



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS



**MODELO LOCAL  
DE PRODUCCIÓN  
DE BRASSICAS  
FORRAJERAS  
CON FINES  
BIOENERGÉTICOS  
Y FORRAJEROS**



EDITOR  
CHRISTIAN HEPP K.

COYHAIQUE, CHILE, 2012

BOLETÍN INIA N° 254



InnovaChile  
CORFO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS

# MODELO LOCAL DE PRODUCCIÓN DE BRASSICAS FORRAJERAS CON FINES BIOENERGÉTICOS Y FORRAJEROS



EDITOR  
CHRISTIAN HEPP K.

COYHAIQUE, CHILE, 2012

ISSN 0717-4829

BOLETÍN INIA N° 254

## ÍNDICE

Introducción y antecedentes generales.	<i>Christian Hepp K.</i>	5
Fase agronómica y potencial producción de Brásicas forrajeras con fines bioenergéticos.	<i>Christian Hepp K., et al</i>	13
Procesamiento de raíces y Brásicas forrajeras para la generación de Bioetanol.	<i>Pier Barattini P., et al.</i>	25
Procesos de fermentación y destilación para la obtención de Bioetanol a partir de filtrado de Brásicas forrajeras.	<i>Daniel Cross O., et al.</i>	33
Producción animal a partir de cultivos de Brásicas forrajeras y uso de subproductos.	<i>Christian Hepp K. et al.</i>	49
Propuesta de modelo local de desarrollo basado en Brásicas para uso forrajero y co-generación de etanol	<i>Christian Hepp K.</i>	59

Autores: Christian Hepp Kuschel, Ingeniero Agrónomo. MPhil - PhD  
Daniel Cross Ossa, Bioquímico.  
Pier Barattini Pesutic, Biólogo.

Editor: Christian Hepp Kuschel  
Ingeniero Agrónomo MPhil - PhD  
Instituto de Investigaciones Agropecuarias  
INIA Tamel Aike  
e-mail: chepp@inia.cl

Representante legal: Hernán Felipe Elizalde Valenzuela, Director (I) INIA-Tamel Aike

Hepp, C., 2012. Boletín N° 254 MODELO LOCAL DE PRODUCCIÓN DE BRASSICAS FORRAJERAS CON FINES BIOENERGÉTICOS Y FORRAJEROS Noviembre 2012, Coyhaique, Patagonia, Chile. 82 p.

ISSN 0717 – 4829.

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTA OBRA SIN PERMISO DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS, MINISTERIO DE AGRICULTURA, CHILE.

Diseño y diagramación	:	Felipe Geoffroy Mansilla
Diseño portada	:	C.Hepp
Impresión	:	Imprenta América Ltda.
Cantidad de ejemplares	:	500

## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES GENERALES

Christian Hepp K.

El proyecto denominado “Diversificación de la matriz energética con un modelo local de desarrollo sustentable basado en bioetanol a partir de nabo forrajero en la Patagonia” nació con la idea de evaluar alternativas energéticas locales, en una escala que permitiera definir parámetros que validaran un eventual escalamiento productivo.

En la Región de Aysén, se desarrolló este proyecto entre 2008 y 2012, con financiamiento de Innova Chile (Corfo) y del Ministerio de Agricultura, y el aporte de asociados como la empresa Covepa S.A. y productores particulares. En este proyecto, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), a través de su Centro de Investigación Tamel Aike, evaluó un modelo agroenergético basado en bioetanol a partir de varios cultivos forrajeros.

A través de esta iniciativa se validaron diferentes cultivos en un uso combinado con fines de producción agropecuaria y también cogeneración de etanol. Lo anterior, basado en la buena adaptación de cultivos forrajeros probados por el INIA Tamel Aike, como nabos y rutabagas, su excelente valor nutritivo y especialmente su alta concentración energética (basada en azúcares solubles). Esto último permitía esperar buenas perspectivas de transformación parcial del cultivo a bioetanol. La información entregada en este artículo se basa en los resultados de este proyecto.

Este proyecto busca determinar y validar un modelo sistémico que involucra tanto al ámbito agropecuario (especialmente pecuario) como al industrial-energético. La escala de

los posibles desarrollos son definidos como locales, es decir relacionados con un ámbito geográfico limitado. Lo anterior se conecta con aspectos de sustentabilidad del sistema como también de su potencial impacto, al permitir reemplazar parte de los combustibles líquidos en uso.

Asimismo, es importante indicar que este modelo probablemente tiene mayor validez en zonas marginales o extremas, donde la población es reducida, los costos en general son elevados, donde hay disponibilidad de suelos aptos actualmente improductivos, y donde los usos alternativos de suelos no implican por lo tanto el reemplazo de alimentos dirigidos a consumo humano. Muy por el contrario, en estas circunstancias se genera un círculo virtuoso, en el cual se aumenta la producción pecuaria en paralelo con generación de biocombustible, debido a la sustantiva mayor productividad que se obtiene con estos cultivos.

## Focos del proyecto

Los focos del proyecto están centrados en tres aspectos principales, que son:

- a. *Producción primaria*: en que se consideró establecer algunas bases de optimización de las fases del cultivo desde el establecimiento a la cosecha, junto con estudiar características particulares como los niveles de carbohidratos en cultivos potencialmente utilizables. También se consideraron los aspectos de usos de subproductos en sistemas animales.
- b. *Procesamiento y producción de bioetanol*: Es la parte principal y central del proyecto, y consideró el diseño, instalación y operación de una planta piloto. Se focalizó en las fases críticas para obtener bioetanol para uso como biocombustible.
- c. *Demostración de usos de bioetanol*: Finalmente consideró la fase experimental de usos del bioetanol producido y la demostración concreta.

## Objetivos del proyecto

El objetivo general del proyecto era sentar las bases para la construcción de un modelo de desarrollo agropecuario-energético sustentable en escala piloto en la Patagonia (Región de Aysén).

Los objetivos específicos fueron:

- a. Instalar y operar una planta piloto laboratorio para producción de bioetanol en el sector de Valle Simpson (Aysén), describiendo los procesos, sus eficiencias y detectando puntos críticos.
- b. Optimizar la cosecha de nabo forrajero con fines bioenergéticos, explorando otras alternativas de cultivo, como la rutabaga y remolacha.
- c. Realizar demostraciones locales de usos de bioetanol en motores y otros usos.
- d. Generar un modelo teórico de desarrollo energético local basado en sistemas agropecuarios que incluyan los cultivos bioenergéticos, evaluando algunas consecuencias técnicas, económicas, sociales, ambientales.

## Aspectos generales

### *Producción de bioetanol*

Desde hace décadas, en muchos países del mundo se están utilizando biocombustibles y su aplicación está incorporada en la matriz energética respectiva con diferentes énfasis según sea el caso. Entre los biocombustibles líquidos de mayor aplicación se cuentan básicamente dos: el bioetanol y el biodiesel; los que pueden ser producidos a partir de diversas materias primas.

En el caso del bioetanol, existen diversas fuentes como materia prima, con características muy diversas, especialmente en relación a la complejidad química de los compuestos que deberán ser procesados para obtener el producto final. Existe una gran división entre las características de las materias primas, en que se diferencia básicamente a aquellos que son bioetanol de “primera generación”, que se produce a partir de procesos de fermentación de carbohidratos simples, como son los azúcares solubles y el almidón. Algunos ejemplos de materias primas para procesos de primera generación son: caña de azúcar, remolacha, cereales, etc. En algunos casos, al tratarse de compuestos como almidón, se requieren ciertos pre-tratamientos para liberar las moléculas de glucosa.

Por otra parte, el bioetanol de “segunda generación” proviene de compuestos vegetales más complejos, como son la celulosa y la hemicelulosa. Aquí caen todos aquellos productos denominados “lignocelulósicos”, que son por ejemplo los residuos forestales, ciertos tipos de basuras domésticas, etc. En este caso, se requieren procesos más complejos (hidrólisis química, hidrólisis enzimática, tratamientos físicos, etc.) para liberar los carbohidratos y transformarlos a moléculas más simples que puedan ser fermentadas.

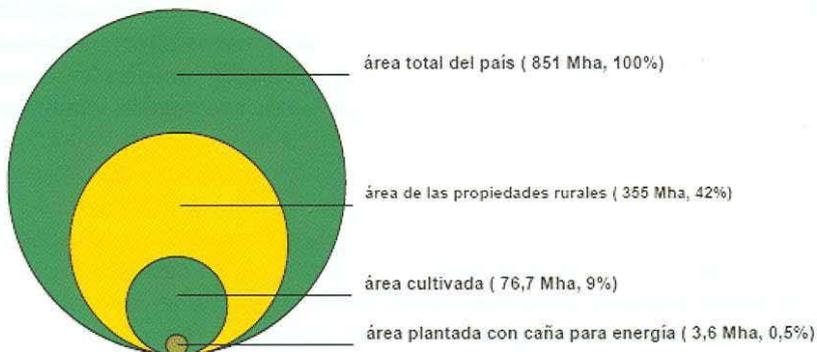
El bioetanol de primera generación proviene habitualmente de diferentes vegetales de uso agrícola. Este combustible se considera una fuente de energía “limpia”, sobre todo al tener un balance de carbono al menos neutro. Junto a lo anterior, se reducen emisiones y contaminación del aire, lo que trae efectos positivos en temas de polución ambiental. En estos procesos de primera generación en general pueden lograrse altos rendimientos de alcohol (bioetanol) por unidad de superficie, con menor gasto energético, dependiendo del cultivo utilizado y de la zona de producción. Se caracterizan por generarse en procesos relativamente simples (fermentación y destilación) con subproductos útiles, como es el caso de coqueta, bagazo, vinaza, etc. En general, casi todo el cultivo se utiliza, ya sea con fines de producir el alcohol o bien en los usos alternativos y de subproductos.

### *Posibilidades para biocombustibles en Chile*

En torno a los biocombustibles de primera generación hay una discusión extensa, por ejemplo en torno a la cantidad de energía que se gasta para generar energía (MJoule o Mcal gastados para producir 1 MJ o Mcal de bioetanol). Ello en realidad es aplicable a cualquier combustible, incluso al petróleo y sus derivados. Al respecto, hay muchos estudios que analizan el balance de energía y los resultados son también muy variables.

Cada cultivo tiene índices diferentes, siendo más eficientes los balances de caña de azúcar y remolacha, y menores los de maíz y trigo, por ejemplo. La magnitud de los balances está relacionada, entre otros, con los rendimientos de alcohol factibles de obtener, además de los sistemas de cultivos y su intensidad (uso de fertilizantes, maquinarias, etc.). Obviamente que un cultivo de maíz, con alta tecnología en su cultivo y rendimientos intermedios de bioetanol, tendrá un balance más negativo que un cultivo de caña de azúcar, que puede obtener rendimientos tan altos como 8 m<sup>3</sup>/ha, con menos intensidad de trabajo.

Otra discusión se centra en el hecho de que los biocombustibles (sobre todo de primera generación) usan superficie agrícola y de esta forma sustituyen áreas de producción de alimento por áreas de generación de energía. Lo anterior también es relativo, ya que dependerá nuevamente de la localización de las áreas de cultivo. Es así como en países como Brasil, donde hay extensas áreas de cultivo, puede haber espacios para producir combustibles sin afectar necesariamente la producción de alimentos (aunque en este caso pueda haber objeciones respecto al reemplazo de áreas naturales por áreas de cultivo). Como se aprecia en la figura 1, este país tiene más de 800 millones de hectáreas como superficie total, y de ellas casi 77 millones de ha son de cultivo. Allí se destina cerca del 5% de la superficie de cultivo a producir energía (bioetanol). En países como Chile, la situación es diferente y es impensable un uso generalizado de superficie de cultivo para estos fines, ya que competiría directamente con producción de alimentos, de alto valor exportable. La situación puede ser diferente al considerar suelos de zonas más marginales, como en el norte y extremo sur del país.



Fuente: IBGE (2007).



FIGURA 1. Comparación de superficie total del país y superficie potencial de cultivo (Mha) de Brasil (arriba; (IBGE, 2007)) y Chile (abajo).

El potencial de producción de alcohol de diferentes cultivos está relacionado directamente con la concentración de azúcares y otros carbohidratos de relativa fácil disponibilidad. A ello se agrega el factor de potencial de rendimiento del cultivo, que depende de diversos factores, como la localización (clima, suelo, agua, etc.) y el manejo. Por ello, para una misma especie puede haber rangos bastante amplios de rendimiento de biocombustible por unidad de superficie.

También existen diferentes escalas de producción. En ciertos países como Brasil, Estados Unidos, España y otros, existen grandes instalaciones que procesan grandes superficies de materias primas para generar altos volúmenes de combustibles, los que se incorporan a la matriz energética a nivel nacional. Por otra parte, existen otros países donde se aplica un concepto que está orientado a ver los problemas de energía a nivel de localidad y tratar de solucionar dichos problemas a una escala local. Ejemplos como este último se encuentran en algunos países escandinavos, como Finlandia. Este es el enfoque que se plantea en el presente trabajo.

El extremo sur de Chile (Patagonia húmeda, Región de Aysén), si bien está dominado por extensas zonas de bosques, grandes estepas y praderas, también tiene suelos de mayor productividad con claras posibilidades de intensificación productiva. En esta región, existe una escasa diversificación productiva en el ambiente agropecuario y domina

la producción de carne (bovina/ovina) y lana. La rentabilidad de los rubros es habitualmente limitada y es necesario elevar los niveles de vida de las zonas rurales, de modo de evitar, entre otros, la migración de zonas rurales a las urbanas. Es una región de muy baja densidad poblacional, con cerca de 110.000 habitantes, lo que hace de ella un tamaño abordable para modelos de este tipo.

Estos suelos marginales, pero que sin embargo poseen buen potencial agrícola, permiten sustentar sistemas más intensivos, lo que elevaría sustancialmente su capacidad de rendimiento vegetal y con ello de producción animal. La región de Aysén tiene una ganadería basada en praderas, en su mayoría con manejos relativamente extensivos, pero donde hay mucho espacio de mejoramiento, con aumento de la producción primaria vía fertilización e incorporación de nuevas especies forrajeras. Entre éstas, en ciertas situaciones de suelos arables, es posible la incorporación de cultivos forrajeros intensivos, los que según antecedentes y pruebas realizadas por el INIA en la zona, pueden aumentar entre tres a seis veces la capacidad productiva. Existe un universo de al menos 90-100.000 ha arables en Aysén, y al menos una fracción de ellas puede darse la intensificación y así los espacios para aumentar sustancialmente la producción animal y, eventualmente, la incorporación de cultivos energéticos en las rotaciones de cultivos. De esta forma, en la misma superficie se estaría aumentando la producción de alimentos (producto animal), junto con la co-generación de biocombustible. Lo anterior no es el caso de otras zonas de Chile, donde la existencia de muchas alternativas productivas de alta rentabilidad atenta contra la idea de producir biocombustibles sobre suelos agrícolas.

Junto a la baja población de la región, su aislamiento y conectividad difícil, hacen de esta región una zona donde soluciones de tipo local pueden tener mayor espacio de desarrollo, y donde los impactos de un enfoque basado en energías no convencionales pueden ser de magnitud. Los mayores costos de los combustibles fósiles y los problemas de contaminación del aire en centros poblados de la región son también factores que aportan a la búsqueda de soluciones basadas en energías alternativas.

La generación de bioetanol a partir de sistemas combinados de producción agroenergética es una alternativa que debería formar parte de un plan regional que incluya otras fuentes energéticas alternativas, de modo de componer una matriz energética nueva para la localidad.

La forma de enfrentar los problemas energéticos de una zona y las alternativas que se puedan elegir no responden a una receta universal, sino que van a depender de cada territorio, su realidad y los recursos disponibles.

En los próximos capítulos se describen los principales resultados obtenidos durante el desarrollo de este proyecto. Se incluye en ello la fase agronómica de producción de la

materia prima, junto a su utilización animal y la caracterización de la misma. Posteriormente se abarcan los procesos en planta piloto, desde la recepción de las raíces, su procesamiento primario y luego la separación de la fracción líquida y de la coqueta. Continúa con la fase de fermentación y posterior destilación y rectificación. Finalmente, en base a los parámetros obtenidos, se evalúa el modelo completo desde un punto de vista técnico-económico, con los componentes sociales y ambientales.



## CAPITULO 2

### FASE AGRONÓMICA Y POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BRASSICAS FORRAJERAS CON FINES BIOENERGÉTICOS

Christian Hepp, Rodrigo Muñoz, Patricio Almonacid, Ricardo Salvo,  
Oswaldo Teuber, Margot Monsalve y Elda Monsalve

#### ANTECEDENTES GENERALES

Las brassicas forrajeras (BF) pertenecen al género *Brassica*, que a su vez forma parte de la familia de las brassicaceas o crucíferas. Agrupa diferentes especies de interés económico, entre las cuales se encuentran el nabo forrajero (*Brassica rapa*) y la rutabaga (*Brassica napobrassica*), las que desarrollan una raíz napiforme y se conocen por ello como BF de raíz. Otras especies utilizadas como alimento animal son la col forrajera, el raps forrajero y los nabos de hoja no desarrollan dichas raíces, por lo que se conocen como BF de hoja. Las BF se caracterizan por ser especies de clima frío, y por ello bastante resistentes a bajas temperaturas. Se utilizan habitualmente como cultivos forrajeros suplementarios y estratégicos, ya que su alta producción por unidad de superficie y alto valor nutritivo permite la alimentación animal en períodos críticos.

Las BF han sido utilizadas por siglos, especialmente en Europa, aunque más recientemente también en países con climas templados y fríos como Estados Unidos, Canadá, Nueva Zelanda y Australia. En el sur de Chile, especies de BF fueron ampliamente utilizadas (p.ej. col), pero su utilización más extensa ha sido a partir de la presente década. En la Región de Aysén se iniciaron las primeras experiencias el 2003, demostrándose su adaptación a las condiciones locales y su gran potencial productivo.

La resistencia al frío y a la sequía y, en general, la alta rusticidad de su cultivo, además de su muy elevado rendimiento y valor nutritivo, han favorecido la introducción de estas especies en la región. Un factor central para su utilización en sistemas ganaderos es su

rápido crecimiento y la factibilidad de contar con forraje estratégico a los pocos meses de su siembra, ya sea en períodos de verano, otoño o invierno, dependiendo de las variedades utilizadas.

De esta forma, algunos cultivares de nabos forrajeros se caracterizan por su rápida entrada en producción, ya que entre siembra y utilización necesitan en promedio de 90 a 120 días, mientras que la rutabaga se caracteriza por un período de crecimiento más prolongado con una utilización a partir de los 150 a 180 días o más, posterior a la siembra, según las variedades seleccionadas.

En términos generales, las BF presentan altos potenciales de producción, pudiendo rendir sobre 16-18 t MS/ha en rutabaga y de 12-15 t MS/ha con nabos forrajeros. Estas plantas presentan alto contenido de proteína, con 15-25% en hojas y 10-15% en raíces. La digestibilidad es alta, superando habitualmente el 85-90% de la MS, y el contenido de humedad es elevado, cercano a 90% en las raíces y sobre 85% en las hojas. Un aspecto muy destacable de estas plantas es su elevado contenido energético, con niveles de energía metabolizable entre 2,6-3,1 Mcal/kg MS (en raíces más cercano al valor alto). Tienen muy bajo contenidos de fibra, especialmente la fibra detergente neutra (FDN), con valores inferiores a 18% de la MS. El alto valor nutritivo se mantiene en el tiempo, lo que hace incluso posible el almacenaje de raíces para consumo posterior, especialmente en climas fríos.

## CULTIVO DE BRASSICAS FORRAJERAS

En la región de Aysén se están probando dos especies con fines bioenergéticos, prospeccionando la factibilidad de generar bioetanol a partir de la composición de azúcares solubles que caracteriza a las raíces de estas plantas. Ellas son el nabo forrajero y la rutabaga, ambas plantas bianuales, pero que se utilizan durante su primer año de cultivo.

### Nabo forrajero de raíz (*Brassica rapa*)

La planta se caracteriza por tener una raíz de gran desarrollo (napiforme) y hojas suculentas. Presenta alta tolerancia a bajas temperaturas, condición importante en un cultivo de otoño e invierno en la Patagonia (mínimas absolutas invernales habituales entre -7 y hasta -18 °C). La nieve no representa un problema mayor para la subsistencia de este cultivo. La relación de raíz y hojas es un factor importante que afecta el índice de cosecha, dependiendo del grado de desarrollo del cultivo y del cultivar utilizado. De esta forma, el peso de la raíz puede representar entre un 30-50% ó más del peso total de la planta. En cosechas tardías las raíces aumentan en proporción, ya que existe senescencia de hojas. Ello ocurre con mayor frecuencia en cultivares más precoces que se utilicen más tarde.

Los nabos forrajeros de raíz se dividen en nabos precoces, de precocidad intermedia y tardía, según su período de siembra a cosecha. Nabos precoces pueden ser utilizados incluso en verano, si el crecimiento ha sido adecuado (unos 80-90 días desde la siembra). Éstos poseen una menor resistencia a heladas que los más tardíos y las raíces tienden a estar más expuestas (Figura 2.1a). Los cultivares de ciclo intermedio y tardío presentan características morfológicas similares, con raíces más globosas. Son de período vegetativo más largo, habitualmente de sobre 100-120 días. Son en general más resistentes a las heladas y bajas temperaturas, sin perder su calidad (Figura 2.1b).

### Rutabaga (*Brassica napobrassica*)

La rutabaga, también conocida como colinabo, tiene un ciclo de desarrollo más largo que los nabos forrajeros, de entre 150-240 días de siembra a cosecha. Habitualmente presentan niveles de energía mayor. Muy resistente al frío invernal, presenta alta palatabilidad y las raíces pueden mantenerse en terreno u acopio por espacios prolongados de tiempo.

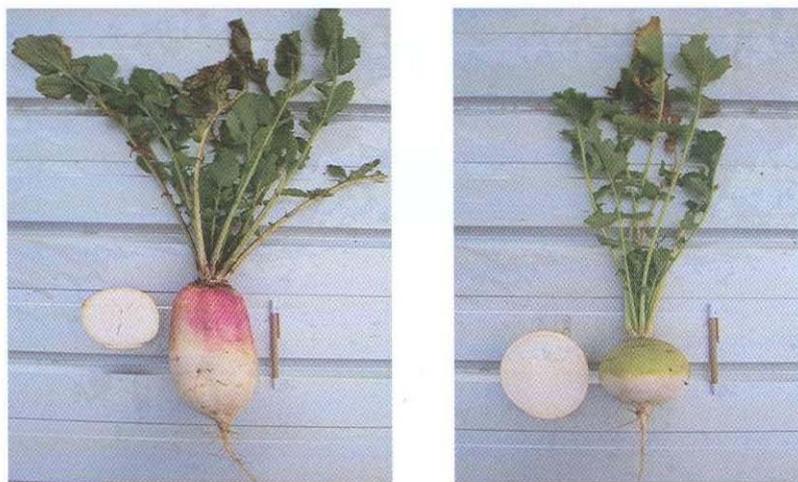


FIGURA 2.1 Nabo tardío de raíz (izquierda, a) y nabo más tardío (derecha, b).

Prefieren ambientes más frescos y algo más húmedos que los nabos forrajeros, aunque sean más fríos. Durante su crecimiento, son menos tolerantes a la sequía. Su menor precocidad hace a la rutabaga un cultivo de uso invernal más que otoñal. Las raíces perduran en buen estado en el terreno hasta avanzado el invierno e incluso inicios de primavera, si las condiciones son frías.



FIGURA 2.2 Rutabaga o colinabo

Existen muchas variedades o cultivares de nabos forrajeros y rutabagas, las que difieren en procedencia y características agronómicas, como su precocidad, factor muy relevante a la hora de definir las necesidades de cosecha. Es posible tener disponibilidad de raíces desde tan temprano como febrero (nabos precoces) hasta septiembre (rutabagas más tardías). El cuadro 2.1 resume algunas de las especies y variedades recomendables para la región de Aysén y sus diferentes condiciones agroclimáticas.

Especie	Zona de Estepa	Zona Intermedia	Zona Húmeda
Nabo de raíz	Blanco de Lugo Green Globe Marco York Globe  8-15 t MS/ha	Civasto Green Globe Barkant Rival Cuello de Violeta  8-16 t MS/ha	Civasto Cuello. de Violeta Balance  6-11 t MS/ha
Rutabaga	Winton Dominion Highlander Major Plus  8-11 t MS/ha	Winton Dominion  8-17 t MS/ha	Winton Highlander Major Plus  8-16 t MS/ha

CUADRO 2.1. Lista de cultivares de brásicas forrajeras con buena adaptabilidad, en el proceso de introducción a las diferentes zonas agroclimáticas de la Región de Aysén.

## **ESTABLECIMIENTO DE LOS CULTIVOS**

Las BF tienen un sistema radicular relativamente poco profundizador, por lo que habitualmente requieren de niveles de fertilización relativamente altos, sobre todo si se piensa que los potenciales rendimientos son elevados. En muchas ocasiones estos cultivos pueden ser utilizados como cabeza de rotación y existe una fertilidad residual hacia las temporadas siguientes. De esta forma, la selección de los potreros en un predio deberá considerar la rotación que se quiera seguir y que tienda al establecimiento de praderas permanentes en muchos casos. En condiciones de la Patagonia, es muy importante considerar el factor de vientos, ya que la fecha recomendada de establecimiento coincide con alta incidencia de éste, que puede causar problemas de erosión eólica bastante serios.

Para lograr una buena preparación de suelo, resulta recomendable realizar un barbecho temprano en otoño, facilitando con esto la aireación del suelo y la mineralización de los nutrientes y posteriormente labores de labranza secundarias a salidas de invierno para asegurar una buena cama de semillas. En ocasiones en que haya problemas de infestación de malezas puede ser recomendable realizar un barbecho químico pre-siembra.

Las BF pueden ser sembradas al voleo o idealmente en líneas, de forma manual o mecanizada, que permita distribuir la semilla en forma homogénea y a una profundidad no superior a 1-1,5 cm, atendiendo al pequeño tamaño de la semilla. Las siembras mecanizadas permiten regular muy bien la dosis de semilla y la profundidad de siembra. La forma de siembra es importante, ya que las dosis de semillas utilizadas en BF son muy bajas, recomendándose en general sólo 2-3 kg/ha o menos para nabos forrajeros y rutabagas, lo que complica su distribución en el terreno.

## **RESULTADOS PRODUCTIVOS EN AYSÉN**

Estudios realizados por el INIA en Aysén, a cargo de Teuber (2005), prospectaron el potencial productivo de dos especies de BF (nabo forrajero y rutabaga), con siembra a principios de noviembre) y dos fechas de cosecha: marzo y mayo (143 y 196 días, respectivamente). En nabo forrajero se determinó un potencial de 15-16 t MS/ha totales, con una proporción de aproximadamente 50/50 % de hojas/raíz, cuando la cosecha se realizó el 27 de marzo (puntos 1 y 2 de la figura 1). Sin embargo, cuando la cosecha fue atrasada hasta el mes de mayo, la producción disminuyó a 12-14 t/ha (8 t/ha raíces), producto de la pérdida de hojas por senescencia.

En cuanto a la producción de rutabagas, en el mismo estudio anterior se alcanzaron 16 t MS/ha, con 8-9 t de raíces en cosecha de marzo. Sin embargo, cuando la cosecha fue atrasada hasta mayo, la producción subió a 16-17 t MS/ha, con sobre 12 t de raíces y

4-5 t de hojas. El nabo forrajero es una especie de más corto período vegetativo, ya que a los 143 días posteriores a la siembra, ya ha alcanzado su potencial de producción y posteriormente se observan pérdidas. No obstante, las mayores pérdidas se observan en hojas, no así en raíces, las que pueden permanecer en buen estado por períodos prolongados hasta su uso.

La rutabaga requiere de un período vegetativo más prolongado para alcanzar su potencial de producción, y tiende a crecer más en otoño, donde aún acumula materia seca, especialmente en raíces.

Las características de crecimiento contrastante de ambas especies las hace muy interesantes desde el punto de vista de complementar su cultivo de modo de tener disponibilidad de raíces por períodos más prolongados durante el año, ya sea para consumo animal o usos alternativos, como se pretende en eventuales sistemas bioenergéticos.

### CRECIMIENTO DE BRASSICAS FORRAJERAS

Con el fin de conocer el patrón de crecimiento de dos brassicas forrajeras en las condiciones de la Zona Intermedia de Aysén, se estudiaron durante todo su ciclo vegetativo dos cultivares de nabo de raíz y uno de rutabaga. Se consideró especialmente desde el período de verano en adelante, que corresponde a los períodos de eventual utilización. Los cultivos se establecieron el 26 de octubre y correspondieron a los nabos *Rival* (precoz) y *Green Globe* (más tardío) y la rutabaga *Dominion*. Los cultivos se establecieron y se procedió a hacer cosechas secuenciales desde principios de febrero hasta fines de septiembre, de modo de evaluar la producción y la partición de ésta (hojas y raíces). También se evaluó el contenido de azúcares en las raíces, de modo de observar variaciones estacionales en estos parámetros, que afectan directamente la producción de bioetanol.

En la figura 2.3 se resumen los resultados para las tres especies estudiadas. En primer término, queda de manifiesto que las tres especies tienen un potencial de crecimiento muy grande, que puede llegar a superar las 20 t de materia seca por hectárea. En los tres casos tendió a presentarse el máximo de rendimiento en el mes de mayo, donde se logra la mayor acumulación de forraje, especialmente en raíces. Mientras que la mayor acumulación de raíces se presentó en la rutabaga, con cerca de 15 t MS/ha, ésta llegó a niveles algo más bajos en el caso de los nabos. Desde el mes de mayo en adelante en los tres casos se verifican menores rendimientos, hasta llegar a valores de 10 t/ha en nabo *Green Globe* y rutabaga, aunque con una proporción muy alta de raíces en esta última.

A principios de febrero los cultivos ya han acumulado alrededor de 10 t MS/ha, pero en esta etapa el rendimiento está compuesto mayoritariamente por hojas. Más tarde en la temporada, en otoño, se revierte esta situación y las raíces empiezan a ser más importantes en la partición del rendimiento. En la figura 2.4 se observa cómo va disminuyendo la relación de

hojas: raíces al avanzar la temporada. Ello significa que la acumulación de materia seca empieza a ser más relevante en raíces versus hojas, y también es un reflejo de pérdida de hojas por senescencia.

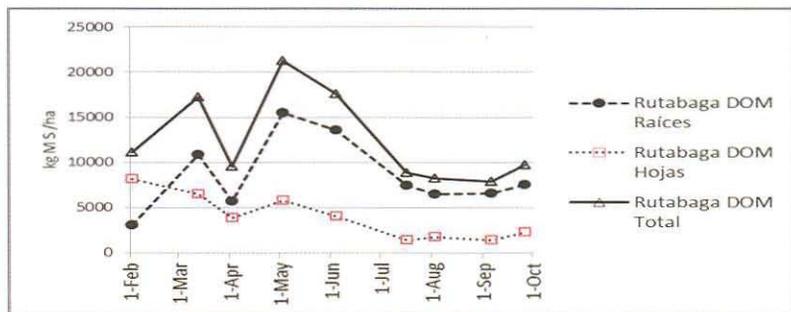
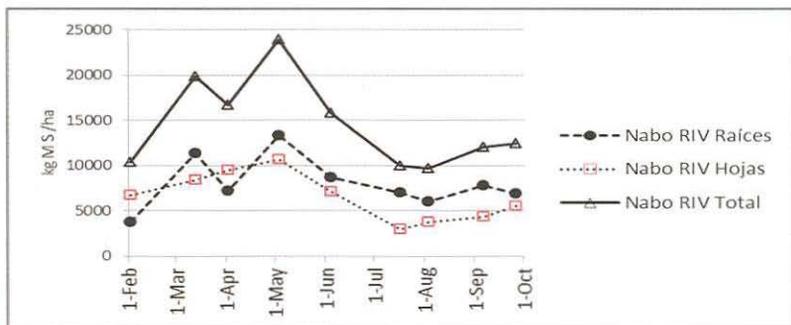
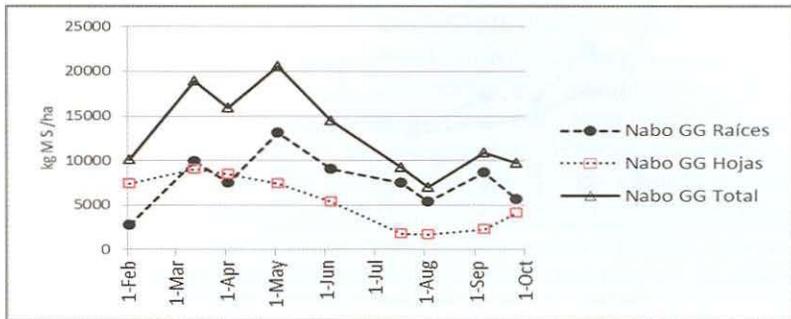


FIGURA 2.3 Crecimiento y partición del rendimiento de tres brassicas forrajeras en la Zona Intermedia de Aysén. Nabo cv Green Globe (arriba); Nabo Rival (medio); Rutabaga Dominion (abajo).

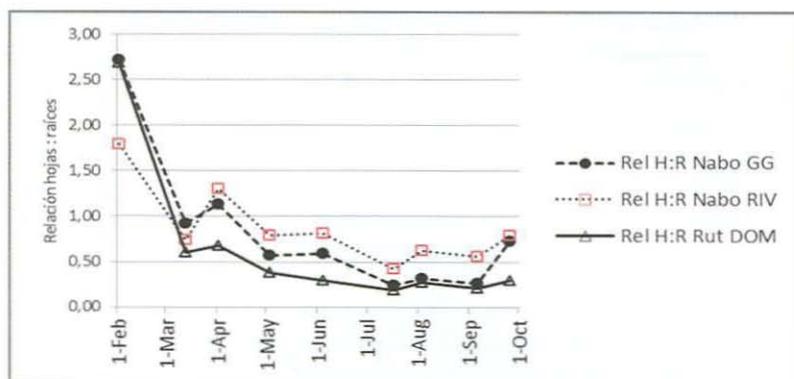


FIGURA 2.4 Variación de la relación hojas:raíces en tres brassicas forrajeras entre el inicio y Final de la temporada de utilización (febrero - septiembre).

Las brassicas forrajeras, como plantas bianuales, en su primer año tienen habitualmente sólo crecimiento vegetativo. Durante el invierno, en caso de que las plantas no fueran cosechadas, acumulan frío y se induce el crecimiento reproductivo para la primavera siguiente (vernalización), en que emiten el tallo floral. En algunas ocasiones, especialmente con siembras muy tempranas de algunas variedades, y en zonas donde las primaveras son especialmente frías, las plantas pueden vernalizar ya en la primera temporada. Ello tiene efectos sobre el rendimiento del cultivo y la partición de éste, ya que una proporción importante está compuesta por tallos florales. Esto genera también problemas de manejo y afecta negativamente el valor nutritivo de la planta (cuadro 2.2)

Nabo de Raíz cv. Rival				
	Órgano	P.C	EM	DMS
		%	Mcal/Kg	%
Estado Vegetativo	HOJAS	21	2.7	91
	RAICES	11	3.1	95
Estado Reproductivo	HOJAS	18 ↓	2.7 ↓	92
	RAICES	8 ↓	2.8 ↓	87
	TALLO FLORAL	6	2.1	66

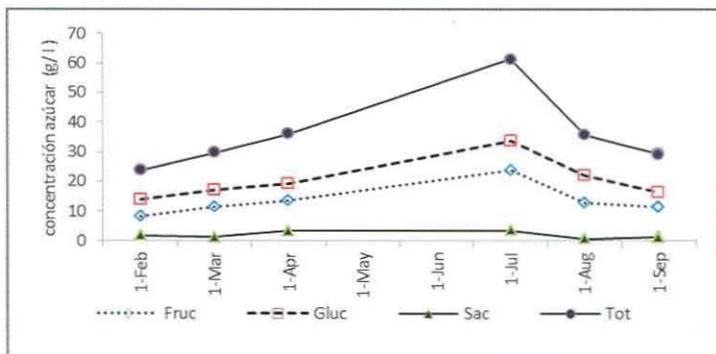
CUADRO 2.2 Valor nutritivo de plantas de nabo en dos estados contrastantes.

Las raíces de plantas vernalizadas presentan menos concentración de proteína y energía, además de ser menos digestibles. Sin embargo, la caída mayor de valor nutritivo se produce por los bajos valores de los tallos florales para las mismas variables nutricionales.

En la figura 2.5 se aprecia la variación de concentración de los tres azúcares solubles principales en la composición de raíces de nabos y rutabagas, que son la glucosa, fructosa y sacarosa. Se observa que en los tres casos, la importancia relativa es la misma, siendo la glucosa la de mayor relevancia, seguida por fructosa y finalmente pequeñas concentraciones de sacarosa. En este caso, los dos nabos forrajeros llegaron a máximos más elevados en la suma de las tres azúcares (>60 g/l) que la rutabaga, que sólo supera levemente los 40 g/l. En los nabos forrajeros se verifica un aumento en la concentración de glucosa y fructosa hasta el mes de julio, siendo más pronunciado el aumento en Green Globe que en Rival. Este último, siendo más precoz, llega a superar los 55 g/l ya en abril, mientras que la variedad Green Globe, siendo más tardía, a esa fecha presenta menores concentraciones, cercanas a 35 g/l. Con posterioridad a julio, las raíces de ambos nabos decaen en su concentración de azúcar. La rutabaga tiene una variación menor a través del tiempo, no llegando a los máximos observados en nabos, pero mantiene concentraciones cercanas a 40 g/l hasta el final de la temporada.

En otra experiencia realizada anteriormente, al considerar los mismos tres azúcares anteriores (sacarosa + glucosa + fructosa) se observaron niveles superiores en rutabaga, especialmente a partir de marzo y al menos hasta junio. Entre marzo y junio, época normal de cosecha, los azúcares mencionados alcanzaron una concentración total de casi 80 g/l en rutabaga Dominion, mientras que en nabo cv Rival varió desde 60 g/l en marzo a alrededor de 37 g/l en junio. Finalmente, el nabo Green Globe se verificaron los menores valores con máximos cercanos a 50 g/l inicialmente y finales entre 25-30 g/l. Se observaron diferencias estacionales dentro de cada cultivo, así como también diferencias entre especies y cultivares, lo que debe ser estudiado más en profundidad.

De esta forma, diferentes especies serán mejor utilizadas en forma temprana, mientras que otras, como probablemente es el caso de la rutabaga, pueda extender su cosecha a períodos más tardíos, sin desmejorar demasiado su potencial de generación de biocombustible.



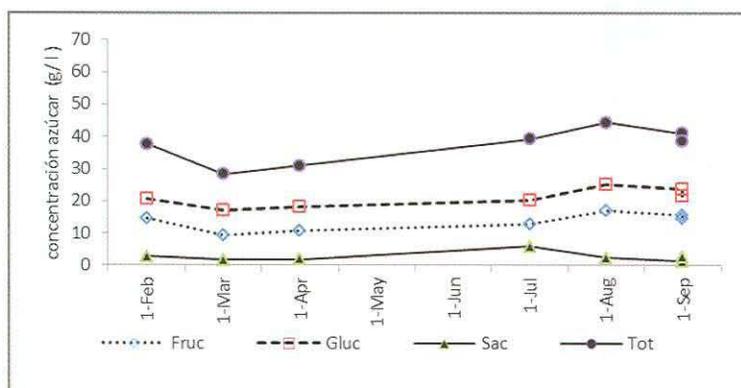
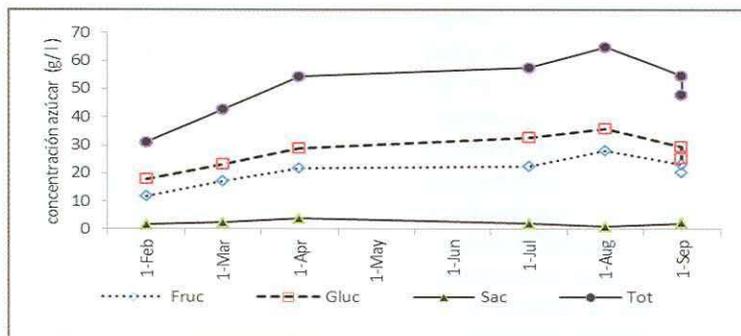


FIGURA 2.5 Variación de la concentración de azúcares solubles en raíces de tres brassicas forrajeras entre febrero y septiembre. Fruc=fructosa; Gluc=glucosa; Sac=sacarosa; Tot=total (suma), en gramos por litro. Nabo Green Globe (arriba), Nabo Rival (centro); rutabaga Dominion (abajo).

## REMOLACHA

Existen otros cultivos factibles de utilizar como materia prima para la transformación de azúcares a etanol y que tendrían una buena adaptación a las condiciones de la región. Se realizaron algunas pruebas y experiencias con plantas de remolacha azucarera en la zona de Valle Simpson (Zona Intermedia). En una fase preliminar, la remolacha presenta buenas condiciones de adaptación a la zona, con una alta resistencia al frío invernal. Es una planta de ciclo largo, que podría entregar materia prima durante el período invernal, similar a lo que ocurre con la rutabaga.

Los rendimientos obtenidos a nivel experimental indican buenas proyecciones, con valores que podrían situarse entre 12-15 t de MS total/ha o más, de las cuales 8-10 t podrían ser raíces.

Otra especie interesante de explorar, por su uso alternativo animal, es la remolacha forrajera, planta algo más rústica que la remolacha azucarera, pero con buenas posibilidades de adaptarse a las condiciones de la Patagonia. En ambos casos, es necesario continuar estudios para afinar sus requerimientos y potenciar su producción.



## **CAPITULO 3**

### **PROCESAMIENTO DE RAÍCES DE BRASSICAS FORRAJERAS PARA LA GENERACIÓN DE BIOETANOL**

Pier Barattini, Daniel Cross, Noé Carrillo y Christian Hepp

#### **ANTECEDENTES GENERALES**

En el capítulo anterior se entregaron antecedentes sobre las prácticas agronómicas y los principales resultados de adaptación y producción de brassicas forrajeras en la Región de Aysén. Estas especies forrajeras representan una alternativa de gran interés para los sistemas ganaderos regionales, tanto en bovinos como ovinos, al poderse disponer de alimento en cantidad y calidad adecuadas para sustentar niveles altos de rendimiento.

No obstante ser el uso como alimento animal la forma tradicional y más corriente de utilización de las brassicas forrajeras, se plantea aquí un uso alternativo, combinando lo anterior con la generación de un biocombustible. Se ha señalado que las raíces de estas plantas tienen una concentración elevada de azúcares solubles, especialmente del tipo glucosa, fructosa y sacarosa. Estos azúcares pueden llegar a superar el 50% de la materia seca de las raíces, lo que hace de éstas una fuente potencial para ser fermentados para la generación de alcohol (etanol).

Este capítulo describe la etapa de procesamiento de las raíces de brassicas forrajeras, desde su cosecha en terreno hasta la separación del jugo rico en carbohidratos solubles y de la coqueta.

#### **COSECHA DE NABOS O RUTABAGAS**

Las brassicas forrajeras, según la especie, la variedad y la fecha de siembra, estarán dispo-

nibles para su cosecha a partir del mes de marzo de cada año. Las plantas han demostrado también la capacidad de permanecer en terreno por períodos considerables de tiempo, lo que permite extender los períodos de cosecha y ajustarlos a los requerimientos de una eventual planta de procesamiento para la generación de bioetanol. Desde los nabos forrajeros más precoces hasta las rutabagas más tardías, los cultivos estarán listos para cosecha entre principios de marzo y hasta junio. La extensión del período de cosecha puede llegar casi hasta el mes de octubre, ya que las raíces pueden permanecer en el terreno. Sin embargo, hay que contar que las cosechas más tardías van acompañadas de pérdidas considerables en hojas, lo que tiene connotaciones para la alimentación del ganado.

La cosecha de BF puede realizarse manualmente, lo que demanda bastante mano de obra, ya que junto con extraer la raíz (sale con relativa facilidad) del suelo, debe cortarse a nivel del cuello en la zona de inserción de las hojas, de modo de que solamente la fracción radicular vaya a la planta. Las hojas y restos de corona pueden quedar en terreno y ser consumidas por el ganado, lográndose así una utilización de toda la planta. En otros países, donde el cultivo de nabos y rutabagas es de más larga data y donde se almacenan para su consumo animal posterior, p.ej. en sistemas de patios y estabulación, existen alternativas eficientes de cosecha mecanizada. Existe maquinaria desarrollada para la cosecha de nabos y rutabagas, la que extrae la planta del suelo, separa las hojas y va lateralmente cargando un carro de arrastre o camión.

Las raíces, ya sean nabos o rutabagas, son transportadas a la planta en camión, a una zona especialmente habilitada para su acopio (Figura 3.1). Consiste en una plataforma reforzada con hormigón armado, diseñada para soportar cargas pesadas, que posee un declive que permite evacuar las aguas de lavado hacia una pequeña laguna de acopio.



*FIGURA 3.1. Arribo de las raíces a la planta de procesamiento*

Las raíces habitualmente deben limpiarse antes de poder ser procesadas, operación que se realiza en el patio de descarga. La tierra adosada puede quitarse mediante un lavado

con hidrolavadora y el agua de este lavado es desviada hacia una laguna, pasando antes por un desarenador. Esto permite una eventual reutilización de estas aguas en riego de terrenos vecinos.

Si las raíces quedan a la intemperie y llueve, es recomendable cubrir con una lona para evitar pudriciones y pérdida de calidad, sobre todo si hay condiciones aún cálidas, lo que puede ocurrir en la primera parte de la cosecha (inicios de otoño). Después de la limpieza, las raíces son acopiadas en recipientes plásticos (bins) con capacidad aproximada de 500 kilos, los que facilitan su transporte. Una vez en los bins, las raíces son pesadas y luego están listas para ser procesadas.

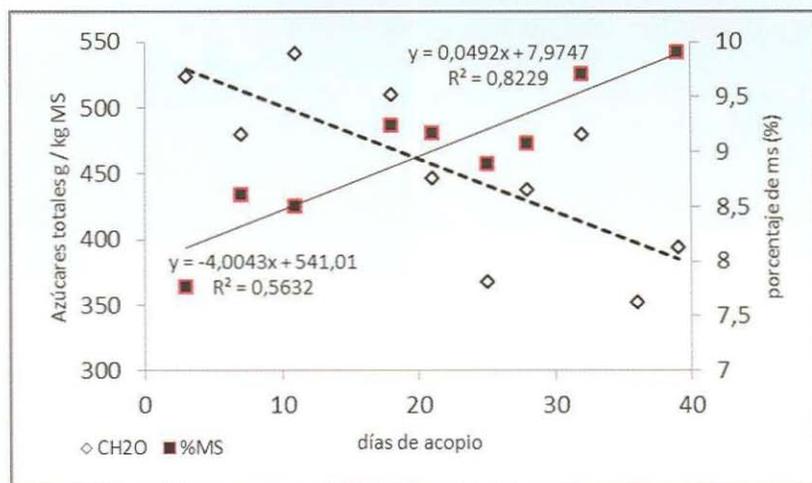


FIGURA 3.2 Efecto del tiempo de acopio de raíces sobre el porcentaje de materia seca y su concentración de azúcares. INIA Tamel Aike, 2012.

La figura 3.2 muestra el efecto de acopiar raíces a la espera de ser procesadas en la planta. Se analizó un período de 39 días, en que secuencialmente se tomaron muestras del material acopiado. Se aprecia que hubo una disminución de hasta más de 30% en la concentración de azúcares de las raíces, aparejada de un aumento de la materia seca desde algo menos de 8% en raíces frescas a cerca de 10% al final del período de acopio.

De esta forma, es importante estudiar más las condiciones de acopio de la materia prima, de modo de conocer las mejores formas de almacenamiento y los períodos límites más recomendables.

## MOLIENDA

En términos operativos, esta fase del procesamiento de los nabos y rutabagas involucra las etapas de alimentación y molienda propiamente tal.

Las raíces son cargadas en una correa transportadora, instalada en las afueras a un costado de la sala de proceso primario (Figura 3.3). La correa permite elevar la materia prima a una altura aproximada de 2,5 m. Ésta cae a una pequeña rampa que desemboca en un molino destrozador.

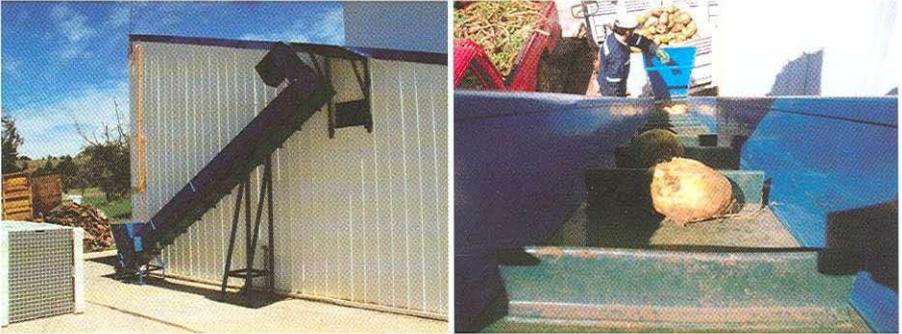


FIGURA 3.3. Correa transportadora

El molino de martillo (Figura 3.4) permite la reducción de tamaño de las raíces a través de un proceso de destrozamiento y molienda. Éste recibe la materia prima a través de una tolva superior. Es una máquina provista de una estructura de metal y cuenta con un motor trifásico de 10 HP, el que impulsa un cabezal compuesto por una serie de pesadas piezas de metal provistas de afiladas cuchillas en cada extremo. En la parte inferior tiene una criba (o malla) con orificios de 0,5 cm de diámetro por el que pasa la pulpa. La pulpa obtenida con el molino se acumula en un tolva inferior, que alimenta la bomba del equipo de filtrado y prensado.



FIGURA 3.4. Molino de martillo (vista superior, sin tolva)

## PRENSADO Y FILTRADO DE LA PULPA

La pulpa que entrega el molino de martillo debe ser prensada y filtrada para extraer el jugo rico en azúcares solubles y separarlo de las fracciones sólidas y estructurales de la raíz. Para este fin se utiliza un filtro en base a placas filtrantes de telas de polipropileno, denominado filtro de prensa (Figura 3.5), el que opera en ciclos de prensado y descarga.



Figura 3.5 Filtro de prensa. Placas de prensado y filtrado.

El sistema de alimentación del filtro de prensa consiste en una bomba de desplazamiento positivo que levanta una presión de hasta 12 bar. Esta bomba empuja la pulpa, la que se comprime, permitiendo que el jugo filtre a través de las telas del elemento de prensa. Utilizando únicamente la bomba se detectó que la pulpa aún retenía bastante jugo, por lo que se incorporó un compresor de aire que aumenta la presión ejercida y permite seguir extrayendo jugo una vez que la bomba deja de alimentar al filtro.

El filtro se alimenta con la pulpa hasta que las telas se saturan, momento en que se detiene la alimentación y continúa el prensado utilizando únicamente el compresor. El jugo va drenando desde el filtro prensa mediante tubería que permite conectar mangueras para transferirlo hacia reactores de 3000 litros de capacidad, donde posteriormente se va a producir la fermentación y obtención de cerveza (Figura 3.6).

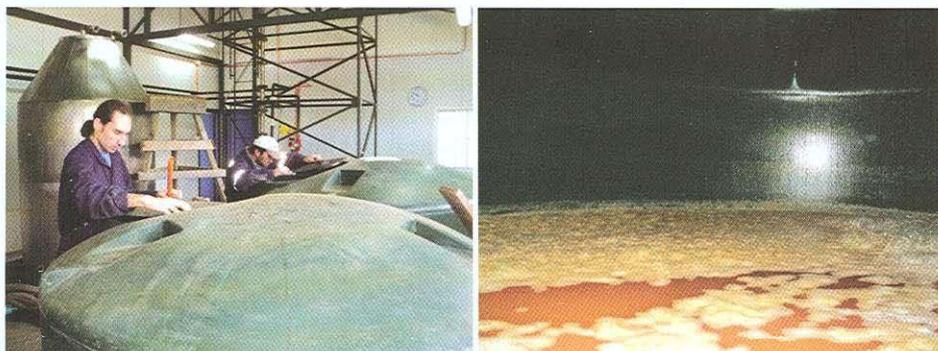


FIGURA 3.6. Acopio de jugo en reactores de fermentación.

Una vez terminada la fase de prensado y filtrado, se abre el filtro prensa. En éste queda retenida una torta prensada que recibe el nombre de “coseta” y que corresponde a la pulpa deshidratada. Ésta es acopiada en bins plásticos y pesada para hacer el balance de masa y estimar posibles pérdidas.

Un proceso normal tiene un rendimiento aproximado de un 50% (volumen/peso) en la extracción del jugo, es decir, por cada kilo de nabo o rutabaga procesado, se obtienen aproximadamente 0,5 litros de jugo. Las cantidades promedio involucradas por filtrado son las que muestra el cuadro 3.1.

Valores por filtrado		
TOTAL NABOS PROCESADOS	132,7	Kg
JUGO	71,2	Litros
COSETA	61,4	Kg
RENDIMIENTO (volumen/peso)	53,6	%

Cuadro 3.1. Valores promedio por ciclo de prensado y filtrado

## MONITOREO Y ANALÍTICA

Una vez obtenido el jugo, se debe analizar el contenido de azúcares solubles, lo que se realiza mediante técnicas de HPLC (cromatografía líquida de alta eficiencia, figura 3.6).

Valores promedio para los azúcares solubles presentes en el jugo filtrado indican que la glucosa es el azúcar más abundante, seguido por la fructosa, mientras que la sacarosa siempre se encontró en cantidades mínimas. También se detectan las concentraciones de etanol mediante esta misma técnica. En el cuadro 3.3 se pueden ver los promedios de los valores obtenidos.

RENDIMIENTO DE AZUCARES		
	g/l	g/g MS*
Glucosa	27,37	0,313
Fructosa	19,56	0,224
Sacarosa	0,43	0,005
TOTAL	47,36	0,541

Cuadro 3.2 Promedios de azúcares en jugo.

\*MS: Materia seca

A partir de estos valores se pudo determinar el porcentaje de azúcares en la materia seca, valor correspondiente a un 54% (peso/peso), como se muestra en el cuadro 3.3.

PARÁMETROS PROMEDIO 2011		
MATERIA SECA NABOS (%)	8,75	% p/p
AZÚCARES FERMENTABLES (BASE SECA)	54,13	% p/p
JUGO OBTENIDO (BASE HÚMEDA)	53,60	% v/p
JUGO OBTENIDO (BASE SECA)	6,10	l/Kg MS

Cuadro 3.3 Valores promedio temporada para azúcares en materia seca del jugo.



## CAPITULO 4

### PROCESOS DE FERMENTACIÓN Y DESTILACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE FILTRADO DE BRASSICAS FORRAJERAS

Daniel Cross, Pier Barattini, Noé Carrillo y Christian Hepp

En el capítulo anterior se describieron los procesos primarios para la obtención de un jugo o filtrado, a través de la molienda y posterior prensado de la pulpa de nabo forrajero y/o rutabaga. Este filtrado es la materia prima para el proceso de fermentación, que junto con la posterior destilación, son materia del presente capítulo. El resultado final será la obtención de bioetanol, alcohol etílico, que es el objetivo final del proceso.

#### ANTECEDENTES GENERALES

La bioquímica de la fermentación es compleja e involucra reacciones subyacentes al crecimiento de las levaduras durante la fermentación, donde existe una transformación de azúcares reductores en etanol. En ello, están involucradas todas las facetas del metabolismo celular.

En ello, la composición del medio de cultivo juega un rol muy importante, especialmente cuando se trata de jugos directamente obtenidos, en este caso, de nabos o rutabagas. La premisa básica en este caso es la presencia de azúcares reductores en el jugo o filtrado. En general, si hay conversión de azúcares reductores a etanol se debe estar cumpliendo el siguiente balance:

Azúcares reductores + N disponible + Levaduras + O<sub>2</sub> Etanol + CO<sub>2</sub> + Levaduras

Este balance de masa refleja el proceso que se desarrolla en planta. Es interesante destacar que la conversión de azúcares a etanol no es de 100 %, ya que parte pasa a formar levaduras y también hay pérdida de materia seca en términos de  $\text{CO}_2$ . El oxígeno juega un rol fundamental ya que participa en la formación catabólica de ácidos grasos que son fundamentales para el desarrollo de más levaduras, en particular en la génesis de membranas. Sin embargo, este metabolito debe ser dosificado con cuidado pues si hay un exceso, la tendencia de las levaduras será metabolizar los azúcares vía la ruta del ciclo de Krebs o de los ácidos tricarbóxicos, que tendrá como productos principales levaduras,  $\text{CO}_2$  y agua y no producirá etanol.

## PROCESO DE FERMENTACIÓN

Uno de los metabolitos fundamentales para la fermentación alcohólica son los azúcares reductores. En general, las levaduras pueden consumir una gran variedad de éstos, sin embargo hay diferencias a nivel de cepas. El jugo de nabo o rutabaga procesado en planta tiene principalmente los azúcares reductores *glucosa* y *fructosa*, mientras que la *sacarosa* está presente en una menor proporción. En un periodo de 48 a 72 horas estos azúcares son convertidos a etanol. Un análisis por cromatografía líquida HPLC muestra este proceso de conversión (figura 4.1).

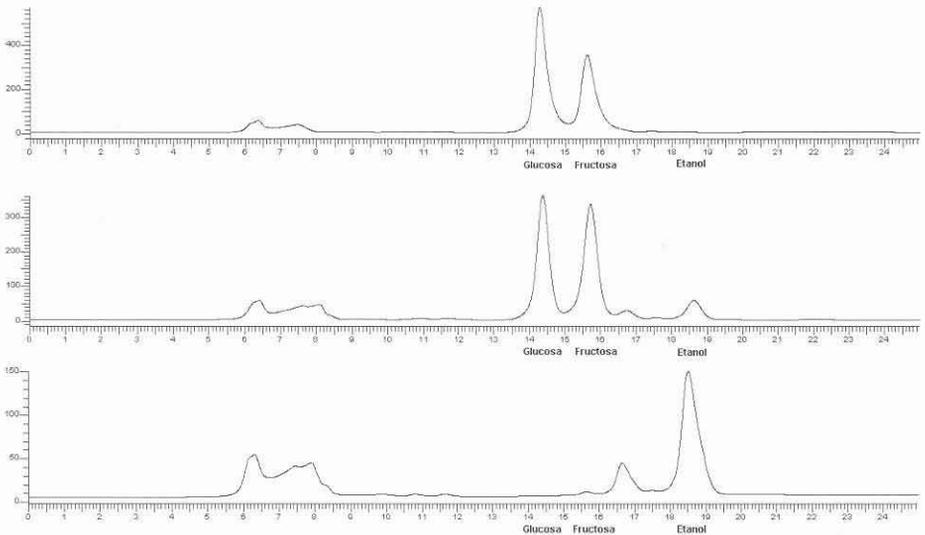


FIGURA 4.1. Utilización de los azúcares reductores y su transformación a bioetanol.

La asimilación de compuestos nitrogenados es fundamental para el desarrollo de las levaduras durante el proceso de fermentación. Las fuentes de nitrógeno son heterogéneas y por lo tanto se utilizan diferentes rutas para su asimilación. Se puede tratar de aminoácidos libres, péptidos, o compuestos aminados simples. Lo mismo puede decirse de los microelementos.

El procedimiento actual para la inoculación con levaduras de las partidas de jugo de nabo o rutabaga (acondicionado con sulfito, benzoato y pH), consiste en la aplicación de levaduras deshidratadas frescas a razón de 10 %p/v. Esto permite, en condiciones óptimas, tener una conversión o fermentación de los azúcares reductores a etanol en un plazo de 48 a 72 horas. En el proceso de acondicionamiento, el uso de  $H_3PO_4$  (ácido fosfórico) para regular el pH, aparentemente resultó ser menos efectivo que el  $H_2SO_4$  (ácido sulfúrico), e incluso podría tener un efecto inhibitorio indirecto. La práctica ha indicado que el acondicionamiento con ácido sulfúrico genera un medio que gatilla el proceso de fermentación con un mínimo periodo de latencia, lo que hace más recomendable su uso.

También se evaluaron y utilizaron inóculos líquidos que se desarrollaron a partir de escalamientos de volúmenes hasta obtener 50 a 100 litros de cultivo. La eficiencia de este tipo de inóculo dio un resultado sub óptimo y con muchas variaciones entre lote y lote; algunos reactores presentaban mucha latencia y era necesaria su re-inoculación sucesiva.

En principio, lo que estos resultados indican es que para tener un proceso fermentativo óptimo se debe, antes que nada, agregar una gran cantidad de levaduras, número que nunca se alcanzará con cultivos líquidos en base a jugo de nabo o rutabaga. Al utilizar levaduras deshidratadas se puede lograr tener un gran número de organismos en suspensión. Es probable que no todos sean efectivos o viables pero es más fácil -y así lo demuestra la práctica- llegar al número crítico de individuos que permite un proceso fermentativo más rápido y eficiente.

Otros aspectos que se han intentado abordar para una optimización del proceso de fermentación son la obtención de cepas de levaduras especializadas en crecer a expensas de jugo de nabo o rutabaga.

Cada "batch" o partida que se recibe en los reactores es inmediatamente acondicionada, siendo éste un proceso que tiene como objetivo inhibir el desarrollo de microorganismo que compiten a la levadura por los azúcares fermentables o reductores como sacarosa, glucosa y fructosa.

Para ello, se considera el control de la acidez del jugo, procurando un descenso rápido de pH (adición 3,96 ml/l ácido sulfúrico), ya que a pH de 2,8 la mayoría de los microorganismos contaminantes, que provienen principalmente del suelo, no se desarrollan bien.

Muchos de ellos no mueren pero no siguen dividiéndose. Este pH es adecuado para el desarrollo de las levaduras.

Asimismo, se agrega benzoato de sodio (0,1 g/l), que es un agente anti-microbiano inespecífico de uso grado alimenticio. Es inocuo para la salud humana e inhibe el desarrollo desproporcionado de microorganismos, dando la opción de que la levadura se pueda desarrollar rápido al momento de inocular y así desplazar por competencia a otras poblaciones microbianas. Las levaduras tienen bastante tolerancia a este compuesto, y en las concentraciones utilizadas no afecta al desarrollo de éstas.

También se utiliza sulfito de sodio (0,05 g/l), agente químico que actúa como un compuesto inhibidor para las levaduras nativas. De esta manera evita que estos hongos compitan con las levaduras por los azúcares reductores. De esta manera se generan las condiciones óptimas para el desarrollo de las levaduras de inóculo *Saccharomyces cerevisiae*.

Una vez que se ha completado el proceso de acondicionamiento, cada partida es inoculada con levadura de pan a razón de 10% p/v. Para ello, la levadura deshidratada se disuelve en un medio rico y se aplica inmediatamente al jugo de nabo o rutabaga acondicionado como ya se describió.

El proceso de fermentación se gatilla casi en forma instantánea. A las 24 horas ya hay clara presencia de la actividad de levaduras (burbujas, espumas, etc.). Se puede apreciar con un análisis al microscopio la presencia de una población abundante y “sana” de levaduras.

La fermentación o conversión de los azúcares solubles (glucosa, fructosa y sacarosa) a etanol demora aproximadamente 24 horas en condiciones de laboratorio, sin embargo en la planta piloto, en que la operación es a escala mayor, existen factores que influyen y hacen que estos plazos se alarguen más.

El proceso de conversión de los azúcares solubles (glucosa, fructosa y sacarosa) a etanol demora aproximadamente 3 a 4 días, en condiciones de trabajo en planta (hasta lograr una “cerveza”). El final de la fermentación se puede determinar según la variación de densidad, la que inicialmente está en el orden de 1,029 g/l y hacia el final del proceso baja a niveles de 1,006 g/l.

El proceso de fermentación se monitorea analizando muestras por HPLC utilizando la columna SupelcoGel Ag1 (figura 4.2).

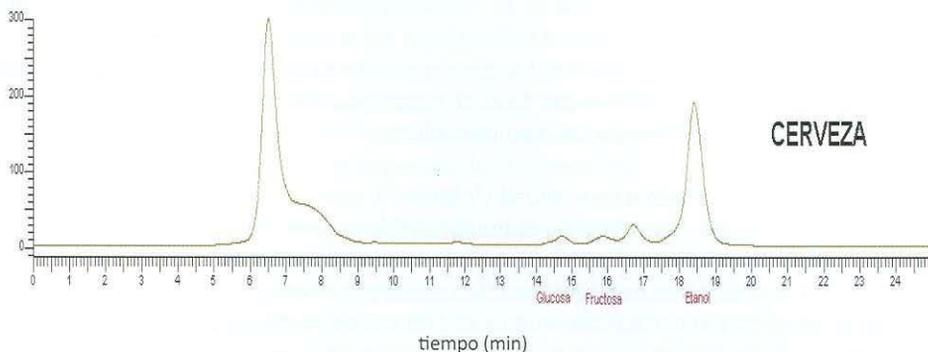


FIGURA 4.2 Gráfica de HPLC correspondiente a cerveza de nabos o rutabagas.

Como se muestra en la figura 4.2, la fermentación por levaduras del jugo de nabo o rutabaga, convierte los azúcares principales en etanol (eluye a los 18,5 min); se genera una cerveza con concentración final de alcohol de aproximadamente 1,9 a 3 %v/v, con un promedio de 2,34%.

## PROCESO DE DESTILACIÓN

Una vez que ha finalizado el proceso de fermentación, es decir cuando se ha logrado completar la fase de transformación de los azúcares solubles contenidos en el jugo a alcohol etílico (etanol), se cuenta con una cerveza, la que está en condiciones de entrar a la fase de destilación. Este procedimiento se lleva a cabo a través de una columna de destilación.

### Características de la columna de destilación

La columna de destilación se compone de unidades básicas modulares, denominadas “cuerpos”, los que son de acero inoxidable. Cada cuerpo contiene dos platos perforados y un punto de alimentación. Los cuerpos se unen o acoplan entre sí por medio de pernos y cada cuerpo tiene los platos en posición alternada.

La unidad básica operativa de destilación de la columna se denomina “plato”. El plato funciona como una unidad de destilación individual. Este se compone de una superficie cribada, una valla y un escurridor.

La unidad energética de la columna es el “hervidor”. Esta unidad está alimentada por agua calentada en unidad térmica o caldera, que en el diseño actual está a 2,5 bar y 120 °C. La cerveza, inyectada en la columna, circula en contracorriente por esta unidad tomando el calor necesario para producir el vapor que aporta la energía para que el proceso de destilación se lleve a cabo en cada plato.

El rehervidor esta acoplado a una unidad (“cántara”), que es un receptáculo en la parte inferior de la columna, que permite acumular el líquido que fluye desde la columna y permite alimentar también el rehervidor. Esta unidad cumple varias funciones, entre ellas permitir la destilación por lotes; también actúa como reservorio cuando se está alimentando en continuo particularmente en el proceso de rectificado, donde la columna no logra sacar todo el etanol contenido en el afluente. Otro aspecto importante es que la cántara permite regular el aporte calórico en la columna, dando la opción de regular la presión de trabajo y así poder optimizar el proceso de destilación de la cerveza.

Rehervidor y cantara vista lateral:

Un elemento esencial de la columna es el “condensador”, sitio donde los vapores de etanol se recogen en forma líquida, es decir son condensados. Esta unidad permite la circulación de un refrigerante. Está constituido por una camisa o reservorio externo por donde circula agua (temperatura 5 a 12°C), impulsada por una bomba. Como parte importante del proceso de destilación se realiza en invierno y las temperaturas ambientales pueden fácilmente bajar de 0°C, se ha agregado anticongelante al agua que circula en el condensador, para evitar el congelamiento de la misma y una operación más eficiente. En su interior tiene un recipiente donde se recibe el condensado, el que es descargado al exterior por medio de una salida.

Finalmente se tiene la columna completa, la que está constituida por el ensamble de todas las piezas anteriormente descritas. La columna ensamblada se compone de los cuerpos que la conforman y el cuerpo correspondiente al refrigerante (cuerpo 1) y el rehervidor sin la cantara (cuerpo 21). Los cuerpos se encuentran unidos mediante pernos en los flanges y cuentan con empaquetaduras de sellado.

Para lograr una mejor eficiencia en la operación de la columna, con menores pérdidas de calor en el proceso, la columna fue revestida en cada una de sus partes con aislación (lana mineral cubierta por planchas de acero inoxidable). Es importante destacar que el diseño de la columna es producto del presente proyecto y que su construcción también ha sido realizada en la Región de Aysén. La operación de la misma ha llevado a la necesidad de realizar modificaciones y adaptaciones, de acuerdo a las realidades y problemas de operación que se han ido detectando.

## **Operación de la columna - destilación**

La columna descrita se opera con dos secciones. En primer lugar existe un segmento “destrozador”, que se ubica entre los platos 20 a 40 (numerados de arriba hacia abajo). La segunda sección es el segmento “rectificador”, que se encuentra entre los platos 19 a 1. La gradiente de temperatura que se genera fluctúa entre 95 a 74 °C.

El caudal de alimentación de cerveza hacia la columna es de 0,5 – 1,2 l/min, generándose una producción de “aguardiente” (aproximadamente 70°) a razón de 2 litros/h. En destilación la columna opera con un gradiente térmico que es característico para el proceso de destilado de cerveza, en el rango 95,9 °C (plato 41, rehervidor) y 73,5 °C (plato 2, entrada al condensador). El establecimiento de este gradiente térmico en la columna es forzado por la recirculación de agua caliente a través del intercambiador de calor (plato 41). El proceso se inicia cuando el líquido caloportador (agua caliente) alcanza 100-110 °C. La formación de gradiente se inicia con cerveza previamente cargada en la cántara. Cuando se completa el proceso inicial, se comienza la alimentación de la cerveza a la columna.

En el inicio, el afluente de cerveza se mantiene a un caudal muy bajo, a medida que se consolida el gradiente y si se está destilando etanol 70 % v/v (aguardiente) se sube hasta aproximadamente 0,5 litros/min. El afluente ingresa a la columna por el plato 20, y fluye, por gravedad, hasta la cantara (plato 41). Esta zona de la columna es el segmento destrozador, y en éste el etanol que contiene la cerveza es elevado o destilado hacia los platos 20 al 1. De esta forma, el líquido que va retornando a la cantara (se denomina vinaza) está progresivamente libre de alcohol etílico. Esto se verifica haciendo análisis de vinaza por medio de cromatografía líquida HPLC.

Lo expuesto indica que en el segmento destrozador hay un flujo de líquido afluente hacia la cántara y en contracorriente, o sea en dirección hacia los platos superiores o segmento rectificador existe un flujo de vapor. En una cerveza diluida, como la que se procesa en este caso, el caudal de líquido descendente es mayoritario respecto al flujo ascendente de vapor, rico en etanol.

## **Operación de la columna - rectificación**

La destilación anterior permite la obtención de etanol con un grado de alrededor de 70°, producto que se ha denominado “aguardiente”. Este etanol, que aún contiene demasiada agua, debe ser concentrado, lo que se logra a través de una segunda destilación o rectificación.

Similar a lo que ocurre en el caso de la primera destilación (cerveza a aguardiente 70°), para la rectificación se opera la columna con dos secciones. La primera es el segmento

destrozador, que comprende los platos 36 a 40 y luego está el segmento rectificador (más largo en este caso), que involucra los platos 35 a 1. La gradiente de temperatura es de 72-73 °C, el caudal de alimentación de 0,05 - 0,1 litro/minuto, mientras que la producción de bioetanol es de 1 a 2 litros/hora. El líquido que se recupera en la cántara (vinaza) está prácticamente libre de alcohol etílico.

En el inicio, el afluente de aguardiente se mantiene a un caudal muy bajo, en la medida que se consolida el gradiente y se está destilando etanol 94 % v/v, se sube hasta aproximadamente 0,1 litros/minuto. Cabe destacar que estos caudales son muy inferiores a los trabajados en la destilación de cerveza. Esto hace que el proceso de rectificado sea más lento.

En la destilación de rectificación el aporte de etanol vaporizado viene tanto del afluente como del aguardiente acumulado en la cántara. Lo expuesto indica que en el segmento destrozador hay un flujo de líquido afluente hacia la cántara y en contracorriente, dirección de los platos superiores o segmento rectificador, un flujo de vapor.

En el proceso de rectificación de etanol 70%, el caudal líquido es minoritario respecto al flujo ascendente de vapor rico en etanol. El límite de caudal afluente viene dado por la capacidad de los platos de contener un cierto volumen sin inundarse.

En cada plato, la fracción de vapor se enriquece en vapor de etanol hasta llegar al límite físico puesto por el diseño de la columna y las características fisicoquímicas de la mezcla etanol:agua, ya que forma un "azeotropo". Esto significa que a cierta estequiometría, ambos compuestos (agua y etanol) destilan por partes iguales a una temperatura dada (se comportan como un líquido puro).

## Destilación en la planta piloto

En el cuadro 4.1 se muestran los caudales de cerveza procesados por jornada (1 turno) y sus rendimientos.

GRADO ALCOHOLICO CERVEZA (% v/v)	2,34
PROMEDIO POR PROCESO 2011	
VOL CERVEZA A DESTILACIÓN (l)	222,30
VOL DEST OBTENIDO (l)	7,31

CUADRO 4.1 Volúmenes de cerveza y destilado obtenido en un proceso promedio (sólo 1 turno)

Los resultados evaluados desde un punto energético, indican que el balance para el proceso de destilación es positivo: se producen más calorías que las que el sistema consume.

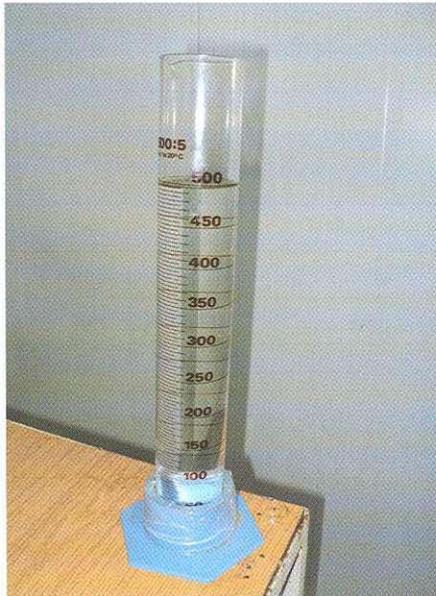
Evaluaciones realizadas indican que en este proceso promedio se utilizan 1.471 kcal/l etanol 70°, mientras que el producto tiene una energía de 4.230 kcal/l.

En el caso de la rectificación (segunda destilación), se obtuvieron los parámetros promedio que se señalan en el cuadro 4.2.

PROMEDIO POR PROCESO 2011	
VOL ETANOL 70% A DESTILACIÓN (l)	21,18
VOL DEST OBTENIDO (l)	12,60
GRADO ALC. DEL DESTILADO OBTENIDO (% v/v)	94,00

CUADRO 4.2 Volúmenes de etanol 70° inyectado y destilado 94° obtenido en un proceso promedio (sólo 1 turno).

Para evaluar el rendimiento energético del proceso en la línea del liquido caloportador, se siguió un procedimiento similar al ya indicado anteriormente, el que arroja un consumo de 166 kcal/l de etanol obtenido (94°), el que tiene una concentración energética de 5.196 kcal/l, es decir, el balance de energía es altamente positivo.



Bioetanol destilado: producto final

## Producción de vinazas

El subproducto de la destilación de cerveza es la vinaza y en el caso de la rectificación el residuo es fundamentalmente agua. Las vinazas representan en promedio un 97,7 % del volumen de cerveza que se destila, y se producen en un caudal diario similar al de cerveza procesada. Éstas contienen todos aquellos, elementos presentes en su fermento de origen, excepto el etanol, además de algunos componentes agregados durante el proceso ya descrito. Se debe considerar que el jugo de nabo o rutabaga que da origen al fermento ha sido procesado por las levaduras, lo que le puede aportar algunos otros componentes y metabolitos, no originales o propios de la materia prima.

Los principales nutrientes de interés para los sistemas ganaderos serán nitrógeno, fósforo. Potasio y azufre. El cuadro 4.3 resume valores promedio encontrados para estos elementos en muestras de vinazas procesadas. Los valores indicados, considerando un volumen de p. ej. 100.000 l aplicados por ha, implican un aporte de 36,5 kg N/ha, 19 kg de P/ha, 61 kg de S/ha y 144 kg de K/ha. Todos los valores anteriores son de gran importancia en sistemas agropecuarios y, en ciertos casos, pudieran estar entregando el 100% de nutrientes requeridos y reemplazar así a fertilizantes comerciales. Un factor a considerar es la acidez de la vinaza, la que puede estar entre pH 3-4, situación que pudiera manejarse llevándola a un pH más cercano a la neutralidad mediante uso de p.ej, cal. Es importante realizar estudios respecto del uso de vinazas y sus efectos, sobre todo por el impacto que pudiera tener como fertirriego.

Nutrientes disponibles	Concentración g/l
Nitrógeno	0,37
Fósforo	0,19
Azufre	0,61
Potasio	1,45

CUADRO 4.3 Composición nutricional de la vinaza de nabo forrajero

## Características del etanol producido

Debe considerarse que en este proyecto se está generando alcohol "hidro", que por lo tanto siempre va a contener agua (alrededor de 4-6%), la que no debe considerarse como un contaminante si no como parte integral del producto.

Análisis realizados mediante cromatografía líquida indicaron que ya el alcohol de 70 %v/v estaba libre de una serie de elementos presentes en la cerveza y presentaba un número de picos similares al etanol control, que es puro (grado analítico).

En 2008 se promulgó un decreto que regula el uso de bioetanol y biodiesel (Decreto 11 del 30 de enero de 2008 que “aprueba definiciones y especificaciones de calidad para la producción, importación, transporte, almacenamiento, distribución y comercialización de bioetanol y biodiesel”). Este decreto está vigente y es interesante revisar algunos de sus puntos:

Propiedad	Unidad de medida	Valor
Contenido de etanol	% volumen	Min. 92,1
Contenido de metanol	% volumen	Máx. 0,5
Goma lavada	mg/100 ml	Máx. 5
Contenido de agua	% volumen	Máx. 1
Contenido de desnaturalizador	% volumen	Min. 1,96 Máx. 5
Cloro inorgánico	mg/l	Máx. 32
Cobre	mg/kg	Máx. 0,1
Acidez (como ácido acético)	mg/l	Máx. 56
pH	pH	Mín. 6,5 Máx. 9
Azufre	% masa	Máx. 0,003
Sulfatos	Ppm	Máx. 4
Apariencia		Visualmente libre de sedimentos y material suspendido. Brillante y claro a temperatura ambiente o 21°C (la mayor de ambas).

También se realizaron análisis externos en laboratorios de SGS Chile Ltda., de acuerdo a la normativa existente. Los resultados de SGS en alcohol producido en la planta indican que el etanol producido en planta supera el contenido de agua (en el caso de alcohol 94-95%, tendría 5-6%), ya que se trata de alcohol hidrógeno (éste se utiliza en países como Brasil sin mayores limitaciones). En cuanto a desnaturalizador, no se detecta presencia (lógicamente ya que no se ha agregado en el proceso). Tampoco contiene metanol ni cobre y la acidez está en rangos de norma. En cuanto al azufre, se detectaron niveles del orden de 42 mg/kg (o ppm), mientras que el máximo autorizado es de 0,003% (o 30 ppm), con lo que se estaría levemente bajo norma. Un tema que deberá abordarse es la forma de bajar este contenido

de azufre, para estar dentro de norma. En cuanto a apariencia, el bioetanol producido en planta cumple con los requerimientos, presentándose brillante y claro a 21°C o temperatura de ambiente. En la misma muestra analizada, se señala que a compresión correspondiente a 100 Octanos (compresión máxima), el producto no combustiona, indicativo de un octanaje superior a 100 y que es característico del etanol.

El decreto 11 señala que se podrá usar etanol de tipo anhidro desnaturalizado como combustible, pero que se podrá mezclar con gasolina automotriz para uso en motores de ignición por chispa, solamente en un 2-5% del volumen resultante de la mezcla. Sin embargo, el artículo 14 del decreto 11 señala que para efectos experimentales y pruebas temporales se podrá obtener autorización vía resolución exenta de la Superintendencia previa consulta a la Comisión Nacional del Medio Ambiente. El combustible utilizado en pruebas no podrá ser comercializado en instalaciones de abastecimiento vehicular. Las pruebas que se desarrollarán en el proyecto se han realizado en el marco de este artículo.

### **Alcohol anhidro**

El alcohol que se generó en este proyecto a partir de los procesos descritos anteriormente es de tipo "hidro", es decir contiene 4-6% de agua en su composición. Las pruebas que se realizaron fueron desarrolladas utilizando como base este combustible, ya sea para fines de alimentar motores de combustión interna, o bien en un sistema de calefacción.

No obstante, se desarrollaron algunas pruebas para obtener alcohol deshidratado, a nivel experimental. Uno de los objetivos, que se deben alcanzar al producir bioetanol para combustible, es establecer las bases para poder obtener éste en forma anhidra. El etanol obtenido en la planta piloto en la actualidad es en promedio de una concentración de 94 % v/v.

Si bien es apto para funcionar como combustible por sí sólo, en pruebas experimentales ha mostrado también buena miscibilidad con gasolina de 93 octanos. Sin embargo, al proyectar su uso a escala más masiva como oxigenante para bencinas tradicionales, el etanol debe ser anhidro (además que el decreto 11 define bioetanol como aquel anhidro).

Existen diferentes procedimientos para alcanzar este objetivo, aunque los niveles de complejidad y equipamiento requerido varían ampliamente. Se consideran principalmente aquellos que se podrían adaptar a la infraestructura existente en la planta piloto, sin perjuicio que otros pudieran adaptarse a escalas mayores en casos de escalamiento. Existen diversos tipos de procesos para lograr eliminar el agua residual en el etanol:

#### - Destilación azeotrópica

Consiste en adicionar un compuesto químico, llamado “modificador”, a una mezcla de alimentación azeotrópica en una columna de destilación fraccionada, heterogénea (ATH) con uno de los componentes de la alimentación. Luego, este ATH es removido como destilado en la columna. La corriente de solución alcohólica de 1 a 6% molar de etanol se rectifica en una columna de destilación fraccionada para obtener agua (fondo) y una solución alcohólica concentrada de 86% molar (cabeza). Parte de esta segunda corriente regresa a la columna como reflujo, mientras el resto es enviada a otra columna de destilación llamada azeotrópica, donde se mezcla con el modificador (benceno o ciclohexano), produciendo el ATH y liberando al EA de la alimentación, obteniéndose como producto de fondo. El ATH es condensado como producto de cabeza y se le decanta para obtener dos fases inmiscibles. La fase orgánica, rica en el modificador, regresa a la columna azeotrópica como reflujo, mientras la fase acuosa es bombeada a una tercera columna de destilación fraccionada llamada recuperadora, donde se separa el modificador alcohólico del agua. El primero es obtenido como producto de cabeza y es reciclado a la alimentación de la columna azeotrópica, mientras que el agua es utilizada junto con la corriente obtenida en la columna rectificadora, como alimentación para otras etapas del proceso.

#### - Destilación extractiva

Consiste en adicionar un solvente no volátil, de alto punto de ebullición y miscible a una mezcla de alimentación azeotrópica, en una columna de destilación fraccionada, para alterar las volatilidades de los componentes claves sin la formación de un nuevo azeótropo. Consta de tres columnas de destilación fraccionada. La primera columna es la rectificadora y es similar a la descrita para la destilación azeotrópica. La segunda columna, llamada extractiva, recibe la solución alcohólica rectificada y al solvente, usualmente etilenglicol, en contracorriente. En el tope de la columna, el etanol es condensado y obtenido como producto principal. En la región entre la alimentación del solvente y la de la solución, el agua es absorbida por el solvente, que desciende a la base de la columna. Una corriente de fondo de la columna, constituida de agua y solvente, se alimenta a una tercera columna, llamada recuperadora; donde el agua es separada del solvente como producto de cabeza y es enviada como alimentación de otras etapas del proceso. El solvente agotado sale de la columna, como producto de fondo y es reciclado a la columna extractiva, junto con la corriente de alimentación. Algunas modificaciones aplicadas a este proceso se basan en un análisis energético del mismo y han sugerido circuitos adicionales para los subproductos, logrando aumentar la eficiencia y el rendimiento del proceso.

#### - Destilación extractiva salina

Es un proceso análogo a la destilación extractiva, con la diferencia de que el agente es una sal iónica, no volátil y soluble en la mezcla de alimentación. Una corriente de solución alcohólica rectificada (86% molar de etanol) alimenta a una columna de destilación fraccionada, llamada destiladora salina, donde se mezcla con la sal iónica (acetato de potasio). Se obtiene una solución concentrada de la sal como producto de fondos, la cual es enviada a una etapa de recuperación. Como destilado se obtiene etanol anhidro. La etapa de recuperación, consta de un secador por atomización, que permite obtener la sal en estado sólido y reciclarla a la columna destiladora salina.

La ventaja general de estos procesos es que se pueden adaptar a la infraestructura y experiencia ya desarrollada en planta, con la destilación fraccionada. Dentro de los procedimientos descritos los que presentan mayores ventajas, dada la realidad de la planta, son los de destilación extractiva en base a glicoles o salina.

También existen otros procedimientos como la *deshidratación por adsorción y pervaporación*. El primer procedimiento consiste en filtrar el etanol por zeolitas a alta presión por una cama de zeolitas con porosidad adecuada para retener el agua y dejar fuera de la matriz al etanol, permitiendo que éste sea recuperado libre de agua. La pervaporación consiste en la utilización de una membrana selectiva a uno de los componentes de la mezcla, en general el agua. El sistema requiere que el componente selectivo esté en estado de vapor, y de ahí su nombre y por medio de vacío se favorece el permeado a través de la membrana.

Si bien estos procedimientos son interesantes como alternativa para la obtención de etanol anhidro, escapan a la realidad de la planta piloto de este proyecto.

### **OBTENCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE REMOLACHA**

Básicamente el procedimiento utilizado para la obtención de jugo de azucarado de remolacha azucarera fue igual al utilizado para el procesamiento de nabos. A la remolacha cosechada, se le retira la corona con hojas y luego parcialmente limpiada o lavada de la tierra que tenía adherida.

Posteriormente se sometió a proceso de destrozado por medio del molino de martillo; el jugo se obtuvo por prensado en filtro de prensa de la pulpa. El jugo obtenido se ajustó con agua a una densidad adecuada y se acondicionó e inoculó, como se hace habitualmente con el jugo de nabo, aunque cabe destacar algunas diferencias.

Tanto durante el proceso de obtención de jugo como de fermentación presentaron problemas por un exceso de producción espuma. Durante la obtención del filtrado se produce una espuma gruesa, compuesta probablemente por una emulsión de aire, azúcar y proteínas. En términos de operación se deberá considerar para la recepción de jugo estos dos aspectos: un exceso de espuma que no se debe perder y definir una estrategia para medir los niveles o altura de líquidos para determinar el volumen producido.

Durante la fermentación también se produce un gran exceso de espuma, particularmente al comienzo de ésta; el volumen producido es significativo de manera que se debe considerar esto al dimensionar un estanque o reactor de fermentación.

El jugo de remolacha tiene un densidad de alrededor de 1,06 g/cc, esta densidad puede ser limitante para el desarrollo de las levaduras, es decir está en el límite para convertirse en un medio hiperosmótico, el que puede dañar la estructura celular de las levaduras.

Si bien hay cepas de levaduras alcoholeras que soportan esta densidad, se prefiere trabajar con una densidad menor que asegure el buen funcionamiento de las cepas de levadura que se usan en planta, que corresponde a levaduras de pan.

Es evidente que fermentar un jugo de mayor densidad permitirá obtener una cerveza mucho más alcohólica que se traduce en una destilación más eficiente, sin embargo hay que tener presente que levaduras normales bajan su rendimiento en presencia de mucho alcohol. Es por esto que se trabajó a densidad de 1,04 g/cc, la que se obtuvo por dilución del jugo inicial con agua (jugo :agua /70:30).

La materia seca de la pulpa fue en promedio de 22,8%, mientras que la coseta presentó un porcentaje de 24,8% MS. El rendimiento al filtro de prensa fue de 50,5%, es decir de 829 kg procesados se obtuvieron 417 l de jugo (filtrado)

El azúcar inicial medido fue en promedio de 187 g/l (más de tres veces lo medido en brásicas), mientras que la densidad llevada a fermentación fue de 1,044 g/l. Luego de la fermentación se obtuvo una cerveza de 5,3° v/v de etanol y una densidad de 0,999 g/l.

El proceso de destilación no presentó mayores dificultades y se asemejó a lo ya realizado con las cervezas de nabo. Se procesaron 662 l de cerveza de remolacha, con 5,29° de etanol en promedio, obteniéndose 37,9 l de bioetanol con un 81% de pureza en la primera destilación.



## **CAPITULO 5**

### **PRODUCCIÓN ANIMAL A PARTIR DE CULTIVOS DE BRASSICAS FORRAJERAS Y USO DE SUBPRODUCTOS**

Christian Hepp, Cristian Fernández y Carlos Barra

#### **ANTECEDENTES GENERALES**

La Región de Aysén es considerada tradicionalmente una zona de crianza, ya que las posibilidades de engorda de ganado eran habitualmente muy limitadas, por la predominancia de praderas de bajo rendimiento y deficiente valor nutritivo. Sólo sistemas relativamente extensivos eran utilizados, con bajas cargas animales y descarga habitual al destete. Ello ha ido evolucionando, especialmente en la última década, con el mejoramiento sostenido de la fertilidad de suelos de diferentes zonas de gran potencial y la incorporación de praderas mejoradas. El aumento del cultivo de la alfalfa y algunos cultivos forrajeros como avena y cebada también han aportado a ello, pero especialmente el mejoramiento de praderas, que son de mayor producción y mejor valor nutricional, al incorporar especies de mejor calidad.

La incorporación de las brassicas forrajeras ha sido el paso más reciente hacia un mejoramiento de los sistemas ganaderos de la región, con lo que muchos predios pueden finalizar su ganado y comercializarlo como producto final.

Las brassicas forrajeras de raíz, específicamente nabos forrajeros y rutabagas, han demostrado ser una fuente importante en calidad y valor nutritivo para ser consumida por bovinos en crecimiento. Su uso estratégico invernal debe ser evaluado con diferentes categorías animales para conocer las posibilidades de uso por parte del sector productivo y evaluar las metas productivas que son factibles de lograr en condiciones de campo en la Patagonia en invierno.

## EXPERIENCIAS DE PASTOREO DE BRASSICAS FORRAJERAS

La forma tradicional de utilización de las brassicas forrajeras en sistemas ganaderos es a través del pastoreo directo. En la Región de Aysén, donde las condiciones climáticas limitan absolutamente el crecimiento de las praderas por períodos de 5-7 meses, según la zona, el uso de BF es una alternativa para enfrentar dichos períodos críticos. Estas plantas permiten tener forraje disponible en cantidad suficiente y con elevada calidad, que además el ganado puede aprovechar en forma directa en pastoreo.

En los últimos años se realizaron diferentes experiencias para evaluar la utilización de BF y la producción animal factible de obtenerse de ellas. Para ello se evaluaron sistemas de de recría-engorda con novillos y terneros. Junto a ello se evaluó el uso de coseta (subproducto de la planta piloto) y su efecto en el crecimiento de novillos y terneros en crecimiento en condiciones de estabulación.

### Utilización de brassicas forrajeras con novillos de engorda y terneros de recría durante la fase invernal en la zona Intermedia de Aysén.

En un experimento se evaluó el uso de tres brassicas forrajeras de raíz en la etapa de engorda de novillos y recría de terneros como recurso invernal, en condiciones de campo. Los animales recibieron suplementación parcial de su dieta con heno de alfalfa, pero las brassicas representaba entre el 50-60% de la composición de dieta.

	Terneros			Novillos		
	G Globe	Rutabaga	Rival	G Globe	Rutabaga	Rival
Fecha inicio	22-jun			22-jun		
Fecha término	19-ago			19-ago		
Peso inicial	233	239	232	406	409	405
peso final	267	262	253	455	443	442
kg ganados	34	23	21	49	34	37
Días	58	58	58	58	58	58
kg/d	0,586	0,397	0,362	0,845	0,586	0,638

CUADRO 5.1 Peso vivo de novillos y terneros en pastoreo invernal de tres brassicas forrajeras.

INIA Tamei Aike, 2011.

Como se aprecia en el cuadro 5.1, la mejor respuesta, tanto en novillos como terneros se produjo con nabo forrajero Green Globe, seguido por rutabaga. El nabo Rival, probablemente por su mayor precocidad no tuvo en este caso la capacidad de invernar de forma tan adecuada como las otras dos, que son de comportamiento más tardío. Las ganancias en novillos, de sobre 800 g/d son adecuadas para sistemas de engorda invernal y permiten manejar las estrategias de salida a mercado del ganado en forma más cómoda y planificada.

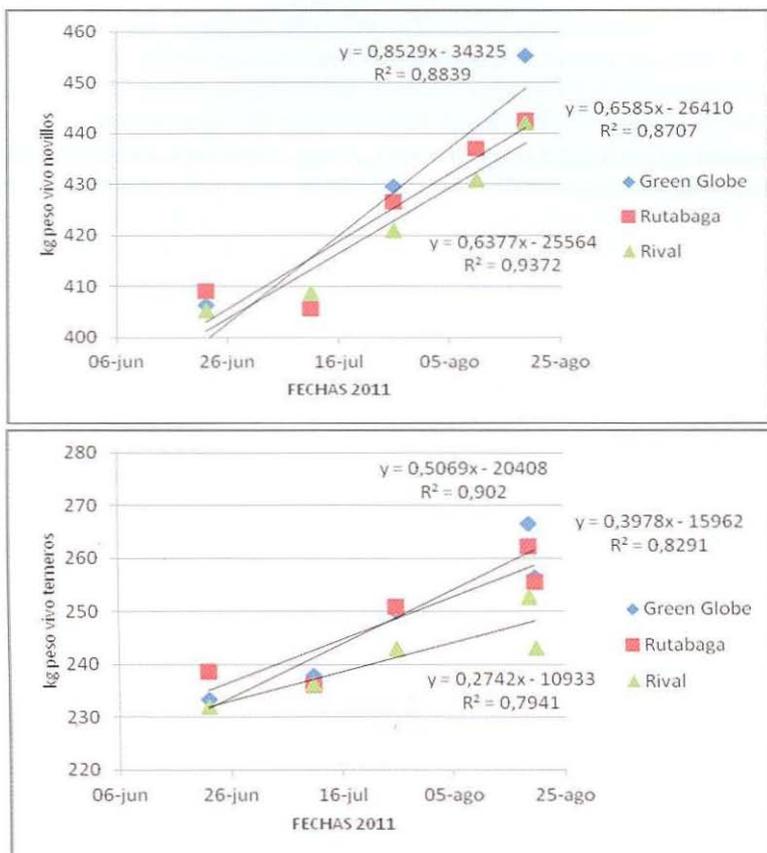


FIGURA 5.1 Evolución del peso vivo de novillos (arriba) y terneros (abajo) con tres alternativas de brassicas forrajeras en pastoreo invernal. INIA Tamel Aike, 2011.

En terneros se observaron ganancias diarias de sobre 500 g/d, lo que permite criar los animales y lograr pesos de salida de invierno mayores, para programar recrias a pastoreo con término anticipado al lograrse antes el objetivo de peso de faena (Figura 5.1).

## **Respuesta animal al uso de diferentes brassicas forrajeras de raíz y hoja**

Para evaluar diferentes especies de brassicas forrajeras (tanto de hoja como de raíz), se realizó una experiencia sometiendo cinco cultivos diferentes a pastoreo con novillos en crecimiento durante el verano y otoño (enero a junio).

En cuanto a la biomasa de hojas, se apreció una caída sostenida desde fines del verano, donde se registran los valores más altos (9 t MS/ha en nabo Green Globe; cerca de 7,5 t en rutabaga Dominion; 6,7 t en raps Winfred; alrededor de 6 t en nabo Rival y 5,2 t en raps Goliath). Ellos descendieron a una disponibilidad de hojas de p.ej. 1 t MS/ha (raps Goliath) y cerca de 3 t MS/ha en el caso de rutabaga Dominion. Una situación opuesta se observó en cuanto al desarrollo de la biomasa de tallos y raíces. Se produjo una acumulación de biomasa de tallos y raíces hasta aproximadamente principios del mes de mayo (cerca de 12 t MS/ha en rutabaga; 10 t en raps Winfred; y 6-9 t en el resto). Con posterioridad a mayo, la biomasa presente en tallos y raíces tendió a disminuir.

Un aspecto interesante de analizar fué la relación tallo : hoja (o raíz) en los diferentes cultivos, donde se verificaron inicialmente niveles muy bajos (cerca de cero, o sea mucha hoja y poco tallo o raíz). Con el avance de la temporada, la relación empieza a aumentar, lo que es una situación natural en las plantas que van ingresando al invierno. El crecimiento es más lento y las hojas muchas veces resisten menos las condiciones de bajas temperaturas de la época y van entrando en procesos de senescencia acelerada. Con ello se pierden como recurso forrajero y va aumentando la proporción de tallos y raíces presentes (Figura 5.2).

Otra variable interesante de considerar en este tipo de cultivos, tanto desde un punto de vista de producción animal, pero también del potencial uso como biocombustible en el caso de los cultivos de raíz, es el contenido de materia seca. Durante gran parte de la temporada, los contenidos de materia seca de las fracciones de hojas y raíces no tienen variaciones demasiado significativas. En el primer caso, las hojas varían entre 10 a 16% de MS, mientras que en las raíces, en el caso de las rutabagas, inician la temporada con 7-12% MS, mientras que los nabos forrajeros presentan entre 5-9% MS. Hacia el final de la temporada (junio), las raíces fluctúan entre 5-7% normalmente.

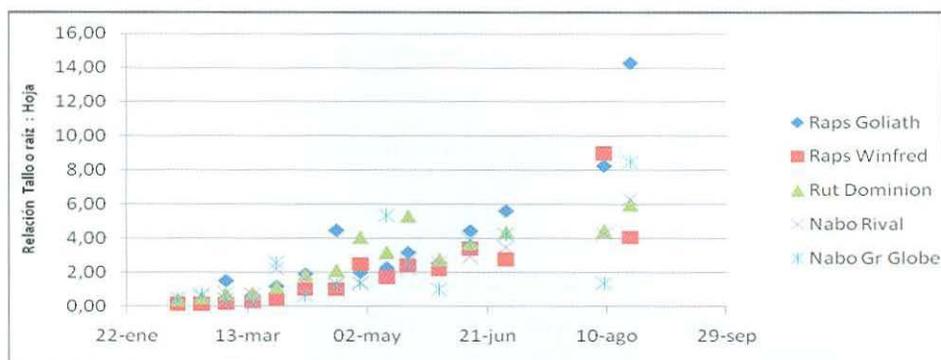


FIGURA 5.2. Evolución de la relación tallos (o raíz) : hojas en la biomasa de cinco cultivos de brassicas forrajeras durante el verano-otoño e invierno 2010 en la Zona Intermedia de Aysén (Tamel Aike, 2010).

La dieta que recibieron los animales en este caso fue principalmente cada una de la brásica forrajera ofrecida, ya que el consumo de forraje fibroso fue muy bajo. Los animales recibían diariamente una franja fresca de cultivo para consumir, y su ancho era regulado de acuerdo al consumo observado. El material sobrante era consumido posteriormente por otra categoría de animales adultos (vacas).

El cuadro 5.2 muestra los niveles de utilización que se lograron en los diferentes tratamientos con el uso de pastoreo en franjas. En general, el consumo de hojas fue bastante completo, con niveles de sobre 90% en ambos nabos (cv Green Globe y cv Rival) y raps cv Goliath. Para rutabaga y raps cv Winfred, fue algo inferior, cercano al 80% de utilización (es decir, residuos de 20% en hojas).

En el caso de raíces, la utilización promedio de los cultivos fue muy inferior, desde 62% en nabo Green Globe, 47% en nabo cv Rival y 43% en rutabaga Dominion. En algunos casos, los bajos niveles de utilización se ligan a la presencia de plantas vernalizadas, donde la presencia del tallo floral hace bajar significativamente la palatabilidad del cultivo y aumenta la dificultad de consumo.

En promedio, para el total del cultivo, la utilización fue de entre 70 y 80% en el caso de los nabos forrajeros, de 50-55% en rutabaga y raps. Debe indicarse que en engorda de novillos no es posible llegar a niveles de utilización demasiado altos en tallos y raíces, sobre todo si no hay otros suplementos alimenticios, ya que se resiente la tasa de crecimiento.

	Cuociente de utilización promedio				
	Rutabaga Dominion	Nabo Green Globe	Raps Goliath	Nabo Rival	Raps Winfred
Hojas	0,79	0,95	0,91	0,96	0,82
Tallo o raíz	0,43	0,62	0,31	0,47	0,32
Total planta	0,55	0,80	0,49	0,72	0,53

Cuociente = Residuo versus disponibilidad.

CUADRO 5.2. Cuociente promedio de utilización de brassicas forrajeras en pastoreo con novillos durante el periodo verano-otoño, en la Zona Intermedia de Aysén (Tamel Aike, 2010).

La figura 5.3 muestra la evolución de pesos vivos desde el verano hasta fines de otoño (junio). En general se observan curvas de crecimiento animal muy similares y prácticamente lineales durante el experimento. Las tasas de crecimiento promedio para todo el período experimental variaron desde 837 g/d en rutabaga hasta 961 g/d con nabo cv Green Globe. En todos los casos se trata de tasas de crecimiento adecuadas para esta época del año, que habitualmente sólo se consiguen con forrajes de alta calidad y uso eventual de concentrados. Si se tiene en cuenta de que estos cultivos estaban en algunos casos parcialmente vernalizados y su calidad probablemente no era óptima, es posible estimar mejores desempeños en condiciones más cercanas a ideal.

Es posible señalar que el uso de brassicas forrajeras como pastoreo invernal es una alternativa cierta en sistemas bovinos de carne de la Patagonia que permite manejar las estrategias de producción en base a los objetivos de mercado. Es necesario continuar estudios en este sentido y evaluar económicamente las alternativas.

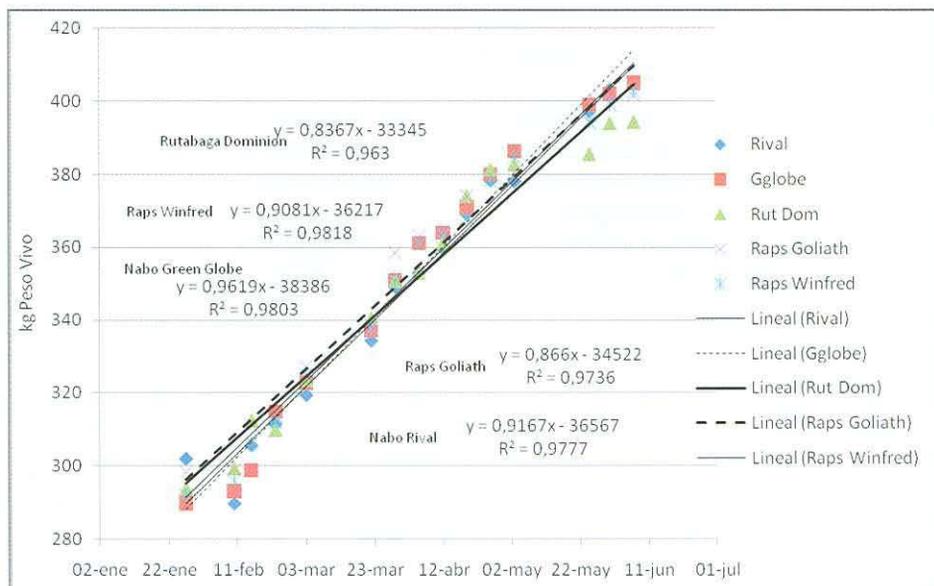


FIGURA 5.3 Evolución del peso vivo de novillos (kg) alimentados con diferentes brassicas forrajeras durante el período verano-otoño en la Zona Intermedia de Aysén (Tamel Aike, 2010).

### Suplementación invernala de novillos de carne con utilización de coseta de brassicas forrajeras.

La coseta de brassicas forrajeras es un subproducto de la generación de bioetanol en la planta de procesamiento. Este material fresco se produce en forma periódica y por su composición nutricional (energía metabolizable de 2,8-3 Mcal/kg MS; proteína cruda de al menos 12%; digestibilidad de 85-9%) es interesante de considerar en la alimentación invernala de rumiantes, como es el caso de la engorda y recría de bovinos de carne. Se genera en el proceso de molienda y posterior prensado y filtrado de la pulpa. Una vez separada la fracción líquida, queda la coseta fresca en las placas del filtro-prensa, material que tiene un contenido de materia seca que en promedio es de un 13% y que puede ser suministrado como suplemento en dietas animales.

En varios estudios realizados en el marco del proyecto de generación de bioetanol, se evaluó el uso de coseta de nabo forrajero en alimentación de rumiantes, como también la determinación de variables bromatológicas en coseta fresca de nabo forrajero.

En uno de ellos se compararon novillos de engorda alimentados con ensilaje de pradera mixta *ad libitum* con novillos alimentados con dos niveles de coseta (6 y 12 kg de coseta

húmeda) más ensilaje *ad libitum*. El ensilaje de pradera mixta provenía de una pradera dominada por pasto ovillo, trébol rosado y trébol blanco.

Se observaron en los tres casos tasas de crecimiento relativamente altas y similares, de sobre 850 g/d, que para el período invernal en estas condiciones son destacables. En los 120 días de experimento, parece haberse logrado una mayor tasa de crecimiento de los novillos (cerca de 1 kg/d) y peso final (417 kg en promedio) en el grupo con coseta “baja”, mientras que los tratamientos sin coseta y con coseta alta tuvieron comportamiento similar (Figura 5.4).

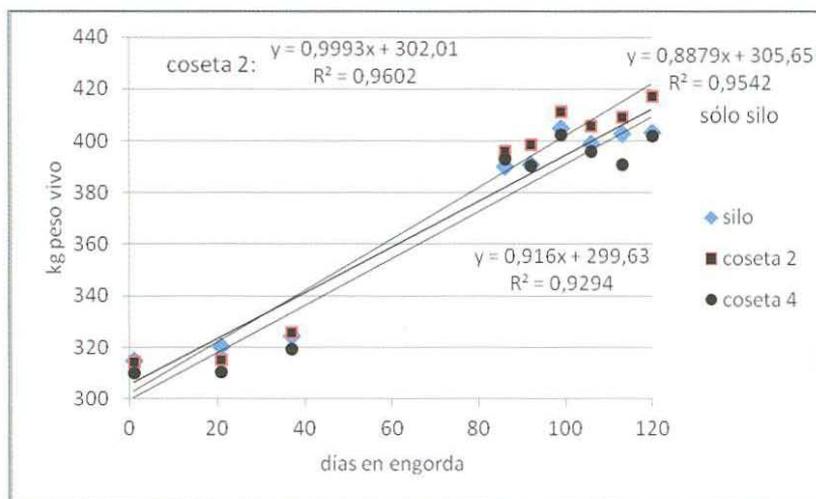


FIGURA 5.4. Evolución del peso vivo de novillos y ganancia de peso observada con y sin uso de coseta de nabo forrajero en la dieta. Coseta 2 = 6 kg/d; coseta 4 = 12 kg coseta húmeda/d. INIA Tamel Aike, 2011.

Como conclusión preliminar, se puede señalar que el uso de coseta como suplemento en alimentación de novillos es factible, aunque debe estudiarse en mayor profundidad su inclusión una vez determinado los parámetros bromatológicos de la misma. Se logra altos niveles de crecimiento en novillos al suplementar ensilaje de buena calidad con coseta húmeda.

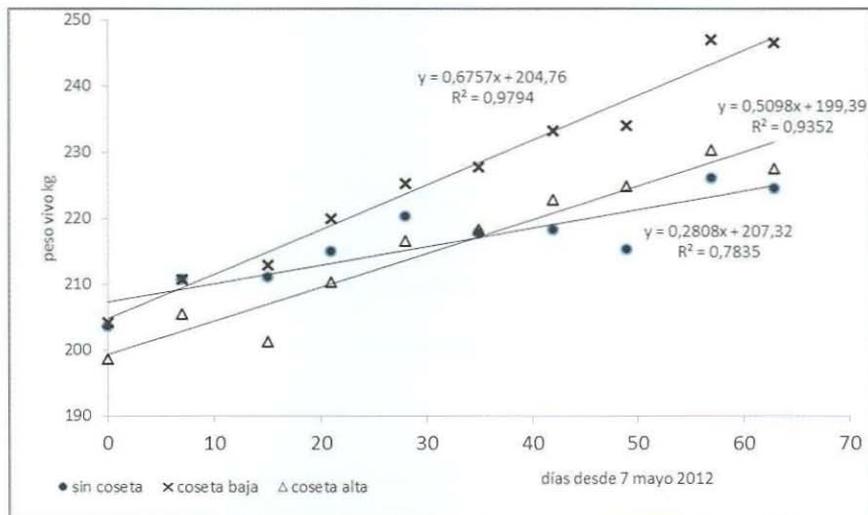


FIGURA 5.5 Crecimiento de terneros alimentados con heno de alfalfa y diferentes niveles de coseta de nabo forrajero durante parte del invierno. Sin coseta = sólo heno de alfalfa; coseta baja = 25% de dieta; coseta alta = 50% dieta. INIA Tamel Aike, 2012.

De forma similar a lo realizado con novillos, en la figura 5.5 se resume la respuesta observada en crecimiento de terneros alimentados parcialmente con coseta procedente del proceso de la planta de elaboración de bioetanol. El material utilizado fue en estado fresco, con un 10-13% de materia seca, y un promedio de 3 Mcal/kg MS; 32,8% FDN; 90,6% digestibilidad in vitro; y 12,5% de proteína cruda. La coseta se probó en niveles aproximados de 0, 25% y 50% de la dieta diaria, complementado con heno de alfalfa. Los resultados indicaron que es factible su uso, y se obtuvieron los mejores resultados con niveles de inclusión de 25%, que alcanzó ganancias diarias promedio de 675 g/d en comparación a 510 g/d en terneros con 50% en la dieta y sólo 281 g/d en aquellos alimentados sólo con heno de alfalfa.



## CAPITULO 6

### **PROPUESTA DE MODELO LOCAL DE DESARROLLO BASADO EN BRASSICAS PARA USO FORRAJERO Y CO-GENERACIÓN DE BIOETANOL**

Christian Hepp K.

El proyecto de desarrollo de energía alternativa, basado en un biocombustible de origen vegetal, constituye un desafío de integración de diferentes sectores, en un plan de desarrollo territorial. La base territorial en este caso es un aspecto relevante, ya que el modelo propuesto es de pequeña escala, tendiente a impactar en una localidad particular, más que ofrecer soluciones de amplia cobertura. Se trata de buscar alternativas de diversificación de la matriz energética de una localidad, en este caso de una zona extrema en la Patagonia Chilena (Aysén).

#### **ANTECEDENTES GENERALES**

Chile es un país casi 100% dependiente de la importación de petróleo, en todos sus componentes, particularmente en lo que a combustibles líquidos se refiere. Estos combustibles líquidos son vitales para diferentes sectores de la economía, en especial el área de transporte. Muchos países han avanzado en la búsqueda de combustibles alternativos, que puedan complementar e incluso reemplazar a aquellos derivados del petróleo (diésel, gasolina). En este sentido, se han explorado soluciones que involucran a los biocombustibles líquidos, principalmente bioetanol y biodiésel.

Brasil es el país latinoamericano que más tempranamente empezó a incorporar biocombustibles en su matriz energética, logrando desarrollos de avanzada y que son reconocidos a nivel mundial, en base a caña de azúcar y más recientemente la soya. Estados Unidos ha incorporado masivamente el bioetanol a partir de maíz, mientras que la Unión Europea utiliza diferentes proporciones de bioetanol o biodiésel en sus combustibles líquidos. Muchos otros países latinoamericanos han seguido esta vía y presentan buenos niveles de desarrollo en este ámbito. Chile es probablemente uno de los países más atrasados en este sentido, con muy escasas iniciativas en proceso y un uso prácticamente nulo de biocombustibles en forma masiva.

Los biocombustibles de primera generación, es decir aquellos que se producen a partir de azúcares disponibles en ciertas plantas de uso agrícola, están en muchos casos siendo complementados por los de segunda generación, que se producen con materiales lignocelulósicos (residuos forestales, basuras, etc.).

Uno de los aspectos más cuestionados en la producción de biocombustibles, sobre todo en los de primera generación, es que ocupan suelos y/o cultivos que eventualmente son o pueden ser utilizados para producir alimento para los humanos. Ello generaría una suerte de competencia entre el bioetanol o biodiésel producido con alimentos como azúcar (de caña o remolacha), aceite (de raps o de soya), trigo (para producir harina y pan), maíz (para producir harinas o alimentos para aves y cerdos), etc. Esta situación ha impulsado a que el desarrollo se centre más bien en biocombustibles de segunda generación, ya que éstos usan como materias primas los residuos de la industria forestal, la agroindustria, ciertos tipos de basuras, etc.

Chile tiene una superficie agropecuaria muy limitada, con una escasa proporción de ella con suelos arables. Además, estos escasos suelos están situados principalmente en zonas agroclimáticas con climas privilegiados y de alto potencial de producción hortofrutícola de exportación. En estos sitios, el uso de suelos para biocombustibles tiene un costo alternativo demasiado alto, lo que lo hace inviable.

No obstante, en ciertas partes del país, esta situación es diferente. Se trata de zonas más marginales, con suelos y climas con bajas alternativas productivas, habitualmente con baja productividad actual, pero factibles de mejorar. La incorporación de una fracción muy limitada de estos suelos en sistemas intensivos puede llevar a un doble beneficio: aumentar fuertemente la producción de alimentos (praderas y cultivos forrajeros de calidad para generar más carne bovina y ovina) además de co-generar un biocombustible para uso local. Algunas zonas de la Patagonia Occidental, particularmente Aysén, caen en esta categoría.

### **Por qué en la Patagonia**

Hay una multiplicidad de factores que hacen interesante explorar alternativas energéticas para zonas más aisladas y marginales, como la Región de Aysén. Esta zona, de forma similar como ocurre en otros lugares, presenta un proceso de migración de los sectores rurales a los centros urbanos, lo que tiene connotaciones muy serias en el mediano plazo, con un envejecimiento de la población rural y despoblamiento acelerado de zonas estratégicas, donde la soberanía es un factor a considerar. La rentabilidad de los rubros tradicionales (bovino de carne, ovino) es limitada, aunque ha mejorado en los últimos años. El mejoramiento de la calidad de vida rural es una forma de detener estos flujos migratorios. Existe una escasa diversificación productiva, ya que las condiciones de clima y suelo no permiten

la multiplicidad de alternativas que existen en el sector agropecuario de p.ej. la Zona Central de Chile. Por este motivo, el costo alternativo no es un factor tan relevante como en otras zonas del país.

Aysén es también una zona de alta sensibilidad ambiental, donde se consideran factores de pureza ambiental y conceptos como *Patagonia limpia* o *Reserva de Vida*. Ciertas problemáticas, como la alta contaminación atmosférica en ciudades y pueblos, producto de la quema de leña de baja calidad, hacen interesante el explorar fuentes alternativas y más limpias para calefaccionar. El bioetanol es un combustible de baja huella de carbono, al provenir de procesos absolutamente renovables, como la fotosíntesis que ocurre en las plantas.

La región se caracteriza además por su baja población, algo superior a 100.000 habitantes, situación que hace muy abordable un modelo de tipo local, que además puede ser de alto impacto, al llegar a la mayoría de la población. Una zona aislada, con un parque automotriz acotado, con una población concentrada en pocos centros urbanos, puede ajustarse a soluciones locales de alto impacto.

Otro aspecto a considerar es el costo de los combustibles fósiles, los cuales son significativamente más caros en esta región, lo que favorece eventuales comparaciones con los biocombustibles. La incorporación de combustibles de generación local, además de aportar una menor contaminación al ambiente, debieran significar un costo menor. Ello en muchas partes del mundo debe ser apoyado con subsidios, de modo de lograr la incorporación de ellos a la matriz. En este sentido, es necesario incorporar factores de costos ambientales y sociales, que pueden dar factibilidad a un proyecto de este tipo.

En la zona, durante años el INIA ha estudiado diferentes alternativas para los sistemas productivos existentes. En muchos casos se han detectado altos potenciales productivos en varios cultivos, algunos de ellos factibles de incorporar en sistemas mixtos de producción energética.

El modelo que se propone, busca conjugar la ganadería pratense (basada en praderas y cultivos forrajeros) con una actividad industrial nueva, como es la planta de generación de bioetanol. Se busca que esta unión sea beneficiosa para ambos sectores, además de vincularse con el sector urbano en la utilización del combustible.

Las soluciones o alternativas difieren según los territorios y sus realidades y la aplicación de un modelo de este tipo debe ser evaluado a la luz de las características propias de cada lugar.

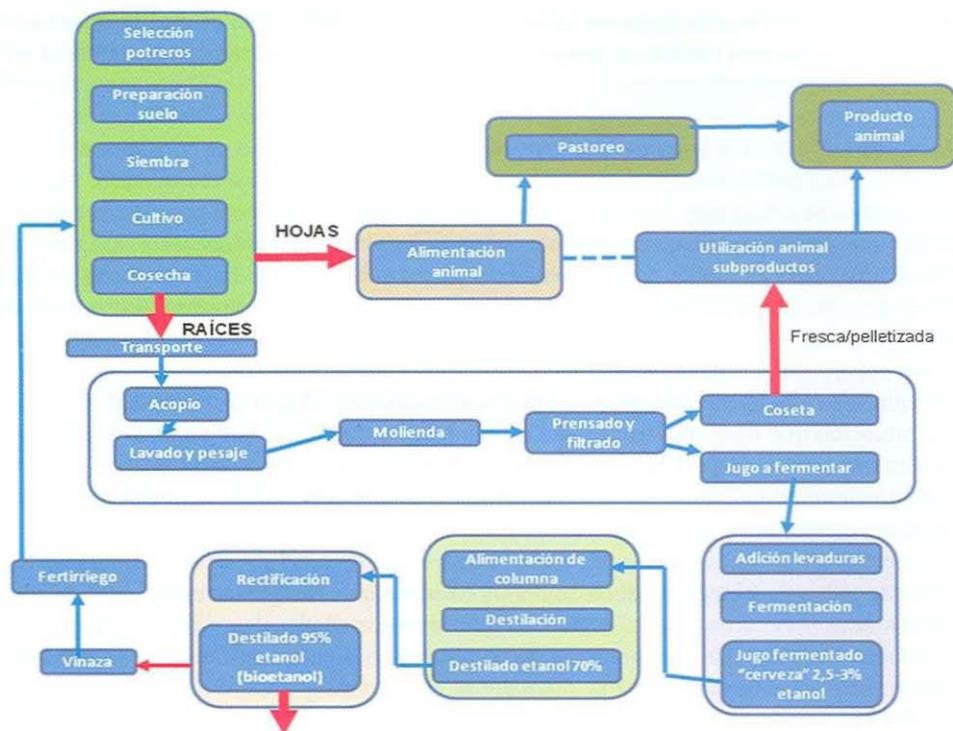


FIGURA 6.1 Esquema del modelo de desarrollo local que combina el uso de cultivos forrajeros con fines ganaderos y producción de bioetanol.

## DISEÑO DEL MODELO PRODUCTIVO

En base a la información entregada en los capítulos anteriores, se ha generado un modelo de desarrollo local. Lo interesante de este modelo es que se valida con información generada en la misma localidad donde se podría aplicar. Está sustentado en la información producida experimentalmente por el INIA en la zona, lo que hace menores los factores de riesgo que puedan considerarse.

La figura 6.1 resume el modelo y los flujos que se producen en cada una de sus fases y etapas. En ella se describen todas las etapas ya explicadas en los capítulos precedentes, integrándolas en dos grandes sectores interdependientes, representados por la ganadería y la planta industrial.

A nivel de los predios ganaderos, la producción de los cultivos de brassicas forrajeras genera la materia prima, la que se desglosa en diferentes fracciones, las que se grafican en la figura 6.2.

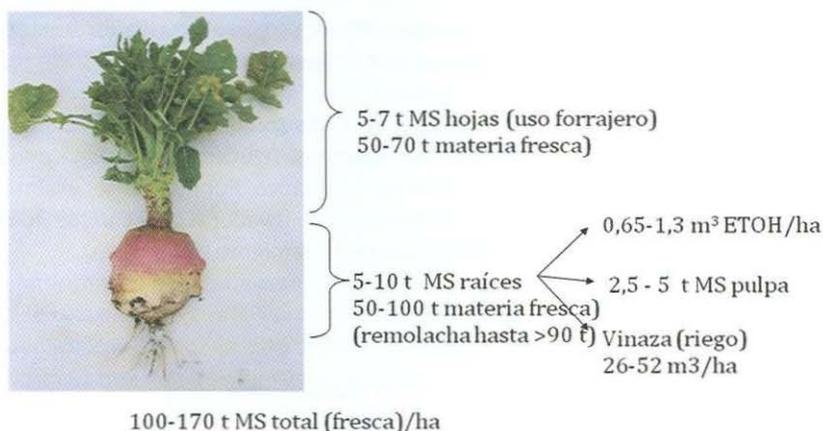
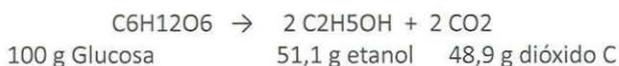


FIGURA 6.2. Partición de la producción de una planta de brassica forrajera para uso mixto en producción de bioetanol y consumo animal.

Como se ha señalado, las raíces llegan a la planta de proceso, donde se inician los procesos industriales. El jugo que se obtiene del proceso primario de nabos y rutabagas es de baja concentración de sólidos, de aproximadamente 3%. El contenido promedio de azúcares solubles está en el orden de 40-45 g/l, medido del efluente del filtro de prensa. En comparación a lo anterior, la remolacha tiene valores habituales de 120-140 g/l en azúcares. El contenido de materia seca de las raíces de nabo/rutabaga bordea el 10-12%, mientras que la coseta obtenida está en un 12-13%.

La materia seca de las raíces es muy baja, con la consiguiente carga de agua muy elevada en los reactores de fermentación, frente a pequeñas concentraciones de azúcares solubles. La alta cantidad de agua en la materia prima eleva los requerimientos de energía y los costos de algunos químicos que deben usarse en el proceso. Sin embargo, la tasa de conversión de azúcares a etanol es habitualmente muy alta en estos casos en que la materia seca es baja.

La ecuación química de la fermentación alcohólica de la glucosa es:



El rendimiento teórico de etanol a partir de glucosa es de 0,51 g ETOH/g glucosa. Como las levaduras utilizan algo de azúcar en el proceso, el rendimiento en la práctica es más cercano a 0,49 g ETOH/ g glucosa.

La levadura puede consumir también fructosa, sin embargo su tasa de fermentación es más lenta que en el caso de glucosa, como se puede apreciar en la figura 6.3

Los carbohidratos contenidos en las raíces son azúcares solubles, almidón y fibras de celulosa. Los primeros son consumidos por las levaduras. Azúcares de cadena más larga, como la rafinosa pudiera requerir de tratamiento enzimático. Por otra parte, el almidón es fácilmente transformado a azúcar para tratamiento con levaduras. La celulosa podría ser transformada parcial o totalmente a glucosa por un tratamiento enzimático.

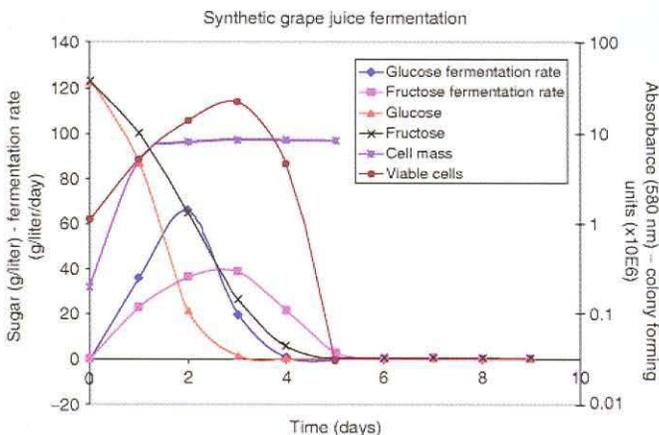


FIGURA 6.3. Cinética de la fermentación de glucosa y fructosa  
Fuente: Bisson, et al (2007)

Considerando 100 kg de raíces de nabo o rutabaga, con un 12% de materia seca, con un contenido de 50% de azúcares solubles y un rendimiento teórico de 0,49 g ETOH/g glucosa, además de una densidad del etanol de 0,789 kg/l, se tiene que:  $100 * 0,12 * 0,50 * 0,49 / 0,789 = 3,73$  l de ETOH (100%)/100 kg materia prima. Sin embargo hay que aplicar aún un factor de rendimiento del proceso, habitualmente del orden de 85%, lo que implica un rendimiento efectivo de 3,17 l ETOH/100 kg materia prima. Este es un rendimiento potencial, por lo que el rendimiento real será seguramente más bajo, probablemente entre 2-3 l ETOH/100 kg materia prima (raíces frescas). Con un rendimiento promedio de 7.000 kg de raíces/ha, con un 12% de materia seca, se tiene un total de 58.300 kg de raíces frescas. Con los rendimientos anteriores se podría optar a 1.166 - 1.749 litros de ETOH (bioetanol)

por hectárea. Ello podría ser menos si los rendimientos de materia prima son menores o incrementarse algo si éstos son superiores.

Este rendimiento es comparativamente bajo, en relación a otras fuentes de uso habitual en los sistemas bioenergéticos, ya que el contenido de azúcares y materia seca es menor y éste se encuentra diluido en una gran cantidad de agua. El proceso generará una gran cantidad de vinaza y agua residual, la que deberá ser tratada, debido a su demanda bioquímica de oxígeno.

## **ASPECTOS ECONÓMICOS**

Toda la información generada en el proyecto se ha utilizado para alimentar el modelo productivo, lo que permite dimensionarlo en términos físicos, pero también muy importante, en lo económico. En este sentido, las evaluaciones han indicado que hay algunos puntos críticos que influyen fuertemente en los resultados finales, que son:

- Especie utilizada (brassica o remolacha)
- Contenido de azúcares solubles
- Rendimiento del cultivo (específicamente de raíces)
- Contenido de materia seca de las raíces
- Costo de traslado de materia prima (alto % agua)
- Real vinculación con la ganadería (producto animal)

### **Importancia del cultivo**

En capítulos anteriores ha quedado de manifiesto que las brassicas forrajeras, nabo y rutabaga, si bien presentan factibilidad para generar bioetanol, son superadas por la remolacha, que contiene mayor concentración de azúcares solubles. Esta realidad hace que esta última especie alcance rendimientos muy superiores de alcohol por unidad de superficie.

Al margen de lo anterior, en cualquier especie, el rendimiento será un componente muy relevante de la producción, ya que en último término será lo que determine la cantidad de azúcares por hectárea que irán a la planta de procesamiento. En el cuadro 6.1 se resume un ejemplo con tres niveles de rendimiento (bajo-normal-alto) en nabo forrajero y las variaciones en la producción final de alcohol y subproductos.

Se observa en dicho cuadro que el rendimiento es más sensible a nivel de las raíces, con una variación de hasta un 100% entre el cultivo de bajo y alto rendimiento. Esta situación implica variaciones similares en pulpa o coseta y en bioetanol. Es decir, se podrá alimentar

el doble de animales y obtener el doble de combustible a partir de un cultivo de alto rendimiento en relación a uno de baja producción de raíces. Lo anterior sin duda que tiene connotaciones económicas, ya que los costos de establecimiento de ambos cultivos no necesariamente son diferentes, los costos de cosecha son proporcionalmente más caros en cultivos de bajo rendimiento, e

		Producción cultivo		
		bajo	normal	Alto
Raíces	kg MS	4.800	7.000	9.600
Hojas	kg MS	7.200	7.000	6.400
Pulpa	kg MS	2.522	3.678	5.045
Filtrado	Litros	29.298	42.726	58.596
Fermentado (2,7+%)	Litros	27.107	39.532	54.215
Bioetanol 70%	Litros	908	1.325	1.817
Bioetanol 96%	Litros	650	948	1.300

CUADRO 6.1. Desglose del cultivo de nabos forrajeros en sus partes anatómicas y los productos obtenidos a partir de la producción de 1 ha en la planta de procesamiento, con tres escenarios de rendimiento.

Los rendimientos de bioetanol indicados en el cuadro 6.1 son menores a los que se pueden obtener teóricamente con nabo, según se calculó anteriormente (sobre 1.700 l ETOH/ha), ya que en este caso se utilizaron factores más conservadores en cuanto al contenido de materia seca de la materia prima y pérdidas del proceso.

### Importancia de la producción animal

El componente de producción animal es muy relevante en el resultado económico final, ya que el uso de subproductos del cultivo, como hojas y cosetas, además de otros que pudieran a futuro derivarse de las vinazas, se traduce en producción de carne bovina u ovina, aspecto que debe ser evaluado.

El cuadro 6.2 muestra, nuevamente para tres escenarios de rendimiento del cultivo, la producción de materia seca por hectárea en términos de hojas y coseta (pulpa). En este caso, se asume que los animales consumen hasta un 50% de su dieta diaria en base a estos

alimentos (considera novillos de engorda de peso aproximado 380 kg, con una ganancia de peso promedio de 800 g/d). En esas condiciones, el forraje y coseta disponibles alcanza para alimentar entre 10-12 novillos por un período de 180 días, que equivale al período de suplementación invernal completo. En ese período se pueden producir del orden de 1.500 a más de 1.700 kg de peso vivo por hectárea.

		Rendimiento cultivo		
		Bajo	normal	alto
Forraje (hojas + pulpa)	kg MS/ha	9.722	10.678	11.445
Consumo para 0,8 kg/d ganancia de peso	kg MS/d	5,25	5,25	5,25
Días alimentación	D	1.852	2.034	2.180
N° animales/ha	n/180 d	10,3	11,3	12,1
kg peso vivo ganado/ha	kg /180 d	1.481	1.627	1.744

CUADRO 6.2 Producto animal (aumento de peso vivo de novillos de carne) por hectárea posible de obtener del forraje residual (hojas) en un cultivo de nabo forrajero y la coseta equivalente producida en la planta industrial. Tres escenarios de rendimiento del cultivo.

La valorización del producto animal es fundamental a la hora de evaluar factibilidad de un emprendimiento de este tipo. Cabe destacar que este producto animal no incluye la fracción radicular del cultivo, la que se destina integralmente a la producción de bioetanol y sólo retorna parcialmente al predio a través de la producción de coseta.

En algunos países, se procesan también las vinazas para obtener alimentos animales adicionales. Se deshidratan hasta obtener un material de un 8% de materia seca aproximadamente, que es rico en proteína y fibras, utilizable en dietas de cerdos. Habitualmente debe ser consumido dentro de un período de 1 semana, para evitar su descomposición.

Otra opción es la deshidratación más completa de las vinazas, hasta alcanzar niveles de 88% de materia seca, obteniéndose un alimento suplementario animal seco. Este proceso requiere de inversiones adicionales y energía para unidades de evaporación, lo que lo justifica si existe energía barata o excedente. Este alimento puede ser transportado y almacenado con facilidad y es un producto de mayor valor agregado. Otra opción en el uso de las vinazas es la producción de biogás en digestores anaeróbicos.

## **Comparación de sistemas productivos**

En la evaluación económica de esta tecnología se consideraron cuatro diferentes escenarios, los que pueden eventualmente coexistir. Se compararon cuatro sistemas productivos (cuadro 6.3), que son:

- Cultivo de brassicas forrajeras como suplemento exclusivamente para producción animal (engorda de novillos en este caso). No hay cosecha de raíces que se destinen para otro fin (Sistema Ganadero). Este sistema ya se desarrolla en la actualidad en la región de Aysén y ha estado ganando adeptos en forma creciente, ya que los cultivos suplen deficiencias nutricionales del ganado en períodos críticos de otoño e invierno. Este sistema tiene un margen bruto que varía ampliamente (M\$ 61-706/ha), dependiendo del rendimiento del cultivo. Como el costo de establecimiento del cultivo es un componente importante del costo total, si el rendimiento es alto, obviamente el costo unitario del kg de materia seca producido es muy inferior e impacta positivamente al resultado final. Este balance positivo y la factibilidad de obtener rendimientos medios a altos ha potenciado el uso de estos cultivos en la región, junto al uso estratégico en período crítico.
- Cultivo de brassicas forrajeras con fines bioenergéticos (Sistema mixto A). En este caso, el cultivo se cosecha y el 100% de las raíces van a la planta de proceso. Las hojas son utilizadas en alimentación animal, junto con la coseta húmeda, que vuelve para ser consumida directamente por el ganado. En este sistema, los márgenes brutos son negativos (varían de M\$ -297-66/ha) en la fase agronómica, aunque resultan muy positivos en la fase industrial. De esta forma, este sistema probablemente sólo sea sostenible una integración vertical de la industria, es decir que la misma planta de procesamiento recicle sus hojas y cosetas en predios propios (para hacerse cargo de los residuos), o bien los coloque en predios muy cercanos (factor flete muy incidente por alto contenido de agua en coseta fresca: 88-90%). La fase industrial tiene un margen bruto que varía entre M\$ 286 y 858/ha, dependiendo de los rendimientos obtenidos.

	Sistema sólo ganadero <sup>1</sup>			Sistema mixto A <sup>2</sup>			Sistema mixto B <sup>3</sup>			Sistema mixto C <sup>4</sup>		
Rendimiento	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
<b>Fase agronómica</b>	M\$			M\$			M\$			M\$		
Ingreso por ganancia peso animal	685	1027	1370	537	765	968	385	482	514	193	289	385
Ingreso por venta raíces	0	0	0	0	0	0	384	720	1152	840	1260	1680
Ingreso bruto total	685	1027	1370	537	765	968	769	1202	1666	1033	1549	2065
Costo bruto total*	624	644	664	834	934	1034	754	814	874	754	814	874
<b>Margen bruto fase agronómica</b>	<b>61</b>	<b>384</b>	<b>706</b>	<b>-297</b>	<b>-169</b>	<b>-66</b>	<b>15</b>	<b>388</b>	<b>792</b>	<b>279</b>	<b>735</b>	<b>1191</b>
<b>Fase industrial</b>												
Ingreso por bioetanol	0	0	0	386	724	1158	386	724	1158	1013	1520	2026
Ingreso por pellets coseta	0	0	0	0	0	0	482	903	1445	851	1192	1532
Ingreso bruto total	0	0	0	386	724	1158	868	1627	2603	1864	2711	3558
Costo bruto total**	0	0	0	100	187	299	484	907	1451	1102	1653	2204
<b>Margen bruto fase industrial</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>286</b>	<b>536</b>	<b>858</b>	<b>384</b>	<b>720</b>	<b>1152</b>	<b>762</b>	<b>1058</b>	<b>1354</b>

<sup>1</sup> Sistema ganadero 100%. No incorpora uso de raíces para generar biocombustible. Rendimientos de raíces de **brassicas** forrajeras corregidos por factor de utilización.

<sup>2</sup> Sistema combinado agropecuario-bioenergético. Utiliza **brassica forrajera** en que las hojas y la coseta húmeda se reciclan en un sistema ganadero, mientras que las raíces van a bioetanol. Es una opción que puede hacer la misma empresa generadora con predios propios o bien ganaderos en la vecindad inmediata de la planta (sin factor de transporte).

<sup>3</sup> Sistema combinado agropecuario-bioenergético. Utiliza **brassica forrajera** en que las hojas son utilizadas para suplementar ganado, mientras que las raíces son vendidas a la planta de proceso. Se produce coseta pelletizada en la planta como subproducto.

<sup>4</sup> Sistema combinado agropecuario-bioenergético. Utiliza **remolacha** en que las hojas son utilizadas para suplementar ganado, mientras que las raíces son vendidas a la planta de proceso. Se produce coseta pelletizada en la planta como subproducto.

\*Incluye costos de establecimiento del cultivo, cosecha y utilización animal de las fracciones correspondientes en cada caso. También el traslado de coseta húmeda en sistema mixto A.

\*\*Incluye costo de compra de materia prima (raíces), proceso industrial de generación de bioetanol y de pelletización de la coseta.

Se utilizó un precio venta de bioetanol mayorista de \$ 670 en forma arbitraria, considerando valores similares a combustible tipo gasolina. Se utilizó precio venta pellets costo de \$ 250.

CUADRO 6.3 Comparación de cuatro escenarios de producción de cultivos con fines ganaderos o fines combinados mixtos ganadero-bioenergía en la región de Aysén.

- Cultivo de brassicas forrajeras con fines combinados de producción ganadera y de bioenergía (Sistema mixto B). En este caso hay una separación entre la fase agronómica y la fase industrial. En la primera, se produce el cultivo y se cosechan las raíces, las que son vendidas a la planta de procesamiento. Las hojas quedan en el predio y se destinan a alimentación animal. El margen bruto de la fase agronómica fluctuó entre M\$ 15 y 792/ha. Es decir, este sistema resulta competitivo especialmente en los niveles de rendimientos medios a altos, ya que el componente de ingreso procedente de la venta de raíces es altamente incidente, al igual que su precio. La planta industrial compra y procesa las raíces, genera el bioetanol y la coseta. Esta última entra en un proceso de pelletización y se genera un segundo producto comercializable, que es el pellet de coseta. El margen bruto de este sistema a nivel de la fase industrial fue de M\$ 385-1.152/ha. En este caso se conjugan márgenes brutos positivos en ambas fases de producción, lo que haría teóricamente factible sustentar un sistema de este tipo.
- Cultivo de remolacha con fines combinados de producción ganadera y de bioenergía (Sistema mixto C). Este sistema es muy similar al anterior y solamente cambia la especie cultivada. En este caso se obtuvieron márgenes brutos de M\$ 279-1.191/ha en la fase agronómica y de M\$ 762-1.354/ha, dependiendo de los rendimientos obtenidos.

Queda de manifiesto de que el factor de rendimiento del cultivo es muy relevante en el resultado final. El objetivo al establecer este tipo de cultivo debe ser la optimización de rendimientos altos, ya que ello permite bajar los costos unitarios. También debe resaltarse la relevancia de los subproductos, especialmente el caso de la coseta, la cual debe ser deshidratada y pelletizada para poder ser comercializada efectivamente, debido a su alto contenido de humedad. El uso de cosetas húmedas, si bien se probó como perfectamente factible, estará limitado a zonas cercanas a las plantas de generación.

En los primeros escenarios de producción industrial, se ha verificado que la venta de pellets de coseta, dependiendo de los precios factibles de obtener, puede llegar a superar al ingreso por bioetanol. Para la valorización de estos productos, que no tienen referentes a nivel nacional, se consideraron valores referenciales de cosetas procedentes de la industria azucarera, como combustibles del tipo gasolina.

Los antecedentes entregados corresponden a escenarios en que se han estimado una serie de factores, además de incorporar otros procedentes de la experiencia adquirida en el desarrollo de este proyecto.

## **Consideraciones generales para una planta industrial**

Para una planta industrial que deba generar p.ej. 3,5 millones de litros de ETOH/año se requerirían entre 2.000 a 3.000 ha de superficie de cultivo disponible anualmente. Si se reemplazara el cultivo por remolacha, la superficie requerida disminuiría sustancialmente, ya que el contenido de azúcares en ésta es muy superior, de entre 2-4 veces, lo que eleva también los rendimientos de alcohol.

Otro aspecto a considerar es el período de producción. Existe disponibilidad de materia prima entre marzo y septiembre, pudiendo extenderse hasta octubre. Las raíces tienen alguna capacidad de ser almacenadas, lo que permitiría su procesamiento por más tiempo, lo cual debe ser probado. De esta forma, una planta de procesamiento podría operar al menos por 8 meses cada año.

De acuerdo a antecedentes solicitados a la empresa escandinava ST1, que trabaja en el ámbito de la distribución de combustibles y que en particular a través de una filial desarrolla y maneja plantas pequeñas de procesamiento para producir biocombustibles, la inversión total de una planta de un tamaño inicial de 3,5 millones de litros/año, podría estar en el rango de 9-12 millones de euros. Lo anterior es una estimación muy gruesa y que puede variar de acuerdo a las condiciones particulares del sitio de emplazamiento, obras civiles, códigos de construcción, etc. El costo anterior se define de acuerdo a datos finlandeses y cubre las unidades de procesamiento solamente y no considera la red de distribución.

Si bien se requiere información adicional para definir exactamente las condiciones que permitirían la instalación de una planta industrial en la zona, ya se ha avanzado bastante en ello. Se considera de gran interés incluir el estudio de la basura domiciliaria como una fuente alternativa para los períodos en que no hay abastecimiento a partir de nabos, rutabagas o remolacha, obviamente con ciclos separados. Esto podría dar más factibilidad al proyecto, al estar operativa la planta durante todo el año.

En base a la experiencia escandinava, un factor central en la factibilidad de un proyecto de este tipo depende de condiciones de apoyo gubernamental y subsidios que la pongan en condiciones competitivas con las alternativas tradicionales (ejemplo costos de contaminación de las fuentes tradicionales, etc.)

Un estudio de factibilidad técnico-económica será necesario a la luz de la información que ha podido generar este proyecto, y que considere ya los elementos objetivos de la instalación de una planta industrial que permita el escalamiento de esta tecnología.

## Ejemplo de aplicación del modelo

Para ejemplificar la aplicación de un modelo mixto de producción en una condición local, se han considerado dos alternativas, una basada en brassicas forrajeras y la otra en el cultivo de remolacha (cuadro 6.4). También existe la posibilidad de que coexistan ambos cultivos dentro de una misma zona, ya que no necesariamente debe basarse el modelo productivo en una u otra.

Se muestra en el cuadro 6.4 cuánto puede generarse a partir de 5.000 ha de nabos y/o rutabagas forrajeras, o bien de 2.000 ha de remolacha. En el primer caso, se superan los 5 millones de litros de bioetanol, mientras que en el segundo se llega a 8,2 millones de litros, ya que este cultivo tiene un mayor potencial en ese sentido. También se producen grandes volúmenes de coqueta, la que sirve para alimentar el ganado.

Resulta interesante analizar el impacto que puede tener en una localidad este volumen de producción de combustible, el que proviene de los cultivos cosechados en la misma zona. Debe recordarse que el bioetanol puede utilizarse en motores de vehículos, pero también como una fuente de calefacción.

	Brassica	Remolacha
Superficie cultivada (ha)	5.000	2.000
raíces (t/ha)	75	90
total t fresco raíces	375.000	180.000
Total t coqueta producida (12%)	22.585	15.188
bioetanol por t materia fresca (l/t)	13,54	46
Volumen bioetanol producido (96%) (l)	5.077.500	8.226.000
Bioetanol por hectárea (l/ha) 96%	1.016	4.113

CUADRO 6.4. Ejemplo de dos situaciones en que se utilizan cultivos con fines energéticos.

El cuadro 6.5 muestra el impacto que puede tener la producción de bioetanol en aspectos prácticos de una localidad. Las 5.000 ha de nabos y/o rutabagas permiten generar más de 5 millones de litros de bioetanol, el que podría mover a casi 2.300 vehículos con motor E100, es decir 100% etanol eros. Si se consideran motores con mezclas de etanol y gasolina (E85, E10, etc.), el número de vehículos aumenta sustancialmente. En el caso de lo producido con 2.000 ha de remolacha es aún mayor, con más de 3.600 vehículos etanoleros al año.

Un uso muy interesante del bioetanol en las localidades es para fines de calefacción habitacional. Resulta además muy atractivo en este caso por la masividad que pudiere alcanzar, además de los efectos beneficiosos que pueda traer para el control de problemas de contaminación atmosférica de ciudades como Coyhaique, que presentan eventos críticos de mala calidad del aire durante el invierno, debidos al uso de combustibles de mala calidad, como la leña húmeda. En este ejemplo, el volumen de bioetanol generado en 5.000 ha de nabos y rutabagas podría calefaccionar más de 8.000 hogares y hasta 13.000 casas con 2.000 ha de remolacha. De esta forma, no resulta imposible pensar en una cobertura casi completa de calefacción para una ciudad cercana a 50.000 habitantes (cuadro 6.5).

	Brassica	Remolacha
Bioetanol permitiría:		
Combustible E100 para vehículos (Considera 18.000 km/año). N° de vehículos abastecidos.	2.257	3.656
o bien: Combustible para calefacción (considera 210 días de uso; 3 l/d; 5-6 horas calefacción). N° de hogares con bioetanol.	8.060	13.057
N° personas (4/hogar)	32.238	52.229
Suplemento animal (coseta; 25% de la dieta diaria, por 180 días). N° de UA que se alimentan	40.152	27.000

CUADRO 6.5 Ejemplo del impacto en el uso de bioetanol en vehiculos motorizados y calefacción.

Al margen de lo anterior, está el impacto sobre la producción animal. Se aprecia en el mismo cuadro 6.5 que con 5.000 ha de nabos forrajeros podría tenerse suplemento alimenticio para más de 40.000 unidades animales y 27.000 unidades animales con 2.000 ha de remolacha. De esta forma, se demuestra además que la incorporación de un sistema de este tipo no entra en competencia con la ganadería, sino que más bien la potencia,

aprovechando más intensivamente algunos suelos factibles de incorporar a estos sistemas. Un aspecto no evaluado aquí es la incorporación de vinazas en los sistemas, ya sea como fertilización o bien como fuente de alimento.

El ejercicio anterior tiene el valor de dimensionar un sistema, al margen de las superficies consideradas. En base al impacto necesario, a los usos que se vayan a definir y los objetivos que se persigan, es posible establecer la superficie necesaria para abastecer esos requerimientos. De acuerdo a los antecedentes anteriores, las superficies necesarias serían factibles de lograr y en zonas cercanas a los centros de consumo existen suelos adecuados para el cultivo de estas especies, además de los sistemas ganaderos que también están establecidos. Es importante, sin embargo, recalcar que estos cultivos deben estar incluidos dentro de rotaciones, de modo de que junto a ellos se desarrolla un sistema de intensificación de la ganadería en paralelo, que involucra la inclusión de praderas de rotación que también tendrá sus impactos de aumento productivo.

## **ASPECTOS SOCIALES**

Junto a los aspectos económicos, también hay aspectos sociales que tomar en consideración a la hora de la implementación de proyectos. En este caso, una de las bases que sustentan las ideas de implementar un modelo agroenergético como el que se ha descrito, es la necesidad de diversificar la matriz energética, el disminuir los niveles de dependencia de combustibles foráneos a través de fuentes alternativas y, sobre todo, el énfasis en el carácter local de la energía generada, que a su vez impacta sobre la actividad económica de la localidad y la capacidad de generación de empleo.

En las diferentes fases de producción del modelo existen impactos de tipo social, los que se describen a continuación:

### **Fase primaria**

Se refiere al sector rural propiamente tal, ya que es ahí donde está la base productiva. Ya se ha señalado que está el fenómeno de migración de población rural hacia los sectores urbanos, lo que impacta negativamente sobre las ciudades, que no tienen la capacidad de absorber esta migración, mientras que el campo se despotencia, especialmente al perder jóvenes.

La incorporación de nuevas alternativas productivas, que mejoren la capacidad productiva de los predios y que estén asociados a mejores niveles de margen bruto, pueden ayudar a asentar a las familias en el sector rural. En el ejemplo anterior, que consideraba 5.000 ha de un cultivo o 2.000 del otro, la producción debe venir de diferentes estratos

de productores, desde grandes a pequeños. Se estima que al menos 400-500 agricultores pequeños podrían incorporarse a estos sistemas, integrados con la industria, además de 80-120 medianos. En términos de la población rural de la Región de Aysén, estas cifras son muy significativas.

La incorporación de sistemas más intensivos, sobre todo en pequeña y mediana agricultura, tendría que ir acompañado de un desarrollo paralelo de transferencia tecnológica, donde también la industria debiera tener un rol fundamental. Junto a los efectos directos sobre los ingresos de las familias rurales, se debe desarrollar un sector paralelo de servicios, en términos de mecanización agrícola, insumos agropecuarios, sistemas de cosecha, transporte, etc. Es decir, hay un efecto de encadenamiento con muchos sectores de la comunidad y favorece directamente el desarrollo de la localidad

Asimismo, debiera tener un impacto directo sobre niveles de empleo, ya que se generan nuevas fuentes de trabajo y posibilidades de capacitación para la especialización necesaria en diversas partes de los procesos primarios, desde el establecimiento de los cultivos, su manejo y hasta la cosecha.

Otro aspecto que debe mencionarse en zonas extremas, como es la región de Aysén, es la soberanía que se ejerce por parte de las poblaciones rurales. En la medida que la población migra a los centros urbanos, se va despoblando el campo, que es donde principalmente se necesita la presencia para efectos de soberanía. Nuevas alternativas productivas ayudan en este sentido.

La necesidad de mantener una cadena productiva en funcionamiento, debiera también impactar sobre factores sociales anexos, como es la calidad de los caminos, la conectividad eléctrica y digital, etc. La necesidad de proveer de servicios de mayor calidad en estos aspectos será patente y será necesario avanzar en ello. Todos los aspectos anteriores deben incidir en lograr mejores niveles de calidad de vida en el sector rural.

### **Fase secundaria**

Esta fase se refiere al sector industrial. La planta de procesamiento debería estar emplazada en una zona rural, cercana a los puntos de producción, para minimizar los costos de transporte, sobre todo con materias primas de alto contenido de humedad. Esta industria debe ser el motor del desarrollo del sector primario.

La instalación de una planta de procesamiento necesariamente tendría un impacto social importante en la zona donde se emplace. En primer lugar, generaría fuentes de trabajo directas, para diferentes niveles de trabajadores, desde operarios básicos, operarios especializados, técnicos y profesionales, además de personal administrativo. Dependiendo

del tamaño de la planta, el número de plazas de trabajo puede ser significativo para una pequeña localidad. Nuevamente, deberán existir posibilidades de capacitación de personas para un desempeño eficiente.

El desarrollo de sistemas de contrato con los productores es otro aspecto que pudiera desarrollarse, mediante sistemas que permitan a la planta programar su trabajo, como también al productor tener más certeza respecto al destino de su cultivo. En desarrollos similares se generan también sistemas de apoyo tecnológico, con paquetes de aplicación masiva y muchas veces con apoyo crediticio directo por parte de la planta. Todo ello tiene un efecto multiplicador importante, y va generando nuevos paradigmas de producción.

### **Fase terciaria**

Corresponde por una parte al sector urbano, es decir, donde se está utilizando el combustible, como también en el sector rural, donde se utiliza el alimento generado en subproductos.

En el sector urbano, pueden haber efectos sociales sobre la modificación de la matriz energética local, en términos que se empiecen a usar vehículos con motores que utilicen parcialmente etanol. El tener un combustible de generación local igualmente genera lazos importantes de valorización entre los sectores urbanos y rurales. El uso del combustible con fines de calefacción sería probablemente de impacto social aún mayor, ya que podría masificarse, como ya se señaló anteriormente. Sería factible abastecer a una gran mayoría de los hogares de una ciudad como Coyhaique con bioetanol producido en la zona. La factibilidad del proyecto podría fortalecerse con la incorporación de subsidios que contrarresten los efectos adversos actuales que genera la calefacción con leña de mala calidad, reemplazándola por un combustible limpio y también renovable.

Otro aspecto social es el de imagen regional, en el sentido de que el uso de combustibles locales, limpios y renovables estaría acorde con la imagen que quiere proyectar una región patagónica como Aysén.

### **ASPECTOS AMBIENTALES**

Un primer aspecto importante relacionado con aspectos ambientales es la característica "carbono neutra" que tiene este sistema de producción. Sin embargo, es necesario realizar estudios más acabados en términos de determinar la totalidad de componentes del modelo en términos de carbono. El bioetanol se produce a partir de materia prima vegetal, la que se ha generado a través del proceso de fotosíntesis. Al quemar el etanol

se está generando dióxido de carbono, pero éste se compensa con aquel que fue capturado en la fotosíntesis durante el proceso primario.

El modelo de producción busca utilizar todos los componentes y no generar residuos, sino más bien subproductos de utilidad. Es así como aparte del bioetanol, se genera coqueta pelletizada que se usa en alimentación animal. Los restos vegetales que quedan a nivel predial (principalmente las hojas) también pueden ser consumidas por los animales, como de hecho se evalúa en el modelo.

En la planta industrial se generan también vinazas, en gran parte compuestas por agua, pero también por otros elementos, los que tienen potencial como fertilizante o fertirriego, con algunos tratamientos de estabilización. Otra alternativa utilizada en otros países es la deshidratación de vinazas y la obtención de suplementos alimenticios animales, que también pueden ser comercializados.

Un aspecto que debe ser tomado en cuenta es la elección correcta de los sitios de cultivo, considerando que en esta zona hay predominancia de vientos fuertes durante las épocas de cultivo. La erosión eólica que potencialmente pueda producirse debiera ser factible de controlar mediante sistemas conservacionistas de cultivo, como mínima o cero labranza y también con la laboreo en épocas de baja incidencia de viento, como es el caso de otoño. Sin embargo, este es un aspecto en el que es necesario realizar más estudios.

Como ya se mencionó en los aspectos sociales, la ciudad de Coyhaique tiene problemas serios de contaminación del aire durante el invierno, debido a uso predominante de leña húmeda en los sistemas de calefacción. El reemplazo parcial o total por bioetanol sería potencialmente factible, lo que provocaría un efecto inmediato de limpieza del aire, ya que la combustión es absolutamente limpia.

De acuerdo a antecedentes entregados por la empresa escandinava ST1, que tiene la experiencia de generación de bioetanol y biogás de diferentes fuentes y materias primas, sería posible tener una planta de procesamiento múltiple. Ello permitiría, por ejemplo, procesar materias primas agropecuarias durante el período de producción (que como se mencionó en otro capítulo, podría abarcar de marzo a octubre) y utilizar otras fuentes en el período restante. Una posibilidad es el uso de basuras urbanas, lo que en Escandinavia se hace con éxito en este tipo de planta. Es decir, durante 4-5 meses, la planta podría alimentarse de basura clasificada y almacenada para su uso en esos períodos. Ello por supuesto implica diseños apropiados para esta función dual. Lo anterior implica también un sistema de clasificación de basura, junto con cambios culturales importantes en la población.

En el proceso de fermentación hay liberación de CO<sub>2</sub>. Las aguas residuales de la planta industrial provienen del lavado de materias primas y de agua procedente de la fase de

rectificación en columna de destilación. El agua en la planta puede ser recirculada en el proceso, hasta niveles de 50%. El agua residual del proceso habitualmente tiene pH ácido (3-4) y tiene un contenido de DBO superior a 5000 mg/l. También hay agua procedente de los intercambiadores de calor y evaporadores. La cantidad de agua y la calidad de la misma son variables según el tipo de materia prima utilizada. De esta forma, hay que estudiar más en profundidad la utilización de estos residuos líquidos y la estabilización que requiere antes de su uso sobre suelos.

La generación de ruidos de esta industria viene principalmente del tráfico de camiones y de procesos como la molienda y otros tratamientos mecánicos. Algunas instalaciones pueden ser aisladas adecuadamente para evitar ruidos molestos.

También está la alternativa de producción de biogás a partir de residuos de planta, como existe vasta experiencia en países especialmente de Europa.

## EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL BIOETANOL

En este proyecto se llegó hasta la producción de bioetanol 95-96% en volúmenes experimentales, los que han servido para realizar pruebas prácticas en condiciones reales.

De esta forma, se está probando el uso del bioetanol en un vehículo con motor tipo *flex-fuel* (Figura 6.4). El combustible producido ha funcionado sin contratiempos en este tipo de motor y el vehículo circula sin problemas.



FIGURA 6.4. Vehículo flex fuel utilizado en pruebas de uso de bioetanol solo o en mezcla con gasolina.

También se probó con éxito la adaptación de un motor bencinero convencional para ser utilizado con 100% de etanol. Para ello se utilizó un dispositivo comercial que permite modificar y regular la inyección de combustible en forma electrónica y adaptarla al nuevo tipo de combustible (Figura 6.5, izquierda).



FIGURA 6.5. Kit comercial para la transformación de un motor gasolinero para uso con bioetanol (izquierda). Quemador de bioetanol para su uso en sistemas de calefacción (derecha).

En la figura 6.5 (derecha) se observa un quemador de bioetanol, el que se ha probado como sistema de calefacción. Éste puede ser adaptado a diferentes tipos y diseños de estufas (algunas en el comercio, especialmente extranjero). En el caso local, en el proyecto se probó con éxito su adaptación a estufas existentes. El consumo estimado es de 0,5 l/h en un ciclo controlado de combustión. Estas aplicaciones deben ser estudiadas más en profundidad para lograr las mejores alternativas de aplicación.

En todos los aspectos analizados, de tipo económico, social y ambiental, es necesario realizar más estudios para definir las mejores alternativas de enfrentar cada uno de los puntos críticos encontrados. Existe tecnología disponible en el extranjero que es adaptable a este tipo de modelos, pero necesariamente debe acomodarse a las realidades locales y especialmente a las características de las materias primas a utilizar.

## COMENTARIOS FINALES

El proyecto realizado ha permitido trabajar en forma directa y a una escala real la temática de generación de biocombustibles, que ha significado una experiencia de gran valor para entender los procesos, las posibilidades existentes y también sus limitaciones. Se han establecido contactos y se ha generado tecnología que permite avanzar en estos temas. Al respecto, se puede señalar a modo de conclusión lo siguiente:

- Los cultivos forrajeros utilizados (nabo forrajero, rutabaga y también remolacha) pueden producir biocombustible líquido a niveles interesantes de explorar económicamente.
- Los rendimientos obtenidos variaron entre 650-1.300 l/ha con brassicas y pudieran superar 4.000 l/ha con remolacha. Lo anterior debe ser explorado en profundidad ya que es un componente crítico del modelo.
- En base a lo anterior, la remolacha debe ser evaluada como alternativa productiva y hay aun que dilucidar factores de manejo en la zona. Otras opciones pueden agregarse.
- 72-76% de la materia seca producida va a consumo animal (subproductos = hojas y coseta).
- La viabilidad económica está íntimamente ligada a uso de subproductos (pueden ser más significativos que el etanol en sí). Se requieren estudios más profundos para definir la factibilidad final de un modelo de este tipo. En este sentido, debe incorporarse experiencia internacional y se sugiere establecer un vínculo con países del norte de Europa, especialmente Escandinavia.
- El modelo debe ser considerado en forma integral. No tiene sentido el desarrollo de un proyecto industrial si no toma en consideración el desarrollo del área primaria.
- El uso de vinazas debe ser profundizado. Son una fuente potencial fertilizante de interés, además de los posibles desarrollos en suplementos de alimento.
- Se ha demostrado el uso local de bioetanol y subproductos con sistemas prácticos, sin embargo queda de manifiesto la necesidad de profundizar en muchos aspectos críticos, que se han señalado anteriormente.

- Es necesario estudiar fuentes alternativas como materia prima, como es la basura domiciliar clasificada. Ello requerirá de estudios específicos y hay tecnología desarrollada para ello, que es compatible con el modelo propuesto.
- Se ha logrado aumentar la producción primaria de forrajes por unidad de superficie (3-6 veces).
- El modelo permite la disponibilidad de subproductos para uso animal (hojas – y pulpa). El desarrollo comercial de la pulpa es imprescindible, para lo cual debe pasar por procesos de pelletización. Ello debe ser estudiado en detalle y existe tecnología para ello, pero debe evaluarse la calidad y efectos del alimento así procesado.
- El modelo logra un aumento de la producción animal (ovinos – bovinos), a través de la intensificación del manejo general y la existencia de recursos forrajeros adicionales. Este factor es muy importante ya que es posible la cogeneración de bioetanol y el aumento de producción animal de la zona, lo que implica un efecto positivo general.
- El modelo logra una mayor diversificación productiva en una zona donde ella es baja. Lo anterior genera mayor estabilidad en el sector rural, mayor asentamiento y mejores condiciones de vida.
- El modelo favorece la incorporación de tecnología en el medio productivo, que debe intensificar la producción para lograr los mayores niveles de margen bruto.
- El modelo permite la disponibilidad de un combustible local, con mayores grados de independencia del petróleo.
- A través de la tecnología propuesta se lograría un reemplazo parcial de otras fuentes combustibles más contaminantes y C-negativas, como es el caso de la leña y la gasolina. Es necesario estudiar en profundidad el balance de carbono del modelo en su conjunto.
- El uso del bioetanol como combustible para sistemas de calefacción aflora como una de las formas más masivas y de impacto integral, que es necesario explorar y estudiar más en profundidad.

