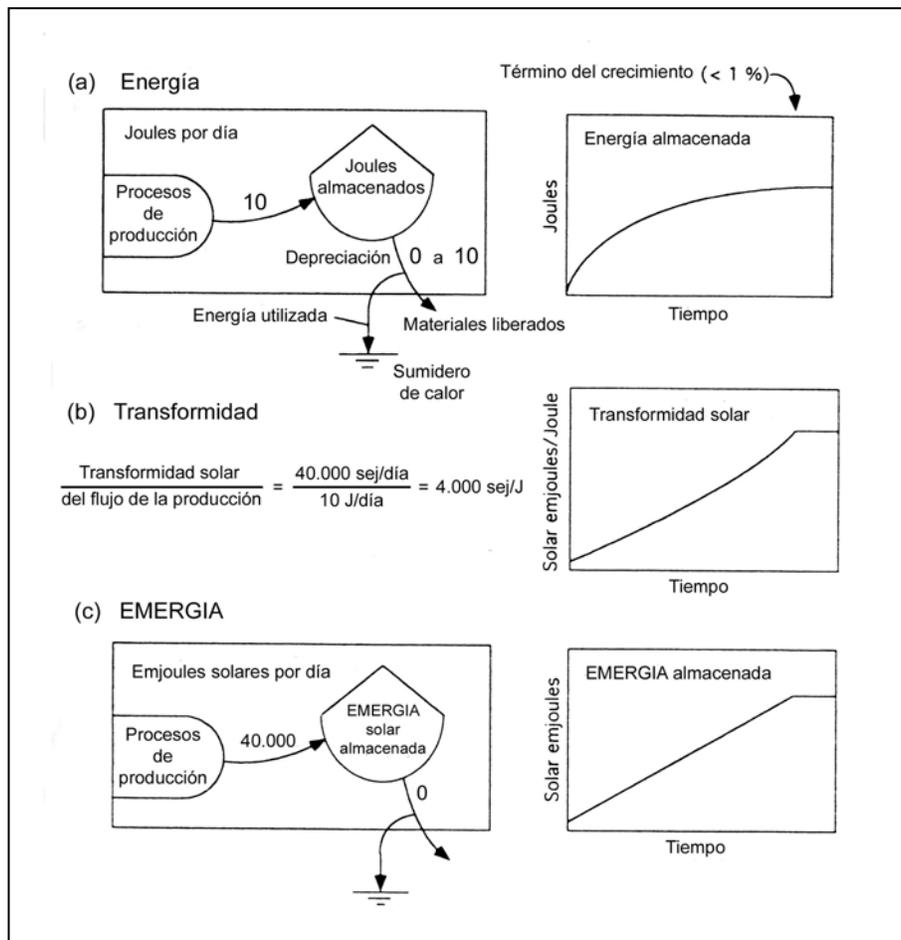
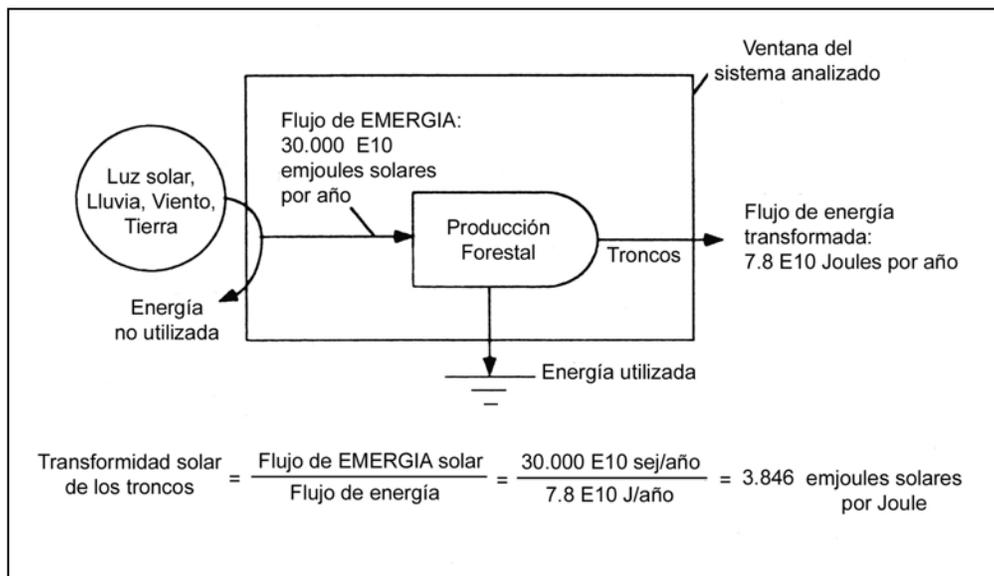


Figura 3.11.- Energía y Emergía en un proceso de almacenaje. (Fuente: Modificado de Odum, 1996)

Para simplificar el ejemplo, se va a considerar que no existe un consumo de la energía almacenada para otros usos aparte del flujo normal para mantener el sistema.

La Figura 3.11 muestra el flujo de energía que se almacena. Al mismo tiempo una parte de esta energía comienza a dispersarse, degradarse, y se pierde del contenedor a través de la ruta que sigue el calor (entropía del sistema). Mientras más energía se almacena, mayor es la pérdida proporcional de energía por calor. Por otra parte, el flujo de energía que esta entrando al sistema para almacenarse estabiliza los flujos de salida y el almacenaje se vuelve constante. Cuando las entradas y salidas del sistema se equilibran, se dice que el sistema esta en un *steady state*. En el ejemplo, cuando el sistema alcanza el *steady state* (almacenamiento constante), la depreciación es de 10 J/día, igual al input de energía del sistema.



**Figura 3.12.- Flujo de Emergía en un bosque productivo de Piceas en Suiza. (Fuente: Modificado de Odum, 1996)**

En la Figura 3.12 se muestra el flujo de Emergía en la producción de una hectárea de bosque de Piceas en Suiza (Doherty et al., 1995 citado por Odum, 1996). El contenedor recibe y acumula la energía solar requerida para desarrollar el contenedor de madera (tronco). La energía solar almacenada es la que se requirió para hacer el contenedor, a pesar de la depreciación que ocurrió. La energía degradada que se fue por la ruta del calor no esta disponible para realizar trabajo, por lo tanto no tiene Emergía. La Emergía se acumula tanto como la energía se incrementa. A partir de esto se puede definir una

importante propiedad de la Emergía: “Cuando la energía almacenada es constante, su Emergía almacenada permanece constante”. (Odum, 1996)

También existe la posibilidad de encontrarse frente a un caso de almacenamiento comience a disminuir, que siguiendo con el ejemplo anterior, sería un bosque en declinación. En la Figura 3.12 se va a suponer que el proceso de producción es detenido. De ocurrir esto el almacenamiento disminuye y su proceso de depreciación continúa. La energía almacenada disminuye, y con esto, la emergía almacenada se pierde. En el ejemplo, cuando parte de la energía se pierde, parte de la Emergía se a perdido también. A partir de se pude establecer un segundo principio importante de la Emergía: “Cuando la energía almacenada comienza a disminuir, la emergía almacenada disminuye proporcionalmente”. (Odum, 1996)

### **3.3.3.1 La eficiencia energética**

Aunque a priori pudiera pensarse que “eficiencia energética” es un concepto autoexplicativo y que, por tanto, el alcance del mismo está claramente delimitado, la realidad muestra que se trata de un término polivalente, como lo demuestran las dificultades que encuentran los expertos para ponerse de acuerdo a la hora de establecer indicadores específicos de eficiencia energética (MINECO, 2003). Casi siempre se tiende a sobredimensionar la componente tecnológica de la eficiencia energética frente a otros elementos. Siendo importante, la componente tecnológica no es necesariamente la principal y sobre todo no siempre resulta la más afectada durante la puesta en marcha de cierto tipo de medidas. Por ello, parece oportuno delimitar en lo posible lo que se entiende como *eficiencia energética*.

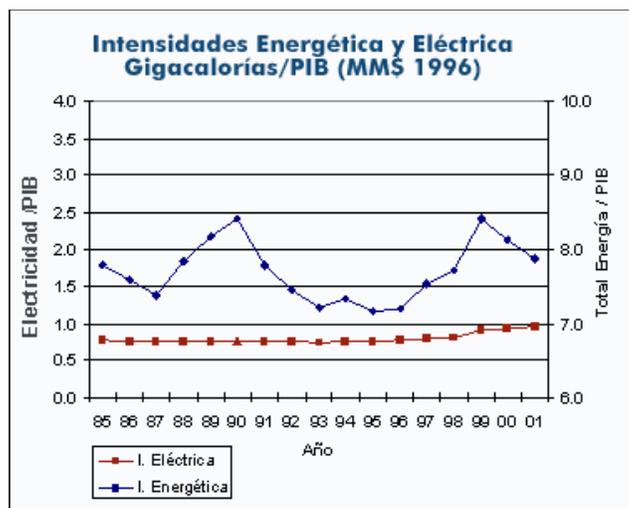
Por ejemplo, es común reconocer como medida de eficiencia energética el aislamiento de las viviendas, al mantener el nivel de confort con un ahorro de energía. Pero este ahorro energético que se produce a nivel individual no necesariamente se visualiza a nivel del conjunto de la comunidad. Un incremento en el número de viviendas construidas o un aumento de la demanda de confort (más electrodomésticos, aire acondicionado, etc.), pueden enmascarar las mejoras en la eficiencia energética alcanzadas a nivel individual. Esta acepción de la eficiencia energética, como componente tecnológica de la misma, puede visualizarse también en cualquier sector productivo. Un cambio en el proceso de

producción puede traducirse en la necesidad de una menor cantidad de energía por unidad de producción. Sin embargo, esta mejora puede ser contrarrestada por una mayor producción o por un desplazamiento hacia sectores energéticos más intensivos en energía, sin que se produzca una reducción en la demanda energética.

El concepto de eficiencia energética se puede explicar de las siguientes maneras: (Farre, 2004)

- Incorporación de variables sustentables para el desarrollo y el uso del sistema energético.
- Conjunto de acciones que llevan a consumir menos energía.
- Capacidad de alcanzar mayores beneficios finales con menos recursos y con el menor impacto sobre el medio ambiente.

Para aprovechar las oportunidades de eficiencia energética y de energías renovables es necesario realizar acciones en los puntos consumidores de energía, realizando una gestión particularizada para cada instalación de forma que se pueda optimizar las posibilidades de ahorro energético. Las prioridades energéticas de cada comunidad autónoma varían de acuerdo a su actividad y desarrollo económico, al impacto que el consumo de energía tiene en su economía y a los recursos energéticos de los que dispone. (AVEN, 2003)



**Gráfico 3.1.- Evolución de la Intensidad Energética y de la Intensidad Eléctrica, para el período 1985 - 2001. (CNE, 2002)**

Sin embargo, la manera de enfrentar el concepto de eficiencia energética puede variar mucho entre diferentes países y regiones entre países. En Chile los indicadores

globales más frecuentemente usados para reflejar las tendencias del uso de la energía son: la Intensidad Energética, que relaciona el consumo de energía a una variable macroeconómica (ej. : GigaCal / PIB o VA sectorial); el Consumo Energético Específico, que relaciona el consumo energético a un indicador de actividad medida en términos físicos (ej. : TeraCal / ton de acero); y finalmente, los Indicadores de Ahorro Energético que permiten reflejar, en términos absolutos, magnitudes de energía ahorrada. (CNE, 2002)

En el gráfico se aprecia que mientras la Intensidad Energética ha tenido fluctuaciones significativas durante el período de análisis, donde no se nota una clara tendencia ascendente o descendente, la Intensidad Eléctrica se ha mantenido constante hasta el año 1995, a partir del cual se aprecia un alza sostenida. En este período, el PIB creció a una tasa promedio anual de 6,4%, mientras que el consumo de energía aumentó al 6,5% y el consumo de electricidad a 7,9%. (CNE, 2002)

La evolución en los últimos años de la intensidad eléctrica, indica que se requiere cada vez más electricidad por unidad de PIB. Sin embargo, es necesario señalar las reservas con que debe ser utilizado un indicador global como éste, dado que no es posible obtener conclusiones sobre la evolución de la eficiencia energética. En efecto, cambios en la intensidad energética o eléctrica se pueden explicar por muchos factores tales como: cambios en la estructura productiva del país, modificaciones en la matriz energética, factores climáticos y cambios en la eficiencia energética, entre otros. (CNE, 2002)

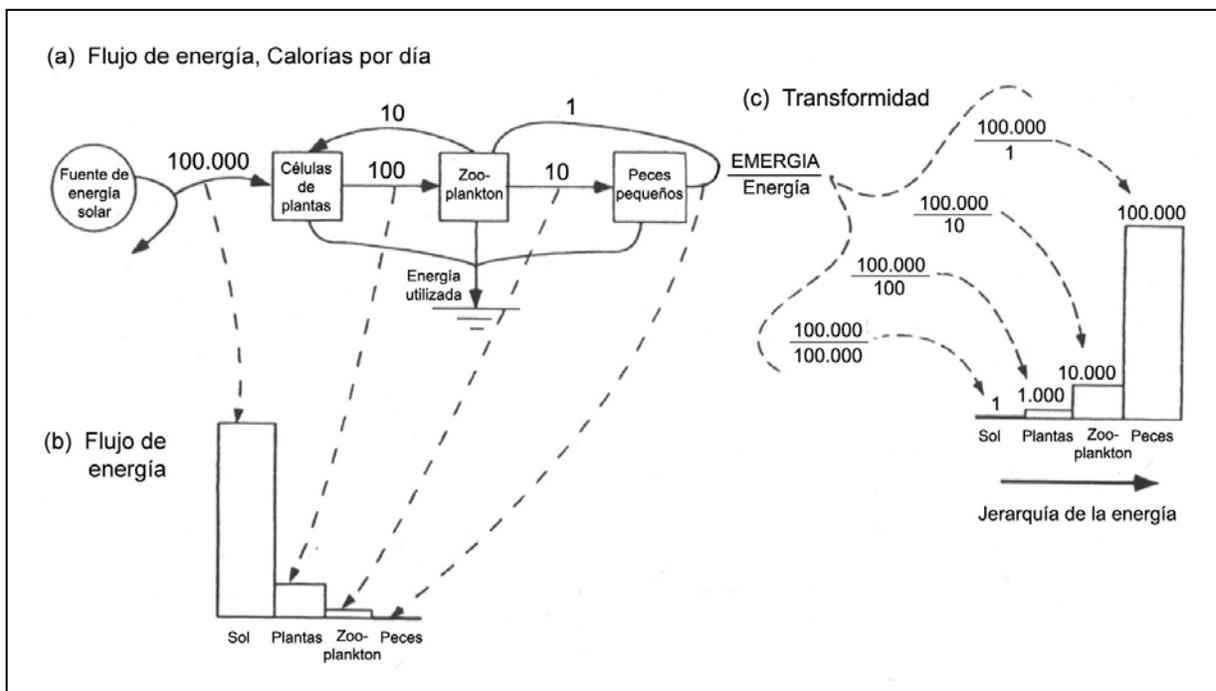
Como se puede notar en los párrafos anteriores, la eficiencia energética como concepto tradicional o implementado en las decisiones políticas, es función de la cantidad relativa de energía para generar una unidad de dinero. En el contexto de la evaluación energética de la eficiencia, se reconoce el hecho de que el dinero sólo está presente en una pequeña parte de la cadena productiva del ecosistema, por lo que no se puede pretender realizar una evaluación correcta de la eficiencia en el uso de la energía si no se están contabilizando todos los flujos de energía que en una economía ocurren.

### **3.3.3.2 La transformidad**

La energía de un producto dividida por su energía se define como su transformidad. La transformidad es la Energía por unidad de energía, expresada en emjoules/joule (Odum, 1996).

La transformidad es un factor de calidad de la energía que contabiliza los procesos convergentes de la biosfera requeridos para realizar algo, los cuales son expresados en unidades energéticas. Mientras mas transformaciones energéticas hayan ocurrido en la generación de un producto, mayor es la transformidad de dicho producto. Y este por lo tanto, ocupara un posición más alta en la jerarquía energética (Odum, 1996). De esta forma, la transformidad puede ser utilizada como una tasa de la escala de la energía, en la cual se indica la calidad de la energía y su posición jerárquica (Odum, 1988 citado por Haden, 2003).

La transformidad es un indicador de las contribuciones de ecosistemas pasados que se han combinado para generar un recurso. A su vez, representa el efecto potencial en el sistema que tiene el uso de los recursos de los ecosistemas en cuestión (Brown & Ulgiati, 1997 citado por Haden, 2003).



**Figura 3.13.- Propiedades de una transformación de energía. (a) Diagrama del sistema energético de la cadena alimenticia de un ecosistema acuático. (b) Gráfico que muestra la disminución de energía en cada transformación. (c) Incremento en la transformidad en cada transformación sucesiva.**

(Fuente: Modificado de Odum, 2001)

En contraste con otras formas de análisis energético que sólo miran los flujos de calor equivalente de un proceso, el análisis emergético, mediante el uso de transformidades, muestra el efecto de los inputs del sistema con respecto al tiempo, espacio y energía

necesaria para generar dichos inputs. Lo anterior es un acercamiento a las fuerzas que conducen los procesos de auto organización en un sistema dado. La precisión de las transformidades, y por lo tanto de los análisis emergéticos, depende de la información científica que se encuentra disponible y actualizada. Dado que la el estado del conocimiento científico es un flujo constante, los cálculos de las transformidades deben ser continuamente revisadas (Haden, 2003)

No existe una única transformidad para cada producto o servicio. Generalmente existe un rango de transformidades que van desde la cantidad mínima de energía requerida para realizar algo y un límite teórico máximo (Brown & Ulgiati, 1999 citado por Haden, 2003). Un input con una elevada transformidad contribuye menos energía a un proceso que un input con una transformidad baja, pero la contribución total de energía de las dos fuentes deberían ser similares cuando se ajustan a las calidades de la energía utilizando transformidades. La energía de un tipo necesaria para generar una unidad de energía de otro tipo es la transformidad.

Ya que la energía terrestre se basa en la energía solar, las transformidades siempre harán referencia a las calorías de la energía solar requeridas directa e indirectamente para hacer una caloría de producto o servicio.

Por ejemplo, en la Figura 3.13, 100.000 calorías de energía solar son transformadas para hacer 100 calorías de energía contenida en plantas. La transformidad solar para la producción de estas plantas es :

$100.000 \text{ calorías solares} / 100 \text{ calorías de plantas} = 1.000 \text{ calorías emergéticas solares por caloría de planta.}$

“La transformidad solar es la Energía requerida para hacer un joule de un producto o servicio” (Odum, 1996). Sus unidades son emjoules solares por joule (sej/J). El producto de la transformidad es su Energía solar dividida por su energía.

Debido a que se requiere más energía para hacer elementos que están hacia la derecha en la Figura 3.13, se dice que estos productos son de una mayor calidad. Elementos que se encuentran a la derecha son más escasos y por lo tanto tienen un mayor valor. La transformidad se incrementa hacia la derecha y es un medida de la calidad de la energía.

Elementos de alta transformidad son más valiosos y pueden hacer mas cosas, ya que pueden ser transportados más fácilmente con un gran efecto por unidad. Por ejemplo,

se requieren de cuatro calorías de carbón para generar una caloría de potencia eléctrica, es decir, la electricidad tiene una elevada transformidad. La potencia eléctrica es una energía de alta calidad, es más flexible en la cantidad de usos que se le pueden dar, y es más fácil de transportar que el carbón. Los trenza eléctricos son más eficientes que los trenes impulsados a carbón.

Las transformidades entregan un principio general; “No se deben usar productos de alta calidad para propósitos de baja calidad” (Odum, 2001). Por ejemplo, no se debería usar la electricidad para calentar una casa si leña en una chimenea sirve para lo mismo. Usando la electricidad se desperdicia la energía que ha sido utilizada previamente para transformar el combustible ordinario en electricidad. Es lo mismo en el caso de un trabajador especializado que a invertido en educación. No debiera trabajar en ocupaciones que no requieren un entrenamiento especial. El hacerlo desperdicia el trabajo realizado en entrenarse.

### **3.3.3.3 Relación entre la energía y la transformidad en los sistemas terrestres**

En la Figura 3.14 se muestra la jerarquía básica de la energía en la tierra mediante un gráfico que relaciona la cantidad de energía utilizada como función de la calidad de la energía, que ha sido medida en términos de transformidad. Ya que la energía disponible ha tenido que ser degradada (es decir su disponibilidad ha sido utilizada) en cada transformación, mientras más transformaciones se requieren para generar elementos de alta calidad hacia la derecha, menos energía queda. Sin embargo, la energía convertida tienen una elevada transformidad. Por ejemplo, la energía calórica disponible en grandes áreas de la tierra es utilizada y dispersada por procesos que concentran y transforman una pequeña cantidad de esta energía en una montaña construida por volcanes. Respecto a todas las capas geológicas que existen a lo largo de toda la tierra, la energía volcánica es pequeña, pero su transformidad es grande y tienen un gran impacto en la organización de el sistema terrestre.

Debido a la gran cantidad de recursos que utilizan y los largos períodos de tiempo en los que operan, los elementos de la derecha que tienen una alta transformidad pueden controlar e influenciar las escalas más pequeñas que están hacia la izquierda Figura 3.14. Sin embargo, los elementos no deberían tener una interacción e influencia efectivos en

aquellas escalas que están a más de un paso, ya sea respecto a las escalas más pequeñas o más grandes.

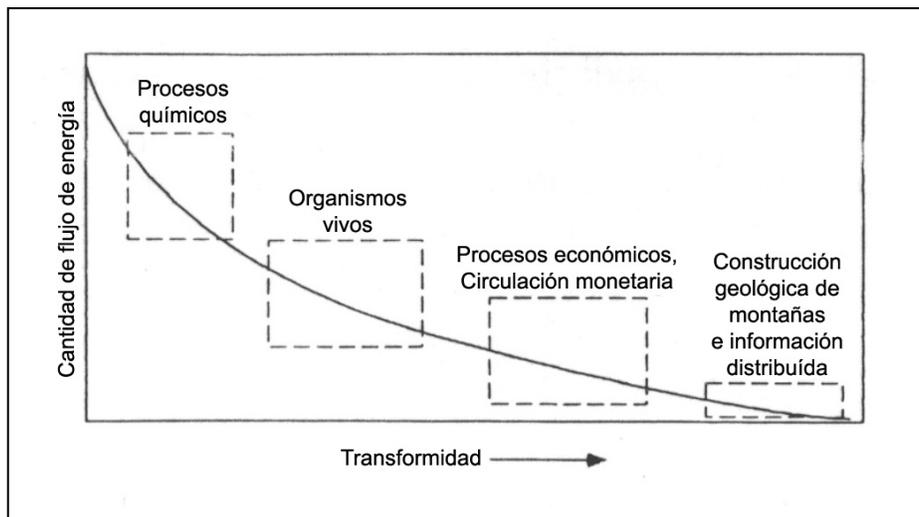


Figura 3.14.- La cantidad de energía en cada nivel depende del soporte del nivel anterior. (Fuente: Modificado de Odum, 2001)

Los peces grandes controlan a los peces pequeños pero afectan al plankton solo de manera indirecta. Los peces grandes en cambio, son controlados por el próximo nivel de tamaño, carnívoros tales como focas y barcos pesqueros.

### 3.3.4 EmPower (Potencia emergética)

El sol es la fuente primaria de energía que potencia el trabajo de los procesos de la biosfera. Esta fuente primaria va acompañada de importantes contribuciones de la fuerza gravitacional de la Luna y del calor de las profundidades de la tierra. Todas las otras fuentes de energía deben ser obtenidas desde almacenamientos que la biosfera a generado previamente. La potencia se define como la energía útil por unidad de tiempo, y la potencia emergética (Empower) se define como el flujo de emergía por unidad de tiempo (Odum, 1996). Trabajo, en una definición más sencilla, equivale a los procesos de transformación de energía (Odum, 1996). Como el trabajo requiere de una fuente de energía usable, la cantidad de trabajo que puede desarrollar un sistema esta regido por la potencia (energía por unidad de tiempo) disponible para ese sistema. El análisis emergético, que cuantifica la energía utilizada en los procesos de transformación necesarios para crear un producto o

servicio, es una medida del trabajo previamente desarrollado para generar un bien o servicio.

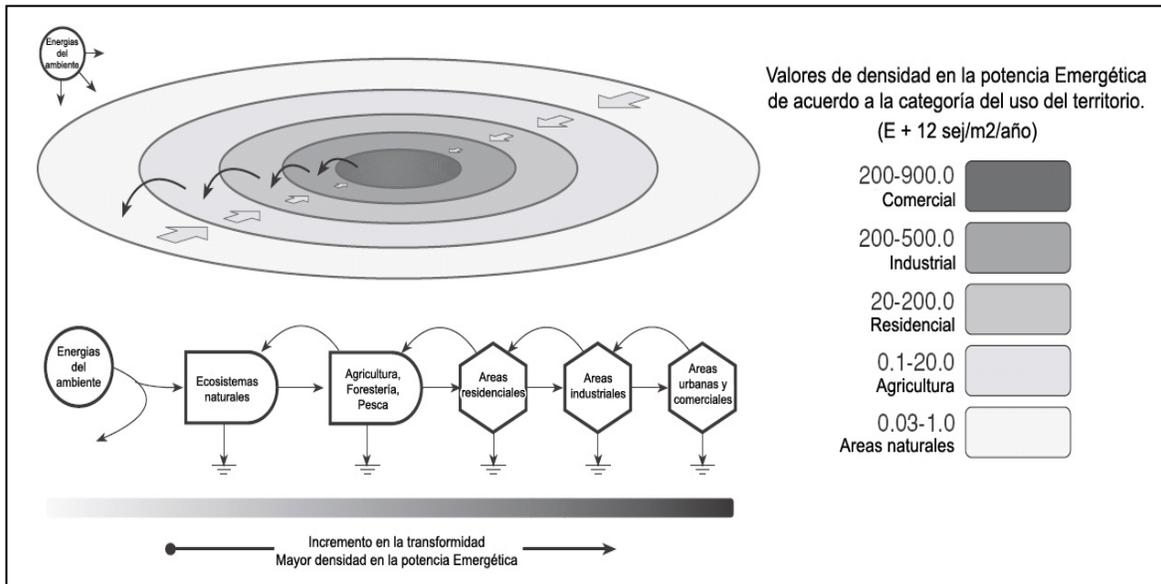
Algunos sistemas pueden utilizar en sus procesos, cantidades de combustibles que exceden sus requerimientos, por lo que se considera que tienen una tasa neta de cosecha de energía. Los almacenamientos de energía producto del trabajo previamente desarrollado por el medioambiente, como es el caso de combustibles que son fáciles de extraer y utilizar, tales como los hidrocarburos fósiles, pueden potenciar una gran cantidad de procesos además del que implica el acceder a dicha energía almacenada.

Al aproximarse a la agricultura y otros procesos productivos que se inician con la energía del sol, se debe notar que hay un límite termodinámico en la habilidad de ese sistema para proveer el exceso de potencia respecto de la energía invertida en dichos procesos.

### **3.3.5 Densidad de la potencia emergética y jerarquía energética del uso de la tierra.**

La perspectiva emergética del uso de la tierra ofrece una explicación de la evolución del territorio de una región determinada, utilizando como patrones el cambio en la densidad de energía y materiales utilizados en el área en cuestión. La cantidad de flujos de energía en un espacio y tiempo determinado se denomina “densidad de la potencia emergética” (Odum, 1996). Debido a que las áreas urbanas se caracterizan por la convergencia de flujos de energía (Odum, 1996), presentan una alta densidad de potencia emergética (Huang et al., 2001 citado por Haden, 2003). Debido a que todos los sistemas desarrollan jerarquías energéticas de acuerdo a como la energía es disipada y como los materiales son concentrados (Odum, 1988 citado por Haden, 2003), los sistemas agrícolas y urbanos, que transforman y utilizan formas características de energía con diferentes niveles de concentración, pertenecen a diferentes niveles de la jerarquía energética (Haden, 2003). Los sistemas urbanos, que incluyen la industria, negocios comerciales y desarrollo residencial de alta densidad, mantienen sectores de la economía que pertenecen a una zona más alta en la jerarquía de la transformación de la energía que actividades económicas características de áreas rurales tales como agricultura, pesca, forestería y minería. La Figura

3.15 muestra los patrones energéticos jerárquicos básicos del uso de la tierra que caracteriza a las sociedades modernas.



**Figura 3.15.- Densidad en la potencia emergética y jerarquía energética en el uso del territorio.**  
(Fuente: Modificado de Haden, 2003)

En esta Figura los ecosistemas agrícolas y naturales son representados mediante el símbolo de productor, mientras que las áreas residenciales e industriales y los centros comercial se representan mediante el símbolo de consumidor. Este es un diagrama simplificado que muestra como ecosistemas hechos por el hombre y ecosistemas naturales forman la base de los flujos de recursos naturales de la sociedad moderna. El proceso comienza con la recolección y canalización de alimentos, energía y materiales hacia la sociedad urbana, en donde son transformados en los productos en los cuales la sociedad de consumo se basa (Haden, 2003). De acuerdo con la teoría emergética, las flechas que divergen desde los centros del diagrama indican como los sistemas urbanos pueden ejercer una influencia controladora y dictar parcialmente la organización de los sistemas agrícolas mediante la retroalimentación de información, la cual se materializa en forma de políticas de manejo de los recursos territoriales así como simplemente la demanda del mercado (Odum, 1996).

### **3.3.6 Teoría emergética del valor**

El valor emergético de un producto no es la energía que contiene el producto, sino la cantidad de energía que ha sido usada en la creación del producto. También hace referencia a la memoria de la energía que ha sido disipada en los procesos de transformación (Odum, 1996). La producción en los sistemas ecológicos y económicos están basados en el producto de dos o más inputs necesarios (Odum, 1996). Al igual que los análisis de costo beneficio, el análisis emergético es un proceso de evaluación. Sin embargo, a diferencia del análisis costo beneficio, que considera la naturaleza como una externalidad, el análisis emergético es una medida del valor del trabajo desarrollado por humanos y naturaleza usando como base común la energía (Haden, 2003). Dado que esta metodología evalúa procesos que están fuera de la economía monetaria, el análisis emergético elimina muchos de los problemas inherentes a la valoración monetaria (Brown & Herendeen, 1996 citado por Haden, 2003).

En contraste con la valoración económica tradicional, en la cual se asigna valor de acuerdo a la utilidad, disponibilidad a pagar y demanda, la valoración emergética se basa en que mientras más energía, tiempo y materiales se invierten en algo, mayor es su valor (Odum, 1996). La teoría emergética del valor establece que mientras mas trabajo o energía disipada haya ocurrido previo al producto o servicio desarrollado, más grande es su valor. Debido a que el trabajo es fundamentalmente un proceso de transformación de energía, en el análisis emergético, el valor es considerado como un resultado del trabajo (Odum, 1996).

### **3.3.7 Tendencia emergética**

Muchos centros urbanos siguen creciendo en sus niveles de consumo de información y energía, mientras que la disponibilidad de los recursos que los mantienen a comenzado a decrecer. El desarrollo de las últimas dos centurias a tenido una tendencia de ascenso en la jerarquía energética (Odum, 2001). La Figura 3.16 representa la tendencia de la potencia emergética relativa en cada etapa. Primera había una predominancia de la agricultura, después el uso de combustibles y materiales en la revolución industrial, luego una explosión en el crecimiento de la población, posteriormente una concentración de energía en las ciudades y finalmente, una alta emergía en la repartición de información

alrededor del mundo. La tendencia parece mostrar una generación de población e información que no se puede mantener.

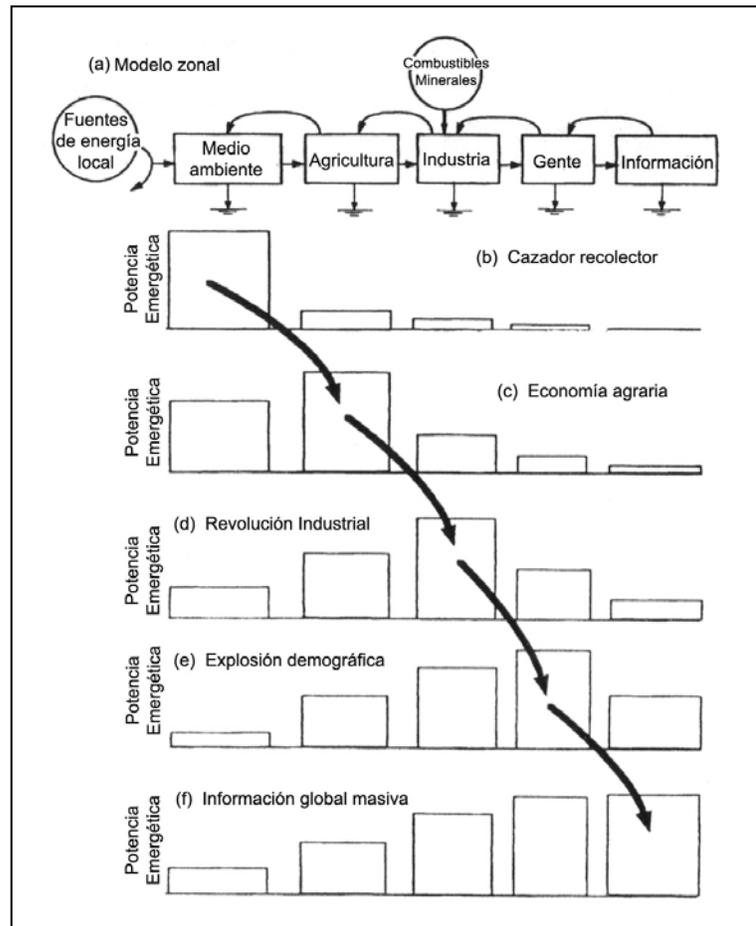


Figura 3.16.- Distribución zonal de la potencia Emergética en cinco etapas de la historia del desarrollo humano. (Fuente: Modificado de Odum, 2001)

### 3.3.8 Conceptos principales asociados al análisis emergético

-Energía disponible: Energía que tiene el potencial para realizar trabajo.

Si una persona tiene una cocina a leña, puede cocinar en ella porque la madera tiene un potencial que está contenido. Después de cocinar, la misma cantidad de energía existe en forma de calor liberada a la atmósfera, pero el leño ya no puede ser usado de nuevo para generar calor. La energía debe estar en forma disponible o usable para los humanos.

-Transformidad: Es la energía de un tipo requerida para hacer una unidad de energía de otro tipo. Por ejemplo tres emjoulles de carbón y un emjoule de servicios se requieren para generar un joule de electricidad, por lo tanto la transformidad desde carbón a electricidad es de cuatro emjoulles / joule.

-Emergía: Toda la energía disponible que ha sido usada para hacer un producto o servicio, expresada en unidades de un tipo de energía. Cuando se tienen las transformidades utilizadas se puede calcular cuanta energía es equivalente a otra energía. Sumando cada energía de un tipo utilizada directa o indirectamente en crear u producto o servicio, transformada a una unidad de energía común (Ej: emjoules), se obtiene el valor total del proceso; la emergía.

-Emergía neta: Es la emergía cosechada desde un recurso, luego de que toda la emergía usada en el proceso en cuestión haya sido utilizada.

--Transformidad solar: Emergía solar por unidad de energía, expresada en emjoules solares por joule. Como los rayos solares son la gran y única forma de energía que llega continuamente desde fuera de la tierra, la idea es calcular la emergía usada en términos de la energía solar. Las únicas energías que afectan al ecosistema terrestre y que no se relacionan con la energía solar son el resultado de la interacción de las masas entre la tierra y la luna, la energía que esta contenida al centro de la tierra y que genera terremotos , erupciones volcánicas y el movimiento de los continentes.

### **3.4 Sustentabilidad**

Sustentabilidad es un concepto simultáneamente penetrante y elusivo. Penetrante en el sentido que es una de las mayores fuerzas que están detrás de una considerable cantidad de investigaciones, que reciben una creciente inversión desde la sociedad a través de las agencias y programas de los gobiernos y es un tema que se incluye en muchos tratados internacionales desde la creación del Reporte de la Comisión Brundtland (UNWCED, 1987). El concepto permanece elusivo debido a que es difícil de definir y se presenta como una estrategia difícil de implementar (Haden, 2003).

#### **3.4.1 Sustentabilidad de qué y para quién**

La definiciones de sustentabilidad deben responder a las preguntas fundamentales de “sustentabilidad de que y para quién, de lo contrario no tendrán relevancia (Haden, 2003). Cualquier definición de sustentabilidad debe incluir el factor tiempo. La cuantificación de los patrones de sustentabilidad o insustentabilidad tienen sus raíces en los

modelos del sistema mundial preparados por Meadows y Forrester en el Club de Roma a los comienzos de los años setenta. Estos modelos parten con la discusión de los límites del crecimiento de la sociedad humana, con un énfasis en el crecimiento de la población, crecimiento económico y en el consumo total de energía y materiales por la sociedad humana (Meadows et al., 1972). Además del análisis emergético, han surgido un gran número de herramientas y métodos que permiten realizar investigaciones sobre el consumo de los recursos y generar reportes del efecto en las sociedades humanas del consumo de los recursos en cuestión.

### **3.4.2 Sustentabilidad: desarrollo del concepto y definiciones**

La palabra sustentable ha sido utilizada por muchas disciplinas y por lo tanto se ha definido de muchas maneras diferentes. Sin embargo a partir de la época de los años 70 (Meadows et al., 1972), la palabra es utilizada para referirse a un manejo apropiado de los recursos naturales, de tal manera de permitir a las próximas generaciones el acceso a los recursos que se utilizan o no en la actualidad.

Aunque el fenómeno de desarrollo es complejo, contradictorio y multifacético, el mismo suele ser concebido y estudiado, mayormente, en su dimensión cuantitativa, como crecimiento económico, despojado de sus aspectos cualitativos (Cuello C., P. Durbin, 1993). La introducción en años recientes de la noción de desarrollo sostenible ha servido para ayudar a restablecer la complejidad y el balance en las discusiones sobre el desarrollo. Pero el propio desarrollo sostenible es objeto a su vez de interpretaciones diferentes y en ocasiones conflictivas.

A partir del reporte “Nuestro Futuro Común” (1987) de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas (UNWCED), se hizo conocida la frase "desarrollo sostenible". El reporte define el desarrollo sostenible como "aquel desarrollo que satisface las necesidades de las presentes generaciones sin comprometer la habilidad de las futuras para satisfacer sus propias necesidades". A esta definición se le suele llamar “Brundtland” en honor a la redactora del concepto que lleva el mismo apellido. La intención fue elaborar una definición práctica, que condujera a "cambios en el acceso a los recursos y en la distribución de costos y beneficios" (UNWCED, 1987).

En este reporte aparece también la siguiente declaración: "Los estándares de vida que sobrepasan los niveles básicos son sostenibles solamente si por doquier los estándares de consumo toman en cuenta la sostenibilidad a largo plazo. Empero, muchos de nosotros vivimos por encima de los medios ecológicos mundiales, por ejemplo, en nuestros patrones de uso de energía" (UNWCED, 1987).

Un aspecto importante de la perspectiva de este reporte es que "liga el desarrollo sostenible a la inclusión de las futuras generaciones en el cálculo de los costos del desarrollo económico del presente" (Cuello C., P. Durbin, 1993).

Aún así, el reporte se centra en estrategias prácticas para un crecimiento renovado; para satisfacer las necesidades esenciales (alimentación, agua, energía, trabajo, servicios sanitarios); para controlar el crecimiento poblacional; para sustentar, y si es posible acrecentar los recursos básicos; para reorientar las tecnologías y manejar los riesgos asociados a ellas; y, para incluir las preocupaciones por el medio ambiente dentro de los cálculos económicos. Se reconoce que la implementación de tales estrategias requeriría de cambios en las estructuras económicas, sociales y políticas tanto en los límites de cada nación individual como a nivel internacional.

De acuerdo al trabajo de Bojo et al (1992), la definición Brundtland puede ser interpretada como si demandara "que todas las opciones fueran preservadas, lo que implicaría la preservación de todo género de recursos" (Bojo et al, 1992). Esto podría incluso conducir a la conclusión de que ni el petróleo, el hierro, o cualquier otro recurso agotable sea usado; de que todos los recursos deben ser preservados para las futuras generaciones. Para evadir cualquier implicación extrema de este tipo, desarrollan una definición operativa del concepto de sostenibilidad, que permita la sustitución de unos recursos por otros. De esta manera se tienen las siguientes definiciones de sustentabilidad:

"El desarrollo económico en un área específica (región, nación, el globo) es sostenible si la reserva total de recursos - capital humano, capital físico reproductivo, recursos ambientales, recursos agotables - no decrece con el tiempo" (Bojo et al, 1992).

"Si el capital físico o humano puede ser sostenido para un recurso ambiental, entonces, dicho recurso puede ser explotado de tal manera que el mismo sea drásticamente reducido si, y sólo si, las inversiones en las reservas de capital humano y físico son tales que la base total de recursos no sea reducida" (Bojo et al, 1992).

También existen visiones del desarrollo que se basan en que el desarrollo sostenible es inviable bajo el actual sistema de mercado. "A menos que los pobres sean incluidos en la satisfacción de sus propias aspiraciones, el desarrollo no podrá nunca ser apropiadamente sostenible" (Redclift, 1987). Esto hace recordar de nuevo uno de los aspectos centrales de la definición del Reporte Brundtland, que al referirse a las necesidades dice: "Se debe dar prioridad especial al concepto de necesidad, en particular, a las necesidades esenciales de los pobres del mundo" (UNWCED, 1987). Este autor ataca el abuso en el uso del concepto de sostenibilidad y argumenta que "La constante referencia a la sostenibilidad como un objeto deseable, ha servido en ocasiones para oscurecer las contradicciones que el desarrollo implica para el medio ambiente" (Redclift, 1987). De acuerdo a sus ideas, este autor desarrolla la idea que se requiere de un análisis de la interrelación del desarrollo y el medio ambiente. Y tal análisis, va a revelar las limitaciones de aquellos enfoques que el desarrollo exclusivamente en términos de crecimiento económico. Las culturas no afectadas por esta concepción, probablemente entenderían el desarrollo sostenible de manera muy diferente. El análisis histórico muestra que los contactos internacionales casi siempre han significado exportación de capitales y recursos naturales, a menudo a expensas del trabajo local. Hay un consistente "proceso histórico que vincula la explotación de los recursos por parte de las naciones más industrializadas con la explotación de los recursos de los países del Sur" (Redclift, 1987). Además, se requiere de un enfoque político-económico de acuerdo al cual, "el desenvolvimiento de las fuerzas económicas está definitivamente vinculado al comportamiento de las clases sociales y al rol del Estado" en favor de la explotación (Redclift, 1987).

El argumento de este autor con respecto al desarrollo sostenible es que las actuales tendencias del desarrollo no pueden continuar sino a costa de niveles de daños ambientales inaceptables. En el caso de los llamados países en desarrollo, el desarrollo siempre tiene lugar en el contexto de la economía internacional. Sin embargo, una economía globalizada ignora las diferencias específicas entre los objetivos ambientales de los países desarrollados y los subdesarrollados. En los países en desarrollo, el auténtico desarrollo sostenible presupone que la productividad económica puede ser mantenida en medio de frecuentes disturbios del sistema, y que el impacto del crecimiento poblacional -especialmente de las necesidades básicas de una población creciente- tiene que ser tomado en consideración.

“El crecimiento industrial necesita ser reorientado hacia la satisfacción de las necesidades de las mayorías mundiales; los recursos energéticos renovables necesitan recibir mayor atención; los recursos naturales y las políticas necesitan ser trasladadas del reino de las armas hacia la protección de los sistemas de recursos biológicos y agronómicos” (Redclift, 1987).

“El desarrollo sostenible, si no ha de ser despojado de contenido analítico, significa algo más que la concertación del compromiso entre el ambiente natural y la búsqueda del crecimiento económico. Esto significa una definición del desarrollo que reconozca que los límites de la sostenibilidad tienen origen tanto estructurales como naturales” (Redclift, 1987:199).

En el trabajo de Carpenter, 1991 (citado por Cuello C.,1993) se critica el Reporte Brundtland por no distanciarse adecuadamente de la teoría económica neo-clásica: "El vínculo de la economía y la ecología perpetúa sistemas insostenibles" de desarrollo. Y él no acepta la relación a la tesis de la sustitución de recursos planteada por los que han intentado cuantificar u operacionalizar la definición de la sostenibilidad del Reporte Brundtland. De acuerdo a este autor, las "tecnología aceptadas por los modelos económicos existentes, incluyendo los modelos alegadamente sostenibles, no sólo son incompatibles con las preocupaciones ecológicas, sino que le son hostiles" (Carpenter, 1991 citado por Cuello C.,1993).

En su libro se hace referencia a las nuevas virtudes del modelo económico de Mark Sagoff como una alternativa al modelo estándar . Según este último autor, los modelos económicos anteriores han usado como estándares la sociedad ideal, la cual ve como el enemigo a la sociedad buena. De acuerdo a su visión, la economía es un asunto de conducta humana cooperativa, incluyendo la cooperación para preservar y conservar los recursos naturales, para proteger la naturaleza en sí misma, no como un recurso, sino como la matriz común de la cual viven, como parte de la naturaleza, los seres humanos (Sagoff, 1988 citado por Cuello C.,1993).

Por otra parte, Vandana Shiva (citado por Cuello C.,1993), sostiene una concepción del desarrollo sostenido en la cual la vida humana es sólo una parte de la vida como sistema total. Ella apela a la "antigua idea sobre la interrelación entre los humanos y la naturaleza de que la tierra le ha sido concedida como un don a los humanos, a quienes a su vez se les

aconseja hacer esfuerzos a fin de no sofocar su generosidad" (Shiva, 1992 citado por Cuello C.,1993).

Esta autora critica los actuales modelos económicos, incluyendo los que aseguran que la sostenibilidad se puede mantener a través de la substitución de recursos diciendo: "Esto se refiere a sostener no la naturaleza, sino el desarrollo como tal. La sostenibilidad en este contexto no incluye el reconocimiento de los límites de la naturaleza y la necesidad de someterse a ellos" (Shiva, 1992 citado por Cuello C.,1993).

En definitiva,"La sostenibilidad en la naturaleza implica mantener la integridad de los procesos, ciclos y ritmos de la naturaleza" (Shiva, 1992 citado por Cuello C.,1993).

### **3.4.3 Disponibilidad de recursos energéticos**

Debido a que la economía es un sistema abierto que disipa energía y materiales para mantenerse o crecer, su sustentabilidad depende de la disponibilidad de energías y materiales que consume. Si la sociedad genera estructuras que requieren grandes flujos de energía provenientes de recursos naturales y grandes almacenamientos de energía fósil, y las concentraciones de estos recursos son consumidos y agotados, entonces la sociedad deberá prescindir de estas estructuras o enfrentará forzosamente una declinación (Odum, 2001). De esta manera, la sustentabilidad o insustentabilidad de las sociedades modernas estará dada por cuanto dependen de las estructuras consumidoras de recursos naturales no renovables. El patrón de sustentabilidad en términos generales, estará dado por aquellas sociedades que funcionen bajo un consumo de energías y materiales renovables (Haden, 2003).

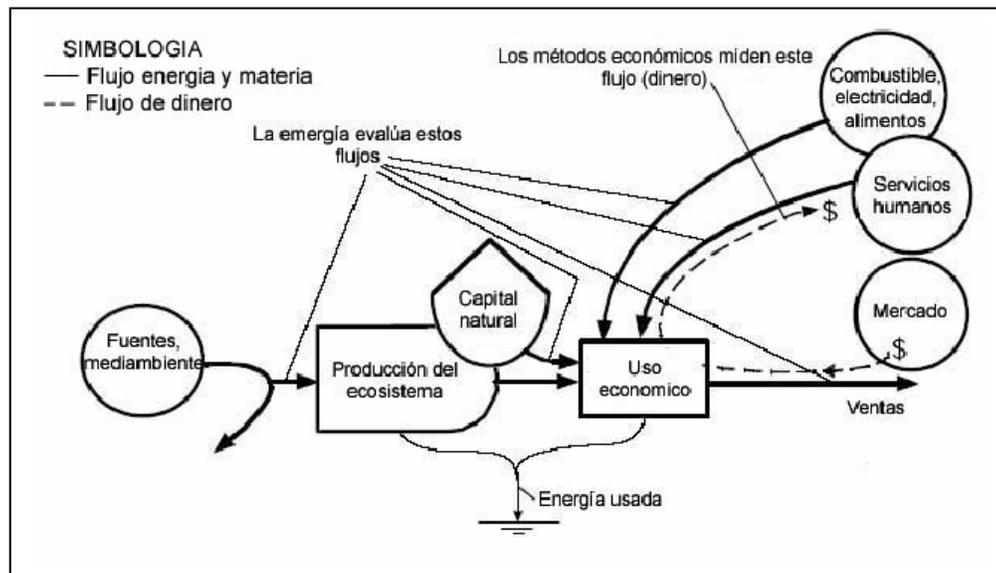
### **3.4.4 Uso sustentable de los recursos naturales**

Durante mucho tiempo se han ignorado las variables medioambientales como factores productivos de bienes y servicios. Sin embargo, hoy en día existe una gran cantidad de información, generada por profesionales de diversas disciplinas y países, respecto al funcionamiento de los sistemas de la superficie terrestre, llamados ecosistemas.

Si se define sustentabilidad como un estado del sistema en el cual la tasa de consumo de los recursos es igual o inferior a la tasa con que se regeneran los recursos utilizados, sea cual sea el proceso de regeneración, entonces el dinero aparece como el primer candidato para evaluar como se comportan los flujos de consumo respecto a los

flujos de regeneración, entendiendo como regeneración al proceso en el cual un objeto vuelve a un estado anterior ( $T_0 - A$ ), donde A es el tiempo en que demora el objeto en llegar al estado en el cual fue utilizado ( $T_0$ ). Por lo tanto, los recursos pueden ser utilizados continuamente por la sociedad en el largo plazo si el nivel de uso y diseño del sistema demandante permiten que los recursos sean renovados por procesos naturales o humanos (Ej: reciclaje plástico)

El análisis emergético es un método de análisis en el cual el dinero es solo una manera de expresar un tipo de flujo del sistema analizado. Como se puede apreciar en la Figura 3.17, el análisis emergético permite visualizar una mayor cantidad de flujos, con los cuales se pueden realizar análisis más completos respecto a la sustentabilidad del sistema. Además, se basa en la medición de flujos de energía, que en el largo plazo resultan más útil que medir flujos de materiales. Lo anterior se debe a que la materia, a diferencia de la energía y poniendo como límite superior para el análisis de sustentabilidad la atmósfera terrestre, al cambiar de estado queda disponible. Una ejemplificación de esto puede ser el ciclo de materiales de un bosque natural en el cual la materia del suelo pasa a ser parte del árbol, y cuando este se degrada, la materia pasa a ser parte del suelo (aunque en un estado diferente). La energía en cambio, llega desde el sol y se esparce en el universo en forma de entropía (calor). El bosque, siguiendo el ejemplo anterior, no recupera la energía utilizada, sino que necesitará de una fuente constante de energía fluyendo hacia su sistema. Por lo tanto, un sistema será sustentable en la medida que las fuentes de energía que le aportan los flujos necesarios para su permanencia perduren a través del tiempo, o bien, un sistema será sustentable si es capaz de adaptarse a las fuentes de energía disponibles y a reemplazar dichas fuentes de energía por otras en caso de que las fuentes originales de energía dejen de estar disponibles. Se entenderá por lo tanto, que la escala humana con respecto a los recursos naturales está dada por la tasa de consumo de los recursos de la fuente con respecto a la tasa con que la fuente genera el recurso. De esta manera, por ejemplo, la extracción de recursos minerales tiende a ser insustentable, ya que es una actividad que se basa en productos no renovables. Sin embargo, la sustentabilidad de dicha actividad estará determinada por la disponibilidad de la energía necesaria para realizar los procesos de extracción, transformación y reciclaje del mineral, además del aumento de la tasa de extracción del mineral.



**Figura 3.17.- Diagrama del sistema terrestre agregado. Como se puede apreciar en la figura, el dinero valora solo una pequeña parte del total de los flujos que permiten el funcionamiento del ecosistema. (Modificado de Odum, 1996)**

La sustentabilidad de una economía, en términos energéticos, es una función de la dependencia de esta economía de energía renovable, el grado de cuanto depende la economía de la energía importada, y la sobrecarga que la actividad económica genera en el ambiente (Brown & Ulgiati, 1997). Para procesos de pequeña escala y subsistemas económicos, tales como la agricultura, la sustentabilidad se considera como una función de la energía cosechada por los procesos que rodean la economía, el grado en cuanto los procesos dependen de flujos de energía renovable, y la sobrecarga que la actividad económica genera en el ambiente (Brown & Ulgiati, 1997).

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

Cualquier metodología para la evaluación de la sustentabilidad ecológica debe permitir un buen conocimiento a través de pequeñas y grandes escalas espaciales y temporales, las cuales se requieren para lograr una equidad intergeneracional de manera más precisa (Haden, 2003). Aunque aún no se han desarrollado herramientas capaces de predecir las consecuencias ambientales a partir de decisiones económicas, cada vez aparecen más metodologías (Haden, 2003), y el análisis emergético es una de estas herramientas.

Los materiales utilizados en esta investigación corresponden principalmente al uso de programas computacionales. Se utilizaron los programas Microsoft Excel 2000, Microsoft Visio 2000, Microsoft World 2000, ArcView 3.2, Adobe Photoshop 7.0

### 4.1 Procedimiento para la evaluación emergética

Odum (1996) entrega una explicación detallada de la aplicación de los procedimientos para realizar una contabilidad emergética para una gran variedad de sistemas. La siguiente Figura (4.1) esquematiza las etapas necesarias para lograr una evaluación emergética.

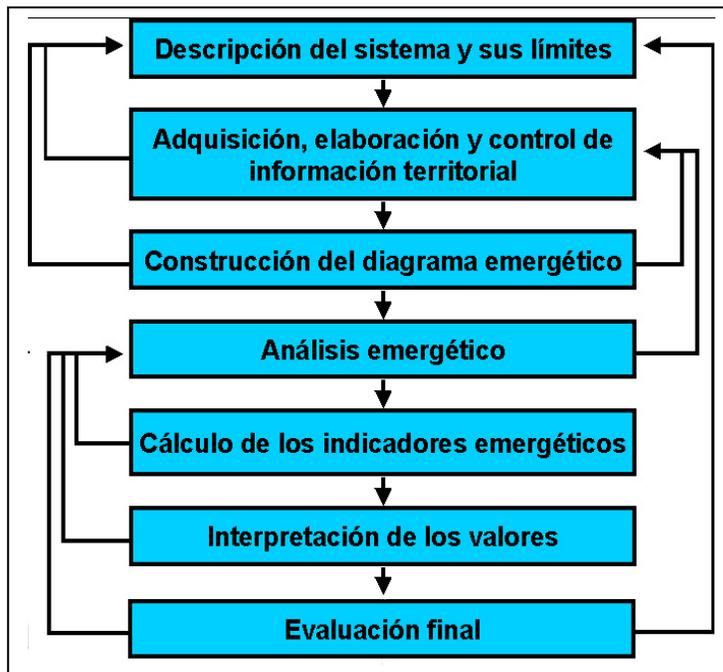


Figura 4.1.- Etapas en la realización de una análisis emergético. (Modificado de Tiezzi et al, 2002)

### 4.1.1 Diagramas de sistemas energéticos

La base de una evaluación emergética de un sistema de producción o económico dado es el análisis de los flujos de materia y energía, en los cuales los flujos se ajustan de acuerdo a su calidad de energía utilizando transformidades. El límite para el sistema estudiado es definido por el evaluador y es este marco el que determinara lo que considerará como un recurso propio del sistema, y cuales serán los flujos de entrada y de salida del sistema en estudio. Un diagrama de sistema energético se dibuja utilizando los símbolos del lenguaje de energía de los sistemas ecológicos (Odum, 1996, 2001) para representar gráficamente los componentes ecológicos – energéticos, el sector económico, recursos utilizados y la circulación de dinero a través del sistema. En las Figuras 4.2 y 4.3 se muestran y describen los símbolos utilizados en los diagramas energéticos.

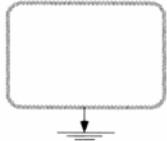
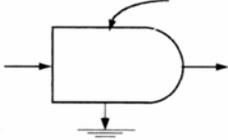
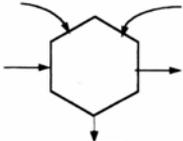
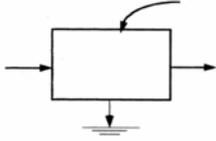
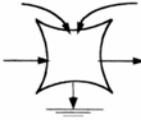
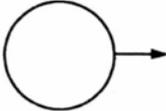
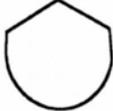
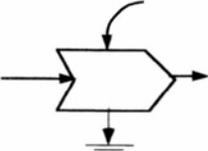
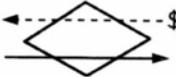
<u>Símbolo</u>	<u>Significado</u>
	Marco: Límite del sistema analizado
	Productor: Unidad que colecta y transforma energía de baja calidad bajo la interacción de inputs de alta calidad.
	Consumidor: Unidad que transforma la calidad de la energía, la almacena y aumenta el influjo autocatalíticamente.
	Caja negra: Unidad que representa cualquier proceso, sin explicar su funcionamiento y que funciona de acuerdo a uno o más inputs.
	Interruptor: Símbolo que indica activación o desactivación de un proceso, producto de la interacción de uno o más inputs.

Figura 4.2.- Diagrama resumen de los flujos energéticos agregados de una economía. Las letras junto a los flujos son las variables agregadas utilizadas para calcular los índices emergéticos. (Modificado de Odum, 2001)

<u>Símbolo</u>	<u>Significado</u>
	Fuente: Energía externa de disponibilidad constante
	Tanque: Compartimiento de almacenaje de energía con un sistema que almacena de acuerdo al balance entre las entradas y salidas del sistema.
	Sumidero de calor: Dispersión de energía potencial que acompaña a todos los procesos de transformación de energía.
	Interacción: Intersección de dos o más flujos que producen una salida proporcional éstos de acuerdo a una función establecida.
	Transacción: Unidad que indica la compra o venta de bienes y servicios (línea sólida) en intercambio por un flujo monetario (línea rayada).

**Figura 4.3.- Diagrama resumen de los flujos emergéticos agregados de una economía. Las letras junto a los flujos son las variables agregadas utilizadas para calcular los índices emergéticos. (Modificado de Odum, 2001)**

Todos los componentes y subsistemas son conectados con flechas que indican los flujos energéticos así como interacciones causales, flujo de información y materiales (Odum, 1996). Los límites del sistema estudiado en este trabajo son Chile continental y la Provincia de Palena ubicada en la décima región de Chile. Estos sistemas son evaluados basándose en la información disponible, la que en su mayoría pertenece al año 2001. Como material de apoyo para los análisis cuantitativos, se dibujaron diagramas para la economía Chilena y la economía de la Provincia de Palena (Figuras 5.2, 5.4). Estos diagramas representan de manera gráfica todos los flujos principales e indican las interacciones primarias que ocurren en el sistema. Por simplificación, se dibujaron diagramas agregados una vez que todos los flujos fueron cuantificados. La Figura 4.4 es un ejemplo de un diagrama agregado que indica las variables utilizadas para calcular los índices y tasas de energía para los sistemas en cuestión.

#### 4.1.2 Tabla de evaluación emergética

Una vez que el diagrama descriptivo es dibujado para que el sistema comience a ser evaluado, una tabla de evaluación emergética se prepara utilizando cualquier software de bases de datos en el cual se almacenan los flujos de materia prima y energía que pasan a través del sistema en estudio. Todos los bienes son convertidos en unidades de energía a excepción de aquellos datos tales como minerales y otros para los cuales existen valores de transformidades de acuerdo a su masa. Las estadísticas de los datos tanto de producción, consumo, importaciones y exportaciones, en unidades biofísicas y unidades monetarias para el caso del cálculo de energía en servicios y labor, fueron obtenidos de fuentes nacionales de estadísticas (ASIMET, 2004; Banco Central, 2003; CNE, 2004; ENAP, 2004; INE, 2004; INFOR, 2004; ODEPA, 2004; SALMONCHILE, 2004; SERNAGEOMIN, 2004; SERNAPESCA, 2004; SERNATUR, 2002; SINIA, 2004) y de fuentes internacionales de estadísticas (FAO, 2004; WRI, 2004; EIA, 2004). En el Apéndice C se muestran todos los cálculos realizados para obtener los valores de energía de cada elemento analizado. Junto a estos valores aparecen las fuentes de los datos utilizados, de esta manera se asocian las bases de datos antes mencionadas con cálculos realizados.

La tabla emergética incluye los valores de la energía de varios componentes presentes en el diagrama descriptivo, los cuales se obtuvieron a partir de algunas de las fuentes mencionadas. La Tabla 4.1 es un ejemplo de una tabla de evaluación emergética.

Tabla 4.1.- Ejemplo de una tabla de evaluación emergética

Item	Cantidad (J/año)*	Transformidad (sej/unidad)	Fuente de la transformidad	Energía solar (sej)
RECURSOS RENOVABLES:				
1 Sol	3,47E+21	1,00E+00	A	3,47E+21
2 Viento, energía cinética	9,36E+18	1,50E+03	A	1,40E+22
3 Marea	6,48E+17	1,68E+04	A	1,09E+22

La columna 1 de la tabla entrega el nombre del ítem y el número de referencia del cálculo con el cual se obtuvo, desarrollado extensivamente en el Apéndice C. La columna 2 muestra los valores de cada componente en joules, gramos y dólares respectivamente. El flujo de energía o materia de cada ítem se multiplica por su respectiva transformidad, que se encuentra en la columna 3. El producto entre los datos entregados y su transformidad es igual a la energía total con la que el elemento en cuestión aporta al sistema. La mayoría de



Una vez que todos los flujos en el diagrama descriptivo han sido cuantificados y tabulados, se agregan en un diagrama resumen. Todos los flujos indicados en el diagrama resumen son en joules de energía solar (abreviado sej en inglés) o dólares de Estados Unidos (\$US).

**R** es la suma de la energía renovable que mantiene a una economía (lluvia, olas, mareas); **N** es la suma de los recursos no renovables propios del sistema (País, Provincia, etc); **N<sub>0</sub>** es la porción de N que proviene desde fuentes rurales no concentradas (suelos y bosque en los casos en los que se extrae más de lo que se renueva); **N<sub>1</sub>** es la porción de N al cual se le da un uso concentrado (ciudades, industrias); **N<sub>2</sub>** es la porción de N que se exporta sin tener una transformación muy significativa dentro del sistema (Por ejemplo minerales); **F** es la suma de todos los combustibles y minerales importados; **G** es la suma de los bienes importados; **I** es el total de dólares pagados por importaciones; **P<sub>1</sub>I** es la energía contenida en los servicios que acompañan a los combustibles y minerales importados; **E** es el total de dólares recibidos por exportaciones; **P<sub>1</sub>E** es la valoración emergética de los bienes y servicios exportados; **B** es la suma de los bienes y servicios exportados que han sido transformados dentro del límite del sistema en cuestión; **X** representa al Producto Interno Bruto (PIB) de el país analizado en USD o moneda nacional.

Las variables antes descritas son utilizadas para calcular índices que ayudan en la interpretación de los resultados de la evaluación (Tabla 4.2).

**Tabla 4.2.- Principales variables utilizadas en un análisis emergético**

Nombre variable	Expresión
Flujo de energía renovable	R
Flujo desde reservas no renovables internas	N
Porción de N de fuentes rurales no concentradas (Suelo, bosques)	N <sub>0</sub>
Porción de N que se utiliza para usos concentrados (urbano, industrial)	N <sub>1</sub>
Porción de N que se exporta sin ser usado	N <sub>2</sub>
Suma de todos lo combustibles y minerales inportados	F
Suma de bienes importados	G
Total dólares pagados por importaciones	I
Dólares recibidos por exportaciones	E
Productos exportados transformados en el sistema analizado	B
Tasa energía nacional / dólar	P <sub>1</sub>
Tasa energía mundial / dólar	P <sub>2</sub>
Energía en servicios asociados a los bienes y combustibles importados	P <sub>1</sub> I
Valor emergético de bienes y servicios exportados	P <sub>1</sub> E

## 4.2 Índices y tasas de emergía

Una vez calculados los flujos de energía y materiales del sistema y después de haberles calculados su emergía mediante el uso de transformidades, se pueden calcular algunos índices y tasas de emergía. Existen algunos papers y libros en los cuales se tratan de manera específica los índices y tasas que se utilizarán. Para el caso de este estudio las principales referencias están en los trabajos de Odum (1996) y Haden (2003).

En la Tabla 4.3 se presentan los principales índices y tasas utilizados en el análisis emergético. Estas relaciones entregan información acerca de la organización de la economía de un país, y entre otras cosas permiten determinar la auto suficiencia emergética versus la dependencia de recursos importados de la economía en cuestión, así como el carácter de renovables o no renovables de las energías y materiales disipados por una economía. En adición a lo anterior, a partir de los resultados del análisis emergético se pueden calcular la capacidad de carga emergética de una nación y la eficiencia total que una economía presenta en el uso de sus recursos naturales. Finalmente se utilizan indicadores de sustentabilidad (Brown & Ulgiati, 1997) que se basan en la contabilidad emergética y que permiten comparar los procesos productivos que ocurren en la biosfera a cualquier escala.

**Tabla 4.3.- Índices y tasas utilizados para la interpretación de los resultados de una evaluación emergética.**

Nombre del Índice	Expresión
Flujo de emergía importada	$F+G+P_{2l}$
Total flujo de emergía	$R+N+F+G+P_{2l}$
Total de emergía usada	$U = N_0+N_1+R+F+G+P_{2l}$
Total de emergía exportada	$P_1E+N_2+B$
Fracción de emergía usada proveniente de fuentes locales	$(N_0+N_1+R)/U$
Importaciones menos exportaciones	$(F+G+P_{2l})-(N_2+B+P_1E)$
Relación exportación e importación	$(N_2+B+P_1E)/(F+G+P_{2l})$
Fracción renovable del total usado	$R/U$
Fracción comprada del total usado	$(F+G+P_{2l})/U$
Fracción de servicios importados	$P_{2l}/U$
Fracción de uso libre	$(R+N_0)/U$
Densidad Empower	$U/(\text{área})$
Uso por persona	$U/\text{población}$
Capacidad de carga renovable con al estandar de vida actual	$(R/U)*(\text{población})$
Tasa de uso GDP, tasa emergía/dólar	$P_1=U/\text{GNP}$
Combustible utilizado por persona	$\text{Combustible}/\text{población}$
Tasa de carga ambiental (ELR)	$(F+G+P_{2l}+N_1)/(R+N_0)$
Tasa de crecimiento de emergía (EYR)	$U/(F+G+P_{2l})$
Índice de sustentabilidad (SI)	$EYR/ELR$
Tasa de inversión de emergía (EIR)	$F/(R+N)$

\*GDP = PIB = Producto interno bruto

### **4.2.1 Índices de sustentabilidad**

La sustentabilidad de una economía, en términos energéticos, es una función de la dependencia de esta economía de energía renovable, el grado de cuanto depende la economía de la energía importada, y la sobrecarga que la actividad económica genera en el ambiente (Brown & Ulgiati, 1997). Para procesos de pequeña escala y subsistemas económicos, tales como la agricultura, la sustentabilidad se considera como una función de la energía cosechada por los procesos que rodean al subsistema, el grado con el cual los procesos dependen de flujos de energía renovable, y la sobrecarga que los procesos generan en el ambiente (Brown & Ulgiati, 1997). Los principales índices utilizados para determinar la sustentabilidad de una economía o proceso productivo son la Tasa de Cosecha de Energía (TCE) y la Tasa de Carga Ambiental (TCA). Cuando estos índices se combinan entregan una medida general de la sustentabilidad ecológica del sistema en cuestión; el Índice de Sustentabilidad (IS). Además existe la Tasa de la Huella Energética (THE), la cual relaciona el área directa de demanda de un sistema con el área indirecta de demanda. La explicación detallada de este índice se entrega en el capítulo V de discusiones.

### **4.2.2 Cálculo y explicación de los índices de sustentabilidad**

#### **4.2.2.1 Tasa de Cosecha de Energía (TCE) de una economía**

$$\text{TCE} = (\text{N}_0 + \text{N}_1 + \text{R} + \text{F} + \text{G} + \text{P}_2\text{I}) / (\text{F} + \text{G} + \text{P}_2\text{I}) \text{ ó } \text{U} / (\text{F} + \text{G} + \text{P}_2\text{I})$$

La TCE es el cociente que resulta de la división de la energía total que mantiene una economía desde todas las fuentes (localmente disponibles e importadas), por la porción de energía importada (combustibles, minerales, bienes y servicios) desde la economía. La tasa de cosecha de energía de cada sistema es una medida de la contribución neta de la economía que esta más allá de la propia operación del sistema (Odum, 1996). A mayor TCE, el sistema tiene una menor dependencia por la economía externa.

#### **4.2.2.2 Tasa de Carga Ambiental**

$$\text{TCA} = (\text{N}_0 + \text{N}_1 + \text{F} + \text{G} + \text{P}_2\text{I}) / (\text{R})$$

Esta tasa indica la cantidad de energía que ingresa a una economía que no es renovable o que no está localmente disponible. Mientras mayor es la fracción de energía renovable utilizada por una economía o proceso productivo, menor es la TCA (Haden,

2003). De manera inversa, economías y procesos productivos que tienen una alta dependencia por fuentes externas de energía presentan altos valores en la TCA. En términos generales, la TCA indica la presión que un proceso genera en un ecosistema local debido a la importación de energía y materiales que no son propios del sistema, por lo que es una medida general del estrés del ecosistema debido a la actividad económica (Brown & Ulgiati, 1997).

#### **4.2.2.3 Índice de sustentabilidad**

$$IS = TCE / TCA$$

Este índice de sustentabilidad asume que el objetivo final de la sustentabilidad es lograr la mayor tasa de cosecha alcanzable con la menor carga ambiental posible (Haden, 2003). Altos valores en la IS indican que la energía cosechada por una economía o proceso productivo tiene una elevada proporción de flujos de energía renovable, y por lo tanto es más compatible con el ambiente local. Bajos valores en la IS indican lo contrario, es decir, la energía de un sistema está poco relacionada con su energía local renovable, lo que lo hace poco compatible con su ambiente local.

#### **4.2.2.4 Índice de la huella emergética**

$$IHE = U / R = (N_0 + N_1 + R + F + G + P_2I) / (R)$$

La huella ecológica (Wackernagel, 2001), es una herramienta de contabilidad usada para cuantificar la cantidad de recursos consumidos por una población humana en un área dada. Los recursos contabilizados se traducen en una estimación de la cantidad de superficie productiva necesaria para producir los recursos en cuestión. A partir de esta idea se puede calcular una huella ecológica utilizando el análisis emergético; el índice de la huella emergética (IHE). El valor obtenido indica cuantas veces más grande debería ser el área de soporte de una economía de tal manera de abastecer los requerimientos de energía locales de manera renovable, es decir, utilizando solo la energía renovable (R) disponible localmente. Valores mayor a uno indican que se está utilizando más de lo que se debería y valores menores a uno indican que aún es posible cosechar más energía de manera renovable.

## **5. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación emergética del sistema país Chile, junto a la evaluación emergética de uno de sus subsistemas; la provincia de Palena. La intención de analizar Chile y uno de sus subsistemas provinciales es la de realizar una evaluación que permita la observación del sistema desde una perspectiva externa y otra interna, a fin de someter la metodología utilizada en este documento a diferentes niveles de escalas territoriales. Las razones que justifican la elección de ambos sistemas están dadas para el primero (Chile) debido a la disponibilidad de información y a que el país es el último nivel en escala en el cual se pueden determinar cambios políticos económicos y ambientales. Para el caso de Palena, la elección se debió principalmente a la oportunidad que se presentó como parte de un proyecto académico denominado “Gestión territorial sostenible de Palena y ecosistemas análogos”.

### **5.1 Evaluación emergética de Chile**

Los flujos emergéticos que mantienen a la economía chilena fueron evaluados para el año 2001. El análisis se desarrolló de manera de obtener una visión detallada de los flujos que ocurren en la economía nacional. La Figura 5.2 es un diagrama energético del sistema que muestra los principales recursos que fluyen manteniendo el sistema combinado ecológico y económico de Chile. El propósito del diagrama de la Figura 5.2 es mostrar las interacciones internas de la economía chilena. Los valores de cada flujo han sido omitidos por simplificación. Para efectos de este estudio, no se consideró el territorio Chileno Antártico ya que no cumple aún una función en la economía del país. Lo anterior no implica que dicho territorio no sea importante en el ecosistema nacional, de hecho regula las temperaturas de todo el ecosistema mundial y es una reserva de agua dulce, pero al no tener una relación directa con el sistema económico nacional, se omitió en el análisis emergético de Chile.

#### **5.1.1 Descripción del sistema**

Chile es un república democrática en la cual la soberanía reside esencialmente en la nación. Está situado en el extremo sudoccidental de América del Sur y se prolonga en el

continente antártico hasta el Polo Sur. Su provincia más occidental es isla de Pascua, en Oceanía. En el continente Americano se extiende desde los 17°30' S, en su límite septentrional, hasta los 56°32' S en la parte meridional sudamericana. Al norte Chile limita con Perú mediante la línea de la Concordia; al este limita con Bolivia y Argentina, siguiendo en general el límite dado por las altas cumbres andinas. Al sur y al oeste, el país limita con una zona de 200 millas náuticas (IGM, 2003). Varias islas en el océano Pacífico incrementan su mar patrimonial. Las más cercanas al continente son las que forman el archipiélago de Juan Fernández y las islas San Félix y San Ambrosio; las más alejadas son Salas y Gómez e isla de Pascua, también conocida como Rapa Nui. Desde la línea de la Concordia hasta el Polo Sur, la longitud del país supera los 8.000 km. La superficie americana, antártica e insular, es de 2.006.096 km<sup>2</sup>, de los cuales 756.096 km<sup>2</sup> corresponden a Chile sudamericano e insular y 1.250.000 km<sup>2</sup> al territorio Chileno Antártico (IGM, 2003).

El uso del suelo está dominado por tierras ganaderas (17 %), superficies agrícolas (2 %), Bosques y plantaciones (11 %) y el resto se divide en suelos no productivos (glaciares, cordillera, cuerpos de agua) (Banco Central, 2003).

Chile se divide en cuatro mega zonas climáticas. La zona Norte, con un clima desierto cálido, en los cuales los principales recursos naturales son el salitre, cobre, hierro y litio, valles agrícolas y productos del mar. La zona Central, con un clima templado con lluvias invernales, en la cual los principales recursos naturales son la agricultura (hortofruticultura y viticultura, ganadería, bosques, energía hidroeléctrica, cobre y productos del mar. La zona Sur, con un clima templado lluvioso, en la cual los principales recursos son la agricultura, ganadería, bosques, energía hidroeléctrica y productos del mar y la zona Austral, con clima de estepa fría y con los principales recursos naturales bosques, petróleo, gas natural, carbón, calizas, ganado ovino y productos del mar. La costa chilena se aproxima a los 8.000 km. Chile cuenta con una gran cantidad de recursos hídricos en forma de ríos y lagos, y presenta una precipitación promedio de 500 –600 mm/año (Promedio calculado a partir de series de datos regionales de INE, 2004).

En el año 2001, Chile presentó una población de 15.402.000 personas aproximadamente, de las cuales el 86 % se concentra en zonas urbanas y el 14 % en zonas rurales, lo que refleja la elevada migración desde el campo hacia las grandes urbes. Del

total de la población, el empleo por ocupación presentó las siguientes proporciones; 13 % agricultura, forestería y pesca, 16 % minería e industrias, 8 % construcción, 27 % comercio y servicios financieros, 8 % transporte y comunicaciones y 28 % en servicios gubernamentales. La economía de Chile es altamente dependiente del comercio exterior, especialmente de las exportaciones y de las importaciones de combustibles fósiles. En el año 2001, el producto interno bruto (PIB) fue de 36.626.086.000.000 pesos chilenos o 57.684.326.000 USD, a una tasa de cambio promedio para ese año de 634,94 pesos por dólar (Banco Central, 2003).

### 5.1.2 Análisis emergético de Chile, 2001

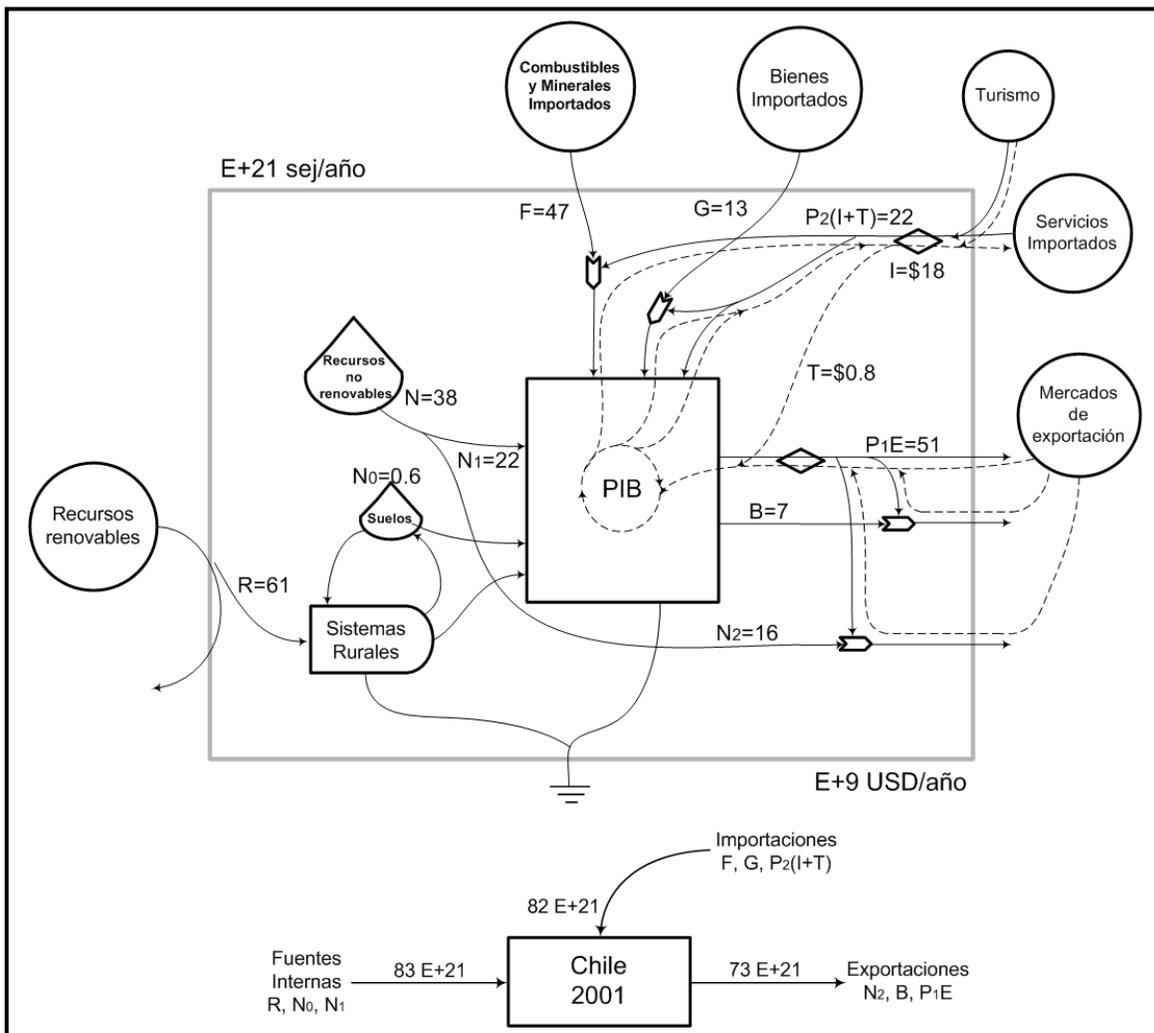
El año evaluado corresponde a 2001, y fue elegido debido a que se pretendió hacer una análisis del estado actual del sistema país Chile, pero los últimos datos disponibles para los elementos analizados correspondían a ese año. La Figura 5.1 es un diagrama resumen que muestra todos los flujos de recursos importados y exportados por Chile así como los recursos originados por Chile en el año 2001. Junto a las flechas que indican las rutas de los flujos de energía, se pueden apreciar los distintos valores que representan los flujos totales que mantienen a la economía chilena. Los flujos de energía se agregan por simplicidad de acuerdo a las categorías descritas en la sección 5.1.3. Todos los valores de flujos de energía están en unidades de joules de energía solar (sej) y han sido divididos por  $1 \text{ E}+21$  ( $10^{21}$ ). Las líneas rayadas indican los flujos monetarios a través del sistema. En la Tabla 5.1 se resumen los flujos ocurridos en Chile durante el año 2001.

**Tabla 5.1.- Resumen de los flujos emergéticos de Chile, 2001**

Variable	Item	Unidades	Cantidad
R	Fuentes Renovables	E + 21 sej/año	86,55
N	Recursos no renovables pertenecientes a Chile	E + 21 sej/año	38,10
N0	Fuentes rurales dispersas	E + 21 sej/año	0,56
N1	Uso concentrado	E + 21 sej/año	21,71
N2	Exportación sin uso	E + 21 sej/año	15,83
F	Combustibles y minerales importados	E + 21 sej/año	46,68
G	Bienes importados	E + 21 sej/año	13,24
P2(I+T)	Energía de bienes, servicios y turismo	E + 21 sej/año	22,31
P1E	Energía de bienes y servicios exportados	E + 21 sej/año	58,60
B	Productos exportados transformados en Chile	E + 21 sej/año	19,87
E	Dolares recibidos por exportaciones	USD	1,77E+10
T	Dolares recibidos por Turismo (importaciones)	USD	7,88E+08
I	Dolares pagados por importaciones	USD	1,72E+10
X	Producto Bruto Interno	USD	5,77E+10
P2	Tasa de Energía/\$ mundial, usada en las importaciones	sej/USD	1,24E+12
P1	Tasa de Energía/\$ Chile	sej/USD	3,31E+12

La Tabla 5.2 muestra todos los flujos evaluados para dicho año y muestra las fuentes de las transformidades utilizadas para cada flujo.

La base para lograr la sustentabilidad en el largo plazo está dada por las fuentes de energía que están localmente disponibles para un sistema. En este aspecto, la energía renovable (R) que mantuvo a la economía Chilena en el año 2001 fue de  $86,55 \text{ E}+21$  sej/año y se presentó como energía primaria en forma de olas y mareas en las áreas costeras y en forma de lluvia en el resto del país. La energía disponible local no renovable (N) totalizó  $38,10 \text{ E}+21$  sej/año y consistió en combustibles fósiles (petróleo, gas natural, carbón), minerales metálicos y no metálicos, y superficie del suelo orgánico. La importación de combustibles y minerales alcanzó los  $46,68 \text{ E}+21$  sej/año, de los cuales  $33,75 \text{ E}+21$  sej/año (72 %) fueron en forma de petróleo y sus derivados.



**Figura 5.1.- Vista esquemática del diagrama sistémico que resume todos los flujos de la economía Chilena del año 2001.**

Lo anterior refleja la alta dependencia de la economía Chilena por los combustibles fósiles, ya que la relación entre la producción y la importación de este bien es de 0,02, lo que implica que se consume aproximadamente 42 veces la cantidad producida (datos en Tabla 5.2). Los bienes importados (G) totalizaron 12,24 E+21 sej/año e incluyen alimentos y productos agrícolas, plásticos, químicos, maquinaria y equipamiento, y productos textiles. La emergía de los servicios [P2(I+T)] que está contenida en los combustibles, minerales y bienes importados fue de 23,31 E+21 sej/año y representa una gran fuente de emergía para Chile en el año 2001. Este flujo representa el trabajo pagado a las personas que están fuera de Chile y que han contribuido a la economía Chilena a través del comercio. La emergía exportada desde Chile sin mayor uso (N2) totalizó 15,83 E+21 sej/año, mientras que la emergía exportada de productos transformados en Chile (B) fue de 19,87 E+21 sej/año, lo que refleja un esquema de economía que tiende a la exportación de productos con valor agregado, pero que aún tiene una alta proporción (44 %) de exportación de commodities. Del total de productos transformados en Chile (B), 13,11 E+21 sej/año (66 %) corresponde a productos del mar, lo que muestra la importancia del sector pesquero en el país. El resto se divide entre productos agrícolas, productos animales y productos forestales. Lo anterior refleja un aspecto muy interesante, y es que al sector forestal se le atribuye ser un elemento muy importante en la economía de Chile ya que contribuye cerca del 4 % del PIB nacional, y no así el sector pesquero. Sin embargo, desde la perspectiva de la valoración energética del sistema, el sector pesquero pasa a ser más relevante que el sector forestal, representando casi 8 veces más en términos de cantidad nominal de emergía. EL balance energético del comercio para Chile en el año 2001, expresado como  $(F+G+P2(I+T)) - (N2+B+P1E)$ , indica que Chile exporta 1,21 E+21 sej/año más de la emergía que importa, lo que muestra la importancia del comercio exterior para la economía Chilena.

**Tabla 5.2.- Análisis emergético de Chile, 2001. Fuentes en Anexo B.**

Item	Cantidad (J/año)*	Transformidad (sej/unidad)	Fuente de la transformidad	Energía solar (sej)
<b>RECURSOS RENOVABLES:</b>				
1 Sol	3,47E+21	1,00E+00	A	3,47E+21
2 Viento, energía cinética	9,36E+18	1,50E+03	A	1,40E+22
3 Marea	6,48E+17	1,68E+04	A	1,09E+22
4 Lluvia, química	1,29E+18	1,82E+04	A	2,35E+22
5 Lluvia, geopotencial	2,52E+18	2,79E+04	A	7,04E+22
6 Oleaje	8,56E+17	3,06E+04	A	2,62E+22
7 Ciclo terrestre	7,56E+17	3,44E+04	A	2,60E+22
<b>ENERGÍA RENOVABLE INTERNA:</b>				
8 Hidroelectricidad	7,79E+16	1,65E+05	A	1,29E+22
9 Electricidad (eólica, solar, otras)	1,92E+13	1,65E+05	A	3,16E+18
10 Producción Agrícola	8,98E+16	2,00E+05	A	1,80E+22
11 Productos animales	8,22E+15	2,00E+06	A	1,64E+22
12 Extracción Marina	2,63E+16	2,00E+06	A	5,27E+22
13 Producción de leña	7,29E+16	1,87E+04	A	1,36E+21
14 Producción y Extracción forestal	1,23E+17	1,87E+04	A	2,30E+21
<b>USO DE RECURSOS NO RENOVABLES PERTENECIENTES A CHILE:</b>				
15 Gas Natural	9,69E+16	4,80E+04	A	4,65E+21
16 Petróleo	1,50E+16	5,40E+04	A	8,11E+20
17 Carbón	4,40E+17	4,00E+04	A	1,76E+22
18 Carbonato de Calcio, g	5,56E+12	1,00E+09	A	5,56E+21
19 Metales, g	8,94E+12	1,00E+09	A	8,94E+21
20 Superficie del suelo	7,54E+15	7,40E+04	A	5,58E+20
<b>IMPORTACIONES Y FUENTES EXTERNAS:</b>				
21 Gas Natural	1,89E+17	4,80E+04	A	9,08E+21
22 Productos derivados del petróleo	5,11E+17	6,60E+04	A	3,37E+22
23 Carbón	7,82E+16	4,00E+04	A	3,13E+21
24 Acero, g	3,00E+11	1,80E+09	A	5,40E+20
25 Minerales	1,87E+11	1,00E+09	A	1,87E+20
26 Alimentos y productos agrícolas	2,22E+16	2,00E+05	A	4,44E+21
27 Productos animales	9,74E+14	2,00E+06	A	1,95E+21
28 Plásticos y Gomas	3,12E+16	6,60E+04	A	2,06E+21
29 Químicos, g	7,06E+12	3,80E+08	A	2,68E+21
30 Madera, Papel, Textiles	1,26E+16	3,49E+04	A	4,40E+20
31 Maquinaria, Transporte, Equipamiento	2,49E+11	6,70E+09	A	1,67E+21
32 Servicios en importaciones, \$US	1,72E+10	1,24E+12	B	2,13E+22
33 Turismo, \$US	7,88E+08	1,24E+12	B	9,77E+20
<b>EXPORTACIONES</b>				
34 Cultivos Agrícolas	1,25E+16	2,00E+05	A	2,50E+21
35 Productos animales	1,28E+15	2,00E+06	A	2,56E+21
36 Pescados y Mariscos	6,56E+15	2,00E+06	A	1,31E+22
37 Productos forestales	4,88E+16	3,49E+04	A	1,70E+21
38 Metales y minerales, g	1,31E+13	1,00E+09	A	1,31E+22
39 Papel & Productos asociados	4,62E+16	3,49E+04	A	1,61E+21
40 Químicos, g	2,94E+12	3,80E+08	A	1,12E+21
41 Servicios en exportaciones, \$US	1,77E+10	3,31E+12	C	5,86E+22

\*Excepto los elementos que tiene una unidad distinta indicada

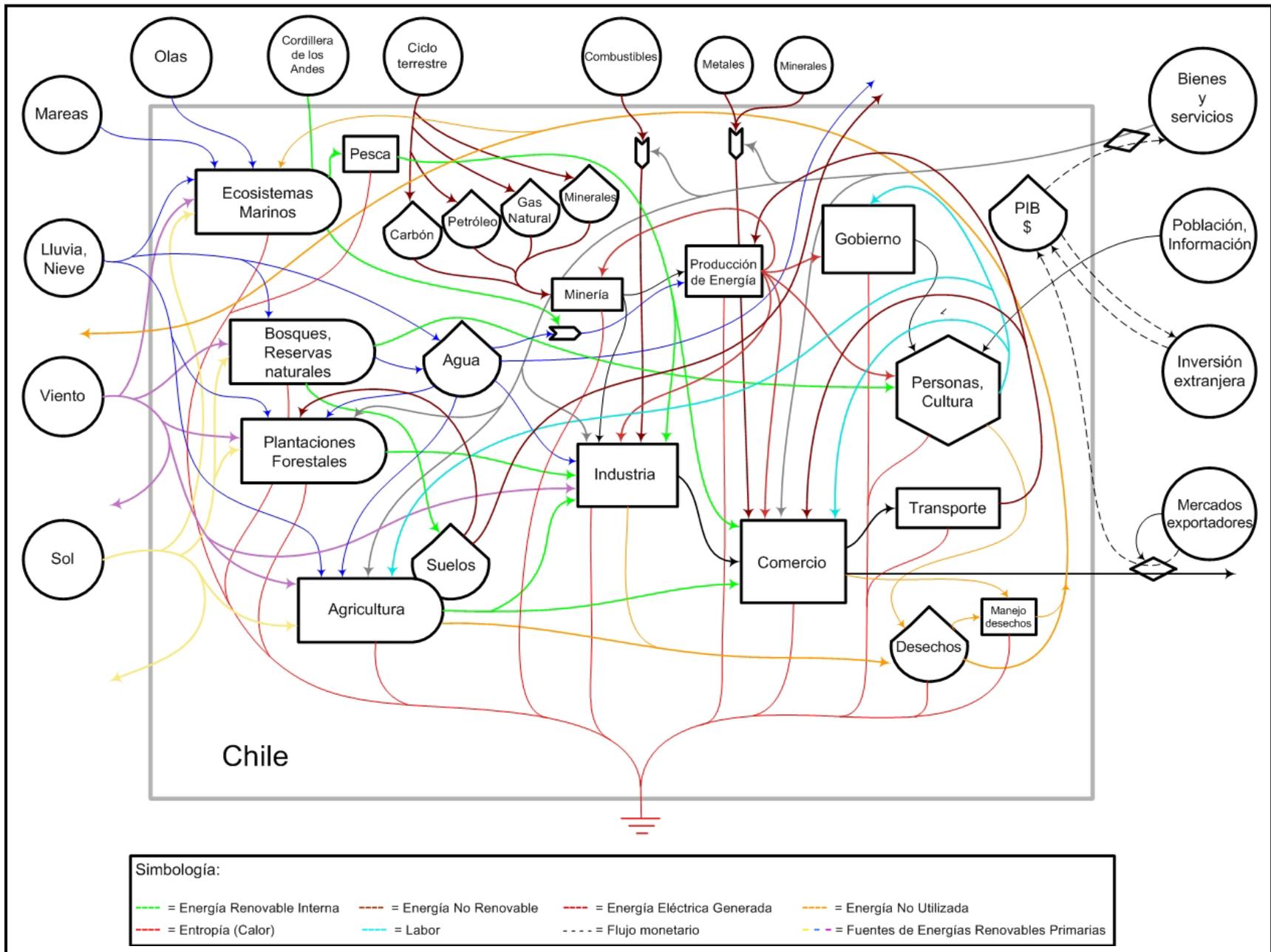


Figura 5.2.- Diagrama del sistema energético de la economía chilena.

## **5.2 Evaluación emergética de Palena**

Los flujos emergéticos que mantienen a la economía de la provincia de Palena chilena fueron evaluados para el año 2001. El análisis se desarrolló de manera de obtener una visión detallada de los flujos que ocurren en la economía provincial. La Figura V.3 es un diagrama energético del sistema que muestra los principales recursos que fluyen manteniendo el sistema combinado ecológico y económico de Palena. El propósito del diagrama de la Figura 5.4 es mostrar las interacciones internas de la economía del provincia. Los valores de cada flujo han sido omitidos por simplificación.

### **5.2.1 Descripción del sistema**

La Provincia de Palena se ubica en el extremo sur de la X Región de los Lagos, en la República de Chile. Comprende 15.301,9 km<sup>2</sup> de superficie y se extiende entre los paralelos 42° y 44° de Latitud Sur y del meridiano 73° al 72° de Longitud Oeste y corresponde a la zona comúnmente llamada Chiloé Continental (Datos obtenidos de estudio FOCUS facilitado por la gobernación provincial de Palena).

La provincia está dividida administrativamente en las comunas de Chaitén, Hualaihué, Futaleufú y Palena, siendo las principales ciudades Chaitén y Hornopirén. La primera, Chaitén, es sede del Gobierno Provincial, siendo Puerto Montt la Capital Regional. Del total de la superficie superficie de la provincia, el 55, 4% corresponden a la comuna de Chaitén, 18,2% a la comuna de Hualaihué, 18,1 % a la comuna de Palena y 8,3% a la comuna de Futalefú (Censo, 2002). Por otra parte, las mayores poblaciones las tienen las comunas de Chaitén y Hualaihué que representan en conjunto el 85% de la población provincial. La comunas de Chaitén y Hualaihué son las más extensas y representan en conjunto el 76% del territorio provincial caracterizándose por un extenso litoral frente al mar interior por el oeste. Las Comunas de Futaleufú y Palena, en tanto, son mediterráneas y se ubican en las partes altas de la Cordillera de Los Andes. Esta condición le otorga características climáticas y ecológicas especiales que las diferencian notablemente de las otras Comunas. A diferencia del resto de Chile, en que la Cordillera de los Andes es el límite con Argentina, en esta zona los Andes limita con el Océano Pacífico. La Cordillera de Los Andes en Palena, al igual que en Chiloé, fue moldeada por el movimiento de las placas terrestres. Las mayores alturas las constituyen los volcanes Hornopirén (1.572),

Yates (2.111), Michinmahuida (2.404) y Corcovado (2.290). Constituyen arte del paisaje los ventisqueros y fiordos como el de Comau y Reñihue.

El uso del suelo se divide principalmente en 64,3 % de Bosque, en sus diversas formas, 17% de Nieves y Glaciares, 6,0 % de Praderas y Matorrales, 8.1% áreas desprovistas de vegetación, 0,02% terrenos urbanos y 0,004% terrenos agrícolas (Datos aportados por MIDEPLAN).

Los recursos hidrológicos constituyen una de las características más importantes de la Provincia y dan cuenta de un potencial de incalculables usos. Los cursos de agua de origen nívico, forman en su trayecto vastos sistemas hidrológicos que incluyen esteros, lagos, lagunas, afluentes y ríos principales. Los principales recursos hidrológicos en provincia son el Río Negro, Río Blanco y Río Cisnes: de origen nivoglacial y nivopluvial. También en la Provincia se encuentran los lagos: Cabrera, Gral. Pinto Concha, Yelcho, Espolón, Lonconao, Palena, Negro y Blanco. Es posible advertir dos tipos diferentes de climas. Uno de ellos característico de la zona costera con temperaturas moderadas a bajas, sin grandes variaciones debido a la influencia marina con un promedio de 3.500 mm. anuales que se registra en las Comunas de Chaitén y Hualaihué. El otro, es el clima de las zonas altas con variaciones térmicas más intensas altas temperaturas estivales y una pluviometría que alcanza a 2.000 mm. anuales y que caracteriza a las comunas de Futaleufú y Palena. La faja costera o continental de la Provincia de Palena tiene un clima templado lluvioso. Con un promedio anual de 3.880 mm de agua caída al año (Datos obtenidos de estudio FOCUS facilitado por la gobernación provincial de Palena).

De acuerdo con el Censo realizado el año 2002, la población total de la provincia es de 18.971 personas, de las cuales el 60 % se encuentran en zonas rurales y el 40 % en zonas urbanas. La densidad poblacional promedio es de 1,2 hab/km<sup>2</sup>, cifra inferior al promedio regional de 15,5 hab/km<sup>2</sup>. Del total de habitantes, solo 6221 tienen una actividad económica formal, de la cual el 24 % se dedica al rubro de la agricultura, crianza de ganado y silvicultura, 32 % a la pesca, 11 % a la administración pública y el resto en servicios, educación y comercio. Durante el año 2001, la provincia registró un producto bruto provincial cercano a los 40.255.196.000 pesos Chilenos o 63.400.000 USD, a una tasa de cambio de 634, 94 pesos por dólar promedio para ese año.

### 5.2.2 Análisis energético de Palena, 2001

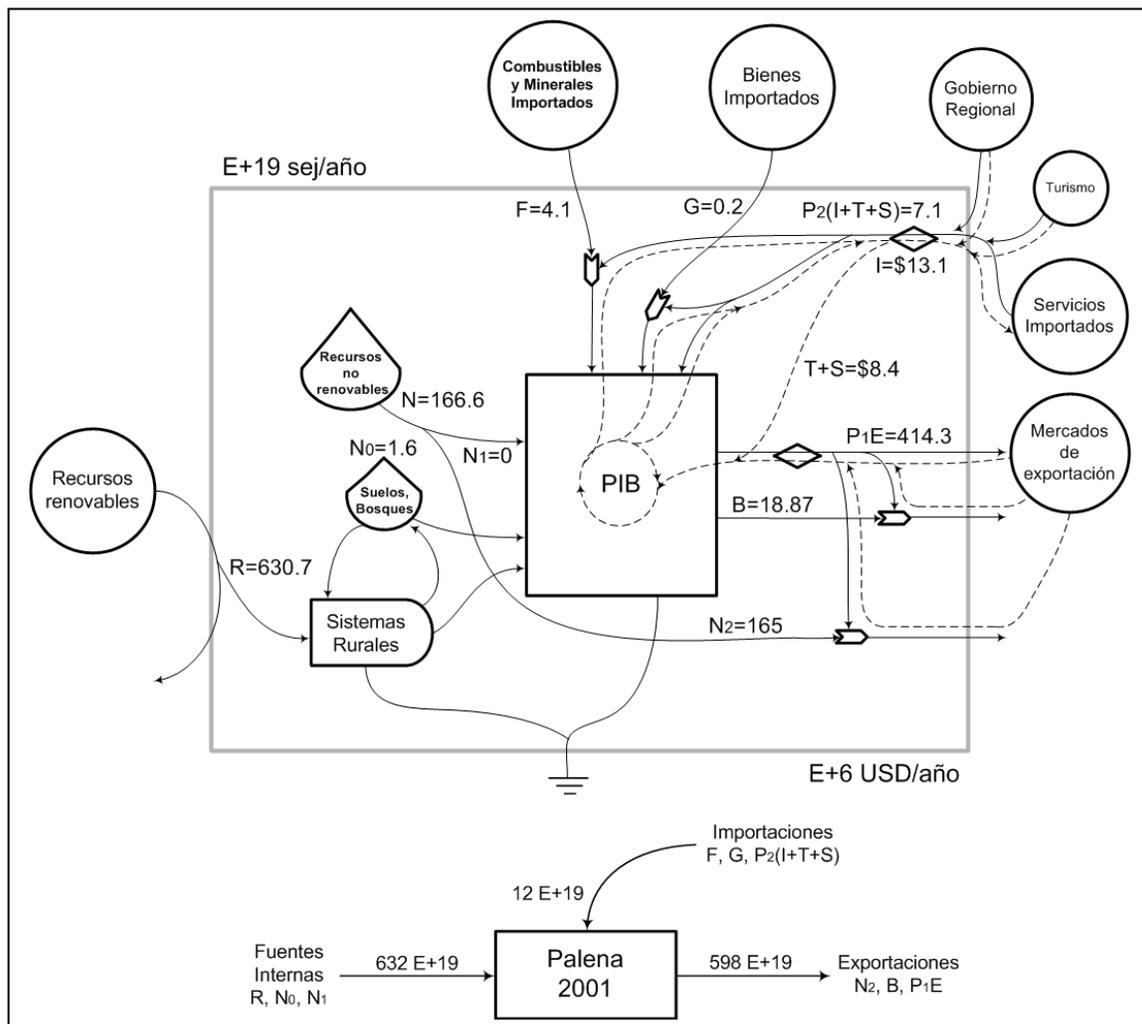
El año evaluado corresponde a 2001, y fue elegido debido a que se pretendió hacer un análisis del estado actual del sistema provincial Palena, pero los últimos datos disponibles para los elementos analizados correspondían a ese año. La Figura 5.3 es un diagrama resumen que muestra todos los flujos de recursos importados y exportados por Palena así como los recursos originados por Palena en el año 2001. Junto a las flechas que indican las rutas de los flujos de energía, se pueden apreciar los distintos valores que representan los flujos totales que mantienen a la economía chilena. Los flujos de energía se agregan por simplicidad de acuerdo a las categorías descritas en la sección 4.1.3. Todos los valores de flujos de energía están en unidades de joules de energía solar (sej) y han sido divididos por  $1 \text{ E}+19$  ( $10^{19}$ ). Las líneas rayadas indican los flujos monetarios a través del sistema. En la Tabla 5.1 se resumen los flujos ocurridos en Palena durante el año 2001. La Tabla 5.2 muestra todos los flujos evaluados para dicho año y muestra las fuentes de las transformidades utilizadas para cada flujo.

Tabla 5.3.- Resumen de los flujos energéticos de Palena, 2001

Variable	Item	Unidades	Cantidad
R	Fuentes Renovables	E + 19 sej/año	630,73
N	Recursos no renovables pertenecientes a Palena	E + 19 sej/año	166,63
N0	Fuentes rurales dispersas	E + 19 sej/año	1,59
N1	Uso concentrado	E + 19 sej/año	0,00
N2	Exportación sin uso	E + 19 sej/año	165,04
F	Combustibles y minerales importados	E + 19 sej/año	4,11
G	Bienes importados	E + 19 sej/año	0,23
P2(I+T+S)	Energía de subsidios estatales, bienes, servicios y turismo	E + 19 sej/año	7,11
P1E	Energía de bienes y servicios exportados	E + 19 sej/año	414,29
B	Productos exportados transformados en Palena	E + 19 sej/año	18,87
E	Dolares recibidos por exportaciones	USD	4,08E+07
T	Dolares recibidos por Turismo (importaciones)	USD	2,86E+06
I	Dolares pagados por importaciones	USD	1,31E+07
S	Dolares recibidos por subsidios estatales	USD	5,53E+06
X	Producto Bruto Interno	USD	6,34E+07
P2	Tasa de Energía/\$ Chile, usada en las importaciones	sej/USD	3,31E+12
P1	Tasa de Energía/\$ Palena	sej/USD	1,02E+14

Como se mencionó anteriormente, la base para lograr la sustentabilidad en el largo plazo está dada por las fuentes de energía que están localmente disponibles para un

sistema. En este aspecto, la energía renovable (R) que mantuvo a la economía de Palena en el año 2001 fue de  $630,73 \text{ E}+19 \text{ sej/año}$  y se presentó como energía primaria en forma de olas y mareas en las áreas costeras y en forma de lluvia en el resto de la provincia. La energía disponible local no renovable (N) totalizó  $166,63 \text{ E}+19 \text{ sej/año}$  y consistió principalmente en el uso de estuarios para la producción de salmón, uso de suelo orgánico y extracción forestal no renovable, atribuida principalmente por la corta de Alerce. La importación de combustibles y minerales (F) alcanzó los  $4,11 \text{ E}+19 \text{ sej/año}$ , de los cuales la totalidad fue en forma de petróleo y sus derivados.



**Figura 5.3.- Vista esquemática del diagrama sistémico que resume todos los flujos de la economía de Palena del año 2001.**

Los bienes importados (G) totalizaron  $0,23 \text{ E}+19 \text{ sej/año}$  e incluyen alimentos y productos agrícolas principalmente. La energía de los servicios [ $P_2(I+T+S)$ ] que está

contenida en los combustibles, bienes importados y subsidios del gobierno regional fue de 7,11 E+19 sej/año y representa cerca de la mitad de la emergía importada por Palena en el año 2001. Este flujo representa el trabajo pagado a las personas que están fuera de Palena (principalmente Chile) y que han contribuido a la economía provincial a través del comercio. La emergía exportada desde Palena sin mayor uso (N2) totalizó 165,04 E+19 sej/año y representa la emergía contenida en la producción de salmónidos en los estuarios de la provincia, mientras que la emergía exportada de productos transformados en Palena (B) fue de 18,87 E+19 sej/año, lo que refleja un esquema económico exportador de productos sin valor agregado.

**Tabla 5.4.- Análisis emergético de Chile, 2001. Fuentes en Anexo B.**

Item	Cantidad (J/año)*	Transformidad (sej/unidad)	Fuente de la transformidad	Emergía solar (sej)
<b>RECURSOS RENOVABLES:</b>				
1 Sol	1,20E+20	1,00E+00	A	1,20E+20
2 Viento, energía cinética	1,89E+17	1,50E+03	A	2,83E+20
3 Marea	5,23E+16	1,68E+04	A	8,81E+20
4 Lluvia, química	1,82E+17	1,82E+04	A	3,32E+21
5 Lluvia, geopotencial	1,80E+17	2,79E+04	A	5,02E+21
6 Oleaje	6,91E+16	3,06E+04	A	2,11E+21
7 Ciclo terrestre	1,53E+16	3,44E+04	A	5,26E+20
<b>ENERGIA RENOVABLE INTERNA:</b>				
8 Hidroelectricidad	1,90E+13	1,65E+05	A	3,13E+18
9 Producción Agrícola	2,37E+13	2,00E+05	A	4,74E+18
10 Productos animales	3,58E+13	2,00E+06	A	7,16E+19
11 Extracción Marina	6,89E+13	2,00E+06	A	1,38E+20
12 Consumo de leña	1,12E+15	1,87E+04	A	2,09E+19
13 Producción y Extracción forestal	9,34E+13	1,87E+04	A	1,75E+18
<b>USO DE RECURSOS NO RENOVABLES PERTENECIENTES A PALENA:</b>				
14 Producción de Salmón	1,82E+14	9,07E+06	D	1,65E+21
15 Extracción Forestal no renovable	1,23E+13	1,25E+06	A	1,54E+19
16 Superficie del suelo	6,72E+12	7,40E+04	A	4,98E+17
<b>IMPORTACIONES Y FUENTES EXTERNAS:</b>				
17 Productos derivados del petróleo	6,22E+14	6,60E+04		4,11E+19
18 Alimentos y productos agrícolas	1,17E+13	2,00E+05	A	2,34E+18
19 Servicios en importaciones, \$US	1,31E+07	3,31E+12	B	4,34E+19
20 Inversión pública, \$US	5,53E+06	3,31E+12	B	1,83E+19
21 Turismo, \$US	2,86E+06	3,31E+12	B	9,48E+18
<b>EXPORTACIONES</b>				
22 Productos animales	2,87E+13	2,00E+06	A	5,74E+19
23 Pescados y Mariscos	6,56E+13	2,00E+06	A	1,31E+20
24 Salmón	1,82E+14	9,07E+06	D	1,65E+21
25 Productos forestales	5,58E+12	3,49E+04	A	1,95E+17
26 Servicios en exportaciones, \$US	4,08E+07	1,02E+14	C	4,14E+21
*Excepto los elementos que tiene una unidad distinta indicada				

Del total de productos transformados en Palena (B), 13,11 E+19 sej/año (69 %) corresponde a productos del mar, lo que muestra la importancia del sector pesquero en la zona. El balance energético del comercio para Palena en el año 2001, expresado como  $(F+G+P2(I+T)) - (N2+B+P1E)$ , indica que la provincia exporta 587 E+19 sej/año más de la energía que importa, lo que muestra a la provincia como una fuente de recursos para otras zonas de Chile.

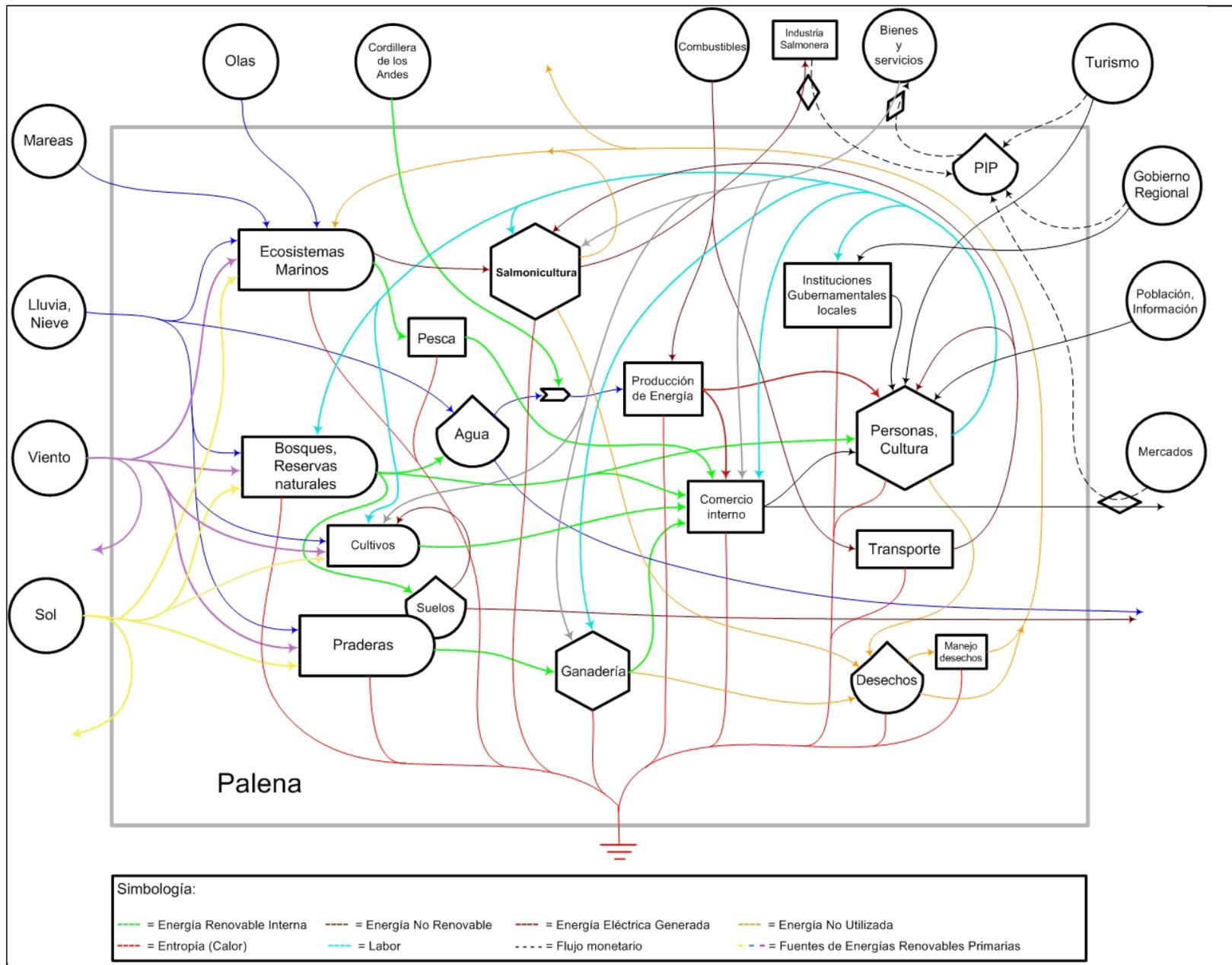


Figura 5.4.- Diagrama del sistema energético de la economía de Palena

## 5.3 Índices comparativos

### 5.3.1 Índices basados en la sustentabilidad emergética de la economía Chilena

En la siguiente Tabla (5.5) se presentan todos los índices emergéticos utilizados para establecer el estado del sistema analizado, en este caso Chile. Todos los valores han sido obtenidos a partir de la Tabla 5.3.

**Tabla 5.5.- Indices emergéticos para Chile, 2001.**

Item	Cantidad
Flujo de energía renovable, R	8,65E+22
Flujo desde reservas renovables internas, N	3,81E+22
Flujo de energía importada, F+G+P2(I+T)	8,22E+22
Energía total entrante, R+N+F+G+P2(I+T)	2,07E+23
Energía total utilizada, U (N0+N1+R+F+G+P2(I+T))	1,91E+23
Energía total exportada, N2+B+P1E	9,43E+22
Fracción de la energía utilizada proveniente de fuentes internas, (N0+N1+R) / U	5,70E-01
Exportaciones menos Importaciones, (F+G+P2(I+T)) - (N2+B+P1E)	-1,21E+22
Relación entre Importación y Exportación, (F+G+P2(I+T)) / (N2+B+P1E)	8,72E-01
Fracción utilizada localmente renovable, R / U	4,53E-01
Fracción utilizada comprada, (F+G+P2(I+T)) / U	4,30E-01
Densidad de la potencia emergética, U / (área, ha)	2,19E+15
Combustible utilizado por persona	4,28E+15
Producto Interno Bruto (PIB), en USD	5,77E+10
Tasa del uso del PIB, energía/\$, P1 = U / PIB	3,31E+12
Uso de energía por persona, U / población	1,24E+16
Capacidad de carga humana renovable al estandar de vida actual, (R/U) x (población)	6,98E+06

Como se puede apreciar en la Tabla 5.6, la tasa de cosecha de energía (TCE) presenta un valor de 2,32. Este valor representa la contribución neta que han tenido las economías externas al sistema en análisis, en este caso Chile, que están detrás de su propia operación. Mayores valores de TCE indican una menor dependencia con respecto a otros sistemas externos, y responde a la definición de sustentabilidad entregada en la sección III.4. Por otra parte, la tasa de carga ambiental (TCA) presenta un valor de 1,21, lo que quiere decir que por cada unidad de energía renovable utilizada por el país se utilizan 1,21 unidades de energía no renovable. Este índice, a diferencia de la TCE, en condiciones

**Tabla 5.6.- Índices de sustentabilidad para Chile, 2001**

<b>Índice</b>	<b>Valor</b>
Tasa de cosecha de energía (TCE)	2,32
Tasa de carga ambiental (TCA)	1,21
Índice de sustentabilidad (IS)	1,92
Tasa de la huella energética (THE), (U / R)	2,21

deseables debería ser cercano a cero, es decir, que exista una mayor proporción de uso de energía renovable. La combinación de los índices obtenidos entrega el índice de sustentabilidad (IS), que para el caso de Chile fue de 1,92. En la Tabla 5.7, se muestran los principales índices de sustentabilidad energética para algunos países, Chile y el mundo. Lo anterior permite dar una idea de los valores que se pueden llegar a obtener, ya que como cada sistema tiene sus propias limitantes y potencialidades, no existen rangos de valores que permitan concluir si es acaso o no sustentable el sistema en cuestión, es decir, se observa cuales sistemas tienden a ser más sustentables y cuales menos sustentables. En un extremo está Nueva Guinea con 76,95 y en el otro Taiwán, con 0,16. Claramente se puede apreciar que el primero es considerablemente más sustentable en la forma en la que opera su economía.

**Tabla 5.7.- Índices de sustentabilidad de Chile, algunas naciones y el mundo. (Adaptado de Brown, 1997)**

País	Energía total (sej/año)	Flujo de energía (sej/año)				%Renovable	Índices energéticos			
		Renovable (R)	No renovable (N)	Comprada (F)	TCE		TCA	IS	IHE	
1. Papua Nueva Guinea	8,9 E+22	7,30 E+22	1,06 E+22	5,30 E+21	82%	16,8	0,2	76,95	1,2	
2. Ecuador	10,0 E+22	4,81 E+22	4,21 E+22	1,01 E+22	48%	9,9	1,1	9,15	2,1	
3. Tailandia	15,2 E+22	7,37 E+22	2,46 E+22	4,85 E+22	50%	3,0	1,0	3,05	2,1	
<b>4. Chile</b>	<b>19,1 E+22</b>	<b>8,66 E+22</b>	<b>3,81 E+22</b>	<b>4,67 E+22</b>	<b>45%</b>	<b>2,3</b>	<b>1,2</b>	<b>1,92</b>	<b>2,2</b>	
5. Mexico	61,2 E+22	1,39 E+23	3,66 E+23	1,08 E+23	23%	5,7	3,4	1,66	4,4	
6. U.S.A	790,5 E+22	8,24 E+23	5,18 E+24	1,90 E+24	10%	4,2	8,6	0,48	9,6	
7. Italia	126,5 E+22	1,21 E+23	3,57 E+23	7,89 E+23	10%	1,6	9,5	0,17	10,5	
8. Taiwan	21,4 E+22	2,13 E+22	4,02 E+22	1,52 E+23	10%	1,4	9,0	0,16	10,0	
<b>9. MUNDO</b>	<b>33,6 E+24</b>	<b>9,43 E+24</b>	<b>8,21 E+23</b>	<b>2,34 E+25</b>	<b>28%</b>	<b>1,4</b>	<b>2,6</b>	<b>0,56</b>	<b>3,6</b>	

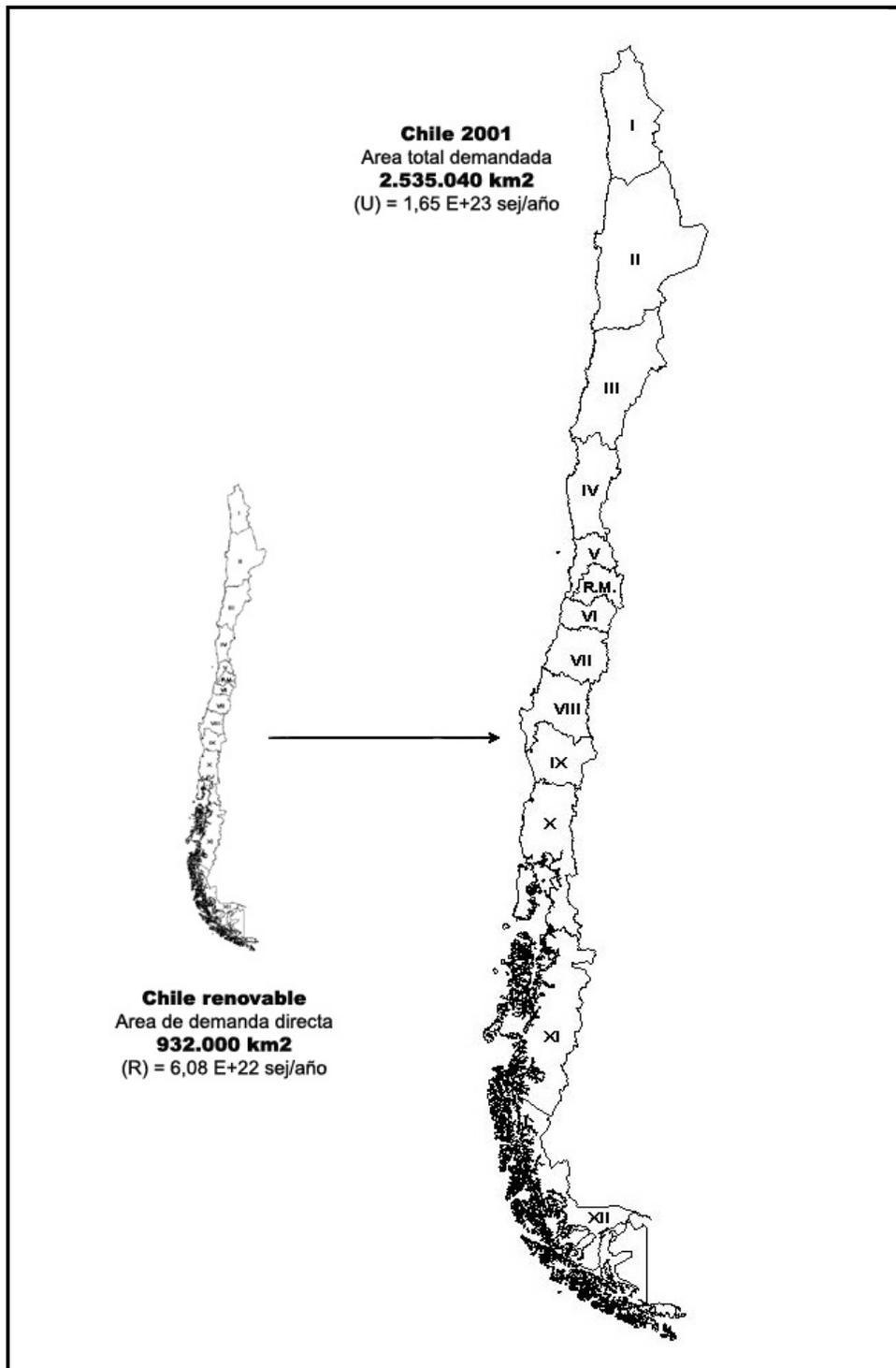


Figura 5.5.- El área de Chile que recibe energía renovable se mantiene constante y es de 932.000 km<sup>2</sup>. El área total demandada de Chile, o huella energética, representa el área total que se debería tener si la energía total utilizada cada año (U) fuese obtenida solo a partir de fuentes locales y renovables (R).

Junto al IS, se tiene el índice de la huella emergética (IHE), que para Chile arrojó un valor de 2,21. Esto indica que actualmente Chile consume el equivalente a dos veces su superficie de recursos renovables, expresados en recursos no renovables e importados. Es decir, e tamaño que Chile debería tener para mantener el actual estándar de vida debería ser 2,21 veces mas grande que el Chile actual si se quisiera que la emergía utilizada fuera únicamente la que esta local y renovablemente disponible (Figura 5.5).

Finalmente, de acuerdo con la capacidad de carga renovable al estándar de vida actual, Chile debería tener una población de 6.980.000 personas, pero en la actualidad presenta una población de 15.402.000 personas (Censo, 2002). La capacidad de carga, es entonces, otra manera de visualizar la huella ecológica (emergética) de cada sistema analizado.

### 5.3.2 Índices basados en la sustentabilidad emergética de la economía de la provincia de Palena

En la siguiente Tabla (5.8) se presentan todos los índices emergéticos utilizados para establecer el estado del sistema analizado, en este caso la Provincia de Palena. Todos los valores han sido obtenidos a partir de la Tabla 5.3.

**Tabla 5.8.- Indices emergéticos para la provincia de Palena, 2001.**

Item	Cantidad
Flujo de energía renovable, R	6,31E+21
Flujo desde reservas renovables internas, N	1,67E+21
Flujo de emergía importada, F+G+P2(I+T)	1,15E+20
Emergía total entrante, R+N+F+G+P2(I+T)	8,09E+21
Emergía total utilizada, U (N0+N1+R+F+G+P2(I+T))	6,44E+21
Emergía total exportada, N2+B+P1E	5,98E+21
Fracción de la emergía utilizada proveniente de fuentes internas, (N0+N1+R) / U	0,98
Exportaciones menos Importaciones, (F+G+P2(I+T)) - (N2+B+P1E)	5,87E+21
Relación entre Importación y Exportación, (F+G+P2(I+T)) / (N2+B+P1E)	0,02
Fracción utilizada localmente renovable, R / U	0,98
Fracción utilizada comprada, (F+G+P2(I+T)) / U	0,02
Fracción utilizada que esta libre, (R+N0)/U	0,98
Densidad de la potencia emergética, U / (área, ha)	2,19E+15
Combustible utilizado por persona	2,16E+15
Producto Interno Bruto (PIB), en USD	6,34E+07
Tasa del uso del PIB, emergía/\$, P1 = U / PIB	1,02E+14
Uso de emergía por persona, U / población	3,39E+17
Capacidad de carga humana renovable al estandar de vida actual, (R/U) x (población)	18587

De acuerdo a la información de la Tabla 5.9, la tasa de cosecha de energía (TCE) presenta un valor de 56,21. Este valor representa la contribución neta que han tenido las economías externas al sistema en análisis, en este caso la Provincia de Palena, que están detrás de su propia operación. La tasa de carga ambiental (TCA) presenta un valor de 0,02, lo que quiere decir que por cada unidad de energía renovable utilizada por la Provincia se utilizan 0,02 unidades de energía no renovable. Como ya se ha mencionado anteriormente, la combinación de los índices obtenidos entrega el índice de sustentabilidad (IS), que para el caso de la Provincia de Palena fue de 2719. En la Tabla 5.10, se muestran los principales índices de sustentabilidad energética para el sistema en análisis, en este caso la Provincia de Palena, su sistema exterior incidente, Chile y el mundo.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la combinación de los índices obtenidos entrega el índice de sustentabilidad (IS), que para el caso de la Provincia de Palena fue de 2719. En la Tabla 5.10, se muestran los principales índices de sustentabilidad energética para el sistema en análisis, en este caso la Provincia de Palena, su sistema exterior incidente, Chile y el mundo. Como se puede apreciar, los valores difieren entre sí considerablemente. Sin embargo existen relaciones útiles que ayudan a interpretar los valores, tales como los

**Tabla 5.9.- Índices de sustentabilidad para la provincia de Palena, 2001**

<b>Índice</b>	<b>Valor</b>
Tasa de cosecha de energía (TCE)	56,21
Tasa de carga ambiental (TCA)	0,02
Índice de sustentabilidad (IS)	2719
Tasa de la huella energética (THE), (U / R)	1,02

porcentajes (%) de energía renovable de cada sistema. Y es en esto donde se aprecia una clara relación entre dicho valor y el índice de sustentabilidad. Es así como en el mundo, Chile y la Provincia de Palena las proporciones de energía renovable son 28%, 45%, 97% respectivamente, mientras que los índices de sustentabilidad son 0,56, 1,92, 2718,5 respectivamente. Lo mismo se observa tanto para la TCE, TCA y el IHE.

**Tabla 5.10.- Índices de sustentabilidad de Chile y Palena.**

Sistema	Flujo de energía (sej/año)				%Renovable	Índices energéticos			
	Energía total (sej/año)	Renovable (R)	No renovable (N)	Comprada (F)		TCE	TCA	IS	IHE
Chile	19,1 E+22	8,66 E+22	3,81 E+22	4,67 E+22	45%	2,3	1,2	1,92	2,2
Provincia Palena	6,5 E+21	6,30 E+21	1,67 E+21	0,04 E+21	97%	56,2	0,0	2718,5	1,0
9.MUNDO	33,6 E+24	9,43 E+24	8,21 E+23	2,34 E+25	28%	1,4	2,6	0,56	3,6

Con respecto a éste último, el índice de la huella energética (IHE), se tiene que para Palena un valor de 1,02. Esto indica que actualmente la provincia consume el equivalente 2% más de su superficie de recursos renovables, expresados en recursos no renovables e importados (Figura 5.6). Este valor se relaciona con la capacidad de carga humana renovable al estándar de vida actual. Es decir, la provincia de Palena presentó en el año 2001 una población de 18.791 habitantes (Censo, 2002), siendo que la capacidad de carga renovable es de 18.587 personas.

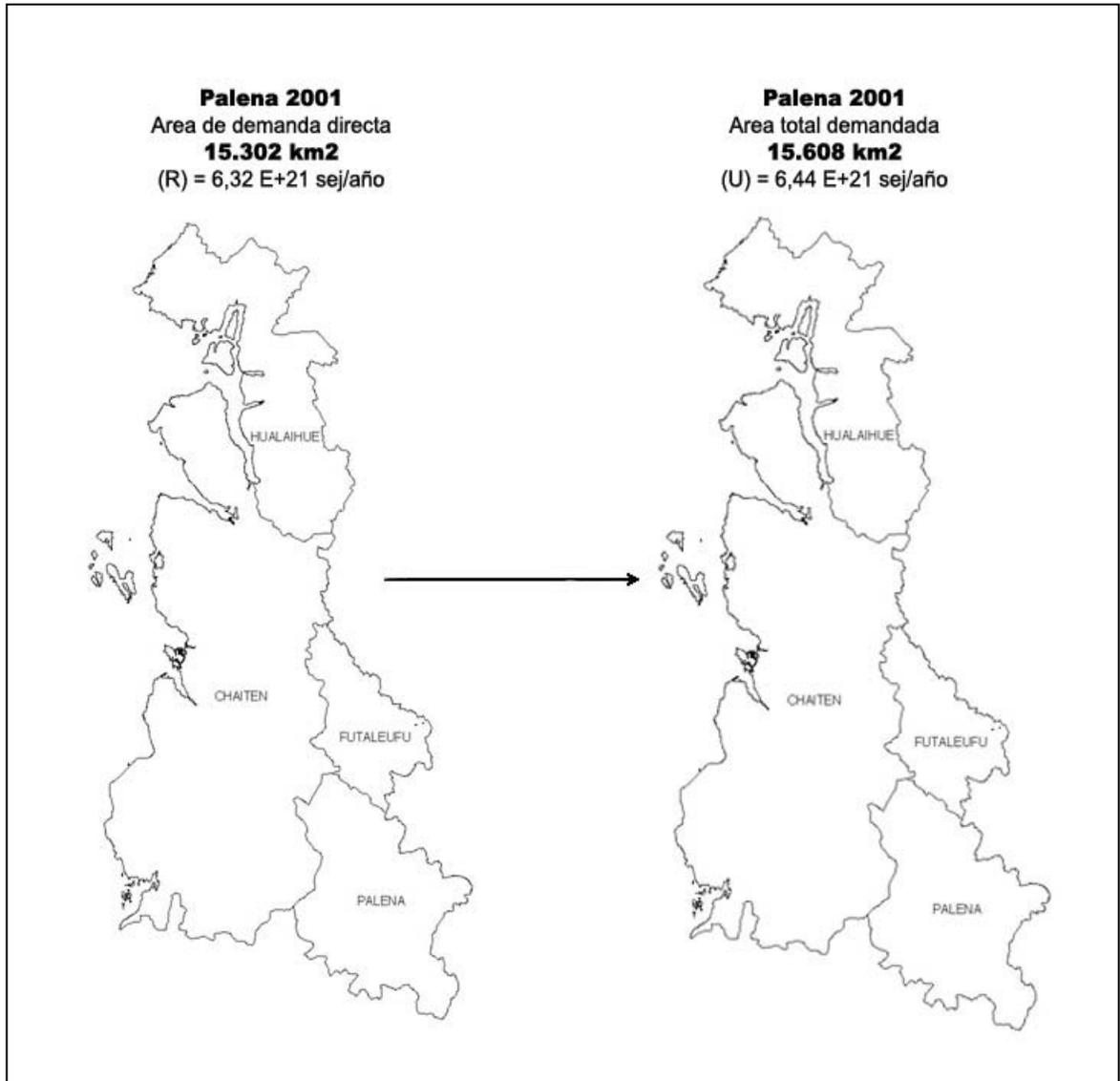


Figura 5.6.- El área de Palena que recibe energía renovable se mantiene constante y es de 15.302 km<sup>2</sup>. El área total demandada de Palena, o huella energética, representa el área total que se debería tener si la energía total utilizada cada año (U) fuese obtenida solo a partir de fuentes locales y renovables (R).

## **6. DISCUSIONES**

### **6.1 Acerca del análisis energéticos de Chile**

En el caso de Chile, el análisis arrojó que en comparación con otros países desarrollados del mundo, este país se encuentra en un estado de sustentable o más sustentable. Es muy importante destacar que el IS es un valor relativo. No existen rangos ni óptimos, pero si refleja el estado actual del uso de la energía por un sistema. Claramente es un estado deseable presentar un porcentaje del 45% de energía renovable para el caso nacional versus un 10% para el caso, por ejemplo, de E.E.U.U. Sin embargo Chile se considera que es un país en vías de desarrollo, que en términos económicos implica que aún le queda por crecer, es decir, aumentar, entre otras cosas, su PIB. Como se mostró en la introducción, el aumento del PIB requiere necesariamente, bajo el actual esquema económico, un aumento en el consumo de energía. Lo anterior implica que en el mediano plazo, proyectando las metas que se tienen actualmente como país, es decir, seguir creciendo, esta proporción de energía renovable disminuirá progresivamente hasta llegar, probablemente, a valores parecidos a los de los países actualmente desarrollados (Ver Tabla 5.7). Es importante hacer notar que la dependencia de los sistemas actuales por energía no renovable tiene dos dimensiones. La primera se refiere a cuanta energía del total utilizado es renovable. La segunda se refiere a cuanta de la energía utilizada es importada. En el caso de Chile, es preciso remarcar la dependencia energética que el sistema tiene actualmente con otras naciones. En la Tabla 5.2 se aprecia claramente que existe un gran déficit entre la energía fósil que producimos y la que consumimos (cerca del 24% del consumo es producción propia). Por lo tanto, de nada sirve tener hoy un país que presenta una condición de sustentable, si no se produce una transformación hacia un sistema que dependa menos de fuentes de energía externa.

### **6.2 Acerca del análisis energéticos la provincia de Palena**

Al comparar la provincia de Palena con su sistema externo incidente directo, es decir Chile (Ver Tabla 5.10), se aprecia una amplia diferencia tanto en los índices energéticos

(TCE, TCA, IS, IHE) así como en la proporción de energía renovable con respecto al total utilizado por el sistema (97% y 45% respectivamente). Un índice de sustentabilidad (IS) de 2719, podría hacer pensar que el sistema es prácticamente un estado ideal, que podría servir como ejemplo para desarrollo de otros sistemas. Sin embargo, en este caso los valores no reflejan la situación de esta provincia. El trabajo en terreno desarrollado en Palena, muestra la situación de pobreza en la cual se encuentra la gente. Este punto, podría ser discutible, ya que si bien no cuentan con muchos recursos, especialmente educación, tienen un gran capital natural que les permite subsistir de una manera autónoma. Es difícil imaginar el estado de pobreza que una familia tendría en Santiago de Chile si contara con \$200.000 al año de capital para gastar en todas sus necesidades, sin embargo en Palena, esta situación se da comúnmente, especialmente entre las personas que no cuentan con un trabajo formal (cerca del 60%). El análisis emergético está lejos de servir como un herramienta de evaluación social. Sin embargo, si permite reflejar el uso de los recursos (no así la distribución de ellos en la sociedad). La provincia de Palena pareciera estar en un estado de óptima sustentabilidad, con una gran proporción de la cosecha de energía local (TCE), es decir poco dependiente de los sistemas externos, y con una baja carga ambiental (TCA). Pero existen elementos que el análisis no logra captar. Uno de ellos es el hecho que no se evalúa la energía exportada dentro de la TCE y la TCA. Para el caso de Palena, dentro de la energía utilizada ( $U = 630 \text{ E}+19 \text{ sej /año}$ , ver Tabla 5.3) no considera la energía no utilizada exportada ( $N2$ ), que fue de  $165 \text{ E}+19 \text{ sej/año}$ . Esta energía no utilizada para el caso de Palena no es renovable, ya que se presenta en forma de exportación por producción de salmón de cultivo, que utiliza los estuarios de la provincia. Estos estuarios no son eternos debido al manejo que se les dan y a que la producción depende de fuentes de energía no renovables que se deben utilizar para lograr altos rendimientos, es decir plásticos, fertilizantes y combustibles. Por lo tanto, en la evaluación de sustentabilidad no se está considerando una gran proporción de energía que esta siendo extraída del sistema Palena, y que no podrá seguir extrayendo en el largo plazo. Lo mismo ocurre con los recursos forestales, especialmente el Alerce. La extracción forestal de esta especie fue la única que se considero como no renovable, ya que con un ciclo de a lo menos 1000 años, difícilmente podría ser considerada una fuente de energía renovable. Junto lo anterior, se suma la

energía que subsidia el gobierno regional, que es energía externa al sistema y que permite el funcionamiento del sistema social.

En resumen, la provincia de Palena, dado su gran capital natural existente aún, se presenta como un sistema que es actualmente sustentable debido a las altas proporciones de energía renovable utilizadas, pero que en el largo plazo, siguiendo las políticas extractivas que se han efectuado en la zona históricamente, podría dejar de serlo. Se presentan posibles distorsiones en el análisis debido a que se requiere de un estudio a través del tiempo para determinar el tipo de uso que se le da a la energía, evitando así clasificarla a priori como renovable o no renovable.

## 7. CONCLUSIONES

El análisis emergético considera las fuentes de energía renovable como utilizadas, es decir, el balance asume que la energía potencial está siendo ocupada por el sistema en cuestión. En este aspecto la metodología es coherente ya que se basa en la teoría general de sistemas y en el principio de máximo poder, que predice el uso del máximo potencial de energía a través del tiempo. Sin embargo, se presenta un desafío en la mejora de la metodología utilizada y es que es difícil asumir cuáles fuentes de energía son o no renovables, que como se explicó en el capítulo III, dependerá de si se consume igual o menos de lo que se produce. Actualmente Chile y Palena se muestran como sistemas sustentables, ya que con respecto a otras situaciones en el mundo, presentan altas proporciones de uso de energía renovable. Sin embargo, la energía renovable se presenta como un estado potencial, es decir, puede ser renovable, no así la energía no renovable, como el caso del petróleo y los minerales. Los bosques, recursos marinos y recursos hídricos pueden ser renovables sólo si se les da un uso adecuado. Esta caracterización de uso no se realizó en este estudio, por lo que se recomienda indagar en este tema.

Tanto en Chile como en la Provincia de Palena, uno de las principales fuentes de energía fue el de combustibles fósiles. El petróleo es el resultado de la acumulación de materia orgánica que bajo procesos geológicos se transforma en energía concentrada. Por lo tanto se podría considerar como una ineficiencia del cretácico, ya que es energía producto de residuos no utilizados en esa era. Sin embargo, aproximándose al fenómeno desde una perspectiva holística, el petróleo podría verse como una parte de la “memoria” del ecosistema que en eras anteriores existía, y que ahora se está utilizando como catalizador de procesos dentro del ecosistema actual en forma de combustible.

Aceptando lo anterior pareciera que necesariamente el petróleo se iba a consumir, junto con el hecho que el principio del máximo poder sugiere la captación por los sistemas de toda la energía disponible. El tema a discutir entonces, no debiera pasar por si es el petróleo una energía que debiera o no utilizarse dada su condición de energía no renovable, sino la manera de cómo se está canalizando hacia los sistemas humanos y cómo afecta esta inyección de recursos concentrados a la civilización. Hasta ahora, luego de varios siglos de consumo de petróleo por parte del hombre, el sistema ha funcionado bajo un esquema de

retroalimentación positiva, es decir, la extracción de petróleo a provocado o estimulado que se aumente la extracción del petróleo.

Sin embargo, este esquema de retroalimentación positiva, estará limitado cuando se llegue a un punto en que la cantidad de energía necesaria para extraerlo sea mayor a la cantidad de energía extraída en forma de petróleo. (Haden, 2003), en este punto, el petróleo ya no podrá ser considerado una fuente de energía. Si gran parte de la energía de un país, como en el caso de Chile (cercano al 25%) proviene de combustibles no renovables, entonces el patrón de organización de dicho país debiera ser considerado insustentable en el largo plazo.

Lo anterior se aplica, en toda su extensión, para cualquier fuente de energía que no se utilice adecuadamente, es decir, por una parte no deberían crearse dependencias por parte de los sistemas hacia fuentes de energía limitadas, y por otra parte, las fuentes de energía renovables deberían utilizarse de acuerdo a una criterio de sustentabilidad, ya que en caso contrario dejan de ser renovables, y por lo tanto, deja de tener sentido tratar de hacer una conversión hacia dichas fuentes.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

- AVEN, 2003. Guía de ahorro y eficiencia energética en los municipios de la Comunidad Valenciana, Valencia. [www.aven.es/informes/municipios.html](http://www.aven.es/informes/municipios.html)
- BOJO, J., MALER, K. Y UNEMO, L., EDS.1990. Environment and Development: An Economic Approach, Dordrecht, Kluwer.
- BROWN, M.T. Y ULGIATI, S., 1997. Emergy based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecological Engineering* 9, pp. 57-69.
- BROWN, M.T. 1997. Emergy Evaluation of Chile and Perspectives for Sustainable Development. Working paper #97-014. Center for Environmental Policy. University of Florida, Gainesville.
- CARPENTER, S. 1991 Inventing Sustainable Technologies, en J. Pitt and E. Lugo, eds., *The Technology of Discovery and the Discovery of Technology: Proceedings of the Sixth International Conference of the Society for Philosophy and Technology*, Blacksburg (VA), Society for Philosophy and Technology, pp. 481-482.
- CÉSARMAN, E. 1997. *Termodinámica de la vida*. Ediciones Gernika. México, D.F. 515 p.
- CNE, 2002. Índices de Eficiencia Energética en Chile Tendencias en el Sector Industrial y Minero 1990 –1999, Chile. [www.cne.cl/archivos\\_bajar/EE\\_chile.pdf](http://www.cne.cl/archivos_bajar/EE_chile.pdf)
- CUELLO C. Y P. DURBIN, 1993. *Desarrollo sostenible y Filosofía de la Tecnología*, Universidad de Delaware. <http://www.campus-oei.org/salactsi/tef02.htm>
- EIA, 2004. Energy Information Administration. Official Energy Statistics from the U.S. Government. <http://www.eia.doe.gov/>
- FARRE, M., 2004. *Manual de buenas practicas: Eficiencia Energética*. Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Argentina.
- GASTÓ, J., RODRIGO P. Y ARÁNGUIZ I. 2002. *Ordenación Territorial: desarrollo de predios y comunas rurales*. Ediciones LOM. Santiago, Chile.
- GASTÓ, J. 1979. *Ecología. El hombre y la transformación de la naturaleza*. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. 520 p.
- GASTÓ, J., COSIO F. Y PANARIO D. 1993. *Clasificación de Ecorregiones y determinación de Sitio y Condición*. Red de Pastizales Andinos, Quito.

- GOODWIN, B., SOLÉ, R. 2000. *Sings of Life: How Complexity Pervades Biology*. Basic Books, New York.
- GOPALAKRISHNAN, CHENNAT. 1994. *Economics of Energy in Agriculture*. Avebury, Vermont.
- HADEN, A. 2003. *Emergy Evaluations of Denmark and Danish Agriculture*. Centrum for uthalligt lantbruk, Uppsala. <http://www.cul.slu.se/information/publik/ekolantbruk37.pdf>
- HALL, C. (ED.) 1995. *Maximun Power: The Ideas and aplicatitios of H. T. Odum*. The University Press of Colorado, Colorado.
- HANNON, B., RUTH, M. 1997. *Modeling dynamic biological systems*. Springer-verlag.
- IGM, 2003. *Atlas geográfico de Chile*. Instituto geográfico militar. Santiago, Chile.
- JORGENSEN ET ALL., 1999. *Ecosystems emerging 3: Openess*. *Ecological Modelling* 117, pp. 41-64.
- LOTKA, A.J., 1922. *Contribution to the energetics of evolution*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 8, pp. 147-151.
- MARGALEF, R. 1993. *Teoría de los sistemas ecológicos*. Segunda edición. Editorial Universitat de Barcelona. Barcelona, España. 290 p.
- MOPT, 1991. *La energía: tema interdisciplinario para la educación ambiental*. Ministerio de obras públicas y transporte. Centro de publicaciones. Madrid, España. 220 p.
- MARTINEZ-ALIER, J. 1987. *Ecological Economics*. Basil Blackwell, New York.
- MCGORVERN, A. 1980. *Marxism: An American Christian Perspective*, Maryknoll (NY), Orbis Books.
- MINECO, 2003. *Estrategia de desarrollo y eficiencia energética*. Subdirección general de planificación energética, España. [www.mineco.es/energia/desarrollo/E\\_EficienciaE4.htm](http://www.mineco.es/energia/desarrollo/E_EficienciaE4.htm)
- NAVA, R., R. ARMIJO Y GASTÓ, J. 1979. *Ecosistema: La unidad de la naturaleza y el hombre*. Serie de recursos naturales. Universidad Autónoma de Navarra. México. 332 p.
- ODUM, H.T. 1980. *Ambiente, energía y sociedad*. Blume Ecología, Barcelona.
- ODUM, H.T. 1996. *A prosperous way down: principlles and policies*. John Wiley, NY.
- ODUM, H.T. 2000. *Heavy Metals in the Environment: using wetlands for their removal*. CRC Press, Florida.
- ODUM, H.T. 2000. *Modelling for All Scale: an introduction to System Simulation*. Academic Press, California.

- ODUM, H.T. 2001. Environmental Accounting, Energy and Decision Making. The University Press of Colorado, Colorado.
- PIMENTEL, DAVID. 1980. "Handbook of Energy Utilization in Agriculture. CRC Press, Florida.
- PRADO, 1983. Artificialización de ecosistemas. Planteamiento teórico para su transformación. Tesis de Licenciatura en Fitotecnia. Facultad de Ciencias agrarias, Veterinarias y Forestales. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- REDCLIFT, M. 1987. Sustainable Development: Exploring the Contradictions, London, Methuen.
- SAGOFF, M. 1988. The Economy of the Earth, Nueva York, Cambridge University Press.
- SAFONOV P., COMAR V., ORTEGA E. 1999. Systems Modeling of Brazilian Sustainability with Energy Flows Diagrams. Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow. [www.ulb.ac.be/ceese/STAFF/safonov/Brasil4.pdf](http://www.ulb.ac.be/ceese/STAFF/safonov/Brasil4.pdf)
- SHIVA, V. 1992. Resources, en Sachs, W., ed., 1992, The Development Dictionary, London, Zed
- TIEZZI, E., MARCHETTINI, N., BASTIANONI, S. 2002. Analisi Energetica della Provincia. Università degli Studi di Siena. [www.provincia.bologna.it/ambiente/rospos/libri/an\\_energetica/relazione\\_emergia.pdf](http://www.provincia.bologna.it/ambiente/rospos/libri/an_energetica/relazione_emergia.pdf)
- UNWCED, 1987. Our Common Future, Nueva York, Oxford University Press.
- WACKERNAGEL, M. 2001. Nuestra huella ecológica: reduciendo el impacto humano sobre la Tierra. LOM. Santiago, Chile.

## 9. ANEXOS

### ANEXO A: El álgebra de la emergía

Usando como ejemplo la Figura A.1, se puede decir formalmente que la emergía B del flujo o del producto k-ésimo esta dada por:

$$B_k = \sum_i Tr_i E_i$$

donde  $E_i$  es el contenido energético del i-ésimo input y  $Tr_i$  representa su transformidad, la cual se define por la siguiente relación;

$$Tr_i = \frac{B_i}{E_i}$$

en la cual  $B_i$  representa la emergía del producto i-ésimo. Esta definición pareciera ser circular, pero en realidad existe un vínculo que la hace operativa: la transformidad de la energía solar directa es, por definición, igual a uno.

Es posible por lo tanto determinar la transformidad de un producto o flujo, mantenido directamente por la energía solar, y usarlos para obtener la emergía demandada por productos que no dependen directamente de la energía solar. Una vez que se determina la emergía que mantiene al k-ésimo proceso se esta en posición para determinar la transformidad  $Tr_k$ , simplemente dividiendo  $B_k$  por el contenido de energía  $E_k$  del k-ésimo producto:

$$Tr_k = \frac{B_k}{E_k} = \sum_i Tr_i \frac{E_i}{E_k}$$

El cálculo de la emergía para cada flujo energético se logra sometándose a las reglas fundamentales que constituyen el supuesto de la *álgebra emergética*, que varía profundamente del álgebra energética en cuanto a la emergía, a diferencia de la energía no es puramente conservativa, y no sigue por lo tanto una lógica de conservación, pero si de memorización.

La primera regla del álgebra emergética afirma que cualquier emergía de salida (output) de un proceso debe ser atribuida a todos los ingresos (input) de dicho proceso.

La Figura A.2 muestra un diagrama energético y un ejemplo numérico del cálculo de la energía para un producto

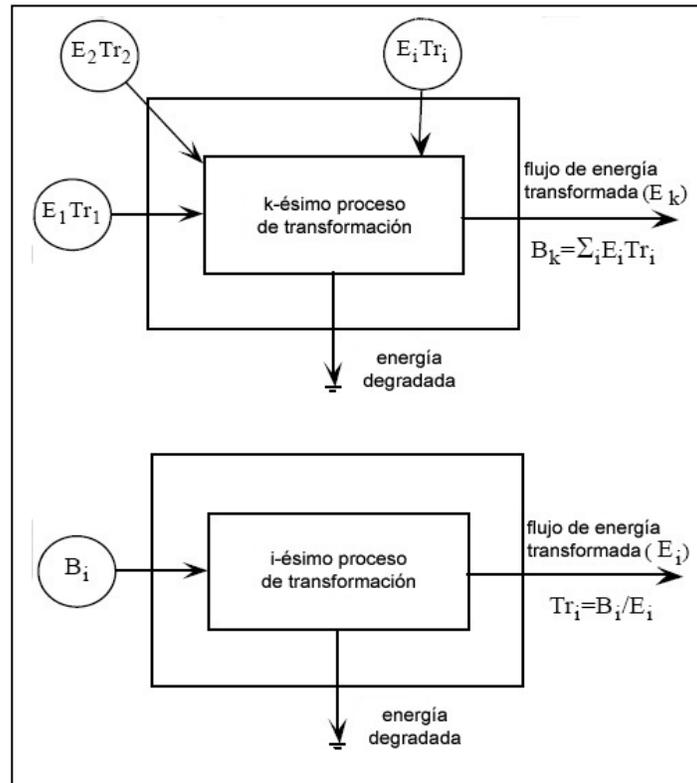


Figura A.1: Cálculo de la energía y de la transformidad

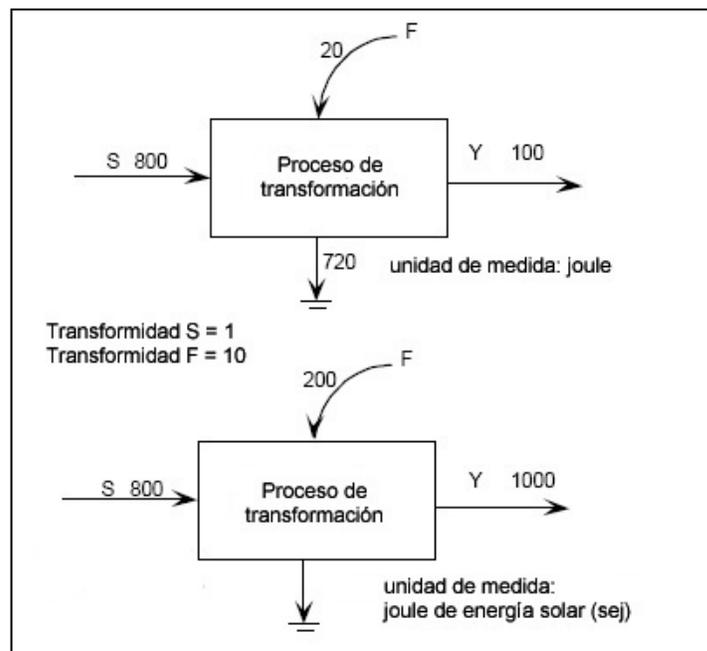


Figura A.2: Cálculo de la energía de un producto.



La cuarta, pone énfasis en los elementos de retroalimentación del sistema. Los flujos de feedback no deben ser contabilizados dos veces dentro de un análisis.

En la Figura A.4, se tiene un sistema simple de retroalimentación desde el componente B hacia el componente A; en la práctica es usual simplificar la asignación de la energía que esta retroalimentando al sistema, escribiendo en cada una de las rutas la suma de los inputs que provienen desde varios recursos.

Comenzando desde la derecha, la salida (output) T0 es la suma de 400 sej de la fuente S y de 3/5 de la fuente F (60 sej), dando un total de 460 sej. Se puede notar que en la salida de A se cuenta solamente la parte de la retroalimentación de B que no proviene de S (y que también atraviesa A). En otras palabras, los 400 sej que provienen originalmente de A no pueden ser contados una segunda vez. Esta regla se aplica también en el caso de “by product”, en cuanto a si el co-producto interactúa en una transformación sucesiva, La energía de producto final no equivale a la suma de las dos contribuciones, pero tiene el valor (común) de uno de los dos flujos, debido a que los dos flujos representan la convergencia del mismo recurso en el mismo lugar y en el mismo período de tiempo.

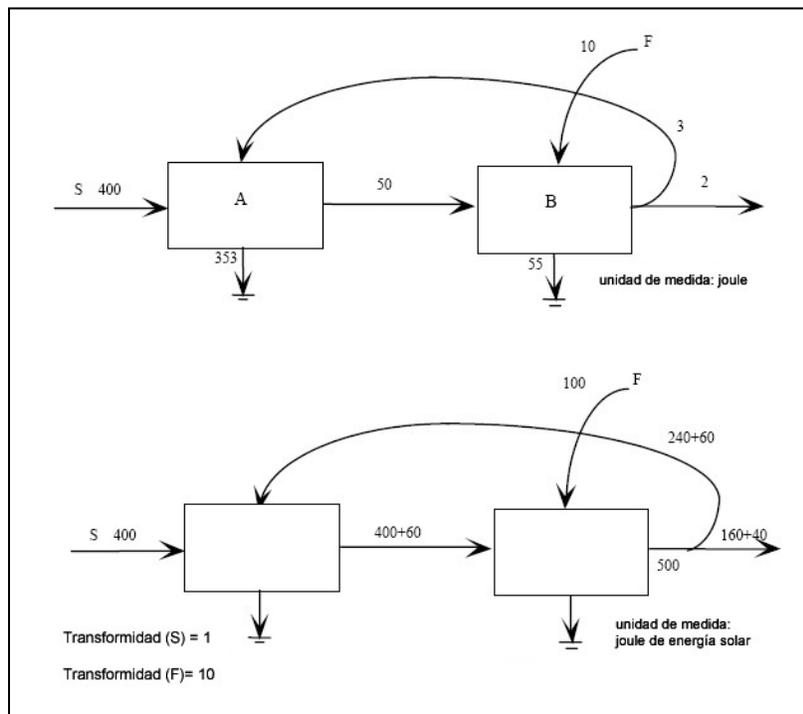


Figura A.4: Cálculo de la energía en presencia de un flujo de retroalimentación..

Se debe enfatizar que el mismo flujo o producto se puede obtener desde varios procesos, si está bajo el control humano, ya que éste da origen a diversas transformidades para un mismo producto.

La emergía, no tiene las características conservativas como la energía; de hecho su álgebra no sigue una lógica conservativa, pero sí de memorización. La contribución de todos los ingresos (inputs) a un proceso se mide a través de la emergía.

Los únicos flujos que se consideran cuando se calcula la emergía de un flujo o producto, son aquellos que derivan de ingresos (inputs) independientes. El problema es determinar si desde el punto de vista de sistemas, se puede interpretar si un input es independiente o si en realidad es un co-producto (parcial o totalmente) de la misma fuente de energía.

Lo anterior se puede lograr estudiando con más detalle el sistema que contribuye a la formación del input en observación, de tal manera de entender cuales son las relaciones entre el sistema verdadero y que elementos podrían pertenecer al ambiente externo.

Un ejemplo típico en el cual es importante evitar contar dos veces la emergía que ingresa es cuando, en sistemas naturales, se considera la energía solar y aquella derivada de la lluvia y del viento. Como estos tres inputs son en realidad producto de la concentración y variación del tiempo de la energía solar, Odum ha sugerido considerar sólo la contribución emergética de la fuente más grande de los tres inputs y de o sumar los otros dos.

**ANEXO B: Fuentes de las transformidades utilizadas en las tablas de emergía.**

<b>Código</b>	<b>Fuente</b>
A	Odum, 1996
B	Haden, 2003
C	Odum, 2001
D	Este estudio

## ANEXO C: Fórmulas y cálculos de los flujos de energía

### CHILE

ITEM	METODO DE CÁLCULO	FUENTE DATOS
<b>RECURSOS RENOVABLES</b>		
<b>1 ENERGIA SOLAR :</b>		
Área de la plataforma continental =	1.76E+11 m <sup>2</sup> a 200 m profundidad.	World Resources Institute
Area terrestre=	7.56E+11 m <sup>2</sup>	SINIA, 2004
Insolation =	1.27E+02 Kcal/cm <sup>2</sup> /año	
Albedo =	0.30 (% dado como decimal)	
Energía (J/año) =	(area total)*(insolation promedio)*(1-albedo)	
=	(9,32E+11 m <sup>2</sup> )*(E+04 cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )*(1.27E+02 Kcal/cm <sup>2</sup> /año)*	
=	(4186 J/kcal)*(1-0.30)	
=	3.47E+21	
<b>2 LLUVIA, ENERGIA POTENCIAL QUIMICA:</b>		
Área de la plataforma continental =	1.76E+11 m <sup>2</sup> a 200 m profundidad.	World Resources Institute
Area terrestre=	7.56E+11 m <sup>2</sup>	SINIA, 2004
Lluvia (terrestre) =	0.57 m/año	
Lluvia (mar) =	0.26 m/año (est. como el 45% de la lluvia continental)	Odum, 1996
Tasa de evapotranspiración =	50%	Brown, 1997
Energía (terrestre) (J/año)	(area terrestre)*(Evapotrans)*(Precipitaciones)*(Gibbs no.)	
=	(7.56E+11 m <sup>2</sup> )*(50%)*(0,57 m/año)*(1000kg/m <sup>3</sup> )*(4.94E+03J/kg)	
=	1.06E+18	
Energía (mar) (J/año) =	(area plataforma continental)*(Precipitaciones)*(Gibbs no.)	
=	(1.76E+11 m <sup>2</sup> )*(0,26 m/año)*(1000kg/m <sup>3</sup> )*(4.94E+03J/kg)	
=	2.26E+17	
Energía total (J/año) =	1.29E+18	
<b>3 LLUVIA, ENERGIA GEOPOTENCIAL:</b>		
Area terrestre=	7.56E+11 m <sup>2</sup>	
Lluvia caída =	0.57 m/año	
Elevación promedio =	996.40 m	World Resources Institute
Tasa de escorrentía =	0.60 (% dado como decimal)	
Energía (J/año) =	(% ecorrentía)*(area)*(precipitaciones)*(elevación Promedio)* (gravedad)	
=	(0,60)*(7.56E+11 m <sup>2</sup> )*(0.57 m/año)*(1000kg/m <sup>3</sup> )*(996,4m)*(9.8m/s <sup>2</sup> )	
=	2.52E+18	
<b>4 ENERGIA EOLICA:</b>		
Energía (J/año) =	9.36E+18	Brown, 1997
<b>5 ENERGIA DE OLEAJE:</b>		
Energía (J/año) =	8.56E+17	Brown, 1997

6 ENERGIA DE LAS MAREAS:

Área de la plataforma continental =	1.76E+11 m <sup>2</sup>	World Resources Institute
Rango promedio de las mareas =	1.00 m	
Densidad agua del mar =	1.03E+03 kg/m <sup>3</sup>	Haden, 2003
Mareas/año =	7.30E+02 (estm.de 2 mareas/dia es 365 dias)	
Energía (J/año) =	(area mar)*(absorcion %)**(mareas/año)(rango de marea)^2* (densidad agua mar)*(gravedad)	
=	(1.76E+11 m <sup>2</sup> )*(0.5)*(7.30E+02/año)*(1,00m)* (1.03E+03 kg/m <sup>3</sup> )*(9.8m/s <sup>2</sup> )	
=	6.48E+17	

7 CICLO TERRESTRE:

Area terrestre =	7.56E+11 m <sup>2</sup>	SINIA, 2004
Flujo de calor =	1.00E+06 J/m <sup>2</sup>	Odum, 1996
Energía (J) =	(7.56E+11)*(1.00E+06)	
=	7.56E+17	

**ENERGIA RENOVABLE INTERNA**

8 HIDROELECTRICIDAD:

Kilowatt Hrs/año =	2.16E+10 KwH/año	CNE, 2004
Energía (J/año) =	(2.16E+10 KwH/año)*(8,62E+5 Cal/KwH)*(4,186 J/Cal)	CNE, 2004
=	7.79E+16	

9 OTRAS ENERGIAS RENOVABLES (Eólica, Solar, Biomasa, Getérmica):

Kilowatt Hrs/año =	5,31E+06 KwH/año	CNE, 2004
Energía (J/año) =	(5,31E+06 KwH/año )*(8,62E+5 Cal/KwH)*(4,186 J/Cal)	CNE, 2004
=	1.92E+13	

10 PRODUCCION AGRÍCOLA:

Producción =	1,06E+09 Tons.	INE, 2004
Energía (J/año) =	8.98E+16	

11 PRODUCTOS ANIMALES:

Producción animal =	6,75E+05 Tons.	Banco Central, 2003
Energía (J/año) =	8,22E+15	

12 EXTRACCION DE PESCADOS Y MARISCOS:

Pesca =	4.66E+06 Tons.	SERNAPESCA, 2004
Energía (J/año) =	(4.66E+06 Tons.)*(1E+06 g/Tons.)*(1350 Cal/g)*(4,186 J/Cal)	www.consumer.es
=	2.63E+16	

13 PRODUCTION DE LEÑA:

Producción de Leña=	1.21E+07 m <sup>3</sup>	INFOR, 2004
Energía (J/año) =	(1.21E+07 m <sup>3</sup> )*(5E+2 Kg/m <sup>3</sup> )*(1E+03 g/Kg)* (3600 Cal/g)*(80%)*(4,186 J/Cal)	Brown, 1997
=	7.29E+16	

14 PRODUCCION Y EXTRACCION FORESTAL MADERA:

Cosecha =	2.04E+07 m <sup>3</sup>	INFOR, 2002
Energía (J/año) =	(2.04E+07 m <sup>3</sup> )(5E+2 Kg/m <sup>3</sup> )(1E+03 g/Kg)* (3600 Cal/g)(80%)(4,186 J/Cal)	Brown, 1997
=	1.23E+17	

**USO DE RECURSOS NO RENOVABLES PERTENECIENTES A CHILE**

15 GAS NATURAL

Extracción =	2.68E+09 m <sup>3</sup> /año	ENAP, 2004
Energía (J/año) =	(2.68E+09 m <sup>3</sup> /año)*(8.64E+03 Kcal/m <sup>3</sup> )* (1E+03 cal/Kcal/Kg)*4,186 J/cal	CNE, 2004
=	9.69E+16	

16 PETRÓLEO

Extracción =	3.85E+05 m <sup>3</sup> /año	ENAP, 2004
Energía (J/año) =	(3.85E+05 m <sup>3</sup> /año)*(8.55E+02 Kg/m <sup>3</sup> )* (1E+03 g/Kg)*(1.09E+04 Cal/g)*4,186 J/cal	CNE, 2004
=	1.50E+16	

17 CARBÓN

Extracción =	5.68E+05 Tons./año	Sernageomin, 2004
Energía (J/año) =	(5.68E+05 Tons./año)*(1E+06 g/Tons.)*(7E+3 Cal/g)* (4,186 J/cal)	CNE, 2004
=	4.40E+17	

18 MINERIA NO METALICA

Consumo =	1.50E+07 Tons./año	Sernageomin, 2004
Masa (g/año) =	(5.56E+06 Tons./año)*(1E+06 g/Tons.)	
=	5.56E+12	

19 METALES (Au,Ag,Pb,Cu,Zn,Fe,Mn,Mo)

Producción =	8.94E+06 Tons./año	Sernageomin, 2004
Masa (g/año) =	(8.94E+06 Tons./año)*(1E+06 g/Tons.)	
=	8.94E+12	

20 SUELO:

Pérdida de suelo =	6.7E+06 g/ha/año	Honorato et all, 2001
Energía (J/año) =	(6.7E+06 g/ha/año)*(1,66E+06ha cultivadas)* (0.03 organico)*(5400 cal/g)(4,186 J/Kcal)	Banco Central, 2003
=	7.54E+15	

**IMPORTACIONES DE FUENTES DE ENERGIA EXTERNA**

21 GAS NATURAL

Consumo =	5.23E+09 m <sup>3</sup> /año	CNE, 2004
Energía (J/año) =	(5.23E+09 m <sup>3</sup> /año)*(8.64E+03 Kcal/m <sup>3</sup> )* (1E+03 cal/Kcal/Kg)*4,186 J/cal	CNE, 2004
=	1.89E+17	

## 22 PETRÓLEO Y DERIVADOS

Importaciones =	1.22E+07 m <sup>3</sup> /año	CNE, 2004
Energía (J/año) =	(1.22E+07 m <sup>3</sup> /año)*(8.55E+02 Kg/m <sup>3</sup> )* (1E+03 g/Kg)*(1.09E+04 Cal/g)*4,186 J/cal	CNE, 2004
=	4.76E+17	
Gas licuado=	9.98E+05 (m <sup>3</sup> /año)*(7E+02 Kg/m <sup>3</sup> )*(1E+03 g/Kg)* (1.21E+04 Cal/g)*4,186 J/cal	CNE, 2004
=	3.54E+16	
Energía total (J/año) =	5.11E+17	

## 23 CARBÓN

Importaciones =	2.67E+06 Tons./año	CNE, 2004
Energía (J/año) =	(2.67E+06 Tons./año)*(1E+06 g/Tons.)*(7E+3 Cal/g)*4,186 J/cal	CNE, 2004
=	7.82E+16	

## 24 ACERO:

Importaciones =	3.00E+05 Tons./año	ASIMET, 2004
Masa (g) =	(3.00E+05 Tons./año)*(1E+06 g/Tons.)	
=	3.00E+11	

## 25 MINERALES : (metales, no-metales)

Importaciones =	1.87E+05 Tons./año	Sernageomin, 2004
Masa (g) =	(1.87E+05 Tons./año)*(1E+6 g/Tons.)	
=	1.87E+11	

## 26 ALIMENTOS Y PRODUCTOS AGRICOLAS

Importaciones =	1.43E+06 Tons./año	ODEPA, 2004
Energía (J/año) =	2.22E+16	

## 27 PRODUCTOS ANIMALES

Importaciones =	8.06E+04 Tons./año	ODEPA, 2004
Energía (J/año) =	9.74E+14	

## 28 PLASTICOS Y GOMAS

Importaciones =	1.04+06 Tons./año	Brown, 1997 (actualizad por cifras Banco Central
Energía (J/año) =	(1.04+06 Tons./año)*(1000 Kg/MT)*(3E+07J/kg)	Brown, 1997
=	3.12E+16	

## 29 QUIMICOS

Importaciones =	7.06E+06 Tons./año	Brown, 1997 (actualizad por cifras Banco Central
Masa (g/año) =	(7.06E+06 Tons./año)*(1E+06 g/MT)	Brown, 1997
=	7.06E+12	

## 30 MADERA, PAPEL, TEXTILES, CUEROS

Importaciones =	8.41E+05 Tons./año	Brown, 1997 (actualizad por cifras Banco Central
Energía (J/año) =	(8.41E+05 Tons./año)*(1E+06 g/MT)*(1.5E+04 J/g)	Brown, 1997
=	1.26E+16	

**31 MAQUINARIA, TRANSPORTE, EQUIPAMIENTO**

Importaciones =	2,49E+05 Tons./año	Brown, 1997 (actualizado por cifras Banco Central)
Masa (g) =	(2,49E+05 Tons./año)*(1E+06 g/MT)	Brown, 1997
=	2.49E+11	

**32 SERVICIOS IMPORTADOS:**

Valor en dolares =	1.72E+10	Banco Central, 2003
--------------------	----------	---------------------

**33 TURISMO :**

Valor en dolares =	7.88E+08	SERNATUR, 2002
--------------------	----------	----------------

**EXPORTACION DE ENERGIA, MATERIALES Y SERVICIOS****34 CULTIVOS AGRICOLAS**

Exportaciones:	8.08E+06 Tons./año	ODEPA, 2004
Energía (J/año) =	1.25E+16	

**35 PRODUCTOS ANIMALES:**

Producción animal =	1,45E+05 Tons.	ODEPA, 2004
Energía (J/año) =	1,28E+15	

**36 PESCADOS Y MARISCOS:**

Exportaciones:	1.16E+06 Tons./año	SALMONCHILE, 2004
Energía (J/año) =	(1.16E+06 Tons.)*(1E+06 g/Tons.)*(1350 Cal/g)*(4,186 J/Cal)	
=	6.56E+15	

**37 PRODUCTOS FORESTALES**

Exportaciones:	4.05E+6 Tons./año	INFOR, 2004
Energía (J/año) =	(4.05E+6 Tons./año)*(1.0E+03 g/Tons.)*(80%)*(3600 Cal/g)*(4,186 J/Cal)	
=	4.88E+16	

**38 MINERALES (metales y no metales)**

Exportaciones:	1.31E+07 Tons./año	Sernageomin, 2004
Masa (g/año) =	(1.31E+07 Tons./año)*(1E6 g/Tons.)	
=	1.31E+13	

**39 PAPEL Y PRODUCTOS ASOCIADOS (Celulosa)**

Exportaciones:	2.76E+06 Tons./año	INFOR, 2004
Energía (J/año) =	(2.76E+06 Tons.)*(1.0E+06 g/Mt)*(4000 Cal/g)*(4,186 J/Cal)*	Brown, 1997
=	4.62E+16	

**40 QUIMICOS :**

Exportaciones:	2.94E+06 Tons./año	Brown, 1997 (actualizado por cifras Banco Central)
Energía (g/año) =	(2.94E+06 Tons./año)*(1E6 g/MT)	
=	2.94E+12	

**41 SERVICIOS EN EXPORTACIONES:**

Valor en dolares =	1.77E+10	Banco Central, 2003
--------------------	----------	---------------------

# PALENA

ITEM	METODO DE CÁLCULO	FUENTE DATOS
<b>1 ENERGIA SOLAR :</b>		
Área de la plataforma		
continental =	2.74E+10 m <sup>2</sup>	Calculos en base a SINIA, 2004
Area terrestre=	1.53E+10 m <sup>2</sup>	
Insolation =	9.53E+05 Kcal/m <sup>2</sup> /año	
Albedo =	0.30 (% dado como decimal)	SINIA, 2004
Energía (J/año) =	(area total)*(insolation promedio)*(1-albedo)	CNE, 2004
=	(4,27E+10 m <sup>2</sup> )*(9.53E+05 Kcal/m <sup>2</sup> /año)*	
=	(4186 J/kcal)*(1-0.30)	
=	1.20E+20	
<b>2 LLUVIA, ENERGIA POTENCIAL QUIMICA:</b>		
Área de la plataforma		
continental =	1.42E+10 m <sup>2</sup>	Calculos en base a SINIA, 2004
Area terrestre=	1.53E+10 m <sup>2</sup>	
Lluvia (terrestre) =	2.5 m/año	SINIA, 2004
Lluvia (mar) =	1.25 m/año (est. como el 45% de la lluvia continental)	Odum, 1996
Tasa de evapotranspiración =	50%	Brown, 1997
Energía (terrestre) (J/año) =	(area terrestre)(Evapotrans)(Precipitaciones)(Gibbs no.)	
=	(1.53E+10 m <sup>2</sup> )*(50%)*(2,50 m/año)*	
=	(1000kg/m <sup>3</sup> )*(4.94E+03J/kg)	
=	9.45E+16	
Energía (mar) (J/año) =	(area plataforma continental)(Precipitaciones)(Gibbs no.)	
=	(1.42E+10 m <sup>2</sup> )*(1.25 m/año)*	
=	(1000kg/m <sup>3</sup> )*(4.94E+03J/kg)	
=	8.77E+16	
Energía total (J/año) =	1.82E+17	
<b>3 LLUVIA, ENERGIA GEOPOTENCIAL:</b>		
Area terrestre=	1.53E+10 m <sup>2</sup>	
Lluvia caída =	2.50 m/año	
Elevación promedio =	800 m	World Resources Institute
Tasa de escorrentía =	0.60 (% dado como decimal)	
Energía (J/año) =	(% ecorrentía)*(area)*(precipitaciones)*	
=	(elevación promedio)*(gravedad)	
=	(0.60)(1.53E+10 m <sup>2</sup> )*(2.50 m/año)*	
=	(1000kg/m <sup>3</sup> )*(800m)*(9.8m/s <sup>2</sup> )	
=	1.80E+17	
<b>4 ENERGIA EOLICA:</b>		
Energía (J/año) =	1.89E+17	Estimado a partir de Brown, 1997
<b>5 ENERGIA DE OLEAJE:</b>		
Energía (J/año) =	6.91E+16	Estimado a partir de Brown, 1997
<b>6 ENERGIA DE LAS MAREAS:</b>		
Área de la plataforma		
continental =	1.42E+10 m <sup>2</sup>	World Resources Institute
Rango promedio de las mareas =	1.00 m	
Densidad agua del mar =	1.03E+03 kg/m <sup>3</sup>	Haden, 2003
Mareas/año =	7.30E+02 (estm.de 2 mareas/dia es 365 dias)	
Energía (J/año) =	(area mar)*(absorcion %)*(mareas/año)*	
=	(rango de marea) <sup>2</sup> *(densidad agua mar)*(gravedad)	
=	(1.42E+10 m <sup>2</sup> )*(0.5)*(7.30E+02/año)*	
=	(1,00m)*(1.03E+03 kg/m <sup>3</sup> )*(9.8m/s <sup>2</sup> )	
=	5.23E+16	

<b>7 CICLO TERRESTRE:</b>		
Area terrestre =	1.53E+10 m <sup>2</sup>	SINIA, 2004
Flujo de calor =	1.00E+06 J/m <sup>2</sup>	Odum, 1996
Energía (J) =	(1.53E+10)*(1.00E+06)	
=	1.53E+16	
<b>ENERGIA RENOVABLE INTERNA</b>		
<b>8 HIDROELECTRICIDAD:</b>		
Kilowatt Hrs/año =	5.26E+6 KwH/año	CNE, 2004
Energía (J/año) =	(5.26E+6 KwH/año)*(8,62E+5 Cal/KwH)*(4,186 J/Cal)	CNE, 2004
=	1.90E+13	
<b>9 PRODUCCION AGRÍCOLA:</b>		
Producción =	3,41E+03 Tons.	Este estudio
Energía (J/año) =	2.37E+13	
<b>10 PRODUCTOS ANIMALES:</b>		
Producción animal =	3,27E+03 Tons.	ODEPA, 2003
Energía (J/año) =	3.58E+13	
<b>11 EXTRACCION DE PESCADOS Y MARISCOS:</b>		
Pesca =	1.22E+04 Tons.	SERNAPESCA, 2004
Energía (J/año) =	(4.44E+04 Tons.)*(1E+06 g/Tons.)*(1350 Cal/g)* (4,186 J/Cal)	www.consumer.es
=	6.89E+13	
<b>12 CONSUMO DE LEÑA:</b>		
Consumo por hogar =	3.50E+1 m <sup>3</sup> /año	Este estudio
Nº de hogares =	5295	
Energía (J/año) =	(3.50E+1 m <sup>3</sup> )*(5295)*(5E+2 Kg/m <sup>3</sup> )* (1E+03 g/Kg)*(3600 Cal/g)*(80%)*(4,186 J/Cal)	Brown, 1997
=	1.12E+15	
<b>13 PRODUCCION Y EXTRACCION FORESTAL MADERA:</b>		
Producción =	1.55E+04 m <sup>3</sup> /año	INFOR, 2001
Energía (J/año) =	(1.55E+04 m <sup>3</sup> )*(5E+2 Kg/m <sup>3</sup> )*(1E+03 g/Kg)* (3600 Cal/g)*(80%)*(4,186 J/Cal)	Brown, 1997
=	9.34E+13	
<b>USO DE RECURSOS NO RENOVABLES PERTENECIENTES A CHILE</b>		
<b>14 PRODUCCION DE SALMON</b>		
Producción =	3.22 E+04 Tons.	SERNAPESCA, 2004
Energía (J/año) =	(3.22E+04 Tons.)*(1E+06 g/Tons.)*(1350 Cal/g)* (4,186 J/Cal)	
=	1.82E+14	
<b>15 EXTRACCION FORESTAL MADERA NO RENOVABLE:</b>		
Cosecha =	2.04E+03 m <sup>3</sup>	INFOR, 2001
Energía (J/año) =	(2.04E+03 m <sup>3</sup> )*(5E+2 Kg/m <sup>3</sup> )*(1E+03 g/Kg)* (3600 Cal/g)*(80%)*(4,186 J/Cal)	Brown, 1997
=	1.23E+13	
<b>16 SUELO:</b>		
Pérdida de suelo =	6.7E+06 g/ha/año	Honorato et all, 2001
Energía (J/año) =	(6.7E+06 g/ha/año)*(1,48E+03 ha cultivadas)* (0.03 organico)*(5400 cal/g)*(4,186 J/Kcal)	ODEPA, 2004
=	6.72E+12	

### IMPORTACIONES DE FUENTES DE ENERGIA EXTERNA

#### 17 PETRÓLEO Y DERIVADOS

Combustibles motores =	1.47E+04 m <sup>3</sup> /año	CNE, 2004
Energía (J/año) =	(1.47E+04 m <sup>3</sup> /año)*(8.55E+02 Kg/m <sup>3</sup> )* (1E+03 g/Kg)*(1.09E+04 Cal/g)*(4,186 J/cal)	CNE, 2004
=	5.73E+14	
Gas licuado =	962 Tons.	
Energía (J/año) =	(962 Tons./año)*(1E+06 g/Tons.)* (1.21E+04 Cal/g)*(4,186 J/cal)	CNE, 2004
=	4.87E+13	
Energía total (J/año) =	6.22E+14	

#### 18 ALIMENTOS Y PRODUCTOS AGRICOLAS

Importaciones =	800 Tons./año	ODEPA, 2004
Energía (J/año) =	(800 Tons./año)*(1E6g/Tons.)*(3.5 Kcal/g)* (4186 J/Kcal)	
=	1.17E+13	

#### 19 SERVICIOS IMPORTADOS:

Valor en dolares =	1.31E+07	Banco Central, 2003
--------------------	----------	---------------------

#### 20 INVERSIÓN PUBLICA

Valor en dólares =	5.53E+06	SUBDERE, 2004
--------------------	----------	---------------

#### 21 TURISMO :

Turistas =	3.10E+04	BID, 2003
Gasto promedio diario =	2,54E+1 \$US	BID, 2003
Nº días estadia =	3.77	BID, 2003
Valor en dolares =	2.86E+06	

### EXPORTACION DE ENERGIA, MATERIALES Y SERVICIOS

#### 22 PRODUCTOS ANIMALES:

Extracción =	6,54E+03 Tons.	ODEPA, 2004
Exportaciones (80% de lo producido)	2.62E+03	
Energía (J/año) =	(2,62E+03 Tons.)*(1E+06 g/Tons.)*(2,62 Kcal/g)* (4,94E+03J/kg)	
=	2.87E+13	

#### 23 PESCADOS Y MARISCOS:

Extracción =	1.22E+04 Tons.	SERNAPESCA, 2004
Exportaciones (95% de lo extraido)	1.16E+04	
Energía (J/año) =	(1.16E+04 Tons.)*(1E+06 g/Tons.)*(1350 Cal/g)* (4,186 J/Cal)	
=	6.56E+13	

#### 24 SALMON

Producción =	3.22 E+04 Tons.	
Energía (J/año) =	(3.22E+04 Tons.)*(1E+06 g/Tons.)*(1350 Cal/g)* (4,186 J/Cal)	
=	1.82E+14	

#### 25 PRODUCTOS FORESTALES

Exportaciones:	9.25E+02 m <sup>3</sup> /año	INFOR, 2001
Energía (J/año) =	(925 m <sup>3</sup> )*(5E+2 Kg/m <sup>3</sup> )*(1E+03 g/Kg)* (3600 Cal/g)*(80%)*(4,186 J/Cal)	
=	5.58E+12	

#### 26 SERVICIOS EN EXPORTACIONES:EXPORTACIONES:

Valor endolares =	4.08E+07	Este estudio
-------------------	----------	--------------