

UCH-FC
B. Ambiental
S 479a
C-1



FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

**APROPIACIÓN DE FITOMASA TERRESTRE EN LA CADENA ALIMENTARIA
HUMANA: IMPORTANCIA DE LA EFICIENCIA DE TRANSFORMACIÓN DE
FITOMASA EN PRODUCTOS ALIMENTARIOS.**

Seminario de Título
entregado a la
Universidad de Chile
en cumplimiento parcial de los requisitos
para optar al Título de
Biólogo con mención en Medio Ambiente



Por
GONZALO RAÚL SEPÚLVEDA KATTAN

Director de Seminario de Título: Dr. Ítalo Serey E.

Mayo, 2009
Santiago - Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el Sr.

GONZALO RAÚL SEPÚLVEDA KATTAN

“APROPIACIÓN DE FITOMASA TERRESTRE EN LA CADENA ALIMENTARIA HUMANA: IMPORTANCIA DE LA EFICIENCIA DE TRANSFORMACIÓN DE FITOMASA EN PRODUCTOS ALIMENTARIOS”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Biólogo con mención en Medio Ambiente

Director de Seminario de Título:

Dr. Italo Serey E.

Handwritten signature of Italo Serey E. in blue ink, written over a horizontal line.

Comisión de Evaluación del Seminario de Título

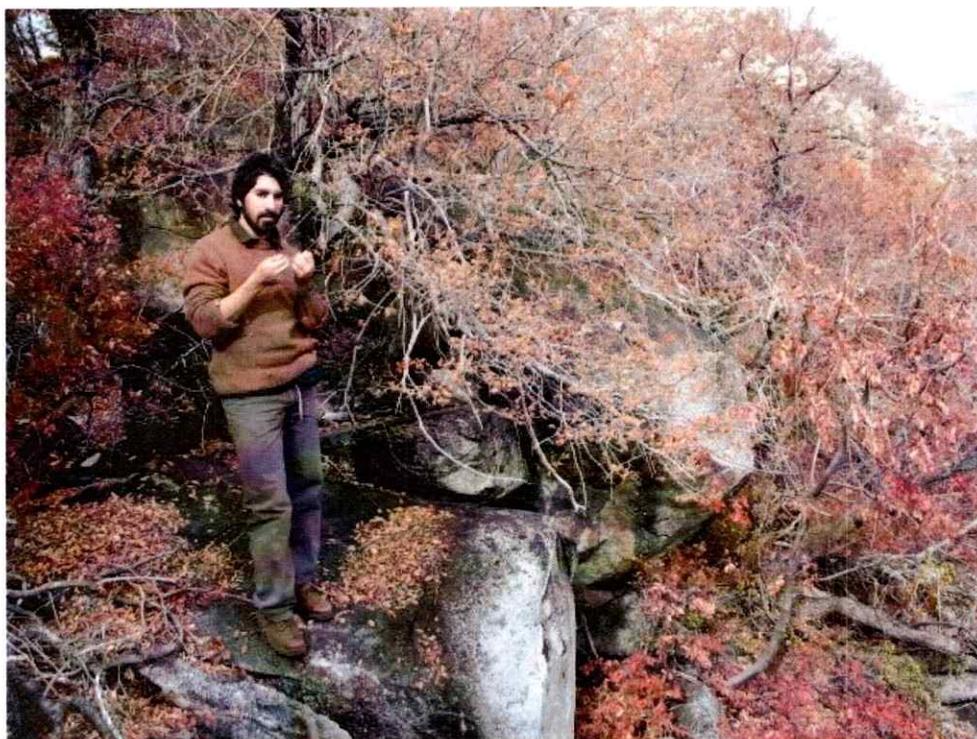
Mg. María de la Luz Hurtado P.

Handwritten signature of María de la Luz Hurtado P. in blue ink, written over a horizontal line.

Dra. Patricia Matus C.



Santiago de Chile, Mayo de 2009



A todos aquellos quienes consideran lo imposible como algo realizable. En señal de mi admiración.





AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer enormemente a mis padres y hermanos por su paciencia y confianza, y por generar el ambiente y soporte sin el cual esta tarea no habría sido posible.

Agradezco en gran medida a mi profesor guía, el Dr. Italo Serey, por su gran apoyo y valiosísimos aportes durante el desarrollo del estudio, y al Laboratorio de Ecofisiología de la Facultad de Ciencias, en especial a Pablo Sabat y a Andrés Sazo por su ayuda indispensable para la obtención de resultados.

También agradezco el apoyo y estímulo constante de mis compañeros de trabajo, quienes contribuyeron en gran medida a que este proceso pudiese concluir. Agradezco especialmente a Sergio, por su ayuda en terreno durante la recolección de datos; a Sandra por su tiempo, paciencia y gran apoyo en el análisis de resultados; a CAF, por permitirme obtener los datos necesarios para la realización de mi trabajo, y especialmente a Paulina, por transformarse en uno de los estímulos más importantes para completar y llevar a término mis estudios.

Y además quisiera agradecer a todas aquellas personas quienes, de manera directa o indirecta, han participado y estado presente durante mi largo proceso de titulación.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Marco de referencia	3
1.1.1 Sistema alimentario, apropiación de fitomasa terrestre	3
1.1.2 Estructura del sistema alimentario.....	6
1.1.3 Energía en el sistema alimentario	9
1.2 Planteamiento del problema.....	12
1.2.1 Perspectiva de la Ecología Industrial.....	17
1.3 Objetivos.....	20
2. CASO DE ESTUDIO: PRODUCCIÓN DE TROZOS DE PULPA DE MANZANA COCIDA	21
2.1 Metabolismo del proceso industrial estudiado	21
3. MATERIALES Y MÉTODOS	25
3.1 Toma de muestras y cálculo del contenido energético de los materiales.....	25
3.1.1 Eficiencia industrial.....	25
3.1.2 Eficiencia óptima	26
3.2 Análisis estadístico.....	27
3.3 Eficiencia energética de transformación.....	28



3.4	Eficiencia industrial vs eficiencia optimizada	28
4.	RESULTADOS	29
4.1	Eficiencia industrial	29
4.2	Eficiencia industrial vs eficiencia optimizada	31
5.	DISCUSIÓN	35
5.1	Análisis de los resultados.....	35
5.2	Flujo de fitomasa.....	37
5.3	Contenido de energía y agua de los materiales.....	39
5.4	Eficiencia energética.....	41
5.5	Hábitos alimentarios y eficiencia energética.....	45
5.6	Ecología industrial y eficiencia	47
6.	CONCLUSIONES	50
7.	REFERENCIAS	52
8.	ANEXOS	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Masa de los flujos de entrada y residuales de fitomasa. Los porcentajes de residuos están calculados en función del total de materia prima.	29
Tabla 2. Porcentaje de agua y contenido calórico de cada tipo de material.....	30
Tabla 3. Masas residuales sin contenido de agua y contenido energético total de cada tipo de material.....	30
Tabla 4. Eficiencia del proceso productivo en términos de energía de la fitomasa procesada.....	30
Tabla 5. Masas supuestas de cada tipo de material, tanto de entrada como residuales.	31
Tabla 6. Porcentaje de agua (n=4) y contenido calórico (n=6) en muestras del material utilizado.....	33
Tabla 7. Masas residuales sin contenido de agua y contenido energético total de cada tipo de material.....	34
Tabla 8. Eficiencia industrial y optimizada para el proceso productivo estudiado, sin considerar etapas de cocción.....	34



ÍNDICE DE FIGURAS



Figura 1. Estructura del sistema alimentario.....	8
Figura 2. Diagrama de la energía disponible en los distintos niveles de una malla trófica terrestre.. ..	10
Figura 3. Flujo de energía a través de distintos niveles tróficos en un ecosistema.....	11
Figura 4. Representación de dos tipos de sistemas productivos.....	19
Figura 5. Flujo de energía y materiales en un sistema en estado estacionario.....	23
Figura 6. Flujo de energía en el proceso de transformación de fitomasa estudiado. ...	24
Figura 7. Porcentaje de los distintos tipos de material en un modelo teórico de manzana <i>Fuji</i>	31
Figura 8. Flujos de fitomasa en el proceso industrial y en una situación óptima de producción de trozos de pulpa de manzana.	32
Figura 9. Contenido de agua y energía de las muestras de cada tipo de material.. ...	33
Figura 10. Comparación entre energía entrante, residual y del producto y eficiencia industrial y óptima del proceso	35

RESUMEN

La apropiación humana de fitomasa terrestre, actividad realizada para la obtención de alimentos, tiene hoy en día grandes consecuencias sobre los ecosistemas y su biodiversidad. La mayor parte de esta fitomasa que es apropiada se transforma en productos alimentarios en dos grandes subsistemas de producción: el de producción animal y el de producción vegetal, cada uno con una eficiencia global estimada de 4% y 62%, respectivamente. Hasta hoy, la investigación sobre la generación de alimentos se ha enfocado principalmente en la creación de cultivos más productivos, sin mayor énfasis en analizar el potencial que posee la reducción de los requerimientos de producción a través de incrementos en la eficiencia de procesamiento, o incluso a través de la modificación de los hábitos alimentarios.

En el presente trabajo se estudió la eficiencia energética de la generación de productos alimentarios en una agroindustria determinada, perteneciente al subsistema de producción vegetal. El análisis se realizó en función de la energía contenida en la fitomasa de manzanas procesadas en la industria, obteniéndose una idea de la eficiencia con que se aprovecha la energía apropiada para la generación de un tipo de alimento particular (trozos de pulpa cocida de manzana). Posteriormente, el estudio consideró una comparación entre la eficiencia industrial y una eficiencia óptima de acuerdo a condiciones ideales de producción.

La eficiencia obtenida para el proceso industrial correspondió a aproximadamente un 35%, mientras que la eficiencia óptima fue cercana al 80%, mostrando un evidente desaprovechamiento de la fitomasa apropiada para la producción de alimentos en la actualidad.

La eficiencia industrial puede mejorarse de manera sustancial a través del perfeccionamiento de las técnicas empleadas en la producción, la que, a su vez, puede aumentarse incluso más a través de la interacción apropiada de diversas industrias. Esta nueva eficiencia se manifestaría a nivel de sistema industrial, como es planteado por la Ecología Industrial.

Palabras Clave: Eficiencia energética, sistema alimentario, Ecología Industrial.

ABSTRACT

Human appropriation of terrestrial phytomass to obtain food have great consequences on ecosystems and biodiversity matters. Most of appropriated phytomass transforms into a series of alimentary products in two different production subsystems: animal and plant production with efficiency levels of 4% and 62% respectively. Until now, food production research has focused in the increase of crop productivity, without emphasizing in the potential of reducing production requirements throughout an increase in processing efficiency or modifying alimentary habits.

This study analyzes energy efficiency of alimentary production in a vegetal subsystem agroindustry, based in energy fluxes of processed apple phytomass to obtain a reference value of the efficiency with which appropriated energy is used to produce a specific alimentary product (cooked apple pulp pieces). Afterwards, the study achieves a comparison between real and optimal efficiency values.

Industrial efficiency values reached approximately 35%, meanwhile optimal levels ranged 80%, showing an evident missuse of appropriated phytomass in present alimentary production.

Industrial efficiency levels could significantly increase by production technique improvement, which can be furtherly incremented through diverse industry interaction. This new efficiency would showout at an industrial system level, as considered by Industrial Ecology.

Key Words: Energy efficiency, food system, Industrial Ecology.

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales orgánicos son componentes vitales de la naturaleza y la sociedad. Para esta última, dichos materiales tanto en forma vegetal como animal, sirven entre otras cosas como alimento para los seres humanos. Los materiales orgánicos constituyen el flujo dominante de la oferta de energía necesaria para el crecimiento, desarrollo y reproducción de todos los organismos heterótrofos (Wirsenius 2000). Dicha energía fluye desde el sol para ingresar a los ecosistemas terrestres mediante el proceso de fotosíntesis, realizado por organismos productores primarios, a través del cual cierta cantidad de ella es fijada y queda contenida en el tejido orgánico de tales organismos, constituyendo así, parte de la biomasa¹. Del total de energía fijada biológicamente, existe una fracción de ella denominada producción primaria neta, correspondiente a la cantidad de energía remanente en los productores primarios (principalmente plantas) después de sustraer la energía disipada por los mismos a través del proceso de respiración. Esta fracción, la producción primaria neta, constituye la fuente total de alimento en la tierra para los heterótrofos, y provee, por lo tanto, el flujo de energía necesario para la vida de todos los organismos no productores (Vitousek y col, 1986).

El ser humano, como cualquier otro organismo heterótrofo, necesita la energía fijada por los productores primarios para satisfacer su demanda metabólica a través de la incorporación de nutrientes. Es decir, necesita consumir, entre otras cosas, parte de la biomasa que constituyen ya sea los productores primarios o los organismos

¹ Biomasa es un término utilizado para referirse a materiales orgánicos biosféricos. Incluye la fitomasa (masa vegetal) y la zoomasa (masa animal) (Wirsenius 2000).

consumidores. Desde sus inicios el ser humano apropia estos flujos de energía para su subsistencia, a través del simple hecho de cortar una fruta de un árbol para comerla, o de cazar a un animal para alimentarse, por ejemplo. Posteriormente, con el desarrollo tecnológico de las sociedades, principalmente, fue generándose un sistema de intercambio de comida y alimentos altamente organizado y complejo a través del cual el ser humano produce y obtiene biomasa para su consumo, conocido como el "sistema alimentario" (del inglés *food system*). En este sistema se incluyen subsistemas tales como los de producción de hortalizas, frutas, cereales, vacunos, porcinos, aves, y en general, cualquier otro sistema productor de alimentos. El concepto *sistema alimentario* describe el complejo conjunto de actividades involucradas en la provisión de comida para la subsistencia y nutrientes para la mantención de la salud, y es ampliamente usado en agricultura, ciencias alimenticias, nutrición y medicina (Sobal y col, 1998). Es un agregado de actividades relacionadas con los alimentos, incluyendo su producción, procesamiento, distribución, almacenamiento y preparación en el hogar, y su función es garantizar seguridad alimentaria para la población, es decir, garantizar un flujo de alimentos que se adecue a la demanda de una determinada comunidad (Giampietro 1994).

La apropiación de fitomasa que el sistema alimentario genera es de grandes proporciones, teniendo como consecuencia diversos efectos negativos sobre los ecosistemas de los cuales dicha fitomasa es extraída. Entre tales efectos se cuentan la modificación de los flujos de energía y la alteración de propiedades que otorgan determinados servicios ecosistémicos, además de posibles alteraciones a los ciclos biogeoquímicos y a la sustentabilidad de los ecosistemas (Imhoff y col, 2004; Daily y col, 1997; Prasad & Badarinh, 2004).

El incremento de la población humana en el futuro hace forzosa la generación de una mayor cantidad de alimentos que la que existe actualmente, situación que obliga a la práctica de técnicas de intensificación de la agricultura o a aumentos en la magnitud de la apropiación de fitomasa que observamos hoy en día, intensificándose los efectos perjudiciales que ello tiene para los ecosistemas (Bender, 1994; Wirsenius, 2003a).

Hasta este punto, resulta evidente que nos encontramos frente a un conflicto. Por un lado, se requiere aumentar la producción de alimentos para satisfacer la demanda de la creciente población, y por otro lado, en contraposición, es necesario reducir los impactos negativos que la misma producción de alimentos genera. Según destaca Wirsenius (2003a), la magnitud de la apropiación humana de fitomasa depende fundamentalmente de la eficiencia con que se generan los productos alimentarios. Es por ello que en el presente trabajo se presenta a la eficiencia de los procesos productivos que generan alimentos como un aspecto significativo para la resolución del problema introducido, a través del estudio y análisis de la actividad productiva de una agroindustria.

1.1 Marco de referencia

1.1.1 Sistema alimentario, apropiación de fitomasa terrestre

A partir de los productores primarios se obtiene la energía² que sostiene al sistema alimentario, es decir, la productividad primaria es la única entrada de energía (asimilable por los organismos) al sistema y, en consecuencia, la única entrada de energía metabolizable por los seres humanos. La necesidad de consumir aquella energía necesaria para subsistir conduce a la realización de actividades de

² En el presente trabajo, se utilizará el término "energía" para referirse exclusivamente a la energía química contenida en los materiales orgánicos que constituyen la biomasa.

“apropiación de fitomasa”, que son actividades que tienen entre sus objetivos la consecución de biomasa para la alimentación. Como indica Haberl (2004), la apropiación de fitomasa está determinada por dos procesos: cambios en la cobertura terrestre (reemplazo de bosques por praderas, cultivos o terrenos construidos) y cosecha de biomasa. En lo que respecta al sistema alimentario, la generación de cultivos y extracción y cosecha de biomasa son las principales actividades de apropiación de fitomasa.

De acuerdo con Wirsenius (2003b), la apropiación de fitomasa, referida a las actividades realizadas por el sistema alimentario, corresponde al total de la producción de fitomasa inducido por el *uso de productos* de ella en un subsistema alimentario particular. Por ejemplo, una industria productora de pollos para consumo humano, requiere maíz para alimentarlos. El maíz que dicha industria utilizaría corresponde a un producto de fitomasa generado previamente, que servirá para llevar a cabo la generación de otros productos alimentarios (pollos). En este caso, la industria avícola es la que induce la apropiación de fitomasa necesaria para la generación del maíz con que sustentará su producción.

Es necesario considerar que el total de producción de fitomasa se divide en ‘productos’ de fitomasa, ‘productos derivados’ de fitomasa, y fitomasa ‘no utilizada’. La definición mencionada de apropiación de fitomasa implica que el *producto* de fitomasa que se desea obtener es considerado el inductor de la producción total de fitomasa: es la cantidad de producto que se desea generar la que determina la magnitud de los otros flujos (productos derivados o fitomasa no utilizada). Siguiendo con el ejemplo anterior, la generación del grano de maíz para alimentar a los pollos será el inductor de

la apropiación total de fitomasa, que incluirá dentro de sus productos derivados o no utilizados, hojas de maíz, el tallo de la planta, sus raíces, etc.

Otra explicación para comprender en qué consiste la apropiación de fitomasa ejercida por el sistema alimentario, es el simple hecho que para producir determinada cantidad de productos de fitomasa, una cierta cantidad de productos derivados y fitomasa sin utilizar es también generada inevitablemente. Por esta razón, el requerimiento de productos de fitomasa de un subsistema no induce la generación de productos solamente, sino también de productos derivados y fitomasa que no se utiliza. La suma de todas estas magnitudes es la apropiación de fitomasa correspondiente al subsistema en cuestión. Consecuentemente, la definición dice que sólo los productos de fitomasa afectan la apropiación de fitomasa generada por un subsistema, no así la utilización de algún producto derivado o de algún residuo.

Apropiación de fitomasa puede también expresarse en términos de energía, como "apropiación de productividad primaria neta". Ésta se define como la diferencia entre la productividad primaria neta de la vegetación potencial de un ecosistema dado y la vegetación que queda en él después de ser extraída una parte por la sociedad (Haberl, 2004). La apropiación humana del producto neto primario de la fotosíntesis es un indicador de la relación y el tamaño del subsistema humano en el ecosistema total (Van Hauwermeiren, 1999), es decir, nos da una idea de la magnitud que posee el sistema alimentario.

Muchos ecólogos han intentado calcular la producción primaria neta a escala global (Vitousek y col, 1986), cálculos en los cuales se han basado otros investigadores para estimar el nivel de apropiación humana de los productos de la fotosíntesis. En términos

energéticos, la productividad primaria neta global de los ecosistemas terrestres es alrededor de 2400 EJ/año³ (Haberl, 2004). Vitousek (1986) señaló que la apropiación humana anual de la producción primaria neta era alrededor de un 30%, pero con un grado de incerteza tal, que agregaba una estimación baja y otra alta de un 3% y 39%, respectivamente. Otro estudio más reciente realizado por Rojstaczer y col. (2001) estimó un valor similar para ella (32%) con una variabilidad que podía ir entre el 10% y el 55%. Si bien la apropiación humana de la producción primaria neta tiene un alto grado de incerteza, es lógico pensar que el impacto generado es significativo, dada su magnitud.

La cantidad de fitomasa apropiada por el ser humano está principalmente determinada por la necesidad de alimentación. Es decir, el sistema alimentario está entre las actividades antropogénicas más significativas en términos de apropiación de tierra y de producción biológica primaria (Wirsenius 2003b).

1.1.2 Estructura del sistema alimentario

La complejidad del sistema alimentario deriva del gran número de elementos que lo componen, como también de la variedad de dominios y esferas sociales que involucra: familia, estado, mercado y todos los sectores productivos: agricultura, industria y sector terciario. Sus componentes y estructura varían en el tiempo y en el espacio según la evolución de la sociedad y de la economía. Tal evolución ha conllevado a una sucesión de modelos del sistema alimentario, yendo desde el tradicional al agroindustrial, y luego al de saciedad (Fonte, 2002). Cada modelo se define en relación a un sistema de producción dominante y un modelo de consumo que es consistente con él, y aunque se van sustituyendo con el tiempo, la evolución de un sistema a otro no implica la

³ EJ = exajoules (1×10^{18} joules). 1 joule \approx 0,24 calorías.

desaparición completa del original. El sistema tradicional es muy simple y se basa en el autoconsumo, predominando sólo un actor: el productor-consumidor. El campo y la familia están muy estrechamente relacionados, y el mercado se limita al intercambio local. El posterior modelo agroindustrial implica la erradicación del autoconsumo, donde las actividades de transformación de productos agrícolas son apropiadas por las industrias, y el aprovisionamiento de comida industrial se realiza a través del mercado. Domina la lógica industrial, que conduce a la estandarización de los alimentos y a la no identificación de éstos con un determinado territorio o temporada. El último modelo, el de sociedad (específico de las sociedades ricas), surge en la década de los años 70. Se caracteriza por la saturación de la ingesta de energía, y su estructura física no se diferencia mayormente de la del modelo agroindustrial (Fonte, 2002). Es por esto que hoy a nivel global, la estructura del sistema alimentario corresponde a una de alta industrialización de la producción de alimentos.

Las actividades de transformación de fitomasa en productos comestibles pueden agruparse dentro de dos grandes subsistemas pertenecientes al sistema alimentario: el de producción de vegetales, y el de producción animal. El primer subsistema mencionado representa la transformación de fitomasa en productos vegetales comestibles, mientras que el segundo representa la conversión de fitomasa, y otra biomasa, en productos animales, todos para consumo humano (Wirsenius, 2000).

Generalmente, la fitomasa cuya producción es destinada al subsistema vegetal corresponde a cultivos de vegetales aptos para consumo humano directo, mientras que para el sistema animal, no necesariamente se trata de fitomasa comestible por el ser humano (pastizales, productos derivados de cultivos, derivados del subsistema vegetal etc.; Wirsenius, 2003b). En ciertos casos, hay productos vegetales que no requieren

ser procesados industrialmente para su consumo, por lo que no ingresan a ningún subsistema (figura 1).

A lo largo de toda la estructura se generan salidas de energía del sistema. Éstas corresponden a flujos de fitomasa como tal (comida no ingerida, pérdidas durante el almacenamiento y la distribución), o fitomasa transformada después de la ingestión (en el subsistema animal o después del consumo humano), en calor respiratorio, excremento y orina (Wirsenius, 2003b).

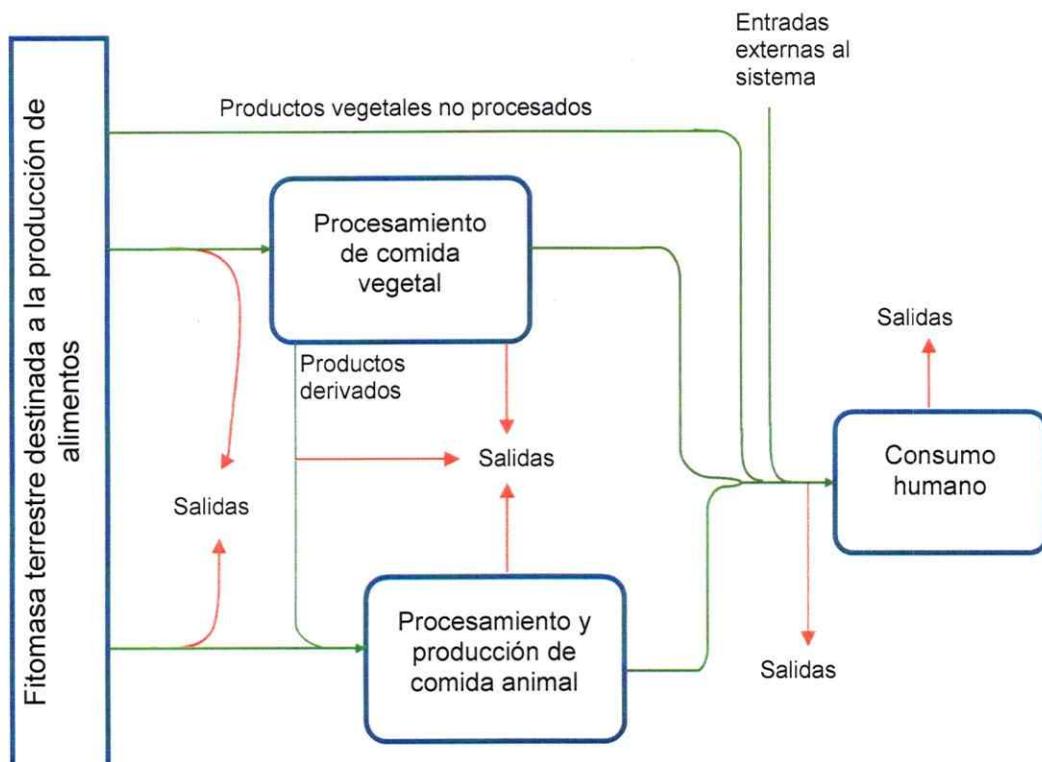


Figura 1. Estructura del sistema alimentario. Las flechas verdes y rojas representan flujos de energía. El flujo marcado como "entradas externas al sistema" corresponde a energía proveniente de sistemas acuáticos.

1.1.3 Energía en el sistema alimentario

El sistema alimentario corresponde a un agregado de actividades que hoy en día equivalen a la organización estructural de la malla trófica del ser humano⁴. Es por esto que la dinámica de sus flujos de energía es análoga a la de las mallas tróficas de los ecosistemas en general.

En los ecosistemas, el flujo de energía a través de los distintos elementos que componen la malla trófica (productores y consumidores) es decreciente, y generalmente unidireccional. La figura 2 es una representación gráfica que da una idea de la magnitud de energía contenida en cada nivel de una malla trófica. Es necesario aclarar que dichas magnitudes pueden variar en gran medida de acuerdo al sistema en estudio; sin embargo, lo que no varía, y lo que se pretende destacar aquí, es que el flujo de energía acumulada es siempre decreciente a medida que pasa de un nivel trófico al siguiente.

La magnitud de la energía de los vegetales es lejanamente superior a la de los otros niveles tróficos, debido a la gran cantidad de biomasa que constituyen las plantas en la biosfera. Es decir, la cantidad de energía de los vegetales es mayor que la del resto de los niveles tróficos en términos de biomasa total. Como se explicó anteriormente, el balance entre la energía fijada por la fotosíntesis y la salida de energía de las plantas a través del proceso de respiración, se conoce como *productividad primaria neta*. Ésta es la energía que se encuentra disponible para la asimilación de los niveles tróficos consumidores en un ecosistema.

⁴ Se hace referencia a la gran mayoría de la población mundial, sin contar aquellos pequeños grupos humanos cuyo estilo de vida y costumbres generales pudieran ser totalmente diferentes (que realicen prácticas de caza y recolección directa, por ejemplo). Estos últimos quedan fuera de la organización actual del sistema global alimentario.



Figura 2. Diagrama de la energía disponible en los distintos niveles de una malla trófica terrestre. En la base se encuentran los vegetales, y hacia arriba los de los consumidores primarios, secundarios, y así sucesivamente. Figura basada en Odum, H.T. (1957).

De toda la energía que es ingerida por un consumidor, cierto porcentaje de ella se pierde como desechos generados, y la proporción restante es asimilada. De la energía que es asimilada, otro porcentaje se pierde en forma de calor respiratorio y, a su vez, la proporción de energía remanente es destinada al crecimiento y la reproducción, y recibe el nombre de *energía productiva* del organismo (Smith & Smith, 2001; figura 3). Lindeman (1942) denominó *eficiencia ecológica* a este balance entre la energía ingerida, asimilada y disipada por los distintos niveles tróficos. La eficiencia ecológica determinará cuál es la cantidad de energía productiva de un organismo, que es la que podrán consumir los organismos del nivel trófico siguiente (quienes poseen una dinámica de asimilación energética similar). Por lo tanto, la energía productiva contenida en un nivel trófico determinado siempre será mayor que la del nivel siguiente, pero a su vez, menor que la del nivel que le precede. Esto nos dice que mientras más alejado esté un consumidor de los primeros niveles tróficos (o de los productores mismos), menor será la cantidad de energía disponible para su consumo.

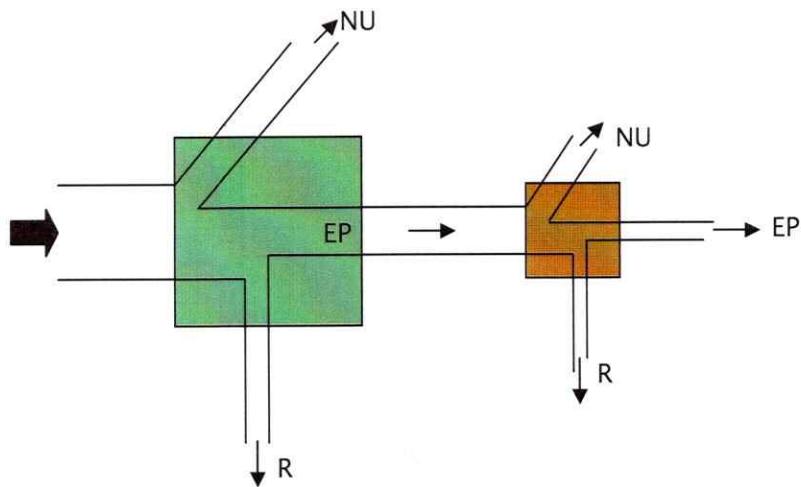


Figura 3. Flujo de energía a través de distintos niveles tróficos en un ecosistema. El flujo de energía entrante es subdividido en respiración (R), energía *no utilizada* (NU), que corresponde a excretas o luz que pasa a través de la vegetación sin ser fijada, y energía productiva (EP). Fuente: Odum, 1965.

Se tiene entonces que toda malla trófica se estructura sobre la base de la producción primaria, que es la primera fuente de energía y donde se encuentra su mayor disponibilidad. Estableciendo la analogía con el sistema alimentario, los subsistemas de producción vegetal y animal corresponderían a niveles de la malla trófica humana. El ser humano como consumidor de energía, pertenece a un nivel trófico superior a los esquematizados en la figura 3, y tiene la facultad de alimentarse directamente de ambos (figura 1).

A su vez, las salidas de materiales que se generan a lo largo de la estructura del sistema alimentario (figura 1) formarán parte de lo que los organismos descomponedores o detritívoros usarán como alimento. En el paralelo entre la malla trófica humana y el sistema alimentario, la diferencia que presenta la energía *no utilizada* está en que en el sistema alimentario, las salidas se deben a asuntos relacionados con el manejo de la biomasa y no corresponden a desechos biológicos.

La eficiencia ecológica en los ecosistemas puede ser entendida, en el sistema alimentario, como la eficiencia energética de transformación de materiales para la generación de productos alimentarios. Dicha eficiencia es mucho más baja en el subsistema animal que en el vegetal. Como indica Wirsenius (2003b), de toda la energía de la biomasa utilizada para generar productos animales, sólo alrededor de un 4% queda disponible para consumo humano, contrastándose con alrededor de un 62% de eficiencia de transformación del subsistema vegetal. Es importante precisar que estas eficiencias se calculan sólo a partir de la biomasa que ingresa a cada subsistema, sin considerar aquella que posiblemente ya se haya perdido durante el manejo previo al ingreso. Por lo tanto, las eficiencias de transformación de los subsistemas no corresponden a la eficiencia total del proceso de generación de alimentos, siendo esta última aun menor.

1.2 Planteamiento del problema

A medida que la noción de sustentabilidad ganaba importancia en el discurso ambiental, alrededor de 1990, las características de éste iban cambiando notablemente, dejando de pensarse en la toxicidad de ciertas sustancias peligrosas como el principal problema o la mayor presión que la sociedad ejercía sobre el ambiente. El foco se movió desde el análisis de los flujos de salida del sistema productivo hacia una comprensión completa de la dimensión física de la economía. Desde este punto en adelante, la economía se conceptualiza como una actividad que extrae materiales de la naturaleza, los transforma, los mantiene como reservorio de la sociedad durante un tiempo determinado y, al final de la cadena producción-consumo, los deposita nuevamente en el ambiente. Hoy se reconoce que problemas ambientales pueden surgir en cada paso de este proceso. Adicionalmente, se entiende que no sólo

sustancias problemáticas pueden generar problemas ambientales, sino también las cantidades de materiales que la sociedad moviliza (Schandl y col, 2002).

La generación de alimentos no es la excepción a lo recién descrito: los alimentos son extraídos de la naturaleza y transformados, constituyendo materiales que posteriormente son devueltos al medio una vez utilizados o desechados. En este proceso operan diversas industrias que generan productos alimentarios, de naturaleza animal o vegetal, que serán consumidos por la sociedad. Entre dichas industrias, existen algunas cuya actividad consiste en el procesamiento de productos agrícolas, implicando éste algún tipo de transformación de la fitomasa que se procesa, su empaquetamiento y posterior comercialización una vez transformada en productos finales⁵. Estas industrias reciben el nombre de *agroindustrias*, y en este trabajo se tomó a una de ellas como modelo de estudio.

La utilización de vegetales por parte de la agroindustria, con el fin de generar productos alimentarios, implica necesariamente realizar prácticas de apropiación de fitomasa cuya magnitud dependerá en gran medida de la eficiencia con que la industria opera. Reconstruyendo los efectos de la apropiación de fitomasa que una determinada industria genera, puede obtenerse un cuadro más completo para comprender la importancia de reducir tal fenómeno.

Imhoff y col. (2004) indica que la apropiación humana de la producción primaria neta, aparte de dejarle menos disponibilidad a otras especies, altera la composición de la atmósfera, los niveles de biodiversidad, los flujos de energía dentro de las mallas tróficas y la provisión de importantes servicios ecosistémicos.

⁵ Una industria puede concluir su proceso productivo generando productos intermedios de una cadena productiva mayor. Sin embargo, ese mismo producto se considera *final* para los procesos productivos de dicha industria.

La principal actividad de apropiación de fitomasa que el sistema alimentario genera, a través de la cual se explican los efectos mencionados arriba, es la transformación de ecosistemas naturales en terrenos agrícolas. La expansión de tales terrenos es ampliamente reconocida como una de las alteraciones de origen humano más significativas que se realizan sobre el ambiente (Matson y col, 1997). Este tipo de uso de tierras altera la estructura y funcionamiento de los ecosistemas originales, y también altera sus interacciones con la atmósfera, con el suelo, con sistemas acuáticos y con tierras aledañas, pudiendo esto tener consecuencias locales, regionales o incluso globales. Aquellas tierras que no son transformadas, a menudo son fraccionadas mediante la alteración de las zonas de los alrededores, afectándolas de todas formas en su composición de especies y funcionamiento, a pesar de no haber sido modificadas en forma directa (Vitousek y col, 1997).

Sin embargo, la expansión de terrenos agrícolas no es una actividad que pueda practicarse infinitamente, puesto que el espacio en el planeta es limitado. Acorde con esto, Bender (1994) explica que la expansión histórica de las áreas agrícolas se redujo en los años 80 como resultado de la intensificación de la agricultura. Por lo tanto, la mayor parte del incremento en la futura oferta global de alimentos provendrá, además de la expansión de los terrenos agrícolas, de un aumento en la productividad de los cultivos. En otras palabras, una creciente demanda de fitomasa que es cultivada en un espacio que no crece estimulará la intensificación de la agricultura a menos que se busquen soluciones alternativas. Si se tiene en cuenta el progresivo aumento de la demanda alimentaria como consecuencia del incremento de la población mundial, resulta lógico que la demanda de fitomasa por parte de la industria alimentaria también crecerá, conduciendo esta dinámica a la progresiva intensificación de la agricultura.

Hasta ahora, la solución más estudiada para resolver el problema de la creciente demanda de fitomasa ha sido el incremento de la productividad de los cultivos (Wirsenius, 2003a). Sin embargo, la intensificación de la agricultura tiene efectos negativos sobre los ecosistemas, lo que hace que su aumento progresivo no sea una actividad sostenible. Una característica clave de la intensificación de las prácticas agrícolas ha sido la especialización de los procesos de producción, lo que ha dado como resultado una reducción del número de especies cultivadas, conduciendo frecuentemente a la formación de monocultivos. En ellos, la composición de la comunidad de plantas es crítica por tratarse de un determinante mayor de la biodiversidad total, ya que influencia la composición y abundancia de la biota asociada a la vegetación, como los invertebrados y microorganismos del suelo, afectando, a su vez, los procesos dados entre el suelo y las plantas (Matson y col, 1997). Los monocultivos, aunque son productivos, carecen de atributos ecológicos para un eficiente ciclado de materiales y conservación del suelo y agua. Además, su productividad es subsidiada con la utilización de compuestos químicos como pesticidas y fertilizantes, algunos de los cuales causan efectos perjudiciales sobre el ambiente y la salud pública (Altieri, 1992).

Claro está que al alterar los ecosistemas, también se altera con ello los procesos que en los ecosistemas se dan. De los muchos procesos ecosistémicos existentes, hay algunos fundamentales para la existencia de la humanidad, conocidos como *servicios ecosistémicos*. Éstos se refieren a un amplio rango de condiciones a través de las cuales los ecosistemas contribuyen al sostenimiento y satisfacción de la vida humana. Algunos servicios ecosistémicos son la purificación del aire y del agua, detoxificación y descomposición de residuos, regulación del clima, regeneración de la fertilidad de los

suelos, amortiguación de sequías e inundaciones, polinización de cultivos y vegetación natural, dispersión de semillas, reciclado y movimiento de nutrientes, control de la amplia mayoría de plagas agrícolas potenciales y protección del borde costero de la erosión causada por el oleaje, entre otros (Daily y col, 1997). Estos servicios mantienen la biodiversidad y la producción de *bienes ecosistémicos*, tales como los alimentos en general, las maderas, los combustibles obtenidos a partir de biomasa, las fibras naturales y muchos productos farmacéuticos e industriales y sus precursores (Daily y col, 1997).

Dada la importancia de las funciones que cumplen los servicios ecosistémicos sobre los cuales la vida se sostiene, es claro que la necesidad de conservar tales procesos es fundamental. Todos los seres vivos transforman su ambiente, y el ser humano no es la excepción. La interacción con su entorno, y por lo tanto generar efectos sobre él, es algo inevitable e incluso necesario para la subsistencia. Sin embargo, la degradación irracional del ambiente sí es algo totalmente innecesario. Sólo evitando la desmesurada degradación del ambiente, y por lo tanto de nuestra propia fuente de vida, es que se pueden perpetuar los procesos ecosistémicos que permiten nuestra existencia.

Absolutamente necesaria para la subsistencia de la humanidad es la apropiación de fitomasa. De otra manera, no podríamos alimentarnos. Por lo tanto, el enfoque necesario para abordar el problema que ella genera no es cómo evitar la apropiación, sino *qué tan grande* es la magnitud de fitomasa realmente necesaria para asegurar, por lo menos en cuanto a producción de comida se refiere, nuestra alimentación. En la actualidad, la investigación sobre la producción de alimentos está orientada a la prospección de incrementos en la productividad de los cultivos, a expensas de analizar

el potencial que tiene reducir los requerimientos de producción a través de aumentos en la eficiencia de transformación de los alimentos en los subsistemas correspondientes (Wirsenius, 2003a).

Como es esperable, el aumento de la eficiencia en el manejo de los flujos de fitomasa apropiada para la producción alimentaria permitiría que una determinada cantidad de productos fuera obtenida con un menor nivel de perturbaciones a los ecosistemas, y por lo tanto, contribuiría a la mantención de sus propiedades y procesos. Al mismo tiempo, un aumento en la eficiencia de transformación de productos alimentarios reduciría la cantidad de desechos que se generan, cuya disposición también presenta impactos negativos sobre el medio ambiente cuando su magnitud es superior a la que éste puede soportar.

1.2.1 Perspectiva de la Ecología Industrial

Como se apreció en la figura 1, la generación de alimentos en el sistema alimentario es realizada por dos grandes subsistemas de producción, ambos altamente industrializados en la actualidad (Fonte, 2002). Es por esto que el impacto que el sistema alimentario genera sobre los sistemas naturales está mediado principalmente por la actividad industrial y la apropiación de fitomasa que ella ejerce. Dada la envergadura que tiene la industria en la generación de alimentos, y dada la importancia de la eficiencia con que ellos son generados, se requiere analizar el problema bajo una mirada que integre a la actividad industrial en la "ecología" de su entorno, entendiendo a las industrias como un elemento central de una nueva idea de ecosistema. De acuerdo a esta reflexión, el problema planteado es abordado desde la perspectiva de la Ecología Industrial.

De acuerdo con Graedel y Allembly (1995), este concepto requiere que una industria sea entendida no de manera aislada de las industrias que la rodean, sino que en armonía con ellas. Corresponde a una visión sistémica en la que se busca optimizar el ciclo productivo total que va desde la obtención de materia prima hasta la disposición final de productos terminados, donde los factores a ser optimizados incluyen los recursos, la energía y el capital.

La ecología industrial estudia las relaciones existentes, tanto dentro de, como entre los sistemas industriales y ecológicos. Su enfoque es el estudio del metabolismo industrial, apuntando a entender la base física del funcionamiento de la sociedad, las relaciones entre procesos y cadenas productivas dentro de la antropósfera⁶, y el intercambio de materiales y energía con el ambiente (Bringezu, 2003).

El concepto de ecología industrial surge de la comparación entre los sistemas industriales y los ecosistemas naturales, e implica un cambio de los primeros hacia formas de organización similares a las de los últimos, con el fin de convertir el desempeño industrial en una actividad definitivamente sostenible (Garner & Keoleian, 1995). La razón se explica de la siguiente manera: en los ecosistemas, el flujo de materiales es circular debido a que están siendo continuamente reciclados por organismos que obtienen recursos a partir de materiales residuales generados por otros organismos componentes del sistema. En un *ecosistema industrial*, los desechos producidos por una industria serían utilizados por otra como recursos.

La evolución de un sistema industrial lineal, en el que existe extracción de recursos primarios y disposición de desechos en el ambiente (considerado antiguamente como

⁶ La antropósfera se entiende como un subsistema del sistema Tierra, en el cual ocurre la totalidad de las actividades humanas (Lehmann, 1993).

fuente infinita de recursos y sumidero infinito de residuos), hacia un sistema más cerrado de materiales, como son los ecosistemas, es un aspecto esencial de la ecología industrial. Un ecosistema industrial *ideal* podría considerarse, entonces, como un sistema cerrado para el flujo de materiales (figura 4). Una experiencia exitosa de este tipo de sistema es la del parque de Kalundborg en Dinamarca, que representa un intento por crear un sistema industrial altamente integrado que optimiza el uso de productos derivados y minimiza los residuos que abandonan el sistema (Garner & Keoleian, 1995).

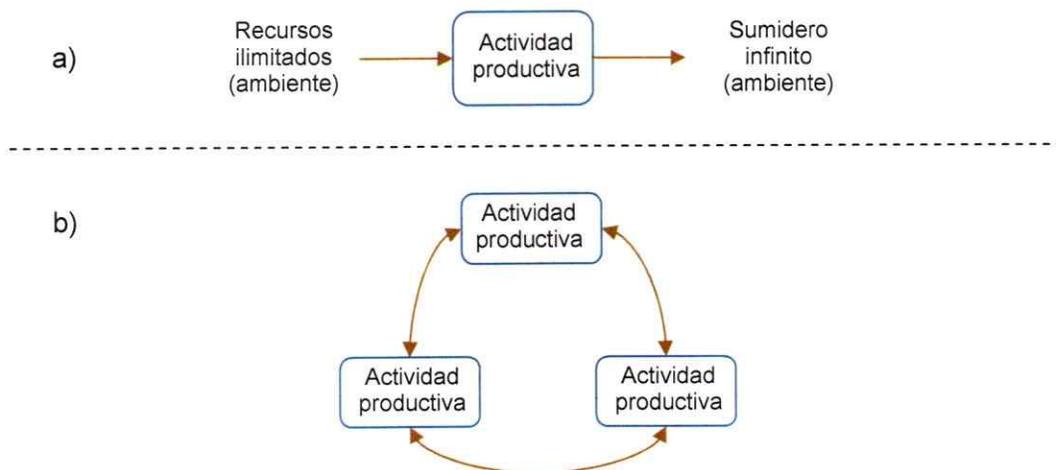


Figura 4. Representación de dos tipos de sistemas productivos. El sistema lineal (a) se ajusta al antiguo pensamiento sobre la infinitud del ambiente como fuente de recursos y sumidero de residuos. El sistema cerrado de materiales (b), objetivo de la ecología industrial, responde a la consideración del ambiente como una entidad finita o limitada.

La meta principal de la ecología industrial es fomentar el desarrollo sostenible a nivel local, regional y global, utilizando como estrategia para ello, disminuir la cantidad de materiales y energía utilizada en los procesos industriales. Para aprovechar al máximo la entrada de recursos que se requieren (recursos que actualmente se sabe que no son infinitos) y al mismo tiempo aminorar el impacto que los residuos y

emisiones generan sobre el ambiente, la actividad industrial debería operar tan eficientemente como fuera posible.

1.3 Objetivos

Objetivo general:

Analizar, desde una perspectiva ecológica, la importancia que posee la eficiencia energética de generación de productos alimentarios a partir de fitomasa terrestre, en el marco del sistema global alimentario.

Objetivos específicos:

- Medir y cuantificar las magnitudes de los flujos de energía en un proceso industrial de generación de un producto alimentario.
- Calcular la eficiencia de dicho proceso.
- Comparar la eficiencia del proceso con una eficiencia optimizada para el mismo.

2. CASO DE ESTUDIO: PRODUCCIÓN DE TROZOS DE PULPA DE MANZANA COCIDA

Los alimentos que produce la industria bajo estudio son de naturaleza vegetal, lo que enmarca este trabajo en el subsistema de producción vegetal del sistema alimentario. Esto se justifica considerando el particular origen que tiene la eficiencia correspondiente a cada subsistema de producción: al igual que en las mallas tróficas, en el subsistema animal la eficiencia ecológica determina los flujos de energía productiva en su interior. En este subsistema, por lo tanto, esta eficiencia está determinada, además del manejo humano, por características fisiológicas de los animales. En el subsistema de producción vegetal, en cambio, la eficiencia se determina exclusivamente por el manejo que el ser humano hace de la fitomasa apropiada. Considerando esto, modificar en forma significativa la eficiencia del subsistema animal es una tarea relativamente dificultosa y compleja, en cambio en el subsistema vegetal es una posibilidad cuya realización es más factible en el corto-mediano plazo, y a través de la aplicación de medidas sencillas y muchas veces de bajo costo.

2.1 Metabolismo del proceso industrial estudiado

En general, todas las actividades realizadas por una industria, incluyendo todos aquellos flujos de materiales y energía y procesos de transformación que ocurren al interior de ella se conocen como *metabolismo industrial*. Este término se deriva del concepto metabolismo, que utilizado en su contexto biológico original se refiere a los procesos internos de un organismo viviente. En un nivel abstracto de descripción, el metabolismo de una industria es el conjunto completo e integrado de procesos físicos y

químicos que convierten materias primas y energía, con adición de trabajo, en productos finales y desechos, en una condición estacionaria (Ayres, 1994).

El metabolismo de la industria en estudio habitualmente consta de la generación de más de un producto en forma simultánea, y debido a la estacionalidad de las materias primas que utiliza, suele adaptar sucesivamente su producción durante un período de tiempo determinado (que suele corresponder a un año). Algunos de los materiales que utiliza para su producción son manzanas, naranjas, frutillas, uvas y espinacas, entre otros. En el presente estudio se consideró la eficiencia de una línea de producción consistente en la generación de trozos de pulpa cocida de manzana, a partir de la transformación de la fruta ingresada al proceso íntegramente.

De acuerdo a lo anterior, la fitomasa que ingresa al proceso agroindustrial es sometida a una secuencia de transformaciones para generar el producto deseado. En algunos de estos procesos se desprecian materiales que no serán utilizados en la generación del producto, y que posteriormente forman parte de los desechos industriales si es que no son aprovechados de alguna manera. Los procesos utilizados en la línea de producción de trozos de manzana cocida y su secuencia y descripción se muestran en forma más detallada en el ANEXO 1.

La energía contenida en la fitomasa procesada también fluye de un proceso a otro a medida que los materiales son transformados a lo largo de la cadena productiva, y debido a que generalmente se pierde cierta cantidad de masa en la mayoría de ellos, hay una consecuente pérdida de energía a lo largo del proceso completo (detalle en ANEXO 1).

Consecuentemente, el análisis realizado en este estudio se basa en el balance de masa y energía de los materiales que ingresan en la línea de producción. Dicho balance se sustenta en la primera ley de la termodinámica, o de conservación de la energía, que enuncia que la energía (o materia) no puede ser creada ni destruida, sólo puede cambiar de una forma a otra. La ley de la conservación, aplicada al análisis de flujo de materiales, indica que la suma de entradas al sistema es igual a la suma de salidas de él, corregida por los cambios ocurridos en los reservorios. Asumiendo que un proceso cualquiera no retiene ni pierde energía (no hay cambios en los reservorios), la cantidad de energía y de materia que entra y sale del proceso es equivalente (figura 5).



Figura 5. Esquema de flujo de energía y materiales en un sistema industrial en estado estacionario, donde $\text{Energía inicial} + \text{Masa inicial} = \text{Energía final} + \text{Masa final}$.

La dinámica que sigue la energía del proceso industrial estudiado puede ser representada por tres flujos principales: entrada de energía, salida de energía y pérdida de energía, es decir, ingreso de materiales al proceso, salida de productos finales y generación de residuos, respectivamente (figura 6). De acuerdo al esquema anterior, y dado que la industria no acumula materiales, la suma de los flujos de salida debería ser igual al flujo de entrada del proceso.

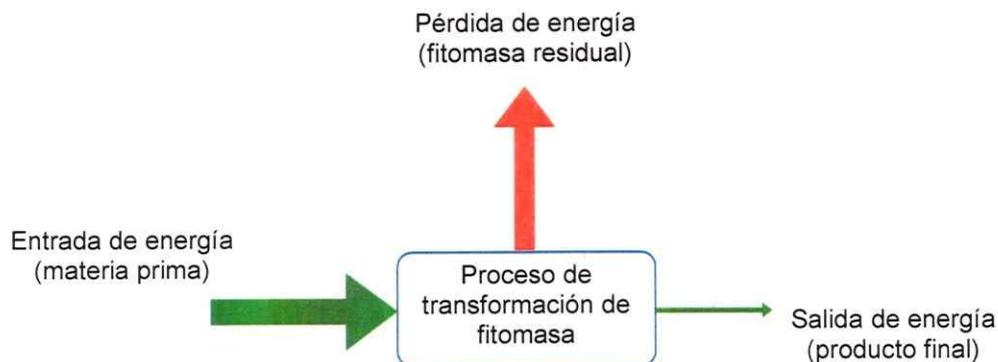


Figura 6. Flujo de energía en el proceso de transformación de fitomasa estudiado.

En este estudio se realizó la evaluación de la eficiencia del proceso de conversión de manzanas en productos finales (trozos de pulpa cocida), medida en energía. Este análisis implica conocer el tipo de material que ingresa al proceso de transformación y su contenido energético, así como su peso total. De la misma manera, se requiere conocer la cantidad de masa de los productos por tipo de material, a fin de poder estimar la eficiencia energética del proceso de producción. La forma en que se abordó el estudio corresponde a la mostrada en la figura 6, lógica en la cual son importantes los flujos de entrada, residual y del producto, sin incluir detalles del funcionamiento al interior del proceso industrial.

Además de la eficiencia determinada para la agroindustria, el presente estudio considera su comparación con una eficiencia optimizada, tomando en cuenta el perfeccionamiento de los procesos de transformación del proceso productivo hasta su más alto grado posible, sólo a partir de la maximización del aprovechamiento de los materiales que son procesados.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el fin de conocer el tipo de material utilizado en la producción de trozos de pulpa cocida de manzana, se consideró el modelo del proceso industrial expuesto en el ANEXO 1 y en base a él se procedió a observar y clasificar los residuos generados. Posteriormente, se utilizaron procedimientos diferentes en la obtención de muestras y cálculo del contenido energético de los flujos de fitomasa, dadas las diferentes condiciones en que se colectaron los datos para calcular la eficiencia industrial del proceso y la estimación de una eficiencia óptima. Ambos procedimientos se describen a continuación.

3.1 Toma de muestras y cálculo del contenido energético de los materiales

3.1.1 Eficiencia industrial

La toma de datos se llevó a cabo en dos días de trabajo. Para obtener la masa total de cada tipo de material, los residuos fueron dispuestos en bandejas plásticas de masa conocida y pesados en forma diferenciada con una balanza, a medida que iban abandonando el proceso de producción para luego ser colocados como desechos en sus sitios de disposición final.

Se colectaron muestras de cada tipo de material residual identificado (piel, corazón, pulpa cruda y pulpa cocida), de las cuales dos de cada una fueron pesadas y posteriormente deshidratadas en un horno de secado a 60°C ($n = 2$ por tipo de material). Para determinar la pérdida completa de agua, las muestras fueron pesadas periódicamente hasta alcanzar peso constante, el que fue registrado en cuatro instancias separadas por un período de 24 horas. Con los datos de masa inicial y final

del proceso de deshidratado, se calculó el porcentaje de agua contenido en cada tipo de material (tabla 1, ANEXO 2).

Una vez deshidratadas, las muestras fueron trituradas en un molinillo y quemadas en una bomba calorimétrica (Parr 1261), obteniéndose los contenidos energéticos en kilocalorías por gramo ($n = 6$ por tipo de material; tabla 1, ANEXO 3). Con estos valores y los datos del contenido de agua de los materiales se estimó el contenido energético total de fitomasa que abandona el proceso en forma de residuos. El cálculo se obtuvo restándole el contenido de agua a cada tipo de material, y luego multiplicando su contenido energético por la masa total remanente (peso seco; figura 1 ANEXO 3). El flujo de energía total entrante al sistema se calculó con los datos de la masa total entrante, obtenidos de la plantilla de trabajo de la industria.

3.1.2 Eficiencia óptima

Para el cálculo del contenido energético de los distintos tipos de material, se utilizaron manzanas de la misma variedad (*Fuji*) que la empleada en el proceso industrial. En el laboratorio se perfeccionaron los procesos de extracción de piel y corazón de la manzana, esto es, se realizó la extracción de dichos materiales cuidando de quitar la menor cantidad posible de pulpa en el proceso. La piel y el corazón extraídos fueron pesados para obtener una aproximación al porcentaje de masa al que corresponden con respecto a la masa total de la manzana. Los datos se obtuvieron de 6 muestras para el caso de la piel ($n = 6$) y de 12 muestras para el caso del corazón ($n = 12$; tablas 1 y 2, ANEXO 4). Con estos datos se estimó la cantidad teórica de masa residual de piel y corazón que se generaría en el proceso, a partir del conocimiento de la masa total procesada. Dicho cálculo no tomó en cuenta la masa del tallo externo de la manzana, debido a que éstas ingresaban sin él al proceso productivo.

En este análisis no se consideró el proceso productivo completo, sino hasta el momento previo a la precocción de pulpa (fin del proceso de trozado, ver ANEXO 1), dado que no pudieron reproducirse ni éste ni los pasos posteriores a él en el laboratorio.

Los materiales piel, pulpa cruda y corazón⁷ fueron deshidratados en un horno de secado a 60°C, para determinar el contenido porcentual de agua (n = 4 por tipo de material; tabla 2, ANEXO 2) y luego el contenido energético. Este último se obtuvo al quemar las muestras en una bomba calorimétrica Parr 1261. Los resultados se obtuvieron de 6 procedimientos por cada tipo de material (n = 6) en kilocalorías por gramo (tabla 2, ANEXO 3).

Posteriormente, con los datos de masa total entrante al sistema (facilitados por la industria) se procedió a estimar el flujo total de entrada de energía al sistema de transformación de manzanas (figura 1 del ANEXO 3).

3.2 Análisis estadístico

Para discriminar si las diferencias entre los contenidos calóricos y de agua de los materiales fueron significativas tanto dentro de cada procedimiento como entre ellos, se aplicaron las pruebas estadísticas no paramétricas (muestras independientes) de Kruskal-Wallis y Mann-Whitney, con un $\alpha=0,05$. En el caso de comparaciones múltiples, se usó un α ajustado por la corrección de Bonferroni.

En el caso de los datos del proceso industrial, las muestras de pulpa cruda y pulpa cocida fueron agrupadas en "pulpa" sólo para fines comparativos, puesto que corresponden al mismo material en diferentes etapas del proceso industrial.

⁷ Como se explicó recién, no hay materiales correspondientes a pulpa cocida en este análisis.

3.3 Eficiencia energética de transformación

La eficiencia de transformación fue calculada mediante la división entre la energía contenida en el producto y la energía contenida en los materiales a partir de los cuales dicho producto fue obtenido (Wirsenius 2003b):

$$\text{Eficiencia de transformación} = \frac{\text{Energía del producto}}{\text{Energía de la materia prima}} \times 100$$

3.4 Eficiencia industrial vs eficiencia optimizada

Dado que el cálculo de la eficiencia óptima no pudo replicar las etapas de cocción del proceso industrial, la comparación entre ésta y la eficiencia industrial se realizó calculando esta última hasta el paso previo a la precocción de materia prima.

Por ello, para efectos de esta comparación, se consideró como producto final del proceso industrial aquella fitomasa que ingresaría al proceso de precocción en adelante, es decir, la que sigue en la cadena productiva después del proceso de trozado (ver ANEXO 1). Este flujo de fitomasa fue calculado restando a la materia prima, la pérdida medida hasta dicho proceso. De igual manera que las anteriores, la nueva eficiencia de transformación obtenida fue calculada como se muestra en la fórmula de más arriba.

4. RESULTADOS

4.1 Eficiencia industrial

La modelación del proceso de transformación de manzanas permitió discriminar cuatro tipos de residuos generados: piel, pulpa cruda, pulpa cocida y corazón. De ellos, la piel correspondió al porcentaje más alto con respecto al total de fitomasa entrante. El porcentaje total de residuos fue de un 45,43%, correspondiente a una masa de 1297,98 kg (tabla1).

Tabla 1. Masa de los flujos de entrada y residuales de fitomasa. Los porcentajes de residuos están calculados en función del total de materia prima.

Tipo de residuo	Materia prima (kg)	Residuos (kg)	% residuos
Piel	804,08	804,08	28,14
Pulpa cruda	1753,22	75,24	2,63
Pulpa cocida	-----	118,96	4,16
Corazón	299,70	299,70	10,49
TOTAL	2857,00	1297,98	45,43

En relación con el contenido calórico, la piel resultó ser superior al resto, al mismo tiempo que inferior en cuanto a su contenido de agua. Inversamente, la pulpa de la manzana (cruda o cocida) mostró los contenidos de agua más altos y los contenidos calóricos más bajos (tabla 2). La prueba de Kruskal-Wallis ($\chi^2=12,7$, $gl=2$, $p < 0,05$) mostró diferencias significativas en los contenidos de agua para los distintos tipos de material. Posteriormente una prueba de comparaciones múltiples mostró que existen diferencias significativas ($p < 0,008$) en el porcentaje de agua entre piel y pulpa. También se encontraron diferencias significativas en el contenido calórico entre los distintos tipos de material (Kruskal-Wallis, $\chi^2=19,44$, $gl=2$, $p < 0,05$). Las comparaciones múltiples demuestran que la pulpa difiere significativamente con la piel

($p < 0,008$). No habría diferencias significativas entre el contenido calórico de piel y corazón ni entre pulpa y corazón.

Tabla 2. Porcentaje de agua (n=2) y contenido calórico (n=6) de cada tipo de material.

Tipo de material	% agua	(kcal/g)
Piel	80,00 ± 0,00	4,29 ± 0,08
Pulpa cruda	88,18 ± 0,08	3,69 ± 0,06
Pulpa cocida	90,24 ± 1,45	3,74 ± 0,06
Corazón	83,73 ± 0,11	3,92 ± 0,04

Con los datos mostrados en las tablas anteriores se calcularon las masas correspondientes a los materiales residuales deshidratados y su contenido energético total. En términos totales, la mayor cantidad de energía residual estuvo contenida en los residuos de piel generados por el proceso (tabla 3).

Tabla 3. Masas residuales sin contenido de agua y contenido energético total de cada tipo de material.

Tipo de material	Masa de residuos deshidratados (kg)	Energía (kcal)
Piel	160,81	689932,79
Pulpa cruda	8,90	32863,16
Pulpa cocida	11,61	43467,72
Corazón	48,76	191125,55

A partir de los datos expuestos anteriormente se procedió a calcular la eficiencia energética de producción, mostrando ser alrededor de un 35%. Los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Eficiencia del proceso productivo en términos de energía de la fitomasa procesada.

Energía entrante (kcal)	Energía residual (kcal)	Energía producto (kcal)	Eficiencia del proceso
1646285,68	957389,22	569686,84	34,60%

4.2 Eficiencia industrial vs eficiencia optimizada

La distribución de materiales en un modelo teórico de manzana de la variedad estudiada corresponde en un 6,94% ($\pm 0,29$) a piel, en un 4,68% ($\pm 0,70$) a corazón y en el restante 88,35% a pulpa, con respecto a la masa total (figura 7).

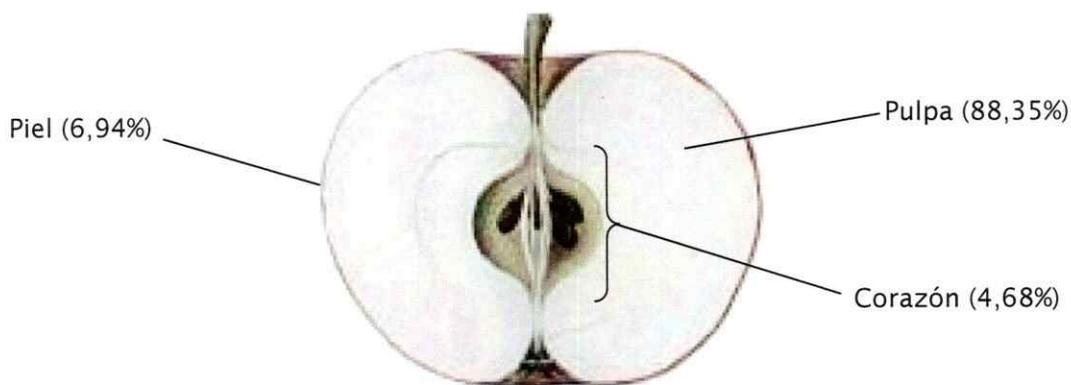


Figura 7. Porcentaje de los distintos tipos de material en un modelo teórico de manzana *Fuji*.

Con estas proporciones se procedió a calcular la masa de cada tipo de material residual que supuestamente se generaría en el proceso industrial. Los flujos de fitomasa teóricos mostraron diferencias evidentes con los flujos observados en cuanto a fitomasa entrante y residual. Los residuos teóricos no consideran pérdida de pulpa de manzana. Se debe advertir que para los materiales piel y corazón, la masa de la materia prima es igual a la masa de los residuos en ambos procesos (tabla 5).

Tabla 5. Masas supuestas de cada tipo de material, tanto de entrada como residuales.

Tipo de residuo	Proceso industrial			Proceso optimizado		
	Materia prima (kg)	Residuos (kg)	% residuos	Materia prima (kg)	Residuos (kg)	% residuos
Piel	804,08	804,08	28,14	198,28	198,28	6,94
Pulpa cruda	1753,22	75,24	2,63	2525,02	0,00	0,00
Corazón	299,7	299,7	10,49	133,70	133,7	4,68
TOTAL	2857,00	1179,02	41,27	2857,00	407,22	11,62

En la tabla anterior se observa que las cantidades de fitomasa de ambos procesos difieren tanto para los flujos residuales como para el de producto final (pulpa cruda en este caso), siendo los primeros mucho menores en el proceso optimizado que en el industrial. La situación es inversa para el flujo de producto final, el cual resulta ser mayor en el proceso optimizado (figura 8). Nótese que, teóricamente, el máximo aprovechamiento de los materiales supone que no existen residuos de pulpa cruda en un proceso de producción de manzanas (0%).

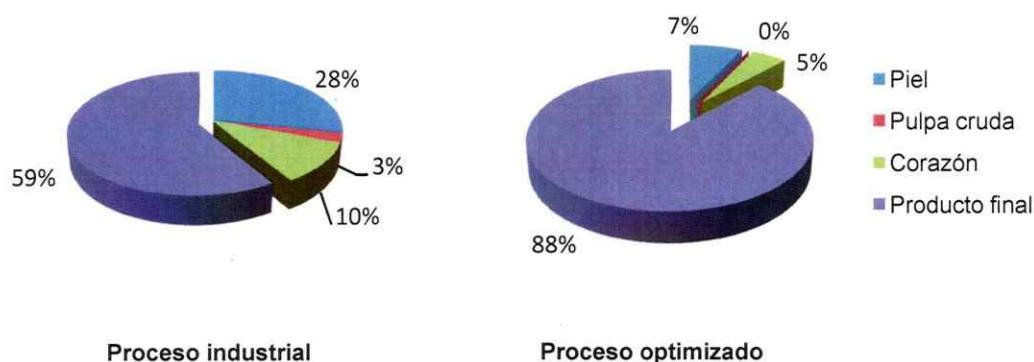


Figura 8. Flujos de fitomasa en el proceso industrial y en una situación óptima de producción de trozos de pulpa de manzana. Los porcentajes residuales (piel, pulpa cruda y corazón) corresponden a una aproximación de los valores expuestos en la tabla 5.

Para las muestras del proceso optimizado, la prueba de Kruskal–Wallis ($\text{Chi}^2 = 9,88$, $\text{gl}=2$) mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) en los contenidos de agua entre los distintos tipos de material. Posteriormente, una prueba de comparaciones múltiples mostró que existen diferencias significativas ($p < 0,008$) entre el porcentaje de agua de piel y pulpa. Igualmente, se encontraron diferencias significativas en el contenido calórico según el tipo de material (Kruskal-Wallis, $\text{Chi}^2 = 15,16$ $\text{gl}=2$, $p < 0,05$), estando éstas entre piel y pulpa solamente ($p < 0,008$) de acuerdo a la prueba de comparaciones múltiples.

Comparados ambos procesos (tabla 6), los resultados de la prueba de Mann-Whitney aplicada a cada tipo de material indican que no existen diferencias significativas en ninguno de ellos en cuanto al contenido de agua (piel: $z = -1,907$, $\text{Prob} > |z| = 0,0565$; pulpa y corazón: $z = -1,852$, $\text{Prob} > |z| = 0,0641$), pero sí difieren significativamente en cuanto al contenido calórico, con valores de $z = 2,882$ y $\text{Prob} > |z| = 0,0039$ para cada uno de ellos.

Tabla 6. Porcentaje de agua (n=4 en proceso optimizado) y contenido calórico (n=6) en muestras del material utilizado.

Tipo de material	Proceso industrial		Proceso optimizado	
	% agua	(kcal/g)	% agua	(kcal/g)
Piel	80,00 ± 0,00	4,29 ± 0,08	71,37 ± 0,54	4,81 ± 0,06
Pulpa cruda	88,18 ± 0,08	3,69 ± 0,06	84,32 ± 0,75	3,82 ± 0,04
Corazón	83,73 ± 0,11	3,92 ± 0,04	76,29 ± 0,86	4,30 ± 0,03

Las diferencias entre los contenidos de agua y calórico de ambos procesos se grafican en la figura 9. Las diferencias significativas se detectaron sólo en el contenido calórico (derecha) para cada tipo de material.

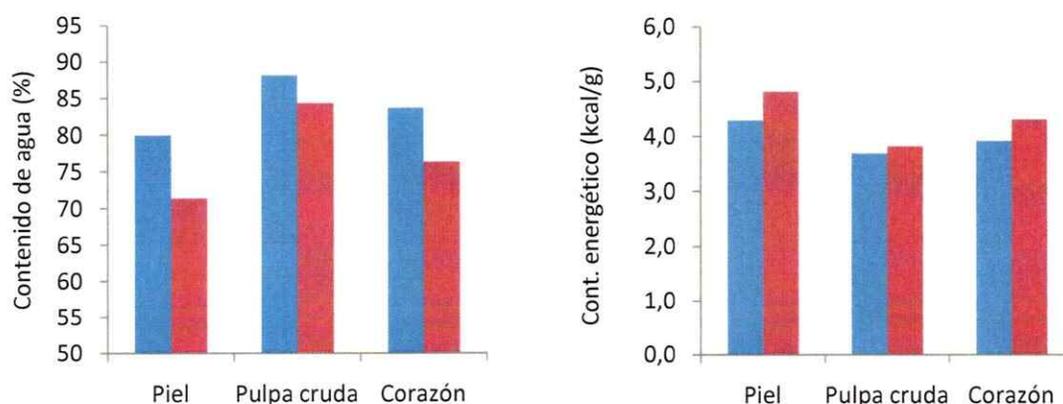


Figura 9. Contenido de agua y energía de las muestras de cada tipo de material, para ambos análisis realizados. Las barras azules corresponden al proceso industrial; las rojas, al optimizado.

A partir de la información anterior se calculó el contenido energético de los flujos de residuos deshidratados que se deberían generar en el proceso. Los resultados se muestran comparados con los obtenidos en el proceso observado en la industria (tabla 7).

Tabla 7. Masas residuales sin contenido de agua y contenido energético total de cada tipo de material.

Tipo de material	Proceso industrial		Proceso optimizado	
	Masa de residuos deshidratados (kg)	Energía (Kcal)	Masa de residuos deshidratados (kg)	Energía (Kcal)
Piel	160,81	689932,79	56,77	273112,52
Pulpa cruda	8,9	32863,16	0,00	0,00
Corazón	48,76	191125,55	31,23	134408,93

Con los datos expuestos anteriormente se procedió a calcular la eficiencia óptima de producción, en términos de energía. La comparación con la eficiencia industrial del proceso permite ver con claridad las diferencias que muestran ambos procedimientos (tabla 8, figura 10).

Tabla 8. Eficiencia industrial y optimizada para el proceso productivo estudiado, sin considerar etapas de cocción.

	Energía entrante (Kcal)	Energía residual (Kcal)	Energía producto (Kcal)	Eficiencia
Proceso industrial	1646285,68	913921,50	732368,47	44,49%
Proceso optimizado	1921259,28	407521,45	1513737,83	78,79%

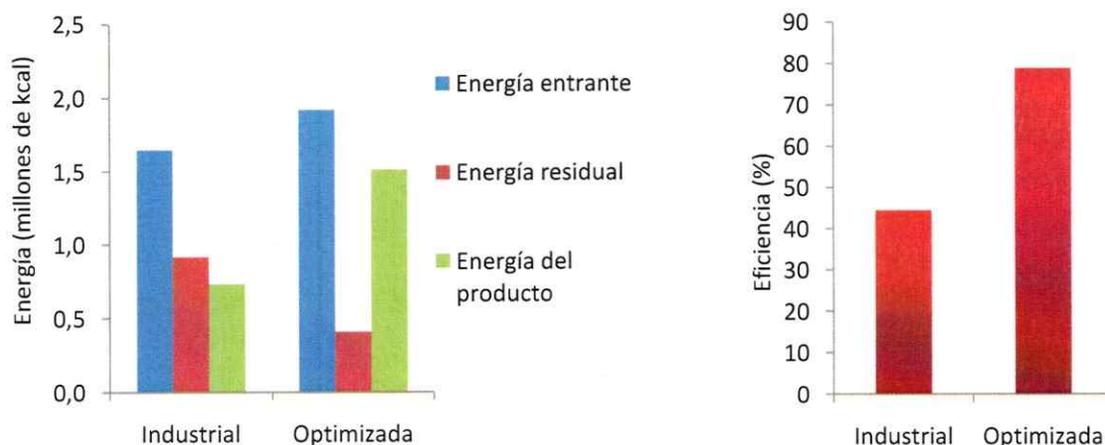


Figura 10. Comparación entre energía entrante, residual y del producto (izquierda) y eficiencia industrial y óptima del proceso (derecha).

5. DISCUSIÓN

5.1 Análisis de los resultados

Las condiciones en que las muestras fueron obtenidas durante el trabajo en la industria incluyen error en los resultados del presente estudio. Dichas condiciones se caracterizaron por no contar con flexibilidad para repetir la colecta de datos en caso de ser necesario, por la exigencia de no perturbar los procesos industriales con el fin de evitar repercusiones en sus niveles de producción, por el reducido espacio para operar y la dificultosa accesibilidad a todos los puntos donde había salida de materiales residuales, por la dificultad de corregir o mejorar situaciones una vez comenzadas las mediciones y la imposibilidad de realizar ensayos antes de la toma definitiva de datos.

De estas condiciones se derivaron distintos aspectos puntuales que aumentaron el error obtenido durante las mediciones. Entre éstos contó la imposibilidad de medir ciertos flujos de materiales residuales que abandonaban el proceso productivo, que,

aunque menores, no permitieron obtener un balance de masas correcto para todo el proceso. A pesar de esto, aquella masa que no pudo ser registrada correspondió a flujos casi marginales de ella, por lo que no se alteró el sentido de los resultados del estudio.

Otro aspecto que no pudo ser mejorado fue un pequeño excedente de agua en las bandejas de recolección de material residual al momento de ser pesadas, generado por las características del proceso industrial. Esto hizo que la masa registrada para cada bandeja fuera un poco mayor a la que correspondía exclusivamente a la de residuos, pudiendo aumentar en una pequeña proporción la masa que fue considerada como masa residual generada. Aunque este problema y el planteado en el párrafo anterior se presentan como compensatorios, de ninguna manera es apropiado considerar que eliminan el error generado en las mediciones, sino que las hacen aun más inexactas.

Para la medición del contenido de agua en los materiales recolectados en la industria se utilizaron sólo dos muestras, lo que resulta insuficiente para obtener un promedio confiable desde el punto de vista estadístico. Esta situación lamentablemente no pudo ser corregida, dadas las condiciones en las que fueron deshidratadas las muestras y el tiempo que tomó el proceso, suficiente como para permitir la descomposición del material restante que se había colectado. Esto impidió que se pudieran realizar réplicas y mediciones posteriores para disminuir la variabilidad de los resultados.

Como se aprecia en la metodología, los n muestrales para los cálculos de contenido calórico y de agua fueron variados. En el caso del contenido calórico se estimó una

baja variabilidad en los resultados, por lo que 6 muestras para cada tipo de material se consideraron adecuadas de manera arbitraria. En cuanto al contenido de agua, en cambio, la cantidad de muestras estuvo supeditada a las condiciones de refrigeración y conservación de los materiales colectados en la industria, lo que hizo deficiente el número de muestras para un análisis estadístico más robusto debido a lo comentado en el párrafo anterior.

Por último, algunos de los instrumentos de medición no eran lo suficientemente sensibles como para obtener datos muy exactos de la masa de los residuos. De esta manera, no se obtuvieron valores de masa residual satisfactoriamente finos como para esperar un balance de masas con bajo error. No obstante, los detalles en las mediciones de masa no tienen gran relevancia para los resultados en este caso, dada la gran magnitud de los flujos medidos durante el estudio.

5.2 Flujo de fitomasa

En el proceso industrial, los flujos de masa entrante se calcularon en función de la clasificación de los materiales residuales. Esto es, si una determinada cantidad de masa abandonaba el proceso como residuos de piel, por ejemplo, esa misma cantidad se consideró que ingresaba al proceso como tal material. La diferencia entre la masa total entrante y los flujos residuales piel y corazón correspondió a la masa de pulpa cruda que ingresó al proceso.

Las proporciones registradas en el proceso industrial (figura 8) pueden variar en función de la calidad de los materiales que son utilizados en la producción industrial. Está descrito que la cantidad y tipo de fertilizantes aplicados y la fecha de aplicación influyen considerablemente en los parámetros de calidad de la manzana, tales como su

madurez, color, sabor y resistencia (Velimirov y col, 2005). Otros factores podrían también afectar la calidad de las manzanas, como por ejemplo la rapidez con que son transportadas del lugar de producción al de procesamiento, de las condiciones de refrigeración, de las características climáticas de la temporada, del uso de pesticidas, etc. Esta variabilidad inevitablemente afecta la cantidad de materia prima que aprueba los estándares de calidad exigidos por la industria, generando posibles diferencias en las proporciones de fitomasa aprovechada en distintos días de producción. En una situación extrema, cargamentos completos de materia prima pueden ser rechazados por la industria si no superan las exigencias de calidad impuestas por esta última.

Pero no sólo la calidad de las materias primas afecta la cantidad de fitomasa aprovechada, sino también las técnicas empleadas en los procesos industriales. En la figura 8 puede apreciarse cómo, en forma sustancial, el perfeccionamiento de los procesos de extracción de piel y corazón se traduce en un aprovechamiento considerablemente mayor de la fitomasa que ingresa al sistema, lo que a su vez se reflejará en un aumento de la eficiencia del desempeño industrial en términos de materiales. Los porcentajes de masa entrante de piel y corazón se reducen en forma significativa dado que la masa pura de estos materiales es muchísimo menor que la considerada como tal en la industria, la que se encuentra mezclada con una proporción no menor de pulpa de manzana debido a las técnicas de extracción empleadas. Es importante destacar que la eficiencia de la industria en términos de materiales depende, entre otras cosas, de una combinación de los factores mencionados recién, ya que por muy perfectas que sean las técnicas de extracción de piel y corazón, mucha pulpa podría perderse si la materia prima no tiene la calidad exigida.

5.3 Contenido de energía y agua de los materiales

De acuerdo a los resultados estadísticos, las diferencias significativas dentro de ambos procesos se encuentran entre piel y pulpa, tanto para el contenido calórico como el de agua. Corazón, en cambio, no difiere significativamente con ninguno de estos materiales.

En cuanto al contenido de agua, no existen referencias científicas que hablen específicamente de su distribución en los materiales que constituyen una manzana. Sin embargo, el resultado se ajusta a la lógica puesto que la piel fue el material que presentó menores diferencias de masa entre su peso fresco y su peso deshidratado, mientras que se observó lo contrario con las muestras de pulpa, donde las diferencias entre el peso fresco y el deshidratado fueron las mayores. Consistente con el resultado, los valores obtenidos para el corazón de la manzana fueron intermedios (ANEXO 2).

Lo mismo sucede para el caso del contenido calórico por tipo de material, donde los mayores valores corresponden a piel y los menores a pulpa, teniendo el corazón valores intermedios (ANEXO 3). Las diferencias en el contenido calórico entre pulpa y piel se deben probablemente a sus diferentes materiales constituyentes. Si bien el corazón también se diferencia en el tipo de material que lo compone, su contenido calórico no varía lo suficiente como para diferir significativamente de la pulpa y/o la piel.

Cuando se compara entre ambos procesos por tipo de material, en cambio, el contenido de agua no presenta diferencias significativas para ninguno de ellos, pero sí difieren todos en su contenido calórico. Esto implica que las muestras colectadas en la industria y las muestras obtenidas en el laboratorio poseen la misma cantidad de agua,

pero distinto contenido calórico. Es consistente con el resultado que las muestras de piel y corazón colectadas en la industria tengan más bajo contenido calórico que las de laboratorio, puesto que, dadas las técnicas de extracción utilizadas, contenían también una pequeña proporción de pulpa. Esto redujo el contenido calórico por unidad de masa de las muestras de piel y corazón, aunque no modificó la cantidad de agua de las mismas. Probablemente la cantidad de agua que aporta la pulpa que puede encontrarse en las muestras de piel y corazón de la industria es marginal en comparación con la reducción del contenido calórico que genera al estandarizarlas por unidad de masa.

También es probable que el excedente de agua mencionado en la sección "análisis de los resultados" de la discusión haya tenido un efecto de dilución sobre los azúcares contenidos en los distintos tipos de materiales de la manzana, razón por la cual se apreciarían diferencias significativas en el contenido energético de las muestras colectadas en la industria con las utilizadas en el proceso óptimo. Esto último no generaría diferencias en el contenido de agua de los materiales, dado que dicho excedente es superficial y no incorpora agua a los materiales procesados.

El hecho que los materiales piel y corazón observados en la industria en realidad resulten ser una mezcla de éstos con pulpa de manzana podría alterar la eficiencia energética calculada para el proceso industrial. Lo anterior estaría dado por las calorías totales "reales" que ingresan al proceso, las que deberían calcularse en función del modelo teórico de manzana presentado en este trabajo (figura 7) y no a partir de los materiales descartados por el proceso industrial, los que son clasificados a priori. Sin embargo, estaba lejos de los alcances del presente trabajo depurar las muestras de piel y corazón colectadas en la industria y masar la pulpa extraída de ellas. Una mayor

exactitud en los resultados obtenidos requeriría destinar más recursos y esfuerzos a los procedimientos aplicados durante este estudio, aunque probablemente ello no modificaría el sentido de los resultados obtenidos dadas las magnitudes de los flujos de energía que están siendo analizados.

5.4 Eficiencia energética

Este trabajo presenta los resultados de la eficiencia del desempeño industrial en términos de energía, y no de masa o materiales. La fundamentación de ello es que no interesa para este estudio la utilidad de algún tipo de material en particular, ni es central proponer usos potenciales concretos de los desechos identificados. Sí es central, en cambio, exponer la eficiencia del proceso industrial estudiado. En este sentido, hablar en términos de energía es prescindir del problema que puede significar el aprovechamiento de algún tipo específico de material. Por ejemplo, los desechos correspondientes a piel y pulpa de manzana probablemente tengan utilidades distintas para distintas clases de usos. Sin embargo, ambos tipos de materiales significan una determinada cantidad de energía que se está perdiendo y que puede ser aprovechada de alguna manera.

Los resultados del estudio muestran que la eficiencia varió entre el proceso industrial y el proceso optimizado. De acuerdo a lo expuesto en los resultados, las eficiencias varían principalmente en función de la cantidad de materia prima que es aprovechable para la generación del producto final y de la cantidad de residuos generados en el proceso. Como se aprecia en la tabla 8 y figura 10, la cantidad de energía que ingresa teóricamente es superior a la que se observó, a la vez que la energía teórica de los residuos es mucho menor que la observada. Esto determina que

la energía teórica del producto sea más alta, y por lo tanto que la eficiencia del proceso presente diferencias sustanciales en la comparación.

Los distintos valores que posee la energía que ingresa a ambos procesos son producto de la forma de clasificar los tipos de materiales para el proceso industrial. Claro está que si la cantidad y tipo de materia prima de ambos procesos es la misma, igual debe ser la energía contenida en ella. Así, la energía entrante del proceso industrial es menor que la del proceso optimizado dado que, de acuerdo a las observaciones, las proporciones de los distintos tipos de materiales en la materia prima se consideran diferentes. Si se considera la energía entrante del proceso optimizado como la magnitud más correcta, la eficiencia industrial se vería disminuida en aproximadamente un 6%.

Adicionalmente, en la comparación se observa un cambio en la relación entre las magnitudes de la energía residual y del producto, siendo la residual más alta que la del producto en el proceso industrial. La situación es inversa en el proceso optimizado (figura 10). Una de las razones para ello es que la eficiencia optimizada no consideró la generación de residuos de pulpa cruda en el proceso industrial, justamente por tratarse de una versión óptima de la eficiencia que podría tener el proceso. Esto presume que la calidad de los materiales es perfecta, y que la única razón para descartar fitomasa es que ésta no correspondería al material del cual el producto final está constituido. Esta situación no es real en la práctica, aunque no está tan lejos de serlo. Durante el proceso de transformación de manzanas en la industria se observó que la gran mayoría de los residuos de pulpa cruda generados se debieron a un desaprovechamiento de masa aprovechable, y no a descarte de masa que no podría seguir siendo utilizada en el proceso. Si bien la eficiencia óptima es imposible de

alcanzar, un máximo aprovechamiento de los flujos de energía del proceso lograría eficiencias muy parecidas a ella, y por lo tanto muy distintas (y superiores) a la industrial.

La variabilidad entre los contenidos calóricos de cada tipo de material en ambos procesos no parece ser determinante en la eficiencia final como sí lo son los flujos de fitomasa y sus magnitudes. Por ejemplo, que el contenido calórico de las muestras de piel del proceso optimizado sea mayor que las del proceso industrial, no determina que la energía residual de piel del proceso optimizado sea mayor que la del proceso industrial. Lo mismo sucede con los residuos de corazón, indicando que la diferencia entre la eficiencia industrial y optimizada depende más de la cantidad de fitomasa que está siendo aprovechada o perdida que de las características energéticas de los materiales.

Los resultados de la eficiencia observada en la industria, presentada en la tabla 4, no son exactos. Esto se comprueba porque la suma de la energía residual y del producto no da como resultado la cantidad de energía entrante al proceso, sino que da un valor menor a ésta. Lo anterior significa que existe una cierta cantidad de energía "extraviada", que ingresó al proceso productivo, pero que no se distribuye ni en los residuos ni en el producto final. Análogamente, por tratarse de la energía contenida en la fitomasa procesada, se puede decir que existe una determinada cantidad de masa faltante o no registrada.

Como se discutió en la sección *análisis de los resultados*, una buena parte de esta fitomasa faltante debió corresponder a aquellos flujos residuales que no pudieron ser medidos. Si este fue el caso, la energía correspondiente a los flujos residuales fue

subestimada y el valor debería ser más alto que el mostrado en la tabla 4. Al tratarse de energía o fitomasa "extraviada", cuyo flujo se desconoce pero que de todas formas no está en el producto final, es una pérdida también asociada a la eficiencia del proceso industrial. Es decir, es una pérdida que no pudo ser medida, pero sigue siendo energía que ingresó al sistema y que no está contenida en los productos generados por la industria.

Otra posibilidad es que la inexactitud de los instrumentos de medición utilizados en la industria se vea aumentada al realizar las estimaciones necesarias para el cálculo de los flujos de fitomasa, lo que incrementa el error originalmente medido. Sin embargo, si bien los resultados pueden presentar variaciones dadas las cantidades de masa extraviada, ni en el mejor de los casos (toda la masa extraviada correspondiendo a producto final) la eficiencia energética del proceso industrial supera el 50%.

Se debe recordar que la eficiencia de la industria se enmarca, de acuerdo con Wirsenius (2003b), en una eficiencia global del subsistema de producción vegetal estimada en 62%. Lo anterior hace que la eficiencia industrial observada se encuentre por debajo de la eficiencia general del subsistema al cual pertenece, lo que de alguna manera habla del nivel competitivo de la industria estudiada. A su vez, la eficiencia óptima resulta superior a la media estimada y la competitividad industrial, en este caso, se vería favorecida por esta mejora. En este sentido, la competitividad de la industria además de incidir sobre su rentabilidad, imagen o prestigio en la esfera de la productividad y los negocios, tiene una importante consecuencia ecológica asociada.

Un aspecto importante de la eficiencia energética evaluada es si los productos finales generados por la industria forman parte de una cadena productiva mayor.

Según los operarios, los materiales correspondientes al producto final son enviados a Japón y utilizados para la fabricación de dulces y mermeladas. Esto significa que dichos materiales no serán consumidos por las personas sin antes ingresar a otro proceso industrial que, de acuerdo a lo planteado en este trabajo, tendrá una eficiencia que nunca podrá llegar al 100%. De esta manera, nuevas pérdidas de materiales y energía se experimentarán en los procesos industriales siguientes, probablemente reduciendo en gran cantidad la eficiencia total con que la fitomasa apropiada es aprovechada.

Por lo anterior, la eficiencia energética total en la generación de un producto alimentario debe considerar desde la entrada de materia prima hasta el producto que será consumido por la sociedad, sin importar su lugar de origen ni de destino. Bajo una perspectiva más amplia del esquema mostrado en la figura 6, el proceso de transformación de fitomasa incorpora todos los pasos necesarios para la generación de un producto alimentario destinado a ser consumido, los que pueden formar parte de los procesos de distintas industrias ubicadas en cualquier parte del mundo. La contribución de una mejor eficiencia en cada una de esas industrias logra que la suma de las eficiencias locales reduzca los flujos de energía residual, ahora en una escala de análisis global.

5.5 Hábitos alimentarios y eficiencia energética

La eficiencia de transformación de alimentos siempre dependerá de diferentes particularidades de los procesos a los que los materiales ingresan, como también de características propias de dichos materiales. A su vez, el tipo de material que es procesado en el sistema alimentario está determinado, entre otras cosas, por la demanda de fitomasa que genera la comunidad a la cual está destinada la producción;

es decir, los hábitos alimentarios de una comunidad contribuirán a determinar tanto el tipo de fitomasa a ser utilizada, como la magnitud de la apropiación que dicha demanda requiere para ser satisfecha. Esto significa que las preferencias de la comunidad, ya sea por factores históricos, culturales, económicos o de cualquier otro tipo, generarán un efecto determinado en los niveles de apropiación y eficiencia de transformación de fitomasa.

En el caso particular de la industria analizada en este estudio, el 100% de su producción es exportada a Japón, país en el que la fitomasa es nuevamente procesada para lograr el producto demandado por la comunidad local. Ejemplos de cómo la demanda puede afectar la apropiación de fitomasa y su eficiencia de transformación involucran distintas líneas de producción. Así, en la industria en estudio, de acuerdo a la época, se procesan manzanas, uvas, naranjas, frutillas y espinacas, entre otros materiales, con eficiencias tan variables que fluctúan entre el 0% y el 90%, dependiendo del proceso.

La eficiencia, como se indicó anteriormente, cambia de acuerdo a la calidad y diversas particularidades del tipo de material, como el esfuerzo de mantención en buen estado, la cantidad de material descartable asociado (ramas, grosor de la piel), de acuerdo a las técnicas empleadas en los procesos y a la demanda existente por un tipo de producto específico. Las uvas (eficiencia aprox. de 20%), por ejemplo, se exportan a Japón sin piel y cortadas en forma de cubos, lo que determina que gran cantidad de esta fitomasa sea descartada a priori. En el caso de las espinacas (eficiencia aprox. de 30%), gran cantidad del material que ingresa al proceso industrial no se encuentra en buen estado, dadas las dificultades que implica su mantención. Las frutillas y naranjas,

en cambio, cuando se encuentran en buen estado pueden ser aprovechadas en un 80% a 90% aproximadamente.

En el extremo opuesto, también hay procesos en que sólo la piel de las frutas es utilizada como producto final, pero no para ser ingerido, sino como envase exótico para otro tipo de productos como dulces o helados. De esta manera, en el proceso se extrae y descarta la totalidad de la pulpa, conservando la forma natural de la fruta. Posteriormente, en el lugar de consumo final del producto, la piel (envase) también es desechada, desaprovechándose la fruta por completo (eficiencia de 0%).

5.6 Ecología industrial y eficiencia

Hasta este punto, este trabajo ha analizado la eficiencia con que una industria aprovecha las materias primas que procesa para conseguir un determinado producto. La mejora de esta eficiencia, desde el punto de vista de las acciones que puede tomar la industria, se relaciona con la tecnología que ella emplea, entendiéndola a esta última como los métodos y máquinas que utiliza en su proceso productivo.

En este estudio se observó que es posible lograr una mejora sustancial en la eficiencia de aprovechamiento de materias primas con el perfeccionamiento de las técnicas empleadas en los procesos de extracción de las partes descartables de la fitomasa que ingresa al sistema industrial. Este perfeccionamiento puede ser logrado, por ejemplo, a través de la adquisición de nuevos equipos y máquinas, aunque esto implica una inversión que muchas veces las industrias no están en condiciones de realizar. Por otro lado, se podría otorgar mayor dedicación a los procesos realizados por los operarios, aunque tal acción puede resultar en que éstos tengan que destinar

más tiempo de trabajo por unidad producida, lo que se traduce en una baja en el nivel de producción de la industria.

También se observó que, a pesar de haber una mejora sustancial de la eficiencia al perfeccionar las técnicas empleadas en el proceso industrial, sigue habiendo alrededor de un 20% de energía que no es posible aprovechar, simplemente porque la naturaleza de los materiales correspondientes a esa energía no es adecuada para la generación del producto que se desea obtener. Es decir, por más eficiente que sea la industria, siempre habrá una pérdida de energía dada la naturaleza de las materias primas que utiliza y los objetivos de producción.

Por todo lo anterior, es muy importante considerar la perspectiva de la ecología industrial, en la que las industrias se consideran como elementos interactuantes que pertenecen a un sistema. Si analizamos las industrias en forma aislada, puede que existan muchas que no están en condiciones de mejorar su eficiencia. Es decir, no habría mejoras en la eficiencia *a nivel individual*. Sin embargo, la eficiencia sí podría mejorarse *a nivel de sistema*, es decir, que la eficiencia del sistema de industrias interactuantes aumente. Esto hace alusión al ecosistema industrial explicado en la sección *Perspectiva de la Ecología Industrial*, en el que materiales que son descartados por una industria son aprovechados como insumos por otra.

Por ejemplo, los residuos de piel desechados por la industria analizada podrían ser aprovechados por otra industria para la generación de algún otro producto alimentario, para la generación de fertilizantes, para la extracción de algún compuesto químico, para la alimentación de animales, etc. Algunos estudios han descrito la utilidad de desechos de la agroindustria para el cultivo de hongos comestibles y como parte de la

dieta de algunos animales en la producción avícola, por ejemplo (Kim Dong 2005, Motato y col. 2006, Vega y col. 2006). Este tipo de comportamiento aumentará la eficiencia con que la fitomasa apropiada es aprovechada a la escala de un sistema industrial, permitiendo que la apropiación ejercida por ese sistema se reduzca progresivamente hasta llegar a ser prácticamente nula, situación que debería ocurrir en los sistemas industriales sustentables caracterizados por mantener intercambios físicos mínimos con el ambiente (Richards y col. 1994).

De esta manera, los materiales fluyen al interior de un sistema industrial que intercambia materiales en forma mínima con el ambiente, promoviendo el resguardo de los ecosistemas a través de reducciones de fitomasa apropiada para el funcionamiento de la sociedad. Al mismo tiempo, si es bien aprovechada, la interacción entre las industrias puede incorporar beneficios económicos para las mismas, a través del intercambio comercial de materiales que dejarían de considerarse como residuos. Con lo anterior, es evidente cómo el aporte de la interacción industrial contribuye también con la aplicación del modelo de desarrollo sostenible, acercando la posibilidad de generar beneficios para el ámbito natural, económico y social en forma integrada.

Sin embargo, a pesar de que los efectos positivos de la ecología industrial son considerables, actualmente su influencia sobre las políticas públicas es limitada, y la aplicación de sus principios no parece cercana. Para lograr esto, se debería armonizar la investigación en este campo con objetivos políticos concretos, y establecer un vínculo claro entre los flujos de materiales y los factores económicos, vínculo que hasta ahora no ha recibido la atención suficiente (Bringezu, 2003). Avances en ello podría significar enormes beneficios que hasta el día de hoy están siendo desaprovechados, en desmedro de los ecosistemas y la biodiversidad.

En el contexto nacional, esta línea de trabajo podría implicar la reorientación de parte de los esfuerzos que actualmente se realizan en pos de la conservación de la biodiversidad en Chile, hacia la construcción de vínculos que permitan la interacción industrial. Por otro lado, el desarrollo y conocimiento de esta temática en el país podría despertar el interés de las propias industrias por estudiar el potencial de aplicar medidas que favorezcan la interacción entre ellas, dada la conveniencia integral que esto puede significarles en el tiempo. Así, el desarrollo de políticas, acuerdos, incentivos y medidas que coadyuven con la interacción industrial constituye la proyección a futuro más importante del trabajo presentado.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo al trabajo realizado y los resultados obtenidos, en un nivel específico de análisis, se concluye que los métodos utilizados presentan deficiencias y resultan poco exactos, aunque en términos generales otorgan una buena aproximación a la dinámica de la eficiencia energética industrial estudiada. Sin perjuicio de lo anterior, el estudio puede ser perfeccionado en gran medida con mejores técnicas de medición de los flujos de fitomasa procesados.

En cuanto a la magnitud de los flujos de fitomasa, la industria presenta variabilidad de acuerdo a las técnicas de procesamiento empleadas, pero también de acuerdo a la calidad de las materias primas que utiliza, por lo que, en consecuencia, la eficiencia también presenta variabilidad incluso dentro de una misma línea de producción.

La eficiencia industrial obtenida en el presente estudio muestra que existe un problema no menor en cuanto al aprovechamiento de la fitomasa que es apropiada

para la producción de alimentos, lo que tiene consecuencias perjudiciales sobre los ecosistemas y su conservación. Dados los resultados de la comparación entre la eficiencia industrial y la optimizada, se concluye además que el evidente desaprovechamiento de la fitomasa apropiada puede ser mejorado de manera sustancial a través del perfeccionamiento y mejora de la tecnología empleada para procesar la fitomasa en la línea de producción estudiada.

Los hábitos alimentarios de la sociedad y la demanda particular de alimentos inciden de manera importante sobre la eficiencia de una agroindustria, puesto que son preponderantes en la determinación de los procesos industriales requeridos para satisfacer esa demanda y, por lo tanto, en la determinación de la eficiencia industrial que se encuentra asociada a cada uno de dichos procesos.

A pesar de todo lo anterior, la eficiencia óptima de la industria estudiada no supera el 80%, por lo que es requerida la interacción entre industrias para que se alcancen valores superiores a éste. Dichos valores se manifestarían a nivel de sistema de industrias, como es planteado por la Ecología Industrial.

7. REFERENCIAS

- ALTIERI, M.A. 1992. Agroecological foundations of alternative agriculture in California. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 39: 23-53.
- AYRES, R. and Udo Ernst Simonis. 1994. *Industrial Metabolism: Restructuring for Sustainable Development*. Tokyo, New York, Paris: United Nations University Press.
- BENDER W. H., 1994. An end use analysis of global food requirements. *Food Policy* 19(4): 381– 395.
- BRINGEZU, S. 2003. Industrial Ecology and Material Flow Analysis, Basic concepts, policy relevance and some case studies. En: BOURG, D. y ERKMAN, S. (Eds). *Perspectives on Industrial Ecology*. Greenleaf Publishing, pp 20–34.
- BRUNDTLAND, G. H. 1989. *Our Common Future: The World Commission on Environment and Development*. New York: Oxford University Press.
- DAILY, G., Alexander, S., Ehrlich, P., Goulder, L., Lubchenko, J., Matson, P., Mooney, H., Postel, S., Schneider, S., Tilman, D., & Woodwell, G. 1997. Ecosystem Services: Benefits Supplied to Human Societies by Natural Ecosystems. *Issues in Ecology* No. 2, Spring. Ecological Society of America.
- FONTE, M. 2002. Food Systems, Consumption Models and Risk Perception in Late Modernity. *International Journal of Sociology of Food and Agriculture* 10 (1): 13 – 21
- GARNER, A., Keoleian, G.A. 1995. *Industrial Ecology: An Introduction*. National Pollution Prevention Center for Higher Education, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
- GIAMPIETRO, M., S.G.F. Bukkens, & D. Pimentel. 1994. Models of energy analysis to assess the performance of food systems. *Agricultural Systems* 45: 19-41.
- GRAEDEL , T.E. & Allembly ,B.R. 1995. *Industrial Ecology*. New Jersey: Prentice Hall, 412 p.
- HABERL, H. 2004. The global socioeconomic energetic metabolism as a sustainability problem. *Energy – The international journal*.
- IMHOFF, M. L., Bounoua L., Ricketts T., Loucks C., Harriss R., Lawrence, W.T. 2004. Global patterns in human consumption of net primary production. *Nature* 429: 870 – 873
- KIM DONG, N. 2005. Evaluation of agro-Industrial by-Products as protein sources for duck production in the Mekong delta of Vietnam. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences.

- KRISHNA PRASAD, V., Badarinth, K. 2004. Land use changes and trends in Human Appropriation of Above Ground Net Primary Production (HANPP) in India (1961-98). *The Geographical Journal* 170 (1), 51-63.
- LEHMANN, H., Schmidt-Bleek, F. 1993. Material Flows from a Systematical Point of View. *Fresenius Environmental Bulletin*, Vol 2 No 8, August, pp 413 - 418.
- LINDEMAN, R.L. 1942. The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology*. 23: 399-418.
- MATSON, P.A., W.J. Parton, A.G. Power and M. Swift. 1997. Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science*, 277:504-509.
- MOTATO, K., Mejía, A., León, A. 2006. Evaluación de los residuos agroindustriales de plátano (*Musa paradisiaca*) y aserrín de abarco (*Cariniana piriformes*) como sustratos para el cultivo del hongo *Pleurotus djamor*. *Vitae, revista de la Facultad de Química Farmacéutica* ISSN 0121-4004 Vol 13 número 1. Universidad de Antioquia, Medellín - Colombia. págs. 24-29.
- ODUM, E. Ecología: estructura y función de la naturaleza: los modernos principios de flujo de energía y ciclos biogeoquímicos. México, C.E.C.S.A., 1965. 201p.
- ODUM, H.T. (1957) Trophic structure and productivity of Silver Springs, Florida. *Ecological Monographs*, 27: 55-112.
- PINSTRUP-ANDERSEN, P. 2002. Towards a sustainable global food system: what will it take? *John Pesek Colloquium, Iowa State University*.
- RICHARDS, D. J., Allenby, B. R. and Frosch, R. A. 1994. The Greening of Industrial Ecosystems: Overview and Perspective. *The Greening of Industrial Ecosystems*, National Academy of Engineering, Washington, D.C., pp. 1-19.
- ROJSTACZER, S., Sterling, S. M. & Moore, N. J. 2001. Human appropriation of photosynthesis products. *Science* 294: 2549 - 2552
- SAAD M.B.1999. Food Security for the Food-Insecure: New Challenges and Renewed Commitments. *Centre for Development Studies, University College Dublin*.
- SCHANDL, H., Grünbühel, CM., Haberl, H., Weisz, H. 2004, Handbook of Physical Accounting. Measuring bio-physical dimensions of socio-economic activities. *Vienna: IFF Social Ecology*.
- SMITH, R. L., Smith T. M., Ecología. 4ª ed. Madrid, Pearson Educación, 2001. 642p.
- SOBAL J., Kettel Khan L., and Bisogni C. 1998. A conceptual model of the food and nutrition system. *Social Science and Medicine* 7(7):853-83.
- VAN HAUWERMEIREN, S. 1999. Manual de economía ecológica. 144 p.

VEGA, A., Mata, G., Salmenes, D., Caballero, R. 2006. Cultivo de cepas nativas de *Pleurotus djamor* en Panamá, en paja de arroz y pulpa de café. *Revista Mexicana de Micología* 23:93-97.

VELIMIROV, A., Brandt, K., Lück, L., Wyss, G. & Torjusen, H. 2005. Production of apples, control of quality and safety in organic production chains. Research Institute of Organic Agriculture FiBL, CH-5070 Frick, Switzerland.

VITOUSEK P., Ehrlich P. R., Ehrlich A. H., and Matson P. 1986. Human appropriation of the products of photosynthesis. *BioScience* 36: 368-374

VITOUSEK, P. M., H. A. Mooney, J. Lubchenco, & J. M. Melillo. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277: 494-499.

WIRSENIUS S. 2000. Human use of land and organic materials: modeling the turnover of biomass in the global food system. Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology and Göteborg University, Göteborg, Sweden.

WIRSENIUS S. 2003a. Efficiencies and biomass appropriation of food commodities on global and regional levels. *Agricultural Systems* 7: 219 - 255

WIRSENIUS S. 2003b. The biomass metabolism of the food system: a model-based survey of the global and regional turnover of food biomass. *Journal of Industrial Ecology* 7 (1): 47 - 80.

8. ANEXOS

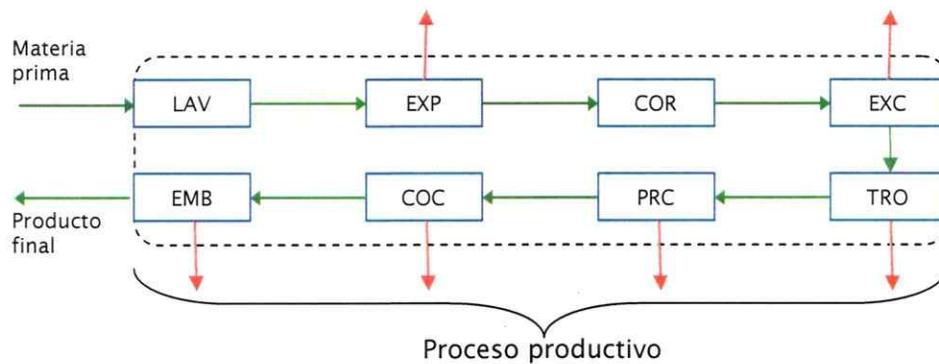
ANEXO 1

Modelo de producción de pulpa de manzana

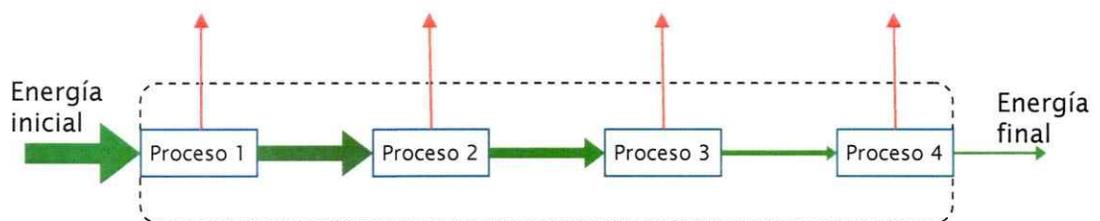
El proceso de generación de trozos de pulpa de manzana cocida constó de 8 pasos desde su inicio hasta la obtención del producto final. Dichos pasos fueron:

- 1) Lavado: las manzanas son lavadas al pasar bajo duchas de agua. En este paso no hay pérdida de fitomasa.
- 2) Extracción de piel: se extrae la cáscara de la manzana, con la consecuente pérdida de fitomasa en este paso.
- 3) Corte: la manzana es cortada por la mitad, en sentido vertical. No se observa pérdida de masa.
- 4) Extracción del corazón: con un instrumento similar a una cuchara, se extrae el corazón de la manzana. Existe, por lo tanto, pérdida de fitomasa.
- 5) Trozado: las mitades de manzana que alcanzan esta etapa son pasadas a través de un molde de cuchillos, quedando atrapados en él pequeños trozos de pulpa. Hay pérdida de fitomasa.
- 6) Precocción: los trozos de manzana son seleccionados antes de la precocción. Adicionalmente, restos de manzana quedan adosados a los recipientes donde son precocidos. Hay pérdida de masa.
- 7) Cocción: las manzanas son cocinadas en hornos. En el proceso, hay pequeñas pérdidas de fitomasa al caer trocitos de manzana fuera de los hornos.
- 8) Embalaje: antes de ser embalados, los trozos de manzana vuelven a ser seleccionados, generándose pérdida de fitomasa en este paso.

La siguiente figura resume la secuencia de pasos y esquematiza los flujos de fitomasa. En flechas verdes se indica la fitomasa que permanece en el proceso, y en flechas rojas la que lo abandona, constituyendo los flujos residuales de la industria:



La siguiente figura esquematiza la dimensión de los flujos de energía en el proceso industrial. Las pérdidas son restadas a la energía inicial para obtener la energía final.



ANEXO 2

Tablas del proceso de deshidratación de muestras

Tabla 1. Peso (Kg) de muestras de cada material en proceso de deshidratación y porcentaje de agua correspondiente. Muestras provenientes de la industria en estudio.

	Nº de muestra	Peso original	24 horas	48 horas	96 horas	120 horas	144 horas	168 horas	% agua
piel	1	0,100	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	80,00
	2	0,100	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	80,00
pulpa cruda	1	0,505	0,375	0,215	0,060	0,060	0,060	0,060	88,12
	2	0,510	0,390	0,235	0,060	0,060	0,060	0,060	88,24
pulpa cocida	1	0,510	0,375	0,215	0,055	0,055	0,055	0,055	89,22
	2	0,515	0,370	0,210	0,045	0,045	0,045	0,045	91,26
corazón	1	0,525	0,395	0,260	0,085	0,085	0,085	0,085	83,81
	2	0,520	0,355	0,195	0,085	0,085	0,085	0,085	83,65

Tabla 2. Peso (g) de muestras de cada material en proceso de deshidratación y porcentaje de agua correspondiente a muestras del proceso optimizado.

Material	Nº muestra	Peso original	24 horas	48 horas	96 horas	120 horas	144 horas	% agua
piel	1	10,7	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	71,96
	2	11,3	3,3	3,2	3,2	3,2	3,2	71,68
	3	11,0	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	70,91
	4	11,0	3,2	3,1	3,2	3,2	3,2	70,91
pulpa	1	51,1	9,0	7,9	7,8	7,8	7,8	84,74
	2	53,0	10,4	9,0	8,9	8,9	8,9	83,21
	3	53,2	8,8	8,3	8,2	8,2	8,2	84,59
	4	51,2	8,1	7,8	7,8	7,8	7,8	84,77
corazón	1	19,4	4,7	4,7	4,6	4,6	4,6	76,29
	2	21,0	5,3	5,2	5,2	5,1	5,1	75,24
	3	21,1	5,1	5,0	5,0	5,0	5,0	76,30
	4	22,5	5,2	5,2	5,2	5,1	5,1	77,33

ANEXO 3

Contenido calórico de las muestras y procedimiento de cálculo de flujos de fitomasa

Tabla 1. Contenido calórico (kcal/g) por tipo de material de las muestras provenientes de la industria en estudio.

Material	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
piel	4,37	4,31	4,24	4,32	4,16	4,33
pulpa cruda	3,72	3,74	3,62	3,62	3,74	3,72
pulpa cocida	3,74	3,79	3,77	3,68	3,67	3,80
corazón	3,90	3,91	3,97	3,92	3,95	3,86

Tabla 2. Contenido calórico (kcal/g) por tipo de material correspondiente a las muestras del proceso optimizado.

Material	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Piel	4,76	4,88	4,79	4,88	4,73	4,82
Pulpa cruda	3,80	3,85	3,79	3,83	3,87	3,77
Corazón	4,30	4,35	4,29	4,32	4,29	4,26

$$1) \quad \text{Kg peso fresco} - \% \text{ agua} = \text{Kg peso seco}$$

$$2) \quad \text{Kg peso seco} \times \text{Kcal/g} \times 1000 = \text{Kcal totales}$$

Figura 1. Procedimiento de cálculo de energía para flujos de fitomasa de cada tipo de material.

ANEXO 4

Tablas aproximación porcentual de piel y corazón en una manzana fuji.

Tabla 1. Porcentaje de masa de piel con respecto a la masa total de manzana. Masas expresadas en gramos.

Nº Muestra (manzanas)	Porcentaje de piel de manzana						Promedio
	1	2	3	4	5	6	
Masa total	264,8	264,8	238,0	211,9	230,1	237,0	241,1
Masa piel	18,8	19,6	16,4	13,9	15,6	16,4	16,8
Porcentaje piel	7,10	7,40	6,89	6,56	6,78	6,92	6,94 ± 0,29

Tabla 2. Porcentaje de masa de corazón con respecto a la masa total de manzana. Masas expresadas en gramos.

Nº muestra (manzanas)	Porcentaje de corazón de manzana												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Promedio
Masa total	139,7	147,7	174,7	144,7	152,6	141,2	154,4	153,7	151,5	150,5	157,1	158,8	152,22
Masa corazón	5,0	7,0	8,0	6,6	8,4	8,5	7,0	8,2	7,6	6,1	6,8	6,2	7,12
Porcentaje corazón	3,58	4,74	4,58	4,56	5,50	6,02	4,53	5,34	5,02	4,05	4,33	3,90	4,68 ± 0,70