



Difusión de un modelo sostenible en la EU
para producir bioetanol de 1^a generación a
partir de sorgo dulce en plantas
descentralizadas

Manual Técnico



Editor:

Digital Copias – Diazo Plotter Suministros – Copiladi, S.L.
Edificio Galileo, módulo 5, tienda 4 – Parque Tecnológico de Boecillo
47151 (Boecillo) Valladolid - España
Tel. + 983 14 24 26 , fax + 983 14 24 27

Plan

C.E.T.A.

<http://www.ceta.ts.it>



CENTRO DI ECOLOGIA TEORICA ED APPLICATA

Fotos de portada: C.E.T.A.



El único responsable del contenido de esta publicación corresponde a sus autores. No representa la opinión de la Comunidad Europea. La Comisión Europea no es responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en él.

1. TABLA DE CONTENIDOS

| | |
|---|----|
| 1. Tabla de contenidos..... | 2 |
| 2. Prólogo | 3 |
| 3. Lista de acrónimos y abreviaturas | 4 |
| 4. Proyecto Sweethanol | 5 |
| 5. Consorcio Proyecto Sweethanol | 6 |
| 6. Sorgo dulce como cultivo energético..... | 7 |
| 6.1 ¿Por qué sorgo dulce? | 7 |
| 6.2 Descripción botánica..... | 9 |
| 6.3 Tecnologías de cultivo y cosecha | 12 |
| 6.4 Programas de mejora..... | 16 |
| 6.5. Experiencias en la EU en el cultivo de sorgo dulce..... | 17 |
| 7. Directrices del modelo de la EU para el procesado de sorgo dulce como cultivo energético..... | 23 |
| 7.1 Introducción | 23 |
| 7.2 Dimensionado de la cadena de suministro..... | 24 |
| 7.3 Procesado de la biomasa del sorgo dulce para bioetanol..... | 27 |
| 7.4 Aprovechamiento energético de los subproductos | 34 |
| 8. Modelo 1 de la EU: sorgo dulce como única materia prima para la planta..... | 38 |
| 8.1 Caso de estudio: desarrollo del modelo 1 de la EU en el Valle del Po en Italia | 41 |
| 8.2 Caso de estudio: desarrollo del modelo 1 de la EU en el área industrial de Tesalónica en Grecia | 50 |
| 8.3 Caso de estudio: desarrollo del modelo 1 de la EU en Andalucía en España | 59 |
| 9. Modelo 2 de la EU: sorgo dulce y remolacha azucarera como materias primas para la planta..... | 65 |
| 9.1 Caso de Estudio: desarrollo del modelo 2 de la EU en Andalucía en España | 65 |
| 11. Fuentes y Bibliografía | 68 |

2. PRÓLOGO

El bioetanol producido a partir de sorgo dulce es sostenible en términos de las observaciones del medio ambiente y la viabilidad económica: el ahorro en las emisiones de gases de efecto invernadero atribuidas cumple con el objetivo europeo para 2018 (es decir, superior al 60%) y el aprovechamiento de los subproductos garantiza la viabilidad económica tanto para pequeñas como para medianas plantas descentralizadas (máximo 15.000 t/año).

En la situación actual, el mercado del bioetanol de la EU está controlado por grandes grupos industriales y grandes cooperativas agrícolas de las industrias del azúcar y del alcohol y, sobre todo, los cereales se procesan en las grandes plantas (100.000-200.000 t/año). Esta situación se debe a algunos obstáculos importantes: los obstáculos económicos, logísticos, ecológicos, ambientales, sociales y de difusión.

El proyecto SWEETHANOL, apoyado por el programa Intelligent Energy de la Comisión Europea, está destinado a cambiar la situación actual con respecto a la diversificación de las materias primas, la descentralización y la sostenibilidad del bioetanol de 1º generación a partir de sorgo dulce, que se puede cultivar en las regiones meridionales de la EU.

La falta de conocimientos acerca de la potencialidad del sorgo dulce como cultivo energético para producir bioetanol sostenible y otras materias primas de energía en las plantas descentralizadas se ha superado a través de una amplia discusión de los principales aspectos técnicos y no técnicos, con los actores de la cadena. Además, esta vía va a ser completada a través de la capacitación de los actores.

Este manual técnico sigue el "manual de principios - Sweethanol", donde se ha implementado a fondo sobre el procesamiento de sorgo dulce con las experiencias de las visitas en la India, España y Perú.

El objetivo específico de este manual es proporcionar a los interesados los detalles técnicos, que son básicos para realizar estudios de factibilidad y luego poner en marcha nuevos emprendimientos en el sector de la bioenergía con el sorgo dulce.

Con este objetivo, el "Manual técnico - Sweethanol" se ha planificado con el fin de poner de relieve algunas pautas generales para la utilización del sorgo dulce como cultivo energético y explicar dos modelos de cadena de suministro de una planta descentralizada, con algunos casos de estudio, contextualizado en los diferentes países que participan en el Proyecto (es decir, Italia, Grecia, España).

La versión en Inglés puede estar disponible para los países no participantes, donde se cultiva el sorgo dulce (por ejemplo, Rumanía, Bulgaria, Francia, Portugal, Croacia, Hungría) con el fin de aumentar la transferibilidad de los resultados del Proyecto en el sur de las regiones de la EU.

El texto del "Sweethanol - Manual técnico" fue realizado por Michela Pin, Picco Denis y Vecchiet Alessia (CETA - Centro para la ecología teórica y aplicada, Italia), Oscar León, Paloma González, Roberto Marcos y Anabel Elisa Ruiz (Fundación CARTIF - Centro Tecnológico, España), Irene Tsakiridou y Kostas Konstantinou (REACM - Agencia Regional de Energía de Macedonia Central - Anatoliki SA, Grecia), Luca D'Apote y Luisa Daidone (INIPA - Coldiretti, Italia), Marina Sanz Gallego, María Hernando Sanz y Mª Dolores Curt (Adabe - Asociación para la difusión de la biomasa, España), Fernando Mosquera Escribano (Grupo de Agroenergética de la Universidad Politécnica de Madrid, España), Bartsios Sakis, Bartsios Athanasios y Eleni Papoulia (Cooperativa Agrícola de Halastra, Grecia).

Deseamos agradecer las contribuciones de todos los escritores y los organismos de financiación para su cooperación.

31 de Octubre de 2011

3. LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

| | |
|---|--|
| AEBIOM Asociación Europea de la biomasa | HRT tiempo de retención hidráulica |
| Bio-ETBE ethil-ter-butil-eter obtenido a partir de bioetanol | HTST pasteurización a alta temperatura corto tiempo |
| CAICYT comité asesor en investigación científica y técnica (España) | IEE Programa Europeo Intelligent Energy |
| CH₄ metano | INIA Centro Nacional de Investigación y Tecnología de Agricultura y Alimentación (España) |
| CHP producción combinada de calor y electricidad | IRR tasa interna de retorno |
| CO monóxido de carbono | LCA análisis del ciclo de vida |
| CO₂ dióxido de carbono | LHV poder calorífico inferior |
| COD demanda química de oxígeno | LUC cambio en el uso del suelo |
| CRA-CIN Consejo para la investigación y la experimentación en agricultura- centro de investigación para cultivos industriales (Italia) | MIPAAF Ministerio Italiano de Agricultura y Silvicultura |
| CRA-ING Consejo para la investigación y la experimentación en agricultura – Unidad de investigación de la ingeniería agrícola (Italia) | MON octanaje del motor |
| CRA-RPS Consejo para la investigación y la experimentación en agricultura – centro de investigación para el estudio de la relación entre la planta y el suelo (Italia) | MSE Ministerio Italiano de Desarrollo Económico |
| Crpa S.p.A. Centro de Investigación de producción animal (Italia) | MSW residuos sólidos municipales |
| db base seca | MTBE metil-ter-butil-eter |
| DDG granos secos destilados | N₂ nitrógeno molecular |
| DDGS granos secos destilados con solubles | NO_x óxidos de nitrógeno |
| DPI especificaciones de producción integrada | O₂ oxígeno molecular |
| E100 bioetanol 100 % | ORC Ciclo Orgánico Rankine |
| EC Comisión Europea | O&M operación y mantenimiento |
| E85 mezcla de bioetanol al 85% v/v | R&D investigación y desarrollo |
| ENEA Agencia Nacional de las nuevas tecnologías, la energía y el desarrollo económico sostenible (Italia) | RED Directiva de Energías Renovables, 2009/28/EC |
| FYROM Antigua República Yugoslava de Macedonia | RES Fuente de energías renovables |
| FIT fijación de precios pero no de cantidad | rpm revoluciones por minuto |
| FP Programa Marco | RON búsqueda del número de octanos |
| FFV vehículos de combustible flexible | RUE eficiencia en el uso de radiación |
| GHGs gases de efecto invernadero | SMEs pequeña y mediana empresa |
| H₂S sulfuro de hidrógeno | toe toneladas equivalentes de petróleo |
| HHST mayor calor y menor tiempo | UP Ultra pasteurización |
| | US Estados Unidos |
| | VOC compuestos orgánicos volátiles |
| | v/v relación volumen/volumen |
| | wb base húmeda |
| | w/w relación peso/peso |
| | WUE eficiencia en el uso del agua |

4. PROYECTO SWEETHANOL

SWEETHANOL es un Proyecto financiado y apoyado por la Comisión Europea en el ámbito del programa EIE-II 2009 (Intelligent Energy Europe), acción "ALTENER" - Fuentes de Energías Renovables.

Se trata de un Proyecto relacionado con la difusión de un modelo sostenible de la EU para producir bioetanol de primera generación y otros productos básicos de energía a partir de sorgo dulce en plantas descentralizadas. El proyecto está organizado según las siguientes acciones:

- Conocimiento acerca de la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce. Los datos más interesantes (por ejemplo, costes de inversión, consumo de energía, costes de producción, rendimiento del bioetanol, aprovechamiento de subproductos) se han recogido en las visitas a los Institutos de Investigación Agrícola, a las empresas de construcción de las plantas y las instalaciones existentes;
- Discusión modelo sostenible de la modelo de la EU con los representantes de cada etapa del proceso. Los anteriores (agricultores, asociaciones agrícolas, procesadores de combustible, PYMEs, empresas agrícolas de semillas, inversores, responsables políticos y representantes de las autoridades públicas, agencias de la energía) están involucrados en una discusión del modelo de la EU a través de talleres sectoriales e intersectoriales a nivel nacional e internacional;
- Formación de los representantes de las etapas del proceso mediante cursos a medida para cada uno de ellos;
- Creación y gestión de la comunidad online (es decir, "Esse community", enlace: <http://esse-community.eu/>), un lugar virtual donde todos los representantes de cada etapa del proceso pueden crear la red con el fin de compartir y reunir información sobre la cadena de bioetanol a partir de sorgo dulce: se han llevado a cabo artículos, información sobre eventos, blog, foro, red social, teleconferencias.

El Proyecto abarca las siguientes actividades prioritarias:

- Fomento por parte de los representantes de la comercialización en la cadena de suministro del bioetanol para aumentar la competitividad económica y la sostenibilidad ambiental de los propios biocombustibles;
- Apoyar y promover la aplicación de criterios de sostenibilidad para el bioetanol;
- Responder a las cuestiones de discusión en los debates actuales sobre el uso del suelo y la sostenibilidad;
- Facilitar y promover un debate bien estructurado y una actitud equilibrada entre los tomadores de decisiones y el público en general.

Los principales objetivos del Proyecto son:

- La difusión de conocimientos sobre el desarrollo sostenible del modelo de la EU;

El modelo sostenible de la EU es compartido entre los actores de la cadena que lo acepte a través de la discusión de los aspectos técnicos, logísticos, económicos, financieros, energéticos, medioambientales y administrativos, y será ampliamente difundida por cada grupo objetivo. Por lo tanto, como agentes del mercado, se les anima a poner en marcha nuevos emprendimientos para aumentar la competitividad económica y al mismo tiempo la sostenibilidad ambiental del bioetanol. Los cambios en el mercado del bioetanol son la mayor diversificación de las materias primas, la descentralización de la producción y la sostenibilidad del bioetanol (principalmente el ahorro en los gases de efecto invernadero). La discusión propuesta sobre la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce contribuye a la dirección de los debates actuales sobre el uso del suelo y la sostenibilidad para facilitar y promover una discusión bien informada y una actitud equilibrada entre los tomadores de decisiones y el público en general

- Actualización diaria a través de la creación de redes y la coordinación de la cadena de suministro. A través de la "Esse Community", los representantes de la comercialización son capaces de contar con

una actualización diaria de los aspectos legislativos, administrativos y técnicos relacionados con la producción de bioetanol y el mercado (en general, y en concreto con el sorgo dulce). El diario ofrece un servicio actualizado que simplifica el análisis de mercado, necesario para la puesta en marcha de un nuevo espíritu empresarial; en consecuencia, la diversificación del mercado de bioetanol se estimula y se contrasta la centralización del mercado entre algunos de los representantes de cada etapa de proceso.

5. CONSORCIO PROYECTO SWEETHANOL

CETA – Centro para la ecología teórica y aplicada – Italia

CETA se creó en 1987 en Gorizia (Italia) y es una asociación sin ánimo de lucro que lleva a cabo la investigación, la experimentación aplicada y desarrollo de tecnologías innovadoras en cuatro áreas: medio ambiente, tales como la gestión sostenible de los recursos ambientales y naturales (agua, suelo, paisaje) y equilibrios ambientales y los modelos de la contabilidad ambiental, la energía, tales como la promoción y difusión de tecnologías de energías renovables (biomasa, biogás, biocombustibles, energía solar - fotovoltaica, geotérmica, hidroeléctrica), la eficiencia y planificación energética, el análisis y los modelos de gestión del territorio, los costes de-beneficios y los criterios de múltiples análisis, el territorio, como la planificación estratégica y la programación, el gobierno del territorio (área grande y el nivel local), los estudios de impacto ambiental y evaluación ambiental estratégica, y el conocimiento como experimentación de modelos de producción y la innovación para las biommasas de combustible y los biocombustibles de 2^a y 3^a generación, la investigación y el desarrollo de cultivos energéticos con bajo impacto ambiental para la producción de energía. CETA lleva a cabo sus propias actividades multidisciplinarias con el empleo de profesionales tales como ingenieros, agrónomos, biólogos, naturalistas, economistas, arquitectos.

Fundación CARTIF – Centro Tecnológico – España

CARTIF se creó en 1994 como Centro de Automatización, Robótica y Tecnologías de la Información y de la Fabricación, una asociación sin ánimo de lucro enfocada a la investigación aplicada y con sede en el Parque Tecnológico de Boecillo, Valladolid (España). Desde octubre de 2005, CARTIF está legalmente establecido como una Fundación y mantiene sus objetivos principales: identificar las necesidades de tecnología y el desarrollo de I+D basada en el conocimiento, el apoyo a la innovación tecnológica en la industria, principalmente entre las PYMEs y la difusión de I+D y los resultados de la innovación.

REACM- Agencia Regional de la Energía de Macedonia Central – Anatoliki S.A. – Grecia

REACM, S.A. Agencia Regional de la Energía y Desarrollo Local de Macedonia Central - Anatoliki establecido en 1997, a través del programa de la Unión Europea SAVE. Las actividades principales son: la adquisición de datos para la producción y consumo de energía en la región, el apoyo a las autoridades locales de la región en la planificación de la política energética, las actividades de difusión de las energías renovables y tecnologías RUE, la formación y la educación, la gestión de la movilidad a nivel municipal, la promoción de los biocombustibles, el apoyo a la industria local y a las pymes, aplicación piloto del reglamento EMAS en las industrias pesadas en Salónica, la capacitación del personal en el sector industrial en las auditorías de Eco-energía, la promoción de las tecnologías de RES en el sector agrícola, la definición de REP, la colaboración con los países vecinos en el ahorro de energía, la participación en la planificación regional para el desarrollo y gestión de campos geotérmicos.

INIPA- Coldiretti – Italia

INIPA es el Departamento Nacional de Investigación, capacitación y desarrollo del sector agroalimentación y de servicios ambientales de Coldiretti (Confederación Nacional de Agricultores - Italia), y se trata de un reconocimiento legal sin ánimo de lucro. Se trata de una estructura unitaria distribuida en todo el país, con institutos asociados a nivel regional y divisiones territoriales. INIPA promueve, organiza y participa (asociado con las principales agencias, tanto a nivel comunitario,

nacional y europeo) en la investigación, la información científica y de formación para los agricultores, organizaciones para destacar los resultados en favor de la continua innovación del sistema agroalimentario.

ADABE – Asociación para la difusión de la biomasa – España

Adabe es una asociación nacional, sin ánimo de lucro, fundada en 1986, de acuerdo a la Dirección General de Política Interior del Ministerio del Interior. Es miembro fundador de AEBIOM con sede en Bruselas, fundada en 1990. Reúne a personas y entidades involucradas en la investigación, la tecnología y/o difusión de la utilización de la biomasa en España.

Cooperativa Agrícola de Halastra – Grecia

Las principales actividades de la cooperativa agrícola de Halastra incluyen: servicios relacionados con los productos agrícolas (por ejemplo arroz, maíz, algodón, trigo, cereales), recolección, secado y almacenamiento de productos agrícolas, venta de productos agrícolas en nombre de los miembros de la asociación, al por menor de productos agrícolas, envasado de arroz y el comercio.

6. SORGO DULCE COMO CULTIVO ENERGÉTICO

6.1 ¿Por qué sorgo dulce?^{1,2,3,4,5,6,7}

El nombre común de "Sorgo" se aplica a una amplia gama de genotipos, principalmente especies de Sorghum bicolor (L.) Moench, dentro de la familia de las gramíneas (Poaceae). Bajo este nombre, existen cinco grupos de variedades disponibles que son:

- A. Sorgo grano. Por lo general, las variedades enanas - 50-80 cm de alto -, que se cultivan los cereales. El grano de sorgo es el cultivo de cereales cuarto más importante en el mundo después del trigo, el arroz y el maíz;
- B. Sorgos Forraje (o forraje). Variedades que se utilizan principalmente como ensilaje para el ganado debido a su alto contenido proteico y de fibra;
- C. Sorgo fibra. De altura, con tallo y rico en celulosa y hemicelulosa;
- D. Sorgo escoba. Las variedades que presentan inflorescencias con ramas largas y elásticas, utilizadas principalmente para las escobas;
- E. Sorgo dulce. Las variedades con tallos gruesos y largos y un alto contenido de azúcares en el tallo, principalmente sacarosa, que son fácilmente fermentables en etanol.

Todos estos sorgos comparten en cierta medida algunas de las características fisiológicas como la tasa fotosintética alta o sensibilidad al fotoperíodo y la temperatura, y algunas características morfológicas como el tamaño común de hierba grande de origen tropical. Sin embargo, el sorgo dulce, como se ha comentado, destaca por una característica fisiológica: su gran capacidad para acumular azúcares (carbohidratos no estructurales) en el tronco. Por lo tanto, con el fin de evitar cualquier confusión, es aconsejable utilizar el nombre de sorgo dulce y no sólo sorgo a aquellas variedades que acumulan azúcares fácilmente fermentables en los tallos y, en consecuencia, que son interesantes para la producción de bioetanol al igual que otras materias primas que contienen sacarosa (por ejemplo caña de azúcar, remolacha azucarera).

El sorgo dulce es un cultivo C₄. Entre otras particularidades, las plantas C₄ tienen una anatomía de la hoja característica, llamada "la anatomía Kranz", lo que da una separación especial entre la fijación fotosintética de CO₂ y la síntesis de asimilados - compuestos producidos por las plantas como resultado de la fotosíntesis y responsable del crecimiento de las plantas. Esta separación permite un mayor uso de la radiación solar y una alta eficiencia fotosintética del sorgo en comparación con los cultivos C₃, más común en las regiones templadas del mundo. La tasa de asimilación fotosintética es especialmente notable en las condiciones de alta radiación solar y disponibilidad del agua. Los estudios sobre la RUE de sorgo dulce llevados a cabo en el sur de Europa han mostrado valores altos de la RUE, explicando la alta productividad de este cultivo, cuando se cultiva en condiciones favorables (temperatura, radiación solar y el suministro de agua). Valores entre 3,10 y 4,96 en Francia, en España se han reportado.

La producción de biomasa a partir de sorgo dulce varía desde 40 hasta 110 toneladas de materia fresca por hectárea al año. El contenido de materia seca varía entre 19 a 30% dependiendo de la variedad, condiciones de cultivo y la fecha de la cosecha. Al final del ciclo, los tallos por lo general representan más del 75% del peso final de la biomasa cosechada (en peso seco), aunque estos valores pueden variar dependiendo de la variedad y pueden alcanzar el 90%.

Los azúcares acumulados en los tallos del sorgo dulce son azúcares solubles en agua, fácilmente fermentables, principalmente sacarosa y una cierta cantidad de glucosa y fructosa. La concentración del jugo de los tallos es del 65-80%. El contenido de azúcar en el jugo de los tallos es del 15.9%. El contenido de azúcar en el tallo fresco es de entre 7,9-12,0%. En la fecha de cosecha, la concentración de azúcar en los tallos (en peso seco) puede oscilar entre 20-45% (en su mayoría es la sacarosa) en función de la duración del ciclo.

Los rendimientos de la biomasa de sorgo dulce, que se cultiva en condiciones no limitantes de agua en un clima mediterráneo suave, son del orden de entre 25-35 t/ha en base seca. Suponiendo una proporción de tallos en base húmeda del 75-85%, un 40% de contenido de azúcar y 0,591 litros de etanol de azúcar/kg como factor de conversión, la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce puede llegar a valores de entre 4.400-7.000 l/ha.

El sorgo dulce se pueden cultivar en una amplia gama de suelos y climas (regiones tropicales, subtropicales y templadas). A pesar de que los mejores rendimientos se obtienen de los suelos fértiles, profundos y bien drenados, podrían también ser cultivadas en peores condiciones del suelo o en suelos con bajo contenido en materia orgánica. El rango de pH de los suelos donde el sorgo puede crecer en buenas condiciones también es grande (5,0 a 8,5). El sorgo dulce es resistente a la sequía (presenta una buena resistencia al estrés hídrico) en comparación con otros cultivos tropicales y muestra una buena capacidad de adaptación a los suelos salinos y alcalinos. Esta gran adaptabilidad permite al sorgo dulce cultivarse en zonas donde otros cultivos no pueden ser cultivados.

En lo que respecta a las necesidades de agua, en condiciones mediterráneas, el sorgo dulce tiene que ser de regadío, pero su eficiencia en el uso del agua es muy alta. Valores entre 3,7 y 5,4 g de biomasa aérea (en base seca) por litro de agua se registraron en España. El sorgo dulce presenta una mayor resistencia a la sequía que el maíz o la caña de azúcar (la evapotranspiración es baja y la capacidad de detener la transpiración del agua es limitada) y por lo tanto, requiere menos agua por unidad de etanol producido. La cantidad de agua necesaria para el sorgo dulce es sólo 1/3 de lo requerido por la caña de azúcar y casi 2/3 de las necesidades de la remolacha azucarera. Por otra parte, el sorgo dulce tiene relativamente menor necesidad de nitrógeno que otros cultivos.

El sorgo dulce es fácil de cultivar a partir de semillas (3,0 a 6,0 kg de semillas/ha), que permiten una fácil mecanización. Esto es una ventaja si se compara con la caña de azúcar, que se propaga a partir de esquejes de tallos (en el rango de 4.500-6.000 kg/ha). Además, su producción puede ser totalmente mecanizada, a pesar de los azúcares fácilmente fermentables pueden generar algunos problemas en el período posterior a la cosecha: los tratamientos deben ser realizados en un corto período de tiempo después de la cosecha para evitar pérdidas de azúcar. Algunas soluciones para resolver este inconveniente se están estudiando: programación de la cosecha con las variedades de la duración del ciclo diferente (de corto, medio y largo ciclo), concentrando el jugo y mejorando las condiciones de ensilaje.

Otra característica favorable del sorgo dulce es que es un cultivo anual, y debido a su ciclo de crecimiento corto (4 a 6 meses) de cultivo de rotación o de los sistemas de doble cultivo son posibles bajo condiciones climáticas determinadas: de hecho, en condiciones adecuadas tropicales o subtropicales se pueden cultivar dos veces al año, aumentando su rentabilidad. Elegido correctamente, esta función podría ser positivo para la agro-diversidad, debido al aumento del período de cobertura del suelo, que reduce la erosión y puede preservar la materia orgánica del suelo.

El sorgo dulce tiene diferentes subproductos que pueden ser explotados con fines energéticos. Algunas variedades producen también los granos que se pueden convertir en bioetanol de primera generación (hay almidón en el grano). El bagazo (residuos madre originados después de la extracción del jugo) se puede utilizar de dos maneras: pueden convertirse en bioetanol de segunda generación, o pueden ser usados para generar calor o electricidad durante el proceso de obtención

de bioetanol, lo mismo que se hace actualmente con la caña de azúcar. Por lo tanto, el sorgo dulce podría ser utilizado para la producción de biocombustibles de primera y segunda generación al mismo tiempo. Las hojas y también el bagazo pueden ser utilizados como forraje.

En resumen, el sorgo dulce ha sido elegido como materia prima interesante para la producción de bioetanol, principalmente debido a su alto rendimiento de biomasa, su alto contenido en azúcares fermentables, su adaptabilidad a una amplia gama de suelos y entornos, sus necesidades de agua (menor que otros cultivos de regadío como el maíz o caña de azúcar), su resistencia a la sequía, su mecanización sobradamente conocida, y la fácil valorización del bagazo, subproducto que puede ser utilizado también con fines energéticos.

6.2 Descripción botánica^{8,9,10,11,12,13}

Sistemática

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Subclase: Commelinidae

Orden: Cyperales

Familia: Poaceae

Tribu: Andropogoneae

Subtribu: Sorghinae

Género: *Sorghum* Moench

Especie: *Sorghum bicolor* (L.) Moench

Subespecie: *Sorghum bicolor* subsp. *Bicolor*

Todos los sorgos identificados botánicamente como *Sorghum bicolor* subsp. *Bicolor* tienen $2n = 20$ cromosomas.

Las variedades comerciales de *Sorghum bicolor* (L.) Moench se clasifican en los siguientes tipos agronómicos: sorgo grano, sorgo fibra, sorgo forrajero (o forraje), sorgo y sorgo dulce. La orientación agronómica de la variedad depende de sus características fenotípicas.

El origen del Sorgo bicolor se supone que fue a partir de tierras de secano entre Etiopía y Sudán (África) y su domesticación se produjo probablemente en torno a los años 4.000-3.000 aC. Fue introducido en la India (~1.500-1.000 aC), Oriente Medio (~900-700 aC) y el Lejano Oriente (~400 aC). La introducción en América fue más reciente (~1850 dC).

Morfología

El sorgo dulce es una especie herbácea anual y, dependiendo de las variedades, posee una alta capacidad de retoño.

Tallos

Los tallos de sorgo son generalmente sólidos, como la caña de azúcar, siendo esta característica una excepción a la familia de las gramíneas. Los tallos están formados por un número variable de alternancia de nudos y entrenudos. La altura oscila entre 0,5 a 5 metros, y la anchura en la base del tallo 1,5 a 5 cm de diámetro.

En cuanto a la estructura de la sección transversal, el tallo se compone de una corona externa con numerosos haces vasculares densamente dispuestos. Dentro de esta corona hay una médula suave dominada por los tejidos del parénquima, donde aparecen unos bultos dispersos. La mayoría de los azúcares, principalmente sacarosa, se acumulan en esta médula.

Una hoja surge de cada nodo, el cual tiene una ranura donde la hoja crece. En este surco hay una yema axilar. Todos los brotes axilares están inactivos, excepto algunos ganglios de la raíz, donde los tallos pueden crecer a partir de estas yemas axilares.

Bien las características varietales o algunas condiciones de cultivo como la disposición de las plantas y las condiciones del clima (es decir, el fotoperíodo y la temperatura) tienen una influencia notable en la capacidad del macollaje del sorgo.



Figura 1. Comparativa entre las dos variedades de sorgo dulce (fuente: CETA)

Hojas

El sorgo dulce desarrolla generalmente de 7 a 24 hojas ordenadas de forma opuesta a lo largo del tallo, dependiendo de la variedad, la latitud y el grado final de desarrollo que la madre pueda alcanzar. Por lo general, una hoja por cada nodo. Las hojas son de color verde brillante, con vetas paralelas, tienen una larga vaina que abraza el tallo y la hoja de hoja cuya longitud es de 30 a 135 cm y la anchura es de 1,5 a 13 cm. La lámina foliar es plana, aunque en condiciones de estrés hídrico se puede enrollar de forma longitudinal, como ocurre en el maíz. Los estomas se encuentran a ambos lados de la hoja.

Inflorescencia

Las inflorescencias se agrupan en una panícula que suele ser apical. Su longitud es variable y cuando la inflorescencia está bien desarrollada puede llegar a 60 cm (pedúnculo incluido). La inflorescencia consiste en varias ramas que en el extremo apoyan algunas pediceladas y espiguillas sésiles, que tienen dos flósculos estériles que sólo fecunda la superior. Cada florecilla tiene tres estambres y un solo ovario con dos estilos con estigmas plumosos.

Fruto

Es cariópside con una forma aproximadamente redondeada y de color diferente, dependiendo de la variedad. Los frutos del sorgo dulce son generalmente más pequeños que los granos de sorgo. El peso de mil semillas es de unos 21 g, variando entre 16 a 28 g.



Figura 2: Semillas de sorgo dulce (fuente: CETA)

Sistema de la raíz

El sistema de raíces es adventicio con raíces fibrosas y ramificadas y puede extenderse hasta 1,5 m, mientras que la raíz primaria, igual que otras plantas de la familia de las gramíneas, tiene la senescencia temprana y se sustituye por las raíces originadas en la parte subterránea del tallo. Por otra parte, el sorgo dulce desarrolla raíces refuerzo en los nudos más bajos de una manera similar al maíz, que ayudan a mantener el tronco.

Características biológicas:

Etapa de desarrollo: en los climas templados tiene lugar en primavera-verano. El ciclo de desarrollo dura aproximadamente 4 meses, de mayo a septiembre, dependiendo de la ubicación y la variedad. La máxima tasa de crecimiento (etapa de elongación) deberá coincidir con el periodo de máxima radiación solar. El sorgo dulce tiene un ciclo de desarrollo muy rápido.

Principales etapas fenológicas: emergencia, macollaje, elongación, emergencia de la panícula, floración, maduración. Si se siembra en primavera, cuando la temperatura es media, por lo general emergen en un periodo de 7-10 días. La duración desde la emergencia al macollaje es de unos 30-40 días, y desde la emergencia hasta la elongación, 47-55 días. La etapa de elongación depende de la variedad y corresponde a 30-90 días. La floración suele ocurrir 5-7 días después de la salida de la panícula. La etapa de madurez es también muy variable, dependiendo de la variedad, pero el plazo común es de 30 días.

La acumulación de azúcar: existe una correlación entre el grado de madurez y el contenido de azúcar en los tallos de sorgo. La elección de la variedad, la fecha de siembra y las condiciones de cultivo son los principales factores para optimizar la acumulación de azúcar. La máxima acumulación tiene lugar después de que aparece la panícula, sobre todo después de la floración. En las zonas donde la temperatura es baja en septiembre, el desarrollo del sorgo es tempranamente interrumpido y la acumulación de azúcar se detiene. Los azúcares almacenados en los tallos son la glucosa, la fructosa y la sacarosa, principalmente. Cuanto más maduro es el sorgo, más alto es el contenido en sacarosa y en glucosa y disminuye el contenido de fructosa.



Figura 3: Variedad de Sorgo Dulce Sugargraze (fuente: CETA)

6.3 Tecnologías de cultivo y cosecha^{14,15,16,17,18,19,20}

El sorgo dulce es tolerante a la sequía y a las diferentes condiciones del suelo; las variedades presentan diferente respuesta al fotoperíodo, hay una amplia gama de la diversificación del genotipo que permite la adaptación para las diferentes longitudes de crecimiento. Debido a esto, el sorgo dulce puede crecer en una amplia gama de ambientes agrícolas.

6.3.1 Preparación del suelo

La preparación adecuada del suelo es necesaria para facilitar la emergencia de las plántulas y para eliminar las malas hierbas. El suelo debe ser arado y finamente gradeado para la siembra. Se debe evitar la compactación.

También se recomienda aplicar un herbicida (glifosato, por ejemplo) para controlar las malezas. La preparación del suelo se efectuará teniendo en cuenta el sistema de riego, que estará disponible para el cultivo. El sorgo tiene una buena respuesta al riego por surcos, lo que impide el alojamiento; en este caso las crestas tendrían que hacerse en la etapa de preparación del suelo. En el caso de aspersión o riego por goteo, la superficie de la tierra se nivela o puede mantenerse plana.

6.3.2 Fertilización

La dosis de fertilización depende de la fertilidad del suelo y la productividad requerida. En los climas mediterráneos, donde la fertilidad del suelo varía de leve a moderada, las necesidades de fertilización son del siguiente orden: 100-150 kg N, 60-100 kg P₂O₅ y K₂O 60-100 kg por hectárea. Se recomienda una aplicación de nitrógeno a realizar en dos momentos: antes de la siembra y durante los 20-30 días después de la emergencia.

6.3.3 Siembra

La temperatura debe ser superior a 10-12 °C para la germinación del sorgo y no debe haber ningún riesgo de heladas. Teniendo en cuenta la duración del ciclo y el hecho de que la etapa de acumulación de azúcar se ve afectada por las bajas temperaturas, la siembra en los climas mediterráneos se debe realizar a principios de mayo para que el sorgo pueda ser capaz de completar su ciclo. La siembra se realiza generalmente en filas separadas 0,75 m con una distancia de 0,10-0,15 m en la fila; se debe mantener una profundidad mayor o igual a 5 cm. La dosis de siembra depende de la variedad, la capacidad de germinación de las semillas y del peso específico, que por lo general oscila entre 30 y 70 semillas/g. Se recomienda realizar una prueba de germinación antes de la siembra. Es esencial después de la siembra mantener unas buenas condiciones de humedad en el suelo para asegurar la aparición.



Figura 4: Siembra de sorgo dulce en el Valle del Po, Italia (fuente: CETA)

La elección de la variedad es muy importante para obtener buenos rendimientos de los cultivos. Las variedades de ciclo largo suelen ser más productivas que las de ciclo corto. Sin embargo, en algunos lugares las variedades de ciclo largo no son recomendables ya que las temperaturas deben ser templadas durante todo el ciclo para expresar su potencial. En climas mediterráneos esta condición significa que la temperatura debe ser suave o templada en septiembre.

- Variedades de ciclo corto: la duración del ciclo de este tipo de variedades es de 70 a 90 días desde la emergencia a la floración en climas mediterráneos. Por ejemplo, las variedades indicadas Mer 60-2, Mer 78-13, Soave, Atlas, Madhura.
- Variedades de ciclo largo: que pueden necesitar alrededor de 110 días desde emergencia a floración. Por ejemplo, las variedades indicadas Keller, Dale, Wray.

6.3.4 Riego

Al igual que para cualquier otro cultivo de regadío, las necesidades de riego para el sorgo dulce dependen de la localización (es decir, el equilibrio del agua se ve afectada por la temperatura y los regímenes de lluvias) y el sistema de riego utilizado para el cultivo. Además, está el factor intrínseco de los requisitos de la variedad. En general se puede variar entre 500 y 1.000 mm.

Para algunas variedades de sorgo dulce y dentro de un rango compatible con la disponibilidad de agua, el uso eficiente del agua de los cultivos disminuye cuanto mayores sean los regímenes de agua. Se han indicado valores de 3,7 a 6,1 kg/m³ en base seca de agua evapotranspirada para el uso eficiente del agua de la variedad de Keller crecida en el centro de España.

El sorgo dulce puede crecer en condiciones de estrés hídrico, pero los rendimientos se ven afectados. En condiciones mediterráneas, donde la escasez de agua es un hecho durante el verano, se debe alcanzar un compromiso entre la dosis de riego y el rendimiento esperado.

6.3.5 Protección del cultivo

Desde las primeras etapas de la cosecha, es decir, desde la siembra hasta el cierre del dosel (aproximadamente cuando el cultivo es 1 m de altura), el sorgo es muy sensible a la competencia con las malezas. Por lo tanto la tierra debe ser preparada cuidadosamente antes de la siembra con el objetivo de eliminar las malas hierbas. También es útil la aplicación de un herbicida antes de la preparación de la tierra. De todos modos, el herbicida debe ser aplicado siempre en pre-emergencia, inmediatamente después de la siembra, porque la germinación del sorgo es muy rápida y la cosecha podría verse afectada si el herbicida se aplica tarde.

Las plagas y enfermedades son similares a las del maíz y la caña de azúcar en las zonas donde se cultiva extensamente, como por ej, en el Sur de los EE.UU.. Por ejemplo, no se han observado plagas o enfermedades en las experiencias llevadas a cabo en el centro de España, sólo ocasionalmente la presencia de barrenadores.

Los principales daños abióticos que el sorgo dulce podría sufrir son fríos y alojamientos.

1. Frío. La adecuada selección de las variedades (la duración del ciclo) y la fecha de siembra son necesarios para evitar daños por el frío.
2. Alojamiento. La adecuada selección de las variedades (altura de la planta, diámetro del tallo, la densidad del dosel) es esencial, así como la tasa de fertilización de nitrógeno y fecha de cosecha.
3. Ajuste. En los lugares donde los daños por el viento son posibles, se recomiendan variedades más cortas, con tendencia a un bajo alojamiento y a bajas tasas de nitrógeno. Además, con el fin de evitar riesgos por efecto del viento durante la temporada de otoño, es mejor cosechar lo más pronto posible.



Figura 5: Cultivo de sorgo dulce 1 mes después de la siembra (fuente: CETA)



Figura 6: Cultivo de sorgo dulce 2 meses después de la siembra (fuente: CETA)

6.3.6 Cosecha

La cosecha debe realizarse cuando la biomasa y la acumulación de azúcar alcanza su punto máximo. El tiempo óptimo para la cosecha es, por lo general, después del desarrollo de las panículas, ya que la mayor concentración de azúcares ocurre después de la floración. Es evidente que la fecha depende de la variedad y las condiciones climáticas. Siempre que sea posible, la determinación de la concentración de azúcar en los tallos se recomienda después de la floración, como mínimo el primer año de crecimiento de la variedad, con el fin de determinar su rendimiento.

La cosecha de sorgo dulce se finaliza con la recuperación de todos los azúcares que se concentran sobre todo en los tallos. Por lo tanto, la forma en que se lleva a cabo la cosecha es mediante el cortado de los tallos en su base; para obtención de bioetanol, las hojas de sorgo son rechazadas.



Figura 7: Máquina segadora-trituradora-cargadora (fuente: CETA)

Hay una serie de estudios sobre la mecanización de la cosecha de sorgo dulce. Algunas de las máquinas utilizadas son: combinadas para la caña de azúcar, cosechadoras que cortan los tallos, picadoras de forraje y algunos prototipos. En los EE.UU., las cosechadoras de forraje de maíz son recomendables, pero la cosecha realizada debe ser entregada inmediatamente a la planta de bioetanol para su procesamiento. Este es un método conveniente, porque se utiliza maquinaria convencional y, por lo tanto, los costes de operación son más baratos. El principal inconveniente es el alto riesgo de pérdidas de azúcar (la pérdida de jugo y la inestabilidad de la sacarosa).



Figura 8: Cosecha de sorgo dulce con la máquina segadora-trituradora-cargadora (fuente: CETA)

6.3.7 Post-Cosecha

A pesar del hecho de que el sorgo dulce es un cultivo interesante para el bioetanol, incluso en los climas templados, se han realizado pocos progresos sobre la penetración de este cultivo. Esto sucede, sobre todo, porque el período de tiempo comprendido entre la cosecha y la fase de procesamiento es demasiado corto. El contenido de humedad en la cosecha es muy alta (70-80%) y las temperaturas en época de cosecha son suaves. Posteriormente al corte o picado, tiene lugar pérdidas en el jugo. Por otra parte, la degradación del azúcar (fermentaciones no deseadas) se provoca por la alta humedad de la biomasa, con una alta concentración en azúcares fácilmente fermentables. Para evitar fermentaciones del sorgo dulce debe ser cosechado de forma rápida y la cosecha producida debe ser inmediatamente procesada en la planta. En los climas templados (por ejemplo, el clima mediterráneo) el período de cosecha se reduce por el hecho de que si la cosecha se retrasa, las condiciones climáticas pueden ser malas para este cultivo y los daños por alojamiento,

frío o pérdidas de azúcar pueden tener lugar. En otras palabras, el problema es el impacto de la estacionalidad de este cultivo en la producción y en el proceso industrial.

Para evitar los problemas antes mencionados, se pusieron de manifiesto varias medidas. Una de ellas es cultivar variedades con una duración de ciclo diferente (variedades de ciclo corto a ciclo largo) o combinar varios cultivos de azúcar, que ayudan a hacer más largo el período de cosecha y procesamiento. Otra medida es la de extraer y preservar el jugo del tallo o los azúcares de la fermentación. Además, se recomienda el uso del bagazo de caña para su posterior procesamiento como materia prima para la producción de bioetanol.



Figura 9: Picado de sorgo dulce (fuente: CETA)

6.4 Programas de mejora^{21,22,23,24}

El sorgo dulce se ha estudiado como un cultivo alternativo para los azúcares/etanol en las regiones templadas desde finales del siglo XIX. Programas de mejora apuntan a la producción de azúcares cristalizados y el jarabe, la mejora de los rendimientos de los hidratos de carbono y también la prevención de la antracnosis de la hoja y la putrefacción del tallo rojo. Varios parámetros del sorgo dulce como el porcentaje de extracción de jugo, el valor de grados Brix, azúcares no reductores, azúcares totales y la actividad enzimática de inversión se están estudiando. En la actualidad, las actividades de mejora de sorgo dulce se están llevando a cabo en el Proyecto Europeo SWEETFUEL, apoyado por la Comisión Europea (7º Programa Marco).

6.4.1 Mejora para ambientes de temperatura

La temperatura se asocia con el período de floración y emergencia y que también está relacionado con la producción de tallos y el contenido en azúcar. El sorgo dulce crece con alta radiación y se adapta a los climas del sur de Europa, pero su crecimiento es limitado en el norte y centro de Europa debido a las bajas temperaturas, que afectan a la producción de biomasa. El objetivo principal de este proyecto es la adaptación de sorgo dulce a bajas temperaturas. El rendimiento de la biomasa, la tolerancia al frío, la germinación rápida y homogénea y la resistencia a las enfermedades se han llevado a cabo. Pruebas de mejora de las variedades se llevaron a cabo en los países europeos implicados en el Proyecto SWEETFUEL: Alemania, Italia y Francia.

6.4.2 Mejora para ambientes propensos a la sequía

Uno de los principales factores limitantes para este cultivo es su necesidad de agua, a pesar del hecho de que son inferiores a los de caña de azúcar. El sorgo dulce puede tener un doble propósito: cereales y azúcares, con una buena adaptación a la sequía, los tallos jugosos con contenido de azúcar y buena digestibilidad. Los objetivos del programa de cría, también en el proyecto SWEETFUEL, son la mejora del jugo de los tallos, para evitar efectos de la sequía, incluso si el aumento de contenido de azúcar. Estas actividades se llevan a cabo en la India, México y Sudáfrica.

6.4.3 Mejora para ambientes con baja fertilidad del suelo

El sorgo es un cultivo adecuado para las zonas situadas en las zonas semiáridas de las regiones de clima semi-húmedo de latitudes tropicales y subtropicales, como las sabanas húmedas. La acidez del suelo y la toxicidad del aluminio son limitaciones importantes existentes en estas áreas. Los programas de mejora son principalmente mejorar la tolerancia genética a estas restricciones que podría permitir obtener mayores rendimientos de biomasa y mayor jugo en los tallos y contenido de azúcar. Estos objetivos también se incluyen en el Proyecto SWEETFUEL; las experiencias se han llevado a cabo en países como Brasil o Sudáfrica.

6.5. Experiencias en la UE en el cultivo de sorgo dulce

Italia^{25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36}

Aunque en marzo de 2011, la ley italiana ha reconocido las Directivas 2009/28/CE y 2009/29/CE (Decreto Legislativo nº 28/2011), la producción de bioetanol nacional no aumentó en el último año. Las únicas plantas existentes están produciendo bioetanol a partir de los orujos agotados y de las uvas de las destilerías en la industria vinícola o los residuos de la producción de jugo de frutas. Sus capacidades son todavía muy pequeñas y, por lo tanto, la demanda nacional de bioetanol se cubre principalmente con las importaciones, que, por orden de importancia provienen de Pakistán, Turquía y Brasil.

En lo que respecta a los cultivos de bioetanol, en Italia existe una larga tradición en las investigaciones agrícolas de sorgo como cultivo para alcohol desde la década de 1930 debido a las políticas autárquicas de la época. El conocimiento de la cosecha y la disponibilidad de las variedades de sorgo dulce ha tenido un desarrollo gracias a los estudios e investigaciones encaminadas a la mejora genética. De hecho, en ausencia de un comercio mundial de la hibridación natural hecho a finales de 1930 y después de la reproducción entre las líneas superiores seguida por la selección de la segregación de generaciones que han sido los únicos sistemas para obtener las variedades de sorgo dulce en Italia.

Desde finales de 1980, estudios y ensayos de campo con este cultivo han sido realizadas por A. Biotec. Partiendo del hecho de que las variedades comerciales, seleccionados principalmente en los EE.UU. con respecto a condiciones muy diferentes a las de Italia no mostraron una capacidad de adaptación perfecta, las investigaciones se centraron en la mejora genética de estas especies con el objetivo de desarrollar híbridos con un alto contenido de azúcar, adecuado para zonas edafoclimáticas de la región centro-norte de Italia. Los ensayos de variedades llevado a cabo durante toda la década de 1990 permitió obtener un gran número de híbridos con alto contenido de azúcar, y otros con alto rendimiento en grano o fibra. Uno de los reproductores híbridos (por ejemplo, LP 34 M x LP 113) ha demostrado ser muy superior si se compara con las mejores variedades de azúcar utilizado como prueba, con un rendimiento de 44 t/ha de materia seca. Ensayos plurianuales realizados por A. Biotec en diferentes áreas en el norte de Italia muestran que algunas variedades (por ejemplo, Wray, Dale, Keller, 1500 Mn, M 81-E, Theis y Río) dieron una producción de tallos de entre 55 y 70 t/ha en base húmeda y una producción de azúcares fermentables de entre 6-8 t/ha. Las mejores variedades fueron la tarde porque no tenían la capacidad de la explotación de un período vegetativo más largo. Sin embargo, estas variedades cultivadas en los entornos de las regiones del sur de Italia, muestran una inestabilidad en la producción causada por una alta sensibilidad para las bajas temperaturas de la primavera.

Desde la década de los años 90, ETA-Energías Renovables ha coordinado algunos estudios para aplicar el sorgo dulce en los alimentos y las cadenas de la energía dentro del clima mediterráneo típico del sur de Italia (Metaponto, Matera). En el marco del Proyecto ECHI-T con el apoyo de la EC (5th FP) la producción integrada de energía eléctrica, bioetanol y pellets para alimentación animal a partir de sorgo dulce se ha investigado a nivel de estudio de pre-factibilidad. En cuanto a los aspectos agrícolas, la relación entre el uso del agua, la intercepción de la luz y la producción de materia seca se analizaron en un entorno caracterizado por la arcilla y suelos profundos, altas temperaturas y elevada demanda evaporativa de la atmósfera. El sorgo dulce proporciona altos valores de WUE y RUE (4,8 kg/mm y 3,3 g/MJ, respectivamente.), y la comparación entre estos parámetros permite evaluar la capacidad de los cultivos para utilizar los recursos hídricos y energéticos del medio ambiente. La investigación demostró, además, que los regímenes de alto

riego son necesarios en este tipo de ambiente para obtener un nivel de producción satisfactorio. Además, durante las mismas pruebas se ha confirmado la tolerancia a la salinidad del sorgo dulce. En entornos montañosos o desfavorables en relación con la disponibilidad de agua, se escogió la elección de los híbridos precoces con cultivos de ciclo corto como resultado preferible. El periodo más favorable para el cultivo en el sur de Italia es a mediados de abril-principios de mayo, con la cosecha a mediados de agosto-mediados de septiembre. El rendimiento de las cosechas obtenidas son de entre 35 a 40 t/ha con el apoyo de abastecimiento de agua y 20 a 25 t/ha con un bajo aporte de agua.

El sorgo dulce también se ha estudiado en la misma época en Italia por otros grupos de investigación importantes, como la Universidad de Catania, la Universidad de Bolonia y ENEA. Estos estudios se han llevado a cabo a través de colaboraciones nacionales e internacionales como "Red de Sorgo Dulce - JOUB 0036", "El sorgo dulce, un cultivo sostenible para la producción de energía en Europa: la agricultura, la mejora de la optimización industrial y su aplicación - AIR CT92 0041", "Medio Ambiente estudios sobre el sorgo dulce y la fibra, cultivos sostenibles de la biomasa y la energía - FAIR CT96 1913 "y" técnicas innovadoras y sostenibles para la producción y transformación de los cultivos energéticos y no alimentarios - TISEN ". Estas investigaciones se han centrado en la respuesta del sorgo dulce a los factores ambientales y de manejo de los cultivos; por otra parte, se han llevado a cabo también diferentes estudios nutricionales con especial énfasis en el nitrógeno y la eficiencia de los cultivos en el uso de los recursos hídricos. En los últimos años los resultados de estas investigaciones se han aplicado principalmente para la producción de piensos (por ejemplo, forraje y variedades de granos) y más recientemente también para la producción de biogás a través de la digestión anaerobia con otros sustratos orgánicos (por ejemplo, estiércol).

En lo que respecta a la aplicación en la producción de biogás, los estudios de CRPA SpA han evidenciado que los beneficios del crecimiento del sorgo con la fertirrigación con estiércol y digestión de la materia (por ejemplo, residuos de la digestión anaerobia), permiten una gestión integrada de la cadena y de sus subproductos.

Con el fin de mejorar la aplicación del sorgo en el sector de la bioenergía, algunas investigaciones llevadas a cabo por el CRA-CIN, se han dirigido a evaluar las diferencias entre las variedades de sorgo fibra y de sorgo dulce en términos de biomasa y de rendimiento de azúcares. Los resultados obtenidos en los campos de las regiones de Marche y Emilia-Romagna (centro de Italia) han sugerido que en estas condiciones climáticas, las diferencias no son muy altas y algunas de las variedades consideradas (por ejemplo, H133, Bulldozer, Padana 1) tienen un doble propósito.

La mecanización de las operaciones agrícolas de las variedades de sorgo se ha estudiado durante mucho tiempo por el CRA-CIN. En el concurso de las actividades de investigación, algunos prototipos han sido diseñados y probados para la cosecha y para el acondicionamiento de la biomasa. Sobre todo un prototipo para sorgo fibra se ha diseñado y recientemente la versión pre-comercial está siendo utilizada en campos experimentales en Italia por el Grupo Mossi & Ghisolfi y Coprob.

La aplicación del sorgo en la cadena de bioetanol ha sido especialmente estudiada por algunos grupos de investigación, tales como el Grupo Mossi & Ghisolfi (Chemtex Italia SpA), las Universidades de Bolonia y Turín, CETA, ENEA y CRA-RPS.

Las investigaciones de Chemtex Italia SpA se han llevado a cabo en Emilia-Romagna en colaboración con la Administración Regional, la provincia de Parma, la Universidad de Parma y la Universidad del Sacro Cuore. Diferentes variedades de sorgo forrajero y sorgo fibra se han comparado con el fin de evaluar su rendimiento y el estudio de la logística para el suministro de una planta de procesamiento para producir bioetanol de 2^a generación. Los resultados han confirmado rendimientos satisfactorios de las variedades de sorgo considerados con bajos insumos (productos químicos -50% DPI, sin riego): 20-25 t/ha en base seca. Además, se verificó la posibilidad de introducir el sorgo en los sistemas de cultivo de las fincas en rotación con cultivos de otoño-invierno.

La Universidad de Bolonia ha estado participando recientemente en el Proyecto "SWEETFUEL", apoyado por el 7º Programa Marco. En Italia, las actividades de investigación tienen como objetivo seleccionar los híbridos que se caracterizan por una alta resistencia a las bajas temperaturas con el fin de anticipar la siembra, para dilatar el periodo de cultivo y para optimizar el abastecimiento de las plantas de procesamiento.

En particular, la oportunidad de desarrollar la cadena de suministro a corto y plantas descentralizadas de producción de bioetanol y otros productos básicos de energía utilizando el sorgo dulce ha sido investigado desde 2007 en diferentes zonas de Italia.

En la región de Piamonte diferentes ensayos experimentales como el cultivo de sorgo dulce para la producción de bioetanol, complementándola con la evaluación de la estrategia del ensilado para la preservación del azúcar, fueron llevadas a cabo por el CETA, en colaboración con la Facultad Agraria de la Universidad de Turín en 2007-2008, con diferentes ensayos de campo en el norte de Italia.

El Proyecto MULTISORGO, implementado por el CETA con el apoyo de la MIPAAF, el ENEA y el CRA RPS, tiene como objetivo poner a prueba algunas variedades comerciales de sorgo dulce en las condiciones climáticas del Sur y del Norte de Italia (regiones de Basilicata y de Friuli Venezia Giulia, respectivamente) y expresar las potencialidades energéticas de toda la cosecha, así como la evaluación de la producción de bioetanol de 2^a generación a partir del bagazo y la digestión anaerobia con vinazas residuales. Las pruebas de campo confirman que en el clima mediterráneo, el riego es necesario para garantizar la viabilidad económica del cultivo (es decir, 2,4-4,6 t/ha en base seca sin riego en comparación con 7,6 a 11,3 t/ha en base seca con riego en 2010) y que en la zona templada de clima oceánico (por ejemplo, 670 mm de lluvia en el período mayo-septiembre 2010) es suficiente para alcanzar rendimientos satisfactorios (es decir, 14,3 a 19,0 t/ha en base seca en 2010 y 16,3 a 21,1 t/ha en base seca en 2011).

Grecia

En Grecia, como en la mayoría de los países europeos, el bioetanol se introdujo en el mercado con la Directiva 2003/30/CE, y se ha dado especial atención recientemente a la Directiva RED. Actualmente, la producción de bioetanol es inexistente. Se ha logrado encontrar el uso de bioetanol como combustible alternativo a la gasolina o un complemento del mismo. Entre los cultivos energéticos más importantes hay variedades de sorgo para la producción de bioetanol, debido a su alto contenido en azúcares fermentables y a sustancias orgánicas combustibles, a la tolerancia al estrés hídrico y a los bajos requerimientos de nutrientes. Para la producción de biomasa y bioetanol, el sorgo dulce ocupa un lugar destacado debido a la elevada capacidad fotosintética de los cultivos C4. La EU ha financiado en los últimos años varios estudios de investigación con sorgo dulce (programas como AIR, FAIR, etc), que se llevó a cabo por centros de investigación griegos, ya que este cultivo se considera como una alternativa para los cultivos energéticos y económicamente viable. La CRES, en colaboración con la Universidad Agrícola de Atenas y la Universidad de Patras, a través de la participación en proyectos de investigación nacionales y europeos, ha cultivado campos experimentales en muchas partes de Grecia. Los resultados de estos experimentos son idénticos a los valores medios de producción con riego y la fertilización completa en ambientes mediterráneos.

Dalianis y colaboradores estudiaron el efecto de la densidad de plantas en el crecimiento y en el rendimiento de las variedades de sorgo dulce Keller. Las plantas se siembran en hiladas con una distancia de 0,7 m, y las distancias de las plantas en la línea eran de 5, 10, 15 y 20 cm. Se encontraron que la densidad de 71.000 plantas/ha (o lo que es lo mismo, la distancia de 20 cm) dieron los mejores rendimientos en biomasa fresca y seca (alrededor de 113 t/ha en base húmeda). Esta densidad también provocó el mayor número de hojas y la mayor altura de las plantas.

Dalianis y colaboradores, como parte del equipo de investigación de la CRES, estudiaron en la década de 1990 la capacidad de adaptación de variedades de sorgo dulce en varias regiones del país y la influencia de los diferentes niveles de riego y la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de la biomasa fresca, el contenido de azúcar en los tallos y las características agronómicas de las variedades de sorgo dulce. El sorgo dulce se adapta bien a través de todo el estado griego y se puede cultivar desde las regiones del norte a las del sur y desde el nivel del mar hasta altitudes elevadas (por ejemplo, hasta 800 metros). Se puede cultivar en diferentes tipos de suelo que van desde la marginal hasta el muy fértil. Los valores más bajos para la biomasa y la producción de azúcar se registraron en suelos marginales, abandonados y pobres (hablando en términos de contenido de materia orgánica), mientras que los mayores rendimientos correspondieron a los fériles campos ubicados en el sur de Grecia.

Por otra parte, se encontró que la variedad Keller demuestra el rendimiento más eficiente en términos de biomasa fresca y azúcar: la biomasa fresca producida estaba en el rango de 87 a 144 t/ha en base húmeda y los azúcares obtenidos estuvieron en el rango de 9 a 12 t/ha. El riego parece afectar a las características agronómicas del cultivo, así como a los rendimientos de la biomasa y a los azúcares. Por el contrario, la fertilización con nitrógeno no parecen afectar a los rendimientos de biomasa fresca y azúcar. En consecuencia, se justifica la aplicación de las tasas de nitrógeno reducido. El equipo también estudió los efectos de los factores abióticos en los parámetros fisiológicos de los cultivos, tales como la evapotranspiración, el uso del agua y la radiación solar. Los rendimientos variaron de 10 a 12 toneladas de biomasa fresca/ha. La eficiencia en el uso de radiación, RUE es de 3,5 g/MJ PAR en base seca y el uso eficiente del agua, WUE es de 55 kg/mm de agua^{42, 43}.

En los experimentos más recientes, a finales de 1990, el grupo de investigación de la CRES estudiaron las características agronómicas y de rendimiento, así como el efecto de los diferentes niveles de riego y la fertilización nitrogenada en un número de variedades (Sofra, Korral, Colley, Keller, Mn 1500) e híbridos de sorgo dulce. Se confirmó que las variedades más rentables fueron Keller y MN 1500. Los rendimientos de estas variedades van desde 105 hasta 115 t/ha en base húmeda con una densidad de 110.000 plantas/ha. En estos experimentos se encontraron efectos de la fertilización sobre las características agronómicas de las plantas tales como la altura y el índice de área foliar verde (6,2 frente a 4,4 en la fertilización de la tierra).

Dercas y colaboradores⁴⁴ realizaron pruebas de cultivo en el ámbito del Programa Europeo AIRE en los campos experimentales de Vagias Viotia Kopaida situado en el centro de Grecia, en 1993 y 1994, con cuatro niveles de riego (es decir, IH, IM = 1/2 IH, IL = 1/4 IH y IHA = IH hasta la floración) y dos niveles de fertilización nitrogenada (es decir, NL = 40 kg/ha de N y NH = 120 kg/ha de N). En los campos experimentales de Vagias cosecha de 1993, el rendimiento fue de 12,2 kg/mm, sin diferencias de rendimiento entre los niveles de riego. En 1994, los rendimientos variaron de 7,45 kg/mm en el nivel de riego alto (IH) a 11 kg/mm en el nivel de riego de bajo (IL). Esta diferencia fue atribuida por los investigadores al hecho de que no había agua subterránea en el campo experimental de Kopaida. La biomasa seca se calcula en 3,2 kg/mm para el nivel de riego alto de los dos años de experimentos. Los niveles de fertilización no tuvieron efecto sobre el rendimiento de la biomasa ya sea fresco o seco en los dos años. Esto se atribuyó a la alta fertilización del campo que se había aplicado en años anteriores y los bajos requerimientos de nutrientes de los cultivos.

España^{45,46,47}

El sorgo dulce como cultivo energético se ha estudiado en España desde la década de 1980. Los equipos de investigación liderado por el Centro para la investigación agrícola y desarrollo de Málaga y la Universidad Politécnica de Madrid han contribuido sustancialmente al conocimiento de este cultivo.

Importantes proyectos de I + D con sorgo dulce se han realizado en España (total o parcialmente) son los siguientes:

- 1981-1987. "Sweet sorghum: contribution to the study of its cultivation for sugars and/or bioethanol in Andalucía (Spain)". INIA y CAICYT. Programa de Agro-Energía de España.
- 1990-1993. "Sweet sorghum, a sustainable crop for energy production in Europe. Agricultural, industrial improvement, optimisation and implementation". Comisión de las Comunidades Europeas, D.G. XII, Programa JOULE, CEE, Contrato JOUB-0036-C.
- 1993-1995. "Coordinated R&D activity in the sector of biomass production - Sweet sorghum network". Comisión de las Comunidades Europeas, D.G. XII, AIR1 Programa, EU, Contrato AIR1-CT92-0041.
- 1997-2000. "Environmental studies on sweet and fiber sorghum sustainable crops for biomass production and energy". Comisión de las Comunidades Europeas, CE, Programa FAIR, Contrato FAIR3-CT96 1913.
- 2004-2005. "Study for the viability of the production and utilization of bioethanol as biofuel starting from new energy crops", Ministerio de Educación y Ciencia, Proyecto Profit.

- o 2006-2007. "Singular strategic project for the development, demonstration and determination of the production of energy in Spain starting from biomass of energy crops". Ministerio de Educación y Ciencia, Subproyecto Agrobiol.
- o 2010-2011. "Initiative for the development of the cultivation of sweet sorghum with bioenergy purposes – SORGOSWEET", Ministerio de Ciencia e Innovación, Proyecto Plan E.

Una serie de experimentos en los cultivos de sorgo dulce desde la latitud 36° a 41° N en España han demostrado que en condiciones no limitantes de agua, variedades y rendimientos se ven fuertemente influenciados por el gradiente de latitud y las condiciones climáticas. Variedades tardías son adecuadas para las zonas del sur siempre con el riego, mientras que las variedades tempranas son más adecuadas para las áreas mediterráneo-continentales. Se ha visto que la selección de variedades es un factor clave para el cultivo del sorgo dulce. Una línea de investigación reciente es el uso del sorgo como segundo cultivo en el entorno mediterráneo. A tal efecto, una cuestión clave es la elección de la variedad adecuada. La evaluación de las variedades comerciales de sorgo como cultivo de ciclo corto para biomasa y para la producción de azúcares en el experimento realizado durante un año por el Grupo de AgroEnergética de la Universidad Politécnica de Madrid se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: Resultados del cultivo de variedades comerciales de ciclo corto. KEY: Altura: muy alto (VT), alto (T), medio (M), bajo (S); Lodging resistance: pobre (*), intermedia (**), buena (***) ; Ciclo de Desarrollo: Temprano (E), intermedio (I), tardío (L) ; tipo de Panícula: Abierta (O), semi-compacta (SC), compacta (C) ; Grano: si (Y), no (N); Rendimiento Biomasa: muy alto (VH), alto (H), medio (M), bajo (L); Contenido en Sacarosa: pobre (*), intermedio (**), bueno (***) . La barra se refiere a la primera cosecha (15 de Septiembre , 85 DAS) y cosecha normal (18 de Octubre, 118 DAS)

| | Altura | Resistencia | Desarrollo | | | | |
|------------|--------|-------------|------------|------------------|-------|---------------------|--------------------|
| | | | Ciclo | Tipo de Panícula | Grano | Rendimiento Biomasa | Contenido sacarosa |
| Sugargraze | M | * | L | O | --- | H | */*** |
| SSG | M | * | L | O | --- | M | * |
| 23402 | M | *** | L | SC | --- | L | * |
| Biom. 133 | VT | *** | E | O | --- | VH | ** |
| Sugar T | T | *** | I | O | --- | M | */*** |
| Autan | T | *** | I | O | Y | H | * |
| Such. 506 | T | *** | I | C | Y | VH | **/*** |
| Such. 405 | S | *** | I | SC | Y | L | * |
| Madhura | T | ** | E | C | Y | VH | */*** |
| Nectar | M | ** | E | C | Y | M | **/*** |

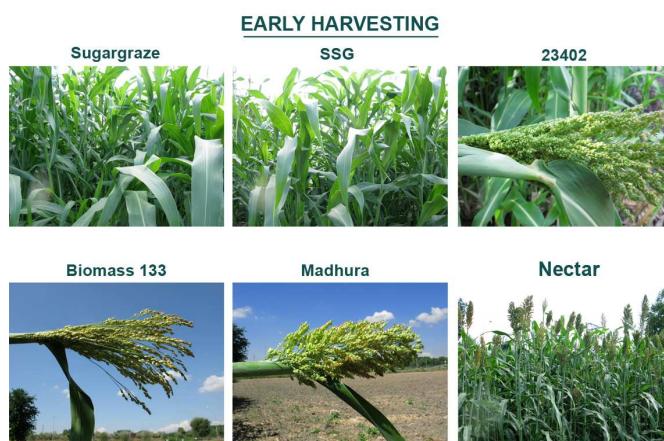


Figura 10: Estado fenológico como función de una variedad de sorgo en pruebas realizadas en Madrid, España. Fecha de siembra: 22 Junio 2010; fecha de cosecha: 15 Septiembre 2010 (fuente: Grupo de Agroenergética de la Universidad Politécnica de Madrid, España)

TEMA: BIOETANOL Y BIO-ETBE

El bioetanol es alcohol etílico usado como combustible para el transporte y se deriva de la fermentación alcohólica de los azúcares libres, como la glucosa, sacarosa, fructosa, o polisacáridos hidrolizados, tales como almidón, celulosa, hemicelulosa y fructanos (por ej, la inulina). Basándose en sus propias características, el bioetanol es adecuado para alimentar los motores Otto en lugar de la gasolina:

- el LHV es alto: 27 MJ/kg
- los valores de MON y de RON permiten un control de la combustión efectivo durante la compresión en el pistón: MON 96, RON 130, número de octano (por ejemplo, media entre MON y RON) 113.

Por otra parte el bioetanol se puede convertir en bio-ETBE, que es un compuesto antidetonante útil en los motores Otto en lugar del MTBE:

- el LHV es alto: 35 MJ/kg
- los valores de MON y de RON indican un buen comportamiento como compuesto antidetonante: MON 102, RON 118, número de octano (por ej. media entre MON y RON) 110.

El Bioetanol contribuye a la reducción de las emisiones de los GHGs para el sector del transporte, porque se deriva de la biomasa y no de los recursos fósiles; en consecuencia, el equilibrio entre el sumidero de carbono y la emisión es igual a cero. El Bio-ETBE se considera como GHGs neutro sólo para la fracción de las moléculas que se derivan de la biomasa: 47% w/w. Las principales materias susceptibles de convertirse en bioethanol son:

- Azúcar: caña de azúcar, remolacha azucarera,sorgo dulce, melazas, bagazo
- Almidón: granos de cereales, patata, batata, mandioca
- Materia lignocelulósica: carrizo, paja, tallos de maíz, fracción orgánica de los MSW.

En base a las materias primas convertidas y posteriormente a la complejidad de la tecnología utilizada, el bioetanol se considera un biocombustible de 1^a generación, pero también como biocombustible de 2^a y 3^a generación:

- 1^o generación: conversión de azúcar y almidón
- 2^a generación: conversión de cultivos lignocelulósicos (por ejemplo, carrizo)
- 3^a GENERACIÓN: CONVERSIÓN DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS (POR EJEMPLO PAJA, MSW).

7. DIRETRICES DEL MODELO DE LA UE PARA EL PROCESADO DE SORGO DULCE COMO CULTIVO ENERGÉTICO

7.1 Introducción

El sorgo es un cultivo multipropósito, ya que proporciona un alto rendimiento en biomasa, azúcares y grano, dependiendo de las variedades elegidas.

En el momento actual, las variedades de sorgo dulce proporcionan principalmente biomasa y azúcar, mientras que su potencial como cultivo de grano todavía no está expresado. Muchas investigaciones agrícolas están destinadas a superar este límite, en cuanto a la selección de híbridos con altos rendimientos en biomasa, azúcar y grano al mismo tiempo. En realidad, con el fin de expresar todas las potencialidades de la cosecha, otras investigaciones agrícolas están dirigidas a optimizar las operaciones de recolección y la separación de todos los productos: la biomasa y el azúcar por un lado y el grano por otro.

Dado que estas investigaciones aún no han finalizado, el modelo de proceso de sorgo dulce prevee el aprovechamiento de los azúcares y de la biomasa lignocelulósica.

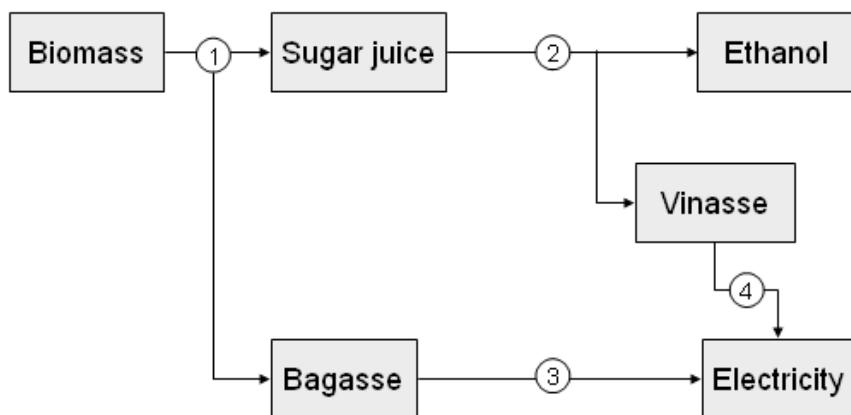


Figura 11: Esquema de planta de procesado de sorgo dulce para bioetanol y materias primas energéticas (fuente: CETA)

De acuerdo con el esquema de la figura 10, la biomasa de sorgo dulce es triturada y el jugo de azúcar se procesa para la obtención de bioetanol.

El bagazo, residuo lignocelulósico de salida de la unidad de trituración, se seca y se quema en las instalaciones de cogeneración para obtener electricidad y calor.

Las vinazas, residuo de la unidad de destilación y rectificación, es la materia prima para la digestión anaerobia, para su uso en co-digestión con otros sustratos como, por ejemplo, el estiércol como inóculo microbiano. El biogás obtenido se purifica y se quema en las instalaciones de cogeneración para obtener electricidad y calor.

Este enfoque para el procesamiento de sorgo dulce permite diferentes variaciones que se pueden aplicar en la planificación de un modelo específico de la cadena para el suministro de plantas descentralizadas de pequeña y mediana escala en la EU.

De hecho, la conversión del jugo azucarado en bioetanol y el aprovechamiento energético del bagazo y de las vinazas puede ser, o bien la única línea de producción o bien una de las líneas de producción aplicados en la planta.

Estas diferentes estrategias se explican en detalle en los capítulos específicos. En particular, la utilización de sorgo dulce como materia prima única se profundiza en tres casos de estudio (por ej, Italia, Grecia y España) y la viabilidad para el procesamiento de sorgo dulce con otra materia prima (por ej, la remolacha azucarera) en la misma planta se detalla en el caso español.

Todas estas aplicaciones tienen algunos elementos comunes en relación con el dimensionamiento de la cadena de suministro, el contenido tecnológico de la transformación y la explotación de los subproductos. En consecuencia, los párrafos que siguen están destinados a poner de manifiesto las

líneas principales que son comunes a las distintas aplicaciones. Los datos de entrada son indicativos para llevar a cabo un estudio de viabilidad y con este objetivo se requiere una contextualización a cada situación específica.

7.2 Dimensionado de la cadena de suministro

En la creación del modelo de la EU, la capacidad del bioetanol anhidro obtenido de la transformación de sorgo dulce se toma como criterio para el dimensionamiento de la cadena de suministro.

En este caso, la acotación se refiere a toda la planta (en el caso de que el sorgo dulce sea la única materia prima) o bien a la línea de producción específica para obtener bioetanol de 1^a generación a partir de este cultivo (si la planta de procesado dispone de diferentes materias primas).

Hay dos elementos que son necesarios para la evaluación: la superficie agrícola cultivada con sorgo dulce y la variedad del suministro.

Necesidad de tierras agrícolas

La tierra agrícola requerida depende de los rendimientos de la biomasa y de los azúcares, que son consecuencia, por ejemplo, del tipo de suelo, de la disponibilidad de agua, del clima y de la variedad cultivada.

Las particularidades principales han relacionado con algunos de los escenarios de referencia, a fin de dar un valor indicativo para las partes interesadas (Tabla 2).

Tabla 2: Rendimientos de biomasa y bioetanol obtenidos a partir de sorgo dulce en algún entorno de referencia^{48,49}

| Macroescenarios para planificar la cadena de suministro | | | |
|---|--------------------|-----------------------|---|
| Tipo de ambiente | | Rendimiento agrícola | |
| Tipo MEDITERRANEO | Riego | Rendimiento Biomasa | 10,3-35,0 t/ha db |
| | | Rendimiento Bioetanol | 1,5-4,6 t/ha 1,9-5,8 m ³ /ha 40,5-123,6 GJ/ha |
| | | Rendimiento Biomasa | 14,3-19,0 t/ha db |
| Tipo TEMPLADO | Sin riego | Rendimiento Bioetanol | 2,1-3,4 t/ha 2,8-4,4 m ³ /ha 56,7-91,8 GJ/ha |
| | | Rendimiento Biomasa | 30,0-40,0 t/ha db |
| | Riego (emergencia) | Rendimiento Bioetanol | 4,3-6,1 t/ha 5,9-7,9 m ³ /ha 116,1-164,7 GJ/ha |

De los rangos reportados para los rendimientos de la preocupación de algunos diferentes variedades de sorgo dulce, actualmente disponibles en el mercado de la EU.

Se han analizado dos diferentes tipos de medio ambiente en cada una de las condiciones para asegurar la viabilidad económica. El cultivo de sorgo dulce en tierras marginales se toma en consideración de los contextos donde se garantiza la viabilidad económica y los rendimientos relacionados corresponden a los valores más bajos en el rango informado para cada tipo de medio ambiente. Especialmente, en los ambientes mediterráneos (por ej, sur de Italia, España, Grecia) el cultivo de sorgo dulce sin riego es excluido debido a los rendimientos de biomasa son muy bajos (2,4 a 4,6 t/ha en base seca). En los ambientes templados (por ej, el norte de Italia), sólo el riego de emergencia se considera eventual porque la lluvia durante el período de crecimiento suele ser suficiente (por ejemplo, 670 mm entre mayo-septiembre de 2010). Estos datos constituyen la entrada para el cálculo de las hectáreas que deben ser cultivadas con sorgo dulce para abastecer a la planta, basándose en su capacidad. Sin embargo, para cada situación específica, la superficie calculada podría requerir un área más amplia, por ejemplo, si se proponen rotaciones con otros cultivos en la región considerada a fin de proteger la fertilidad del suelo.

Línea de suministro

En cuanto a la distancia entre la planta y los campos, se deben integrar diferentes evaluaciones. Los elementos principales son el impacto del transporte en el balance energético de la cadena, el respeto de los límites específicos para el acceso al eventual apoyo nacional (por ejemplo, cadena corta reconocida por una distancia máxima de suministro), la logística coherente con los requisitos de las granjas (por ejemplo, el número de maquinaria agrícola necesaria, el número de kilómetros recorridos) y las plantas (por ejemplo, momento del suministro durante la cosecha) y con el impacto del tráfico consecuente en el área considerada. Con el fin de dar algunas indicaciones para la línea de suministro y sus repercusiones, en la Tabla 3 se describen los detalles de dos simulaciones.

Tabla 3: Resultado de dos simulaciones para el suministro de una planta con capacidad de 10.000 t/año como bioetanol anhídrico^{50,51}

| 3.700-3.800 ha cultivadas con sorgo dulce | | |
|---|-----------------------------|---|
| Rango Máximo | Cosecha en 40 días | Maquinaria Agrícola |
| 15 km | 4 metros en paralelo | 4 segadoras-trituradoras-cargador de máquinas 24 tractores agrícolas |
| 20 km | 6 metros en paralelo | 6 segadoras-trituradoras-cargador de máquinas 24 tractores agrícolas |

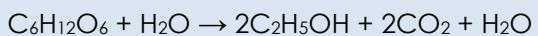
La creación de modelos para el dimensionamiento de las unidades para el aprovechamiento de los subproductos se basa en las cantidades de bagazo y vinazas obtenidos, que están vinculados a las tierras de cultivo agrícola y a la capacidad de convertirse en bioetanol anhídrico. Los principales elementos para dimensionar las unidades relacionadas se presentan en el apartado específico (7.4 aprovechamiento de subproductos).



Figura 12: Cosecha (fuente: CETA)

TEMA: PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

La producción de bioetanol se basa en la fermentación alcohólica llevada a cabo mediante microorganismos en condiciones controladas. La correspondiente reacción química se describe como sigue:



A pesar de que la fermentación es el núcleo de la producción, la transformación completa depende del tipo de materia prima: los azúcares libres son directamente fermentables, mientras que los polisacáridos requieren una hidrólisis previa.

Además, la complejidad de la etapa de hidrólisis depende de la clase de polisacáridos: los azúcares libres se pueden obtener fácilmente a partir de almidón, mientras que la celulosa y la hemicelulosa son los carbohidratos estructurales, fuertemente ligados a la lignina, y posteriormente, su hidrólisis es más difícil.

El tipo de tratamiento se resume de la siguiente forma:

- Azúcar:

1. Extracción de los azúcares libres a partir de la biomasa
2. Fermentación
3. Destilación y rectificación
4. Deshidratación

Al final del proceso se produce bioetanol anhídrico de 1º generación

- Almidón:

1. Hidrólisis enzimática: licuefacción con alfa-amilasa y sacarificación con gluco-amilasa
2. Fermentación
3. Destilación y rectificación
4. Deshidratación

Al final del proceso se produce bioetanol anhídrico de 1º generación

- Materia lignocelulósica:

1. pre-tratamiento para separar la lignina de los polisacáridos estructurales
2. Hidrólisis enzimática: endocelulasa, exocelulasa, hemicelulasa
3. Fermentación de azúcares C6 (por ejemplo glucosa)
4. Fermentación de azúcares C5 (por ejemplo xylosa)
5. Destilación y rectificación
6. Deshidratación

Al final del proceso se produce bioetanol de 2º generación si los cultivos lignocelulósicos se han procesado; como alternativa, se produce bioetanol de 3º generación si los residuos lignocelulósicos se han convertido.

7.3 Procesado de la biomasa del sorgo dulce para bioetanol

En las secciones tecnológicas de la línea de producción de bioetanol de 1^a generación son: la unidad de extracción del azúcar, la unidad de concentración para el almacenamiento de azúcar en el jugo, la unidad de la fermentación, la destilación y rectificación de las unidades y, finalmente, la unidad de deshidratación.

Unidad de trituración

La extracción de los azúcares libres de la biomasa picada puede llevarse a cabo mediante presión directa utilizando los molinos continuos mediante un sistema de lixiviación.

En ambos procesos, la extracción se realiza con agua caliente (75-85 °C) y la relación entre materia prima y agua caliente es de 1:0,1-1:1. El rendimiento de extracción está en un rango entorno al 93-98%, teniendo en cuenta un rango del rendimiento de la extracción entorno al 85-93% utilizando molinos continuos en serie (de 3 a 5 molinos continuos) y un rango de rendimiento de la extracción entorno al 93-98% con un difusor continuo.

En el caso de que la trituración se realice en molinos horizontales o verticales, el principio de funcionamiento consiste en la aplicación de alta presión, que es ejercida por una pareja de rodillos (sistema de molienda TRPF): 3 parejas en las trituradoras verticales pequeñas y hasta 9 parejas en las trituradoras horizontales grandes. La velocidad del rodillo superior es generalmente de 10-12 rpm en los molinos pequeños y de 6-8 rpm en los molinos grandes. Con el fin de mejorar la eficiencia de la extracción la incorporación óptima de agua caliente será de 10% w/w.

El esquema de trabajo de la unidad de trituración se detalla en la siguiente figura.

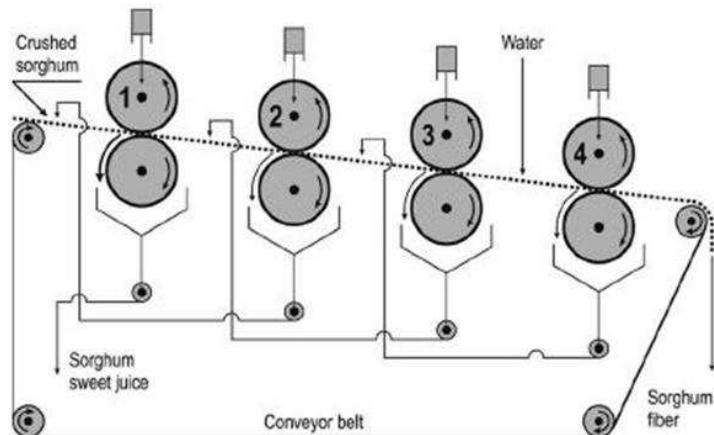


Figura 13: Unidad de trituración (Gnansounou y colaboradores, 2005⁵²)

Alternativamente, el funcionamiento del difusor se basa en la lucha sistemática que ofrece la materia prima en el lavado corriente por medio del agua de imbibición. En la práctica, esto se logra mediante la formación de una capa de tallos cortados en tiras o bagazo primer molino en una cinta transportadora. Se añade agua en la descarga de la cinta transportadora y se filtra a través del lecho del bagazo y de las lamas perforadas de la cinta transportadora. El agua disuelve el azúcar en el bagazo y el jugo obtenido se recoge en una tolva. Este jugo se mueve hacia delante mediante bombeo y el proceso se repite hasta que el jugo alcanza la concentración máxima en el extremo de la alimentación del difusor. El difusor puede operar ya sea para un solo flujo o bien mediante circulación del jugo por flujos paralelos.

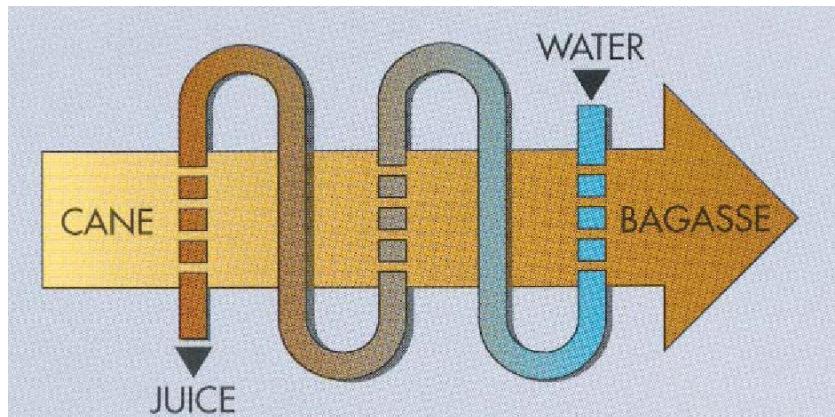


Figura 14: Extracción continua

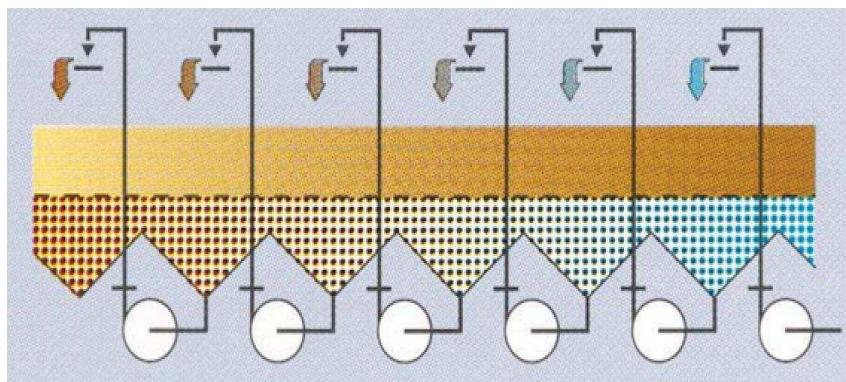


Figura 15: Diagrama de difusión continua

Por lo general, los difusores están diseñados a partir de los 35 metros hasta los 52 metros de largo, la sección transversal es rectangular y los difusores de diferentes capacidades están construidos con diferentes anchos. Las redes de transporte y las pantallas son compatibles con dos cadenas laterales de rodillos con una separación de alrededor de 3 pies. Estas cadenas son compatibles en los extremos de las ruedas dentadas. Al final impulsado, los piñones están acoplados a través de una rueda dentada y un piñón a una velocidad variable de accionamiento hidráulico o eléctrico de engranaje del motor.

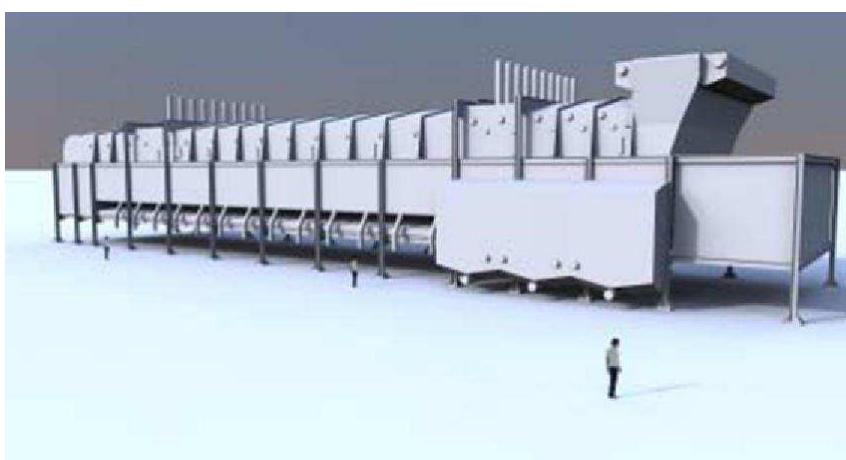


Figura 16: Difusor continuo

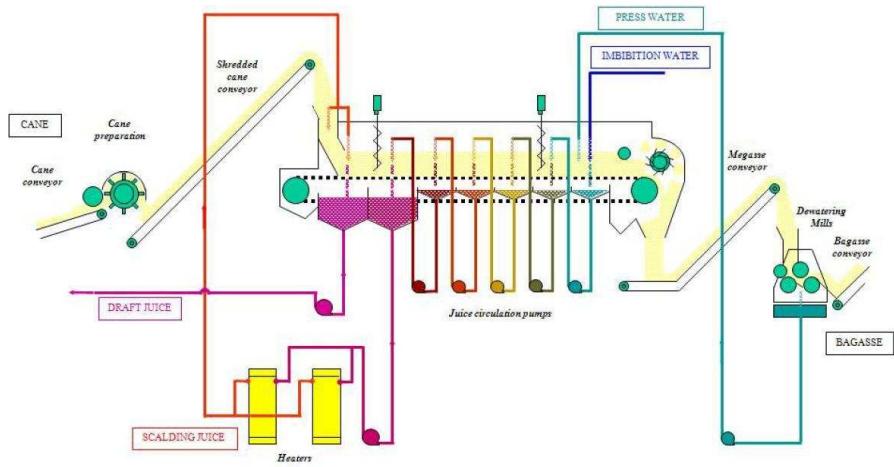


Figura 17: Proceso de extracción de tallos de sorgo dulce mediante el proceso 1

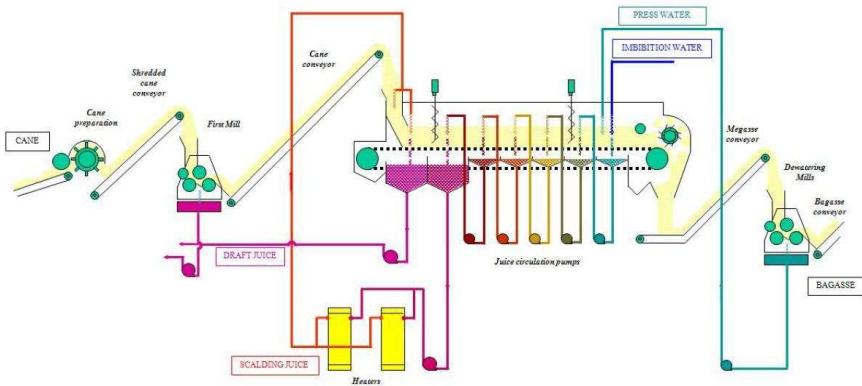


Figura 18: Proceso de extracción de tallos de sorgo dulce mediante el proceso 2

La misma cinta está hecha de marcos articulados que están fijados a las pantallas. Las pantallas y los marcos están rígidamente unidos a los enlaces correspondientes de las 2 cadenas. Estas cadenas están equipadas con cojinetes autolubricantes. Los rodillos se montan en carriles paralelos. Los carriles de cambio están completamente expuestos por debajo de la carcasa, dando una completa visibilidad y accesibilidad a las pantallas. El espesor de la capa varía entre 1,5 y 2 metros. El espacio entre los 2 tramos de transporte está ocupado por un tanque grande con una división de fondo inclinado en tolvas individuales por medio de placas verticales. Estas placas verticales tienen ranuras horizontales, en los niveles especificados, a través de las cuales se desborda el jugo a la siguiente tolva. Al final de la cinta, hay un rascador giratorio para igualar el flujo de bagazo, que cae en una tolva de salida. Esta tolva está provista de una cinta transportadora para retirar el bagazo. El difusor está equipado con los tornillos de elevación en la zona de retroalimentación del agua a presión.

Durante toda la duración del paso por el difusor, la cama de tallos se envía a los sprays intensivos de jugo con una progresiva disminución de la concentración. El jugo se rocía uniformemente por encima de la cama de tallos mediante una serie de canales de desborde que se extienden a lo largo de toda la anchura de la carcasa. Una de estas depresiones se coloca por encima el jugo en cada tolva de recogida, diseñado para distribuir uniformemente el jugo en la cama con una precisión del 2%. La curva muestra la disminución de la concentración del jugo en las sucesivas tolvas y es muy estable (Figura 18).

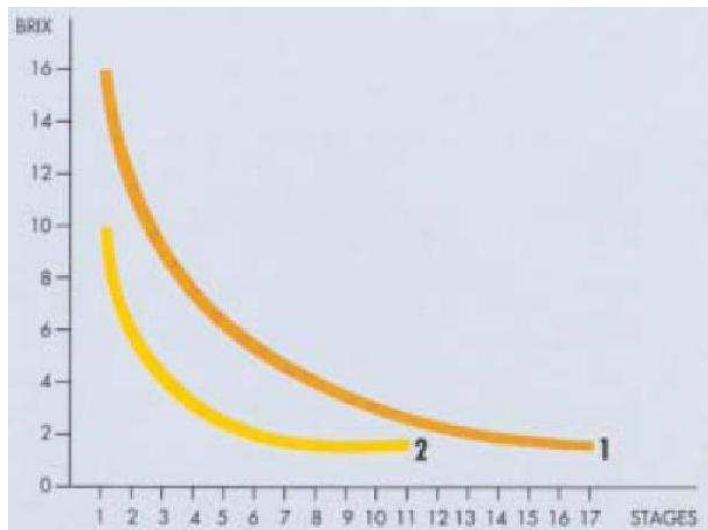


Figura 19: Curvas de grado Brix : (1) Difusor de tallos de sorgo dulce, (2) difusor de bagazo

El último canal se alimenta con agua pura. Todas las tolvas de jugo han de tener la misma anchura. Se recoge el jugo filtrado de cada distribuidor de jugo a través de la cama de tallos. Cada tolva se canaliza a una bomba centrífuga de alta capacidad de cada uno. Cada bomba se canaliza para tomar el jugo de una tolva y rociarlo por encima de la tolva anterior (en la dirección opuesta al movimiento de la cama). Una última bomba alimenta el jugo más rico al tanque de jugo rico. Otra bomba de gran capacidad hace circular continuamente el jugo rico de los tallos frescos de sorgo dulce. El flujo intenso de tallos o del bagazo del primer molino se introduce en el difusor mediante un transportador de arrastre de tipo transversal concebido para difundir la alimentación uniformemente en el transportador difusor. El jugo es bombeado desde el tanque de jugo Enriquecido a la fábrica. El difusor opera y se controla desde un panel central sobre el que se agrupan todos los instrumentos.

Las ventajas principales de la difusión continua son:

- alta extracción alcanzada en combinación con equipos de molienda existentes ó en plantas de extracción completamente nuevas;
- bajo coste inicial de la planta completa de extracción, porque los difusores están diseñados para trabajar con la preparación convencional de tallos de sorgo dulce y con los equipos de molienda. Los difusores se puede instalar al aire libre;
- bajos costes de mantenimiento debido al diseño masivo y al movimiento extremadamente lento de la cinta transportadora principal;
- bajos costes de operación: Los difusores son completamente automáticos y pueden operar por medio de una persona por turno. Los costes de lubricación son insignificantes;
- requisitos de bajo consumo de energía: no es necesario vapor vivo. El vapor de baja presión se utiliza para calentar el jugo en el difusor. Todas las partes móviles son impulsadas por motores eléctricos;
- rango de capacidad muy amplio: los difusores pueden operar sin modificaciones y sin pérdida de eficiencia desde el 30% al 10% por encima de la capacidad nominal. Al variar la altura de la cama y la velocidad de la cinta, el rango de capacidad puede ampliarse aún más. El diseño del difusor es tal que los aumentos imprevistos de la capacidad pueden, hasta cierto punto, encontrarse con la adición de etapas de lavado a los difusores existentes;
- ausencia de fermentación: los difusores están diseñados para eliminar todas las zonas donde la fermentación estática se pueda desarrollar. El período de retorno del transportador difusor se lava en cada ciclo para evitar la contaminación de la alimentación por los pedazos de bagazo pegados a la pantalla. El difusor está dotado de control de pH y es capaz de funcionar a la temperatura óptima;
- la descarga de bagazo se hace por gravedad en el extremo final del difusor: se usa un raspador especial para nivelar el flujo de bagazo y proporcionar una alimentación continua a los molinos

de deshidratación. El difusor se puede descargar completamente para largas paradas y no se debe limpiar de forma manual;

- buena calidad del jugo: la clarificación sistemática de jugo del último molino permite la eliminación de impurezas al inicio del proceso y contribuye a la obtención de jugos fáciles de clarificar y que no presentan problemas en la casa de calderas;
- economía del calor: todos los calentadores son del tipo utilizado para la calefacción de jugo mezclado en las fábricas de azúcar. El difusor está completamente cerrado y aislado;

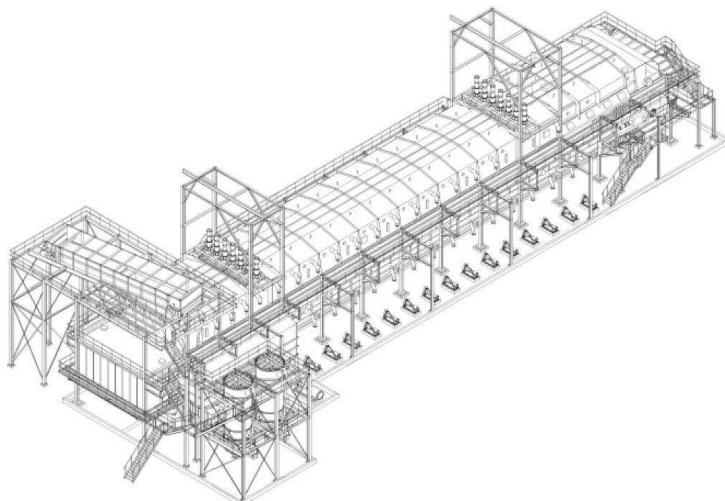


Figura 20: Difusor continuo 1

| NOMINAL CAPACITY | METRIC TONS/DAY | FROM 2,000 | | | | | | | | | | | | TO | | | | 15,000 | | | |
|------------------------------|------------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------------------------|------|------|------|---------------|------|--|--|
| PRINCIPAL OVERALL DIMENSIONS | WIDTH M | 2.8 | 3.3 | 4.2 | 4.7 | 5.2 | 5.7 | 6.2 | 6.7 | 7.2 | 7.7 | 8.2 | 8.7 | 9.2 | 9.7 | 10.9 | 11.4 | 11.9 | 13.4 | | |
| | WIDTH FT | 9.2 | 10.7 | 13.8 | 15.4 | 17.0 | 18.7 | 19.6 | 22.0 | 23.6 | 25.3 | 26.9 | 28.6 | 30.2 | 31.8 | 35.7 | 37.4 | 39.0 | 44.0 | | |
| | LENGTH | FROM 48.3 M - 158 FT | | | | | | | | | | | | TO | | | | 61 M - 200 FT | | | |
| INSTALLED POWER | AT FULL CAPACITY | APPROX. 110 HP/1,000 TONS/DAY | | | | | | | | | | | | APPROX. 100 HP/1,000 TONS/DAY | | | | | | | |
| STEAM CONSUMPTION | KG/TON OF CANE | | | | | | | | | | | | | 80 - 85 | | | | | | | |

Figura 21: Datos para el diseño de un difusor continuo

El difusor continuo ofrece un alto rendimiento en la extracción y un bajo consumo de energía, a parte de que el jugo tiene baja cantidad de interferentes y contaminantes que deben ser retirados antes de la etapa de concentración.

Si el jugo de sorgo dulce contiene sólidos solubles (por ejemplo, antocianinas y clorofila) y sólidos insolubles (por ejemplo, gránulos de almidón), estos componentes deberán separarse para procesar el jugo de azúcar para bioetanol.

Un jugo de buena calidad se puede obtener después de llevar a cabo la evaporación con rozamiento continuo de materiales coagulados, que han subido a la superficie. La evaporación se debe hacer con un calentamiento uniforme. Inicialmente, la coagulación se inicia cuando aumenta la temperatura del jugo. Esta espuma debe eliminarse durante el calentamiento lento. La evaporación no se debe hacer de manera rápida de forma que la espuma recogida en la parte superior del jugo pueda llegar disuelta durante la rápida ebullición y posteriormente pueda flotar o establecerse problemas con la masa que pueden ser vistos en el jarabe.

La evaporación del jugo azucarado deberá hacerse con un producto de buena calidad, que elimine el contenido de sólidos y otras interferencias. Esta purificación se puede hacer con la adición de cal y CO₂ para flocular estos compuestos y tratar de eliminarlos mediante filtración.

Una vez que el jugo se clarifica, se lleva a cabo el proceso de evaporación. Dicho proceso se llevará a cabo en un evaporador de película descendente a vacío para garantizar el mínimo consumo energético y la mejor calidad del jugo azucarado. La clarificación previa es necesaria para asegurar la reducción de las incrustaciones y la suciedad en las tuberías y en la unidad de concentración.

Evaporador de película descendente

La concentración es la estrategia elegida para proteger los azúcares y para suministrar a la planta la biomasa del sorgo dulce en los meses posteriores a la cosecha. Esta etapa se requiere en ambos casos: sorgo dulce como única materia prima y sorgo dulce más otra materia prima adicional.

El objetivo de esta etapa es la concentración del jugo de azúcar de 12-16 °Brix hasta 45-85 °Brix, dependiendo del período de almacenamiento del jugo concentrado. Este proceso aumenta la presión osmótica en el líquido y evita el desarrollo de bacterias o levaduras.

El evaporador de película descendente concentra el jugo azucarado en varias etapas (entre 2 y 4, dependiendo de la concentración final), trabajando a vacío para garantizar un proceso a baja temperatura, menor consumo de vapor, y una menor degradación del azúcar. En cada etapa de concentración, el diámetro de los tubos del evaporador de película descendente es mayor para reducir la suciedad y mantener el rendimiento de la concentración. A partir de este paso, el agua condensada después de la concentración puede ser utilizada en la unidad de extracción de azúcar, minimizando el consumo de agua en el proceso global.

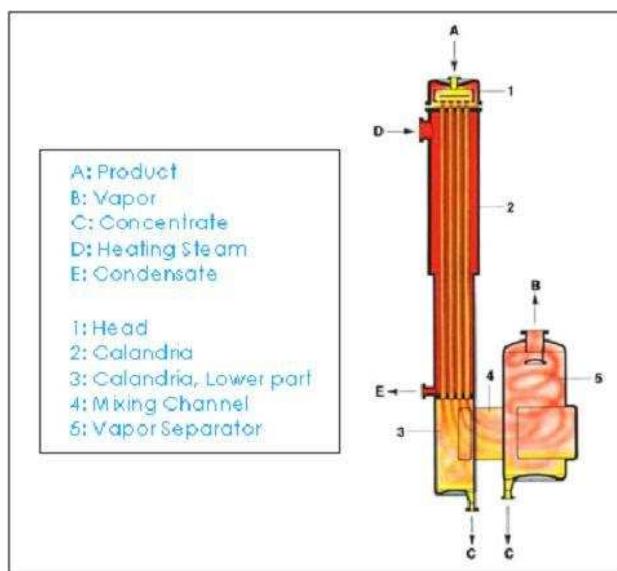


Figura 22: Evaporador de película descendente

Unidad de fermentación

La fermentación se lleva a cabo mediante las levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) en unas condiciones que favorecen en primer lugar su crecimiento celular y la división rápida, y posteriormente su metabolismo anaeróbico.

En especial se requieren las siguientes condiciones:

- concentración de glucosa > 9 g/l (con el fin de beneficiarse del efecto Crabtree y garantizar la fermentación alcohólica en lugar del metabolismo oxidativo);
- pH 4-5;
- temperatura en el rango 30-35 °C;
- concentración de nitrógeno: 150-180 mg/l (como amonio).

La unidad de fermentación tiene 5 etapas.

1. Pasteurización del jugo azucarado: a fin de evitar fermentaciones sin control por medio de las bacterias, el jugo azucarado se esteriliza mediante la pasteurización (Tabla 4).

Tabla 4: Condiciones para la pasteurización del jugo azucarado

| Temperatura | Tiempo | Tipo de Pasteurización |
|-----------------|---------------|------------------------|
| 63 °C (145 °F) | 30 minutos | Vat Pasteurización |
| 72 °C (161 °F) | 15 segundos | HTST |
| 89 °C (191 °F) | 1.0 segundos | HHST |
| 90 °C (194 °F) | 0.5 segundos | HHST |
| 94 °C (201 °F) | 0.1 segundos | HHST |
| 96 °C (204 °F) | 0.05 segundos | HHST |
| 100 °C (212 °F) | 0.01 segundos | HHST |
| 138 °C (280 °F) | 2.0 segundos | UP |

2. Preparación de las levaduras. las levaduras se rehidratan y se estabilizan con el fin de obtener la suspensión en el tanque madre. Este paso se lleva a cabo con una solución rica en glucosa, fructosa o sacarosa, una temperatura media de 35 °C y con la adición de bactericidas, oxígeno y eventualmente ergosterol. Al comienzo de cada reacción de fermentación una cantidad de la suspensión madre se hace fluir como inoculo en el tanque de fermentación.
3. Fermentación. se puede aplicar bien en un proceso en batch o bien en uno en continuo.
 - Fermentación en batch. Las reacciones de fermentación se llevan a cabo en reactores independientes sin comunicación directa entre ellos. El rendimiento de bioetanol en este proceso depende de la tolerancia de la levadura a la concentración de alcohol en el medio (tolerancia máxima del 19% v/v de las cepas seleccionadas). A pesar de que en este proceso el rendimiento es inferior al obtenido en el proceso en continuo, el control de la contaminación es mejor y, por lo tanto, la seguridad es mayor, ya que este sistema permite un fácil aislamiento del tanque contaminado, evitando que se puede extender a lo largo de toda la unidad.
 - Fermentación en continuo. En el proceso continuo se establece el flujo de jugo pasteurizado de azúcar sólo en el primer tanque, donde las levaduras son inoculadas. Desde el primer tanque el jugo parcialmente fermentado fluye a los siguientes; en este tránsito, el bioetanol se elimina y su concentración en el medio se mantiene inferior al nivel de inhibición de las levaduras. Posteriormente la fermentación continúa por grados hasta el último tanque, donde todos los azúcares libres se convierten en bioetanol. El rendimiento de este proceso es mayor que el rendimiento de la fermentación en batch, ya que las levaduras no se inhiben. Por otra parte, el volumen necesario es menor que el requerido para el otro caso. La parte negativa es el riesgo de contaminación: de hecho, si uno de los tanques continuos se contamina con bacterias, el sistema completo puede ser contaminado y la descontaminación es más difícil.
4. Recuperación de las levaduras. La recuperación de las levaduras al final del proceso de fermentación es una medida para mejorar la viabilidad económica de la planta. Las levaduras son recuperados desde el medio de fermentación mediante centrifugación. Si las levaduras están aún activas, se reutilizan en el proceso de fermentación. Si por el contrario, las levaduras no están activas, son una fuente de proteínas para la preparación de alimentación humana y/o animal.

Unidad de destilación y rectificación

La concentración del bioetanol en el medio de fermentación es del 14.9% v/v, y el objetivo de esta unidad es la obtención de bioetanol azeotrópico (es decir, 95-96% v/v).

Con este objetivo, el medio fermentado fluye a través de las columnas de destilación (es decir, destilación de efecto múltiple), compuesto por platos de burbujeo, donde se separan el agua y el alcohol basándose en sus puntos de ebullición específicos a medida que circulan por la torre. La tecnología de efecto múltiple permite reducir el consumo de calor de esta unidad, ya que la presión en la cabeza de la columna es menor que el valor atmosférico y el punto de ebullición de los componentes a separar es inferior.

Unidad de deshidratación

El proceso de deshidratación es necesario para producir bioetanol anhídrico (es decir, 99,7 a 99,8% w/w). Este valor de pureza es necesario para producir Bio-ETBE o para mezclar directamente bioetanol con gasolina.

La unidad de deshidratación se basa en la tecnología de tamiz molecular: las zeolitas, que son los componentes de los tamices retienen selectivamente las moléculas de agua residual, aumentando gradualmente el porcentaje de bioetanol en la mezcla.

El bioetanol anhídrico deberá almacenarse en tanques con atmósfera controlada (libre de aire, por lo general con N₂ o CO₂), a fin de evitar la solubilización del vapor de agua.

Las mismas condiciones deberán aplicarse en la fase de transporte.

7.4 Aprovechamiento energético de los subproductos

Bagazo

Basándose en sus propias características (tabla 5), el bagazo seco, residuo de la unidad de extracción, se puede utilizar en las instalaciones de cogeneración para producir electricidad y calor.

Tabla 5: Principales características del bagazo obtenido en un sistema de molienda TRPF, para planificar su aprovechamiento energético⁵³

| Caracterización del bagazo | |
|---------------------------------------|---|
| Humedad después de la molienda | 30-50% |
| Azúcares Residuales | 6-7% base seca |
| Celulosa | 16-18% base seca |
| Hemicelulosa | 11-13% base seca |
| Lignina | 7-9% base seca |
| LHV | 17-18 MJ/kg base seca 4,7-5,0 kWh/kg base seca |

El tamaño de la planta de cogeneración se correlaciona con la disponibilidad del bagazo y posteriormente con la tierra agrícola cultivada con sorgo dulce y su rendimiento de biomasa.

Teniendo en cuenta los rendimientos de biomasa en la Tabla 2 y el LHV de la Tabla 5, los valores de referencia para el diseño de la unidad para la combustión del bagazo en la planta de cogeneración se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6: Principales elementos para el dimensionamiento de la unidad de aprovechamiento del bagazo en algún entorno de referencia

| Aprovechamiento energético del bagazo | | | |
|---|--------------------|------------------------|--------------------------------|
| Tipo de ambiente | | Rendimiento | |
| Tipo MEDITERRANEO | Riego | Rendimiento del Bagazo | 6-20 t/ha db |
| | | Energía disponible | 100-340 GJ/ha 28-94 MWh/ha |
| Tipo TEMPLADO | Sin riego | Rendimiento del Bagazo | 10-12 t/ha db |
| | | Energía disponible | 190-200 GJ/ha 53-56 MWh/ha |
| Suelos de fertilidad media Clima templado oceánico | Riego (emergencia) | Rendimiento del Bagazo | 18-25 t/ha db |
| | | Energía disponible | 312-442 GJ/ha 87-123 MWh/ha |

En cuanto a los detalles técnicos, la planta de cogeneración está equipada con un quemador de biomasa adecuado para la combustión de materia prima herbácea y una turbina, que podría ser por ejemplo una turbina de vapor basado en el ciclo de Rankine-Hirn, o una turbina de gas basada en el ciclo Brayton, o un turbogenerador basado en el ciclo ORC.

La elección de la tecnología para la planta de cogeneración depende, sobre todo, de la energía eléctrica. La Figura 22 resume algunas situaciones de los valores de potencia en el rango de interés para el modelo de la EU (0,1 a 10 MWe) con la eficiencia energética correspondiente.

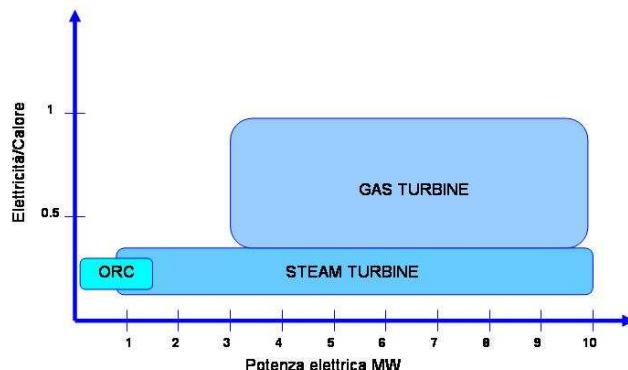


Figura 23: Campos de aplicación de los diferentes sistemas de cogeneración (fuente: A.A.V.V. 2006⁵⁴)

La principal crítica de la combustión del bagazo de sorgo es el alto contenido en cenizas (3,5% en base seca) que se caracterizan por su bajo punto de fusión. En consecuencia, la tecnología aplicada en el quemador de biomasa requiere un sistema de extracción de cenizas adecuado y la garantía especial extendida ha sido emitida por el fabricante. La gestión de las cenizas depende de la ley del país en cuestión.

Vinazas

Las vinazas, residuo de las unidades de destilación y rectificación, tiene una composición química adecuada para la producción de biogás mediante la digestión anaerobia (Tabla 7).

Tabla 7: Principales características de las vinazas para realizar la digestión anaerobia⁵⁵

| Caracterización de las vinazas | |
|--------------------------------|---------------------------|
| Materia seca | 6-7% |
| Materia volátil | 85-90% |
| BOD₅ | 40-50 g O ₂ /l |
| COD | 70-90 g O ₂ /l |
| Nitrógeno | 750-850 mg/l |
| Fósforo | 1,5-2,5 g/l |
| pH | 4,4-4,6 |

El dimensionamiento de la digestión anaerobia se correlaciona con la disponibilidad de las vinazas y con la calidad del bioetanol anhídrico y la HRT.

En cuanto al rendimiento de las vinazas, el coeficiente de correlación teórica es de 7-8 litros de vinazas por cada litro de bioetanol.

En lo que respecta a la HRT para completar la biometanización, depende de la composición química de la materia prima: en principio, la lignina, la celulosa y las proteínas muestran una degradación más lenta que las grasas, almidones y azúcares. La producción de metano de las vinazas se lleva a cabo utilizando también otros sustratos para la puesta en marcha o para estabilizar el proceso: por ejemplo, el estiércol se utiliza como inóculo microbiano en el inicio del proceso y las materias primas lignocelulósicas pueden ser mezcladas con las vinazas para mejorar la relación carbono - nitrógeno, si fuera necesario. Con esta hipótesis, la HRT para las vinazas es de 60 días aproximadamente.

La composición química típica de biogás se detalla en la Tabla 8.

Tabla 8: Principales características del biogás

| Caracterización del Biogás | |
|----------------------------|---|
| CH₄ | 50-70% |
| CO₂ | 25-45% |
| H₂ | 1-10% |
| N₂ | 0,5-3,0% |
| CO | 0,08-0,10 |
| H₂S | 0,02-0,20 |
| O₂ | trazas |
| LHV | 21-22 MJ/Nm ³ 5,8-6,1 kWh/Nm ³ |

El rendimiento teórico del metano es de 0,395 Nm³ por kilogramo de COD, siempre que el contenido de metano en el biogás sea del 60%.

Suponiendo los rendimientos de las vinazas y del metano y los valores de la Tablas 7 y 8 para la COD y LHV respectivamente, los elementos para dimensionar esta unidad se resumen en la Tabla 9.

Tabla 9: Principales elementos para el dimensionamiento de la unidad de aprovechamiento de vinazas en algún entorno de referencia

| Aprovechamiento energético de las vinazas | | | |
|---|--------------------|--------------------|---------------------------------|
| Tipo de ambiente | | Rendimiento* | |
| Tipo MEDITERRANEO | | Metano | 340-1.030 Nm ³ /ha |
| Suelos de baja fertilidad | Riego | Energía disponible | 7,9-23,7 GJ/ha |
| Clima seco | | | 2,2-6,6 MWh/ha |
| Tipo TEMPLADO | | Metano | 500-790 Nm ³ /ha |
| Suelos de fertilidad media | Sin riego | Energía disponible | 11,6-18,4 GJ/ha |
| Clima templado oceánico | | | 3,2-5,1 MWh/ha |
| | | Metano | 1.070-1.420 Nm ³ /ha |
| | Riego (emergencia) | Energía disponible | 24,9-32,7 GJ/ha |
| | | | 6,9-9,1 MWh/ha |

*cálculos con la aplicación de los rendimientos reales de metano

El biogás obtenido se quema en una planta de cogeneración que puede estar basada en el motor diésel o en una microturbina de gas.

El motor Diésel utilizado requiere algunas modificaciones con el fin de trabajar con el ciclo de Otto en la combustión del metano: en especial, está equipado con un carburador y unas bujías. Actualmente, estos motores modificados ya están disponibles en el mercado. El calor se recupera mediante un intercambiador de gases de combustión y/o de la refrigeración del motor.

La eficiencia energética está relacionada con la energía eléctrica de la planta de cogeneración: en el rango considerado para el modelo de la EU (0,1 hasta 5,0 MWe) la eficiencia eléctrica es del 30-42%, el rendimiento térmico es del 45-50%. Las potencias más altas se caracterizan por la mayor eficiencia, sobre todo en la conversión eléctrica.

La materia digerida, residuos de la biometanización, es un buen fertilizante (nitrógeno 800 g/t, principalmente como amonio) y se aplica sobre los campos con el fin de compensar la eliminación de nitrógeno que se lleva a cabo por el crecimiento del sorgo dulce.

8. MODELO 1 EN LA EU: SORGO DULCE COMO ÚNICA MATERIA PRIMA PARA LA PLANTA

Este modelo está destinado a desarrollar una cadena en la EU, basado sólo en el sorgo dulce como materia prima.

La principal ventaja de este modelo es la utilización de un cultivo que se caracteriza por bajos insumos agrícolas (es decir, agua y fertilizantes).

La principal desventaja de este modelo es la dependencia de la planta de un sólo tipo de materia prima.

Para explicar este modelo para la EU, las pautas descritas en el capítulo anterior se aplican a una planta con capacidad de 10.000 t/año para bioetanol anhídrico. Los principales detalles de esta aplicación se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10: Principales detalles relacionados con el modelo de la UE para procesar sorgo dulce como única materia prima en una planta con capacidad de 10.000 t/año para bioetanol anhídrico

| Capacidad para 10.000 t/año (como bioetanol anhídrico) | | |
|--|--------------------------------|---|
| Dimensionamiento de la cadena de suministro | Tierra Agrícola | <u>Tipo Mediterraneo</u> 2.200-6.700 ha <u>Tipo Templado</u> 3.000-4.800 ha (sin riego) 1.700-2.300 ha (iego de emergencia) |
| | Rango de suministro | Depende de la región específica, por ejemplo en términos de diversificación de cultivos, estructura de la explotación, los límites para los incentivos a corto agroenergía cadenas |
| Procesamiento del jugo azucarado | Detalles operativos | 330 días de trabajo al año 68.000-69.000 t en db de biomasa de sorgo dulce aplastado en 40 días. Aplastado, fermentación, destilación, rectificación y deshidratación de acuerdo con las directrices |
| | Unidad de Concentración | <u>Almacenamiento</u> Jarabe al 45% almacenable hasta 3 meses Jarabe al 80% almacenable hasta 11 meses <u>Utilización</u> Dilución al 18% <u>Gestión del agua</u> Vertido de aguas residuales en el cuerpo de agua superficial, de acuerdo con las leyes nacionales y locales Compra de agua para la dilución <u>Consumo térmico</u> Auto-consumo para la explotación de los sub-productos 0,43 MWe disponibles al final del periodo de cosecha |

| | | |
|---|----------------|--|
| Aprovechamiento energético de los subproductos | Bagazo | <u>Disponibilidad</u> |
| | | 41.850- 42.460 t en db de bagazo a almacenar, dry and burn during all year |
| | | 711,4-764,3 TJ/año |
| | | 196,69-212,31 GWh/año |
| | Vinazas | <u>Planta CHP</u> |
| | | 4,20 MWe |
| | | <u>Cenizas</u> |
| | | 2.040-3.450 t/año Eliminación en vertederos o de gestión, en función de los diferentes países |

En cuanto a la necesidad de tierras agrícolas, el clima templado se caracteriza por suelos de fertilidad media y precipitaciones alrededor de 600 a 700 mm durante el período de crecimiento, son necesarias entre 3.000-4.800 hectáreas. Si el riego de emergencia está previsto, el mayor rendimiento permite reducir la superficie cultivada a entre 1.700-2.300 hectáreas, pero en este caso los gastos agrícolas aumentan de manera significativa y por lo general el maíz u otros cultivos se vuelven más competitivos. En consecuencia, esta importante variable debe ser tomada en cuenta en la elección de los campos para cultivar y en el estudio de la viabilidad.

Por el contrario, en las condiciones mediterráneas el riego es necesario para obtener unos rendimientos viables. Se requiere una superficie de 2.200-6.600 hectáreas; la franja superior del rango se debe a valores muy diferentes en los rendimientos, que dependen de las aportaciones de agua y fertilizantes.

La decisión acerca del rango de suministro está relacionada con diversos factores, tales como factores técnicos, logísticos, energéticos, económicos. En primer lugar, la competitividad del sorgo dulce en comparación con otros cultivos depende de su viabilidad económica, que es el requisito previo, pero también por la tradición agrícola de la zona en cuestión y por la propensión a la innovación de los agricultores. Algunos indicadores pueden ser utilizados en esta evaluación, por ejemplo, la diversificación de los cultivos y la estructura de la explotación. Si la diversificación de cultivos en la zona en cuestión es alta, es posible que el rango de suministro aumente, porque esto sugiere que numerosos cultivos son competitivos y el mercado paga todos ellos. Por el contrario, la baja edad de los agricultores, el gran tamaño de las explotaciones agrícolas y la aplicación de soluciones innovadoras en las prácticas agrícolas, por lo general, indican una posible disminución en

el rango de suministro. En segundo lugar, la decisión debe ser sometida a la LCA y al análisis de la logística, evaluando los impactos energético y medioambiental de cada valor de la hipótesis del rango de suministro. Por último, el rango de suministro asumido debe permitir que se beneficien de eventuales incentivos nacionales que los diferentes países ponen a disposición de la RES.

En lo que respecta a la logística, las operaciones de recolección se llevan a cabo en los patios, cada uno de ellos está equipado con una cortadora-trituradora-cargador de la máquina y de 4 a 6 tractores equipados con volquete (es decir, capacidad de 50 m³) para el transporte de la biomasa a la planta picada.

Sin tener en cuenta el número de hectáreas y el rango de suministro, todos los años 68.000-69.000 toneladas de biomasa son procesadas en la planta para obtener bioetanol de 1^a generación a partir del jugo azucarado y electricidad y calor a partir de los subproductos.

El suministro de biomasa a la planta se produce sólo durante el período de cosecha: 40 días como máximo entre agosto y septiembre en las condiciones climáticas del Sur de la EU. Por el contrario, el período de trabajo de la planta es de 330 días al año, de hecho una parada de la planta está prevista aproximadamente en julio para un mantenimiento planificado.

A fin de conservar los azúcares durante todo el período de trabajo de la planta, la biomasa es inmediatamente picada en el momento de la entrega y el jugo de azúcar obtenido se concentra para el almacenamiento y procesamiento en el período posterior a la cosecha. Las concentraciones de azúcar final en el jarabe son del 45% para almacenamiento hasta 3 meses y del 80% para el almacenamiento hasta 11 meses. Los jarabes concentrados son almacenados en tanques adecuados en la planta.

El jarabe se diluye antes de la inoculación con la suspensión madre de las levaduras; después de la fermentación se inicia con un proceso en batch y la duración se establece en 22 horas.

En lo que respecta a los demás aspectos técnicos del tratamiento, las fases de fermentación, destilación, rectificación y deshidratación se llevan a cabo de acuerdo con las pautas descritas en el capítulo 7.

Es necesaria una explicación especial en este modelo para la gestión del agua, ya que una cantidad importante de agua se evapora y posteriormente se condensa y después una cantidad importante de agua se requiere para la dilución del jarabe.

En el modelo considerado esta crítica potencial se resuelve asumiendo que las aguas residuales de la unidad de concentración se descargan en el agua superficial (de acuerdo con los límites previstos por la legislación local, nacional y eventual en términos de COD, nitratos, pH, fosfato, temperatura y otros productos químicos y parámetros físicos), mientras que el agua potable para la dilución se compra. Esta suposición parece preferible desde el punto técnico y económico si se compara con la opción de almacenar las aguas residuales y usarlas en la siguiente dilución, ya que en este segundo caso, se requieren volúmenes de almacenamiento demasiados elevados.

En cuanto al aprovechamiento energético de los subproductos, el bagazo se seca y se quema en plantas de cogeneración equipadas con turbina de vapor (energía eléctrica de 4,20 MW), y el biogás, obtenido a partir de las vinazas a través de la digestión anaerobia, se quema en una planta de cogeneración basada en una turbina de gas (energía eléctrica de 0,75 MWe). La electricidad y el calor producidos en estas unidades se pueden utilizar para el autoconsumo y el excedente de los dos se vende a la red eléctrica y se distribuye a través de una red de calefacción urbana.

Cuando la unidad de concentración deja de trabajar (por ej., al final del período de cosecha) falta un importante consumo térmico en la planta y, por lo tanto, la energía correspondiente se puede convertir en electricidad con una turbina de vapor pequeña (energía eléctrica de 0,43 MWe), aumentando la producción total.

8.1 Caso de Estudio: desarrollo del primer modelo en la EU en el Valle del Po en Italia

Supuestos específicos

El modelo de cadena para procesar el sorgo dulce como materia prima única en una planta de capacidad de 10.000 t/año (para bioetanol anhídrico) se aplica en el caso de estudio adaptado al contexto de la llanura del Po, en el noreste de Italia. Esta zona tiene una tradición agrícola y los cultivos sowable son frecuentes. La situación específica de la zona en cuestión se resume en la Tabla 11.

Tabla 11: Principales características del área geográfica considerada en el caso estudiado

| Valle del Po, Noreste de Italia | |
|--|---|
| Características climáticas | Templado oceánico |
| Tipo de suelo | Franco-arcillosa, Buena profundidad y textura, Buena materia orgánica |
| Precipitaciones en periodo de crecimiento | 600-700 mm |
| Tiempo de siembra | Mayo |
| Tiempo de cosecha | Septiembre |
| Diversificación de cultivos | Bastante baja, prevalencia de maíz |
| Estructura de las explotaciones | Fragmentación de la tierra agrícola |

Las tierras agrícolas afectadas en el caso de estudio son de 3.800 hectáreas y el rango de suministro con las características específicas de la zona es de 15 km. Teniendo en cuenta la diversificación de cultivos y la estructura de la explotación de la zona, la localización de los campos es hipotéticamente como sigue: 35% de los campos dentro de los 5 km de la planta, el 44% de los campos 6 a 11 km de la central, 21 % de los campos 12 a 15 km de la planta. En este escenario, la cosecha requiere de 4 metros en paralelo, en cada tractor agrícola un 1 máquina cortadora-trituradora-cargadora y 6 tractores agrícolas equipados con dumper; el tráfico consiguiente es de 15 tractores por hora durante los 40 días de la cosecha. En este clima, la duración del período de cosecha puede durar hasta 40 días, si las variedades de ciclo corto y las de ciclo largo se cultivan al mismo tiempo en diferentes campos de la superficie agrícola considerada. Los principales detalles de la fase agrícola se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12: Principal detalle del cultivo de sorgo dulce en el caso estudiado

| Fase Agrícola* | |
|--|---|
| Fertilización | 100 kg N/ha 60 kg P ₂ O ₅ /ha 60 kg K ₂ O/ha |
| Riego | No |
| Rendimiento Biomasa | 18,2 t/ha db |
| Rendimiento de azúcar | 6,5 t/ha |
| Rendimiento bioetanol anhídrico | 2,8 t/ha 3,5 m ³ /ha 75,6 GJ/ha |
| Uso anterior de la tierra | Maíz |

* Año de referencia: 2010

La producción de bioetanol de 1^a generación se lleva a cabo de acuerdo con las directrices. La trituradora utilizada tiene una eficiencia del 93% y, en consecuencia la concentración de azúcar es de 12,4% en el jugo y el 5,4% en el bagazo en base seca. El bagazo tiene una humedad residual del 31%. En lo que respecta a la unidad de concentración, el suministro continuo de los reactores de fermentación está prevista para concentrarse en un 80% más de jugo de azúcar (73% del importe total) y un 45% la parte restante (27% del importe total). La siguiente fermentación del nuevo jugo azucarado recién diluido se lleva a cabo con un proceso en batch. La eficiencia aplicada de la fermentación alcohólica es el 90% de la teórica.

El bioetanol anhídrido obtenido tiene una pureza del 99,7% w/w, y es adecuado para producir Bio-ETBE o para mezcla con gasolina.

En cuanto al aprovechamiento de los subproductos, el bagazo húmedo se almacena y se seca hasta un 10% inmediatamente antes de su quema en la planta de cogeneración. Durante el almacenamiento, se produce una hipotética pérdida del 5% de biomasa (principalmente azúcares). La planta de cogeneración está equipada con un quemador de biomasa, un generador de vapor y una turbina de vapor, y su eficiencia térmica es de 0,90. A diferencia de las otras unidades, esta planta de cogeneración funciona 340 días al año. El biogás obtenido a partir de las vinazas proporciona una microturbina de gas con una eficiencia eléctrica del 34%.

En este caso, la electricidad se vende a la red y el calor se utiliza para el autoconsumo de la planta.

La electricidad se vende a la red porque en el momento actual un sistema de incentivos en vigor se encuentra disponible en Italia para la RES y, especialmente, para la biomasa. En consecuencia, los beneficios del balance económico de la venta de electricidad producida y de la compra contextual de la cantidad para consumir en la planta.

El calor producido puede cubrir el consumo térmico de la planta. Los mayores consumos son relativos a las unidades siguientes: la concentración del jugo de azúcar (sólo durante el período de cosecha), las unidades de destilación y rectificación, el secado del bagazo. En este caso de estudio, la venta de calor a través de una red de calefacción urbana no se considera, ya que hay una dificultad razonable en el área considerada en la búsqueda de usuarios.

Aparte de estos supuestos, el caso de estudio se aplica a los contenidos del modelo 1 de la EU.

Análisis Económico

Los principales costes e ingresos considerados en el análisis económico se resumen en la Tabla 13.

Tabla 13: Principales costes e ingresos incluidos en el análisis económico del caso estudiado

| Análisis Económico | | | |
|---|----------------------------|---|---------------------------|
| Costes | Costes de Inversión | 30 millones € | |
| | Costes Operativos | Biomasa 20-35 €/t * | 4,94-8,64 millones €/año |
| | | O&M | 2,69 millones €/año |
| | | Otros | 1,22 millones €/año |
| Ingresos | Productos finales | Costes Bioetanol 400-1.000 €/t * | 4,05-10,13 millones €/año |
| | | Precio de la electricidad 0,18-0,28 €/kWh * | 7,78-12,11 millones €/año |
| *Variables sujetas a análisis de sensibilidad | | | |

Los costes de inversión incluye edificios, equipos, mantenimiento ordinario y extraordinario, gastos generales (5%), gastos técnicos (5%), imprevistos (4%), adquisición de terrenos, licencias y patentes eventuales que no están incluidos.

Los costes operativos de la compra de productos químicos, la gestión del agua (es decir, la descarga de aguas residuales de la unidad de concentración, la compra de agua potable para la dilución del jarabe), la eliminación de las cenizas, el movimiento de la biomasa y el seguro están incluidos en el espacio llamado "Otros".

El precio de la biomasa y los valores de los ingresos son detallados como rango debido a que estos parámetros son variables para el análisis de sensibilidad.

La recompensa adecuada de los agricultores como proveedores de biomasa es el requisito previo para el desarrollo de la cadena. En consecuencia, la cuantificación del precio de la biomasa requiere un enfoque muy preventivo. Suponiendo que en la zona en cuestión los gastos agrícolas corresponden a 16-18 €/t wb (equivalente a 1.040-1.170 €/ha, incluyendo el transporte a la planta con una distancia media de 10 km), el umbral de asequibilidad se estima en 30 €/t. De hecho, en las peores condiciones, otros cultivos son más competitivos que el sorgo dulce y entonces la seguridad de suministro se vuelve crítica.

Sin embargo, los valores más bajos del rango se incluyen en el análisis de sensibilidad, ya que la viabilidad económica del modelo de la cadena debe prever amplios escenarios con el objetivo de evidenciar todas las posibles soluciones en el cambio de las condiciones de mercado (por ejemplo, caída del precio del bioetanol, disminución del apoyo nacional a la RES).

El precio del bioetanol depende del mercado energético, especialmente en el precio del petróleo, y el margen considerado se cree que es preventivo.

En lo que respecta a los ingresos de la venta de electricidad, en el momento actual en Italia el uso de la biomasa permite el acceso a dos incentivos alternativos, que tienen una validez de 15 años:

- a. El total de ingresos se deriva de la suma de la partida debido a la venta de la electricidad (en base al precio de mercado) y el valor de los correspondientes Certificados Verdes, cuyo número se multiplica por un coeficiente, que es específico para cada RES (por ej., 1,8 para la biomasa y el biogás);
- b. el total de ingresos se deriva sólo de una tarifa con todo incluido, cuyo valor depende de cada RES (por ej., 0,28 €/kWh para la biomasa y el biogás).

La segunda opción es a menudo preferible, ya que no está influenciada por el mercado energético y por lo tanto permite los ingresos previsibles durante 15 años. Sin embargo, en el momento actual, esta opción sólo está disponible para la energía eléctrica inferior a 1 MWe. La posibilidad de extender este incentivo a energías eléctricas mayores (por lo menos 5 MWe) está previsto por la ley italiana, pero aún no es muy aplicada porque las regulaciones son insuficientes.

Teniendo en cuenta la potencia eléctrica aplicada en este caso de estudio (es decir, 4,20 MWe a partir del bagazo, 0,75 MWe a partir de la vinaza, 0,43 MWe de la unidad de concentración) y las incertidumbres relacionadas, se considera preventivo el rango de 0,18 a 0,28 €/kWh.

La disponibilidad económica de la iniciativa es establecer para el IRR valores superiores al 20%, ya que garantizan la capacidad bancaria y beneficios significativamente mayores a la tasa de débito.

Los resultados de los análisis de sensibilidad se resumen en los siguientes cuatro tablas, donde para cada precio de la biomasa en el rango considerado (es decir, 20 €/t, 25 €/t, 30 €/t, 35 €/t) los valores de IRR se presentan variando las condiciones de mercado: los precios del bioetanol y de la electricidad en las filas y columnas, respectivamente. En amarillo las tesis viables se ponen de manifiesto, las celdas más oscuras indican las condiciones con IRR mayores del 30%.

Tabla 14: Valores de IRR variando el mercado del bioetanol y la electricidad, si el precio de la biomasa fuera 20 €/t

| IRR | | Precio Bioetanol [€/t] | | | | | | |
|--|-----|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1,000 |
| Precio Electri- cidad [€/MW h] | 180 | - 6,2% | 4,1% | 10,5% | 15,7% | 20,2% | 24,5% | 28,5% |
| | 200 | 1,4% | 8,7% | 14,3% | 19,1% | 23,4% | 27,5% | 31,4% |
| | 220 | 6,7% | 12,8% | 17,8% | 22,3% | 26,5% | 30,5% | 34,4% |
| | 240 | 11,2% | 16,5% | 21,2% | 25,5% | 29,6% | 33,5% | 37,3% |
| | 260 | 15,1% | 20,0% | 24,5% | 28,6% | 32,6% | 36,4% | 40,2% |
| | 280 | 18,8% | 23,4% | 27,6% | 31,7% | 35,6% | 39,4% | 43,1% |

Tabla 15: Valores de IRR variando el mercado del bioetanol y la electricidad, si el precio de la biomasa fuera 25 €/t

| IRR | | Precio Bioetanol [€/t] | | | | | | |
|--|-----|------------------------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1,000 |
| Precio Electri- cidad [€/MW h] | 180 | - | -10,7% | 2,4% | 9,2% | 14,6% | 19,3% | 23,6% |
| | 200 | - | - 0,7% | 7,4% | 13,2% | 18,1% | 22,5% | 26,6% |
| | 220 | - 5,3% | 5,2% | 11,6% | 16,8% | 21,4% | 25,6% | 29,7% |
| | 240 | 2,5% | 9,9% | 15,4% | 20,32% | 24,6% | 28,7% | 32,6% |
| | 260 | 7,9% | 14,0% | 19,0% | 23,5% | 27,7% | 31,7% | 35,6% |
| | 280 | 12,4% | 17,7% | 22,4% | 26,7% | 30,8% | 34,7% | 38,6% |

Tabla 16: Valores de IRR variando el mercado del bioetanol y la electricidad, si el precio de la biomasa fuera 30 €/t

| IRR | | Precio Bioetanol [€/t] | | | | | | |
|--|-----|------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1,000 |
| Preci- o Electr- icida- d [€/M Wh] | 180 | - | - | - | 0,5% | 7,9% | 13,5% | 18,3% |
| | 200 | - | - | - 3,3% | 5,9% | 12,0% | 17,0% | 21,6% |
| | 220 | - | -10,1% | 3,5% | 10,3% | 15,7% | 20,4% | 24,7% |
| | 240 | - | 0,4% | 8,5% | 14,3% | 19,2% | 23,7% | 27,8% |
| | 260 | - 4,2% | 6,3% | 12,8% | 18,0% | 22,6% | 26,8% | 30,9% |
| | 280 | 3,7% | 11,0% | 16,6% | 21,4% | 25,8% | 29,9% | 33,9% |

Tabla17: Valores de IRR variando el mercado del bioetanol y la electricidad, si el precio de la biomasa fuera 35 €/t

| IRR | Precio Bioetanol [€/t] | | | | | | |
|--|------------------------|-----|--------|--------|--------|--------|-------|
| | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1,000 |
| Precio Electri- cidad [€/M Wh] | 180 | - | - | - | - | - 1,7% | 6,5% |
| | 200 | - | - | - | - 6,6% | 4,3% | 10,8% |
| | 220 | - | - | - | 1,5% | 9,0% | 14,6% |
| | 240 | - | - | - 2,2% | 7,0% | 13,1% | 18,2% |
| | 260 | - | - 9,3% | 4,6% | 11,5% | 16,9% | 21,6% |
| | 280 | - | 1,6% | 9,7% | 15,5% | 20,4% | 24,9% |
| | | | | | | | 29,1% |

El valor umbral para la recompensa adecuada a los agricultores (por ej., 30 €/t) es viable para al menos 900 €/t para el bioetanol y 0,22 €/kWh para la electricidad o al menos 1.000 €/t para el bioetanol y 0,20 €/kWh. En el momento actual en Italia estos escenarios son probables y posteriormente la certeza en el suministro podría garantizarse.

Ahorro en emisiones de GHGs

Fase de cultivo

Las emisiones derivadas de la sección de cultivo incluyen todas las partes agronómicas de la cadena, de la siguiente manera:

1. los datos de entrada del rendimiento de biomasa en el Valle del Po (noreste de Italia) es de 65 t/ha en base húmeda (humedad 72%), expresado específicamente como 65.000 kg/ha/año, se calcula una salida energética correspondiente de 316.680 sorgo MJ/ha/año;
2. el consumo de energía se ha calculado teniendo en cuenta la suma de energía primaria, combustibles y lubricantes para las maquinarias del cultivo en el caso específico de estudio: corresponde a 5.563 MJ/ha/año;
3. los insumos agroquímicos se han detallado como realmente utilizados en el caso de estudio para el cultivo de sorgo: N 100 kg /ha/año, K₂O 60 kg/ha/año, P₂O₅ 60 kg/ha/año. Los pesticidas y herbicidas se han calculado como 2 kg/ha/año;
4. las vinazas procedentes de las unidades de destilación y rectificación no se consideran útiles como fertilizante, ya que se utilizan en la digestión anaerobia para la producción de biogás. De lo contrario, la materia residual digerida después de la producción de biogás se considera como fuente de abono orgánico para el cultivo de sorgo. La cantidad se ha calculado teniendo en cuenta la producción de la materia digerida que es 92.705 t/año para compartir en 3.800 hectáreas, y la cantidad resultante es 24.396 kg/ha/año;
5. el material de siembra utilizado en el caso de estudio es de 10 kg/ha/año
6. las emisiones de N₂O en el campo se han calculado utilizando la herramienta específica "emisiones IPCC del N₂O". La producción de biomasa es de 65.000 kg/ha/año en base húmeda (humedad 72%). El uso de la tierra es para tierra de cultivo. En las emisiones directas de N₂O de los suelos gestionados, las entradas son de 100 kg N/ha/año de fertilizantes sintéticos y 19,52 kg N/ha/año de abono orgánico teniendo en cuenta la aplicación de la materia digerida que corresponde a 19,52 kg N/ha. Las emisiones indirectas de N₂O se calculan automáticamente. Las emisiones de N₂O resultado son 3,06 kg N₂O/ha/año.

Las emisiones de la fase de cultivo corresponden a 29,32 g CO₂/MJ bioetanol.

El transporte de la materia digerida a los campos para la fertilización orgánica se incluye en la fase de cultivo. El transporte se considera con camiones cisterna con cañones de agua para una distancia de 20 km (éste es el valor medio para el transporte de la biomasa en el caso de estudio). La cantidad resultante es de 0,56 g CO₂/MJ bioetanol que se resume en el número anterior.

Las emisiones de GHGs para la fase de cultivo (e_{ec}) son 29,9 g CO₂/MJ bioetanol. Con la asignación, las emisiones corresponden a 26,7 g CO₂/MJ bioetanol como se detalla en la Tabla 18.

Tabla 18: Emisiones de GHGs en la fase de cultivo

| Fase de cultivo | kg/ha/año | MJ sorgo/ha/año | MJ/ha/año | g CO ₂ /MJ bioetanol |
|---------------------------------------|-----------|-----------------|-----------|---|
| Rendimiento Biomasa | 65.000 | 316.680 | - | - |
| Consumo de Energía | - | - | 5.563 | 6,81 |
| N | 100 | - | - | 8,22 |
| K₂O | 60 | - | - | 0,48 |
| P₂O₅ | 60 | - | - | 0,85 |
| Pesticidas | 2 | - | - | 0,31 |
| Materia Digerida | 24.396 | - | - | 0 |
| Materia Sembrada | 10 | - | - | 0 |
| Emisiones campo N₂O | 3,06 | - | - | 12,66 |
| Transporte de materia digerida | - | - | - | 0,56 |
| Total sin asignación | | | | 29,9 g CO₂/MJ bioetanol |
| Total con asignación* | | | | 26,7 g CO₂/MJ bioetanol |

*factor de asignación 89%

Transporte y fases de distribución

Para la fase de transporte, la cantidad de producto se calcula en megajulios en 316.680 MJ sorgo/ha/año. El transporte de la biomasa por camión de producto seco con combustible diésel se considera para un valor medio de distancia de 20 km. El valor parcial para las emisiones de esta fase de transporte es de 1,49 g CO₂/MJ bioetanol, pero este valor debe sumarse al transporte de bioetanol desde la planta hasta el depósito y posteriormente a las estaciones de servicio. Para esta parte del transporte, el factor de asignación debe ser considerado (89%), por lo que las emisiones son 1,33 g CO₂/MJ bioetanol.

Para el transporte del bioetanol desde la planta y desde el depósito:

1. Los camiones utilizados para líquidos se consideran para un movimiento de 300 km como valor medio de distancia desde los destinos de la plant dentro de la EU;
2. el consumo de energía del depósito tiene los mismos valores detallados para las plantas de bioetanol a partir de caña de azúcar

El valor parcial resultante es de 1,31 g CO₂/MJ bioetanol. La asignación no se considera para esta fase, donde todo se asigna al bioetanol (100%).

Para la estación de servicio, los valores son los mismos que para el bioetanol a partir de la caña de azúcar u otras materias primas. EL valor correspondiente en las emisiones es de 0,44 g CO₂/MJ bioetanol. La asignación no se considera para esta fase, donde todo se asigna al bioetanol (100%).

Para el transporte (e_{td}), el valor final es 3,08 g CO₂/MJ bioetanol (Tabla 19).

Tabla 19: Emisiones de GHGs para el transporte y las fases de distribución

| Transporte y fase de distribución | km | Camión con combustible Diésel | MJ/ MJ bioetanol | g CO ₂ /MJ bioetanol |
|---|-----|-------------------------------|------------------|---|
| Transporte de sorgo dulce cosechado* | 20 | Camión para producto seco | - | 1,49 |
| Transporte de bioetanol desde la planta | 300 | Camión para líquidos | - | 0,99 |
| Consumo de energía del depósito | - | - | 0,00252 | 0,32 |
| Estación de servicio | - | - | 0,0034 | 0,44 |
| Total sin asignación | | | | 3,24 g CO₂/MJ bioetanol |
| Total con asignación* | | | | 3,08 g CO₂/MJ bioetanol |

* factor de asignación 89 %

Fase de procesamiento

Basándose en los datos del caso de estudio, se producen 0,226 MJ bioetanol/MJ sorgo.

En el modelo basado en el sorgo dulce, la cantidad total de electricidad generada (planta de cogeneración para la quema del bagazo, la quema de biogás y la turbina de la sección de concentración) se divide en energía eléctrica a partir de los subproductos (biogás y la concentración) que se asigna por separado (89% de bioetanol, 11% de subproducto), y la electricidad procedente de la planta de cogeneración se alimentó con el bagazo (esto es totalmente atribuido a la producción de bioetanol). El gran exceso de electricidad producida por una planta de cogeneración es vendido a la red. De la cantidad total de electricidad una parte se reutiliza en la planta para la producción de bioetanol: corresponde a 0,108 MJ/MJ bioetanol.

Puesto que la electricidad se produce en una cantidad mayor a la requerida por la planta, esto no es realmente una demanda, sino una reducción de la electricidad de salida. La salida de electricidad a partir de la producción de vapor se acredita por la electricidad a partir del bagazo quemado en las instalaciones de cogeneración con turbina de vapor para la generación eléctrica. Como consecuencia, también la demanda de electricidad en la planta de bioetanol está considerada como electricidad para la quema de bagazo en instalaciones de cogeneración para reconocer el hecho de que en la práctica esto no es una exigencia, sino una reducción de la electricidad de salida.

En el caso de estudio considerado, el total de la producción (salida) de electricidad es 43.240 MWh (155.664 GJ) obtenido de la quema del bagazo, del biogás y de la etapa de concentración. Restando la cantidad relativa a los subproductos (8.996 MWh) la energía eléctrica producida sólo en la cogeneración con bagazo es de 34.244 MWh (123.278 GJ), correspondiente a 0,454 MJ/MJ bioetanol sobre una base anual. Restando los consumos eléctricos de la planta, el valor obtenido es 0,346 MJ/MJ bioetanol; esto es el excedente de electricidad y el crédito se calcula siguiendo el Anexo RED V, C.16.

La producción de calor no se considera, porque es completamente re-utilizada en la planta para las necesidades internas.

Los productos químicos de la planta se utilizan en los procesos de producción y una parte de ellos son los lubricantes para las maquinarias.

Las emisiones para el procesamiento (e_p) corresponden a -1,12 g CO₂/MJ bioetanol. Los detalles se resumen en la Tabla 20.

Tabla 20: Emisiones de GHGs a partir de la fase de procesamiento

| Fase Procesamiento | MJ bioetanol/ MJ sorgo | MJ/ MJ sorgo | MJ bioetanol/ ha/año | MJ/ MJ bioetanol | g CO ₂ / MJ bioetanol |
|--|---------------------------|-----------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| Rendimiento Bioetanol | 0,226 | - | 71.570 | - | - |
| Subproductos | - | 0,027 | | - | - |
| Electricidad tomada de CHP | - | - | - | 0,108 | - |
| Vapor de CHP | - | - | | 1,66 | - |
| Generación Electricidad (total) | - | - | - | -0,454** | - |
| Electricidad bagazo Turbina de vapor* | - | - | - | -0,346** | -1,98 |
| Productos químicos | - | - | - | 0,00132 kg/MJ bioetanol | 0,85 |
| Total sin asignación | | | | | -1,12 g CO ₂ /MJ bioetanol |
| Total con asignación *** | | | | | -1,00 g CO ₂ /MJ bioetanol |

* excedentes de electricidad, crédito se calcula siguiendo el Anexo RED V C.16

** electricidad de salida, por lo que es negativo

*** factor de asignación 89 %

Cambio en el uso de la tierra y mejora de la gestión agrícola

En cuanto a la LUC en el cultivo de sorgo dulce, la suposición es "no LUC", debido a que el cultivo de sorgo dulce en el caso de estudio se lleva a cabo en los campos donde normalmente se cultiva maíz. De hecho, las mismas técnicas que para el maíz se utilizan para el sorgo dulce y también las maquinarias y el tipo de suelos son similares.

La gestión agrícola mejorada, la captura y el reemplazo del CO₂ y la captura del CO₂ y el almacenamiento geológico no se consideran.

Ahorro en las emisiones de GHGs en el caso de estudio

El valor final de las emisiones por megajulio de bioetanol obtenido a partir de sorgo dulce se corresponde con 32,00 g CO₂/MJ bioetanol. La referencia de los combustibles fósiles (por ejemplo gasolina) tiene un valor de emisión de 83,8 g CO₂/MJ de gasolina. El resultado atribuido corresponde a 28,8 g de CO₂/MJ bioetanol.

La reducción de las emisiones resultantes del cálculo previsto en el RED corresponde al 66%. Cumple con el objetivo para el año 2018.

Este resultado es comparable a los valores para bioetanol a partir de caña de azúcar (es decir, el 71% de ahorro de emisiones de GHGs como valor por defecto) y el bioetanol a partir de trigo con paja quemada en la cogeneración (es decir, el 69% de ahorro de emisiones de GHGs como valor por defecto).

TEMA: METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE AHORRO DE EMISIÓNES DE GHGs

Un aspecto importante del modelo es lo relativo a las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce y en la generación eléctrica. El cálculo de la LCA de esta cadena y las emisiones de gramos de CO₂ equivalentes por megajulio de bioetanol producido puede dar el porcentaje de ahorro en las emisiones del bioetanol producido a partir de sorgo dulce en Italia. Los valores se comparan con los valores indicados en el Anexo V de la RED para otros cultivos energéticos utilizados para la producción de biocombustibles.

Para este propósito, la "herramienta de cálculo de gases de efecto invernadero BioGrace" (www.biograce.net) es el instrumento que puede ser utilizado para el cálculo del ahorro de GHGs produciendo bioetanol a partir de sorgo dulce (como el etanol 1^a generation) y el calor y la electricidad para el aprovechamiento de los subproductos de la cadena.

La herramienta BioGrace permite la reproducción del cálculo de los valores por defecto del Anexo V de la RED de las vías de producción de biocombustibles y también permite realizar cálculos adaptados de forma individual.

De acuerdo con las directrices para el modelo de la EU y, especialmente, con las hipótesis del caso de estudio del modelo 1, la herramienta BioGrace se ha utilizado integrando las vías ya creadas de bioetanol a partir de caña de azúcar, de maíz, de trigo con la paja residual quemada en la planta de cogeneración. Integrando estas tres vías y tomando las partes de interés relativamente al sorgo dulce, se obtuvo el resultado final para este cultivo. Una consideración importante se refiere al hecho de que el modelo prevé un concepto de biorrefinería, donde la cadena integrada se deriva de la producción de bioetanol de 1^a generación y el uso de subproductos para la generación eléctrica en gran exceso si se consideran los requerimientos para la producción de biocombustibles. El sorgo dulce se procesa de forma similar a la caña de azúcar, transportando la biomasa fresca cosechada hasta la planta, extraiendo el jugo azucarado para fermentar el bioetanol, quemando el bagazo en la unidad de cogeneración. En consecuencia, la mayor parte de los valores pueden ser similares y/o comparados con los de la caña de azúcar. A fin de verificar la buena calidad de los resultados obtenidos para el sorgo dulce, que es un cultivo sembrable a diferencia de la caña de azúcar, los datos de cultivo (por ejemplo, fertilizantes, el período de siembra y la cosecha, el consumo de energía en términos de maquinarias) han sido comparados con los del maíz. Además, la quema del bagazo en la planta de cogeneración es similar a la quema del bagazo de la caña de azúcar pero también a la quema de paja de trigo (es decir, también el LHV de la paja y el bagazo son similares). La electricidad generada por la combustión del bagazo se considera en las emisiones de la planta: una parte se reutiliza en la producción de bioetanol, pero una gran cantidad es el exceso de electricidad que se cuenta en las emisiones de la sección de la planta de bioetanol. El biogás obtenido de la digestión anaerobia de las vinazas es posteriormente quemado en las instalaciones de cogeneración y la electricidad se vende a la red; lo mismo sucede para la electricidad generada a partir de la sección de la concentración con la turbina de condensación. Para estas dos secciones, la electricidad no se considera parte de la planta de bioetanol sino como un subproducto de la cadena. Basándose en estas premisas, la asignación de bioetanol es 89% y el resto es de los subproductos. Insertando los datos obtenidos a partir del cultivo de sorgo dulce en Italia y en el modelo elaborado en términos de entradas y salidas de energía de toda la cadena, se obtuvieron los resultados finales.

La herramienta utilizada se ha estructurado con el fin de trabajar en las vías ya preparadas la insertando los propios datos para finalmente obtener los valores de las emisiones derivadas de la fase de cultivo (e_{cc}), de la fase de transporte y distribución (e_{td}), de la fase de procesamiento (e_p), del eventual cambio en el uso de la tierra (e_t), de la mejora de la gestión de la agricultura (e_{sca}) o la captura y sustitución del dióxido de carbono (e_{ccr}) o la captura de dióxido de carbono y su almacenamiento geológico (e_{ccs}) y automáticamente se puede obtener el ahorro de emisiones de GHGs expresados en porcentaje y los gramos de CO₂ emitidos por MJ de bioetanol producido.

Para adaptar el modelo considerado, el punto de partida es la hoja de bioetanol a partir de la caña de azúcar porque se trata de un modelo que procesa biomasa que produce azúcares simples fermentables como el sorgo dulce.

8.2 Caso de Estudio: desarrollo de un modelo en la EU en el área industrial de Tesalónica en Grecia

Supuestos específicos

El modelo de cadena para procesar el sorgo dulce como única materia prima en una planta de capacidad de 10.000 t/año (para bioetanol anhidro) se aplica en el caso siguiente.

Tabla 21: Principales características del área geográfica considerada en el caso de estudio

| Área industrial de Tesalónica, Grecia | |
|--|---|
| Características Climáticas | Mediterráneo |
| Tipo de suelo | Franco-arcillosa, buena profundidad y textura, buena materia orgánica |
| Precitaciones en el periodo de crecimiento⁵⁶ | 33,5 mm |
| Tiempo de siembra | Mayo |
| Tiempo de cosecha | Septiembre |
| Diversificación del cultivo | Bastante baja, prevalencia del arroz |
| Estructura de las explotaciones | Fragmentación de la tierra agrícola |

El rendimiento de biomasa en fresco y base seca, así como el jugo y los rendimientos totales de azúcar utilizada en este estudio están de acuerdo a los resultados de un caso de estudio piloto realizado en el norte de Grecia por el Instituto Tecnológico de Tesalónica. Estos valores se presentan en la tabla 22. De los 4 cultivares de sorgo dulce que se probaron en los dos años de estudio llevado a cabo en el norte de Grecia, un cultivar y más específicamente el "Urja", tuvo el mayor rendimiento teórico de bioetanol.

Tabla 22: Rendimientos de biomasa fresca, rendimientos de biomasa seca, rendimiento del jugo, grado Brix del jugo, rendimiento total de azúcar y rendimiento teórico del bioetanol del cultivar "Urja" crecido con una salinidad del suelo de 3,2 dSm⁻¹ y con un riego de 210 mm

| Cultivar | Biomasa fresca [t/ha] | Biomasa seca [t/ha] | Jugo [t/ha] | Grado Brix [%] | Azúcares totales [t/ha] | Etanol teórico [l/ha] | Etanol teórico [t/ha] |
|----------|-----------------------|---------------------|-------------|----------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Urja | 97.3 | 33.5 | 34.4 | 14.4 | 3.86 | 7620 | 6 |



Figura 24: Ubicación de la planta de bioetanol, campos de sorgo dulce y compañía de refino de petróleo (fuente: REACM)

Las tierras agrícolas afectadas en el de caso de estudio es de 1.660 hectáreas y el rango de suministro de la materia prima es un área a una distancia de 20 km de la planta de bioetanol. Los campos agrícolas están situados junto a la zona industrial de Tesalónica, donde se ubicó la planta. Los miembros de la Cooperativa Agrícola de Halastra son propietarios de una superficie agrícola de 6.000 hectáreas. En este escenario, de acuerdo con el modelo de la EU, la cosecha requiere de 6 metros en paralelo; cada uno de ellos tiene 6 máquinas cortadora-trituradora-cargadora y 24 tractores agrícolas. En este clima, la duración del período de cosecha puede ser de hasta 40 días, si las variedades de ciclo corto y las de ciclo largo se cultivan al mismo tiempo en diferentes campos de la superficie agrícola considerada. Los principales detalles de la fase agrícola se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23: Características detalladas del cultivo de sorgo dulce y producción de bioetanol en el caso estudiado

| | |
|--|--|
| Fertilización | 130 kg N/ha 50kg P/ha 65 kg K/ha |
| Riego | 210 mm (complementado con 142-261 mm de precipitaciones durante el crecimiento) |
| Contenido de humedad | 65,6% |
| Rendimiento bioetanol anhídrico | 6 t/ha 7,6 m ³ /ha 164,8 GJ/ha |
| Producción de Bioetanol | 10.000 t/año 12.649 m ³ /año |
| Biomasa fresca procesada | 161.518 t/año |
| Biomasa seca procesada | 55.610 t/año |
| Superficie agrícola | 1.660 ha |

Fertilización: 2 días antes de la siembra del sorgo se aplicaron 130 kg N/ha, como sulfato amónico $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$, 50 kg P/ha como super fosfato $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2]$ y 65 kg K/ha como sulfato potásico (K_2SO_4) .

Biomasa: el objetivo de la planta es producir 10.000 toneladas (12.649.200 litros) de bioetanol por año utilizando sorgo dulce como materia prima. La eficiencia de la biomasa se estima en 97,3 t/ha, la superficie agrícola en 1.660 ha y la eficiencia del bioetanol en 6 t/ha o 7,6 m³/ha. Para producir 10.000 t de bioetanol se necesitan 161.518 t de biomasa fresca. En cuanto a los costes, no hay datos disponibles sobre el precio del sorgo dulce como materia prima para la producción de bioetanol en Grecia, ya que hasta ahora sólo son cultivos experimentales y no de producción regular. De acuerdo con el modelo de la EU, los gastos agrícolas se estiman en 16-18 €/t en base húmeda, mientras que el ingreso neto final para los agricultores se estima en 12-14 €/t en base húmeda.

Rendimiento de bioetanol anhídrico: para el cálculo de la producción de bioetanol a partir de biomasa fresca de sorgo dulce, las ecuaciones detalladas por Sakellariou-Makrantoniaki y colaboradores (2007)⁵⁷ y Zhao y colaboradores (2009)⁵⁸ se modificaron como sigue:

Rendimiento de bioetanol total [l/ha] = contenido total de azúcares [%] x biomasa fresca [t/ha] x 6,5 (factor de conversión de bioetanol a partir de azúcar) x 0,85 (eficiencia del proceso de obtención de bioetanol a partir de azúcar) x (1,00/0,79) (gravedad específica del bioetanol en g/ml).

El procesamiento se llevó a cabo de acuerdo con las directrices detalladas en el capítulo 7.

En lo que respecta al aprovechamiento de los subproductos, la electricidad se vende a la red y el calor se utiliza para el autoconsumo de la planta.

El factor más importante para el éxito de este proyecto es la situación adecuada para la planta de bioetanol que se instale. Sin embargo, las posibles alternativas pueden ser varias. La solución más óptima podría ser el resultado de una metodología basada en una investigación sistemática, un análisis y una evaluación de las alternativas específicas.

Requisitos básicos para el lugar de recolección

Los posibles sitios donde la planta debería estar ubicada deben cumplir los siguientes requisitos:

- Disponibilidad de recursos humanos
- Coste de la compra de la tierra
- Fácil suministro para las materias primas
- Condiciones ambientales suficientes
- Disponibilidad de medios de transporte
- Proximidad a los mercados
- Disponibilidad de materiales auxiliares y servicios de empresa públicos
- Aceptación por parte de la comunidad local
- Financiación adecuada, infraestructura administrativa y social
- Servicios e instalaciones especiales previstas por la ley de desarrollo número 3908/2011.

El punto de partida para una primera selección o rechazo de algunos sitios es la ubicación de las materias primas. La planta de bioetanol se encuentra cerca de las tierras cultivadas de sorgo dulce.

El segundo punto es la existencia de un parque industrial en la zona. Los parques industriales ofrecen ventajas específicas a las empresas ubicadas allí, como una infraestructura integrada, actividades industriales organizadas, infraestructuras de abastecimiento de agua para el suministro de energía, la comunicación de red (teléfono, servicios de Internet), tratamiento de aguas residuales, redes de carreteras.

Además, la instalación de una planta dentro de un parque industrial ofrece las siguientes ventajas técnicas y comerciales a los futuros inversores:

- términos de la concesión del plan
- amplia red de infraestructura técnica
- servicios con valor añadido (gas natural, red de banda ancha,parque de bomberos)
- acceso al transporte
- fácil instalación con menos requisitos burocráticos
- subvención preferencial a través de la ley de desarrollo.

Parque industrial de Tesalónica

El Parque Industrial de Tesalónica está situado al noroeste de la ciudad (18 km) en el área de Sindos, y cumple con los requisitos anteriores. El Parque Industrial cuenta con una superficie total de 395 hectáreas que abarca 12 bloques con calles y áreas de uso común, mientras que hay aproximadamente unas 187 hectáreas de parcelas edificables disponibles actualmente. Vehículos de uso privado u otros vehículos de trabajo pesado puede pasar a través de la VIPATHE a través de la red de carreteras que se está construyendo actualmente entre los 12 bloques. Además, con el fin de facilitar a las empresas que van a ser co-ubicadas en el parque, hay una plataforma de ferrocarril que une el parque con las vías del tren que lleva a Tesalónica, Atenas y los centros urbanos del norte y el noreste de Grecia, Bulgaria y Macedonia.



Figura 25: Parque industrial de Tesalónica para la ubicación potencial de la planta (fuente: <http://www.vipathe.gr/en/index.asp>)

Características del Parque Industrial de Tesalónica

1. Disponibilidad de recursos humanos

La unidad regional de Tesalónica tiene una población de 1.104.460⁵⁹. La tasa de desempleo en la región de Macedonia Central es del 18.8%⁶⁰.

2. Coste del sitio

El coste de la compra de tierras asciende a 160 € /m²⁶¹.

3. Fácil suministro de materias primas

El total de la tierra cultivable en la unidad regional de Tesalónica, es de alrededor de 412.747 ha⁶².

4. Condiciones ambientales suficientes

La temperatura media en Salónica es de 5,2 °C en enero y 26,6 °C en julio. La precipitación media en los mismos meses es de 36,8 mm y 23,9 mm, respectivamente.

5. Disponibilidad de medios de transporte

El Parque Industrial de Tesalónica se encuentra cerca de la autopista Atenas-Tesalónica y la carretera Egnatia y la industria de refinación de petróleo "Hellenic Petroleum SA". El ferrocarril, el aeropuerto, el puerto y la línea de autobús están cerca de la zona.

6. Proximidad a los mercados

El Parque Industrial está al borde del segundo mercado más grande de Grecia, Tesalónica, y se ve facilitada por el puerto de Tesalónica.

7. Disponibilidad de materiales auxiliares y servicios de uso público

El Parque Industrial cuenta con abastecimiento de agua, tratamiento de residuos, laboratorio de control de la contaminación. También ofrece a las redes telefónicas y de electricidad, comunicaciones de banda ancha, servicios de bomberos y la conexión a la red de gas natural.

8. Financiación adecuada, infraestructuras administrativas y sociales

El Parque Industrial cuenta con un departamento de administración y gestión, mientras que la ciudad de Tesalónica, ofrece todo lo necesario los servicios administrativos, económicos y sociales.

9. Servicios e instalaciones especiales previstas por la ley de desarrollo número 3908/2011

Para el Área Industrial de Tesalónica, la ley de desarrollo proporciona un 35% de subvenciones o subsidios de arrendamiento o concesión para el coste laboral.

Análisis Económico

Los principales costes considerados en la línea de producción de bioetanol a partir de sorgo dulce están de acuerdo con el modelo 1 y se resumen en la Tabla 24.

Tabla 24: Principales costes incluidos en el análisis económico del caso de estudio

| | |
|------------------------------|-------------------------------------|
| Biomasa | ~160.000 t/a x 30€/t=4.800.000€/año |
| Costes de inversión | 30 millones € |
| • Costes de operación | 1.220.000 €/año |
| • O&M | 2.690.000 €/año |
| Otros | 1.220.000 €/año |

Los costes de inversión se estiman en 30 millones de €, incluyendo edificios, equipos, mantenimiento extraordinario, gastos generales (5%), gastos técnicos (5%), imprevistos (4%); la adquisición de terrenos, licencias eventuales y patentes no están incluidos. Los costes operativos incluyen la adquisición de productos químicos, la gestión del agua, evacuación de las cenizas, el transporte de la biomasa, los seguros y otras categorías de costos.

En cuanto a los ingresos, el precio del bioetanol depende del mercado de la energía, especialmente del precio del petróleo, y el margen que se considera depende de los precios del petróleo. Los valores se expresan como valores medios en la tabla 25.

Tabla 25: Principales ingresos incluidos en el análisis económico del caso de estudio

| | | | |
|-----------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Ingresos | Productos finales | Precio Bioetanol 400-1.000 €/t | 4,0-10,0 millones €/año |
| | | Precio electricidad 0,18-0,28 €/kWh | 7,78-12,11 millones €/año |

En lo que respecta a los ingresos de la venta de electricidad, la tasa FIT, en Grecia, tiene un rango desde 0,15 a 0,20 €/KWh.

En Grecia, para la biomasa se prevé la FIT, cuyos valores están garantizados por 20 años:

- o 200 €/MWh para potencia inferior a 1 MW
- o 175 €/MWh para potencia desde 1 MW a 5 MW
- o 150 €/MWh para potencia superior a 5 MW.

En lo que respecta al número de puestos de trabajo, se estima que 14 personas estarán trabajando cada hora en la planta de bioetanol (Tabla 26).

Tabla 26: Horas de personal al día

| | | |
|--|------------------------|--|
| Días de trabajo de la planta en un año | 330 días | |
| Producción diaria de bioetanol | $Q=30,7 \text{ t/día}$ | |
| Método de Cálculo | $L=K/Q^{-0.76}$ | |
| Procesos | K | L=Horas de personal por tonelada de producto |
| 1. Molienda | 10 | 1,384 |
| 2. Extracción | 17 | 2,352 |
| 3. Fermentación | 23 | 3,182 |
| 4. Destilación | 10 | 1,384 |
| 5. Deshidratación | 10 | 1,384 |
| 6. Elaboración de subproductos | 10 | 1,384 |
| Total horas personal por tn de producto | 11,07 hr/t d | |
| Horas de personal al día | 340 hr/d | |

K=constante, que corresponde al valor de "23" para procesos discontinuos, "17" para procesos con baja exigencia de trabajo y "10" para procesos automáticos continuos

Ahorro en las emisiones de GHGs

Instalaciones de producción de bioetanol, como cualquier proceso industrial, se enfrenta a un gran reto. Este desafío es proteger el medio ambiente no sólo durante el período de construcción, sino también durante la operación. Como resultado, uno de los objetivos principales de la planta es reducir las emisiones de GHGs, a través de la LCA.

Fase de cultivo

Las emisiones derivadas de la sección de cultivo incluyen todas las partes agronómicas de la cadena, de la siguiente manera:

1. los datos de entrada de la producción de biomasa en el Distrito Regional de Tesalónica (Norte de Grecia) es de 97,3 t/ha en base húmeda (humedad 65,6%), expresado específicamente en 97.300 kg/ha/año, y la correspondiente salida de energía de 582.399 MJ sorgo/ha/año se calcula automáticamente;
2. el consumo de energía se ha calculado teniendo en cuenta la suma de energía primaria, combustibles y lubricantes para las maquinarias para el cultivo en el caso específico de estudio: corresponde a 5.563 MJ/ha/año;
3. los insumos agroquímicos se han detallado como muy utilizados en el estudio del caso del cultivo de sorgo: 130 kg N/ha/año, K₂O 50 kg/ha/año, P₂O₅ 65 kg/ha/año. Los pesticidas y herbicidas se han calculado como 2 kg/ha/año;
4. las vinazas que se derivan de las unidades de destilación y rectificación no se consideran para su utilización como fertilizante, ya que se utiliza en la sección de digestión anaerobia para la producción de biogás. De lo contrario, la materia residual digerida después de la producción de biogás se considera como fuente de abono orgánico para el cultivo de sorgo. La cantidad se ha calculado teniendo en cuenta la producción de materia digerida que es 60.621,5 t/año para compartir en 1.660 hectáreas, y la cantidad resultante es de 36.519 kg/ha/año;
5. el material de siembra utilizado en el caso de estudio es de 10 kg/ha/año
6. las emisiones de campo de N₂O se han calculado utilizando la herramienta específica "emisiones IPCC de N₂O". La producción de biomasa es de 97.300 kg/ha/año en base húmeda (humedad 65,6%). En las emisiones directas de N₂O de los suelos gestionados, las

entradas son de 130 kg N/ha/año de fertilizantes sintéticos. Las emisiones indirectas de N₂O se calcularon automáticamente. Las emisiones de N₂O resultantes son de 3,51 kg N₂O/ha/año.

Las emisiones para la fase de cultivo corresponden a 15,09 g CO₂/MJ bioetanol.

La materia digerida se transfiere a los campos para la fertilización orgánica. La cifra resultante es 0,37 g CO₂/MJ bioetanol que se resume en el número anterior.

Con la asignación de las emisiones corresponden a 13,75 g CO₂/MJ bioetanol como se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27: Emisiones de GHGs para la fase de cultivo

| Fase de Cultivo | kg/ha/año | MJ _{sorgo} /ha/año | MJ/ha/año | g CO ₂ /MJ _{bioetanol} |
|--|-----------|-----------------------------|-----------|--|
| Rendimiento de Biomasa | 97.300 | 582.399 | - | - |
| Consumo de Energía | - | - | 5.563 | 3,02 |
| N | 130 | - | - | 4,74 |
| K | 50 | - | - | 0,23 |
| P | 65 | - | - | 0,52 |
| Pesticidas | 2 | - | - | 0,14 |
| Materia Digerida | 36.519 | - | - | 0 |
| Material de siembra | 10 | - | - | 0 |
| Emisiones N₂O | 3,51 | - | - | 6,44 |
| Transporte de material digerida | - | - | - | 0,37 |
| Total sin asignación | | | | 15,46 g CO₂/MJ bioetanol |
| Total con asignación* | | | | 13,75 g CO₂/MJ bioetanol |
| *factor de asignación 89% | | | | |

Transporte y fases de distribución

Para la fase de transporte, la cantidad de producto en megajulios se calcula automáticamente en 582.399 MJ sorgo/ha/año. El transporte por camión de producto seco con diésel como combustible se considera para un valor promedio de 20 km. El valor parcial para las emisiones de esta fase de transporte es de 1,46 g CO₂/MJ bioetanol pero este valor debe sumarse al transporte de bioetanol desde la planta hasta el depósito y posteriormente a las estaciones de servicio. Para esta parte del transporte, el factor de asignación debe ser considerado (89%), por lo que las emisiones son 0,88 g CO₂/MJ bioetanol.

Para el transporte (e_{td}) el valor final es de 1,77 g CO₂/MJ bioetanol (Tabla 28).

Tabla 28: Emisiones de GHGs para el transporte y las fases de distribución

| Emisiones de GHGs Transporte y distribución | km | Camión con combustible Diésel | MJ/MJ bioetanol | g CO ₂ /MJ bioetanol |
|--|----|-------------------------------|-----------------|---|
| Transporte de sorgo dulce cosechado | 20 | Camión para producto seco | - | 0,88 |
| Transporte de bioetanol desde la planta | 9 | Camión para líquidos | - | 0,35 |
| Consumo de energía de depósito | - | - | 0,00252 | 0,32 |
| Estación de servicio | - | - | 0,0034 | 0,44 |
| Total sin asignación | | | | 1,99 g CO₂/MJ bioetanol |
| Total con asignación* | | | | 1,77 g CO₂/MJ bioetanol |

*factor de asignación 89 %

Fase de procesamiento

Basándose en los datos del caso de estudio, se produce 0,277 MJ bioetanol / MJ sorgo.

En el modelo basado en el sorgo dulce, el gran excedente de electricidad producida por una planta de cogeneración, además de la combustión del biogás se vende a la red. La electricidad tomada de una planta de cogeneración para la producción de bioetanol corresponde a 0,108 MJ/MJ bioetanol.

Puesto que la electricidad se produce en una cantidad mayor que el requerimiento que demanda la planta, esto no es realmente una demanda y si una reducción en la salida de electricidad. La salida de electricidad a partir de la producción de vapor se accredita por la electricidad a partir del bagazo quemado en las instalaciones de cogeneración con turbina de vapor para la generación de energía. Como consecuencia, también la demanda de electricidad en la planta de bioetanol se considera como electricidad a partir del bagazo quemado en instalaciones de cogeneración para reconocer el hecho de que en la práctica esto no es una demanda, sino una reducción en la salida de electricidad.

En el caso de estudio considerado, la producción total (salida) de la electricidad es 43.240 MWh (155.664 GJ) obtenido de la quema de bagazo, del biogás y de la sección de concentración. Restando la cantidad relativa a los subproductos (8.996 MWh) la energía eléctrica producida sólo en la cogeneración con bagazo 34.244 MWh (123.278 GJ), correspondiente a -0,454 MJ/MJ bioetanol sobre una base anual. Restando los consumos eléctricos de la planta, el valor obtenido es -0,346 MJ/MJ bioetanol; esto es el excedente de electricidad y el crédito se calcula siguiendo el Anexo V de la RED, C.16.

La energía térmica producida en forma de calor es completamente re-utilizada en la planta para las necesidades internas.

En la parte relativa a los productos químicos utilizados en la planta, los valores son los mismos que para el bioetanol obtenido a partir de caña de azúcar: los productos químicos utilizados en los procesos de producción y lubricantes para las maquinarias.

Las emisiones procedentes de la transformación (e_p) es -1,12 g CO₂/MJ bioetanol. Los detalles se resumen en la Tabla 29.

Tabla 29: Emisiones de GHGs para la fase de procesamiento

| Fase de Procesamiento | MJ bioetanol/ MJ sorgo | MJ/ MJ sorgo | MJ bioetanol/ ha/año | MJ/ MJ bioetanol | g CO ₂ / MJ bioetanol |
|---|---------------------------|-----------------|-------------------------|----------------------------|--|
| Rendimiento bioetanol | 0,277 | - | 161.324 | - | - |
| Subproductos | - | 0,027 | | - | - |
| Electricidad tomada de CHP | - | - | - | 0,108 | - |
| Vapor de CHP | - | - | | 1,660 | - |
| Generación de electricidad (total) | - | - | - | -0,454** | - |
| Electricidad del bagazo | - | - | - | -0,346** | -1,98 |
| Turbina de Vapor* | | | | | |
| Productos Químicos | - | - | - | 0,00132 kg/MJ bioetanol | 0,85 |
| Total sin asignación | | | | | -1,12 g CO₂/MJ bioetanol |
| Total con asignación*** | | | | | -1,00 g CO₂/MJ bioetanol |

* excedentes de electricidad, crédito se calcula siguiendo el Anexo RED V C.16

** electricidad de salida, por lo que es negativa

***factor de asignación 89 %

Cambio en el uso de la tierra y mejora de la gestión agrícola

La LUC, la mejora de la gestión agrícola, la captura y el reemplazo del CO₂ y la captura del CO₂ y su almacenamiento geológico no se consideran.

Reducción de emisiones de GHGs en el caso de estudio

El coste final de las emisiones por megajulio de bioetanol obtenido a partir de sorgo dulce corresponde a 14,66 g de CO₂/MJ de bioetanol. El resultado atribuido corresponde a 13,04 g de CO₂/MJ de bioetanol.

La reducción de las emisiones resultantes del cálculo previsto en la RED corresponde a 82,5%.

8.3 Caso de Estudio: desarrollo del modelo de la EU en Andalucía en España

Supuestos específicos

El modelo de cadena para procesar el sorgo dulce como única materia prima en una planta de capacidad de 10.000 t/año (para bioetanol anhídrido) se aplica en el caso de estudio contextualizado a Jédua (Cádiz) en el sur de España (Andalucía). De hecho, el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España, en cumplimiento de las instrucciones de la EU, acaba de publicar un documento sobre la "Evaluación de la balanza de emisiones de GHGs procedentes de la Producción de Biocombustibles", en el que se evalúa la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce en Andalucía (sur de España). La situación específica de la zona en cuestión se resume en la Tabla 30.

Tabla 30: Principales características del área geográfica considerada en el caso de estudio

| Jédua (Cádiz), Sur de España | |
|---|-------------------------------------|
| Características Climáticas | Marítimo mediterráneo templado |
| Precipitaciones en el periodo de crecimiento | 600-800 mm |
| Tiempo de siembra | Mayo |
| Tiempo de cosecha | Septiembre |
| Diversificación del cultivo | Remolacha azucarera |
| Estructura de las explotaciones | Fragmentación de la tierra agrícola |

Las tierras agrícolas adoptadas en el estudio del caso es de 2.147 hectáreas y el rango de suministro con las características específicas de la zona es de 15 km. El número de hectáreas se indica teniendo en cuenta que la producción de biomasa por hectárea es de 31 t/ha db y el porcentaje de azúcar por tonelada es de 38%.

Esta área de cultivo produce aproximadamente 214.750 toneladas de sorgo dulce y fresco con un 10% de azúcares. Por último, la cantidad de azúcar de 21.475 toneladas que se necesita para producir 12.500 m³ de bioetanol. Con estos datos, la cantidad de bagazo utilizado en la unidad de generación de energía es 77.310 toneladas por año, con un 10% de humedad.

Teniendo en cuenta la diversificación de cultivos y estructura de la explotación de la zona, la localización de los campos de la hipótesis de la siguiente manera: 35% de los campos dentro de los 5 km de la planta, el 44% de los campos 6 a 11 km de la planta, el 21% de los campos 12 a 15 km de la planta. En este escenario, la cosecha requiere de 4 metros en paralelo, en cada uno de ellos una cortadora-trituradora-cargador de la máquina y seis tractor agrícola equipado con volquete de trabajo, el tráfico consiguiente es de 15 tractores por hora durante los 40 días de la cosecha.

En este clima, la duración del período de cosecha puede ser de hasta 40 días, si las variedades de ciclo corto y las de ciclo largo se cultivan al mismo tiempo en diferentes campos de la superficie considerada agrícola.

Los principales detalles de la fase agrícola se presentan en la Tabla 31.

Tabla 31: Principales detalles del cultivo de sorgo dulce en el caso de estudio

| Fase Agrícola * | |
|---|--|
| Fertilización | 31 kg N/ha 273 kg Urea (46% N)/ha 60 kg P ₂ O ₅ /ha 31 kg K ₂ O/ha |
| Riego | Si (4.478,5 m ³ /ha) |
| Rendimiento de Biomasa | 31 t/ha db |
| Rendimiento de azúcar | 6-12 t/ha |
| Rendimiento de bioetanol anhídrico | 2,8 – 5,6 t/ha 3,5 – 7,0 m ³ /ha 84 - 168 GJ/ha |
| Uso previo de la tierra | Remolacha azucarera |

* Año de referencia: 2010

La producción de bioetanol de 1^a generación se lleva a cabo de acuerdo con las directrices del capítulo 7. El difusor continuo utilizado tiene una eficiencia del 97%; en consecuencia la concentración de azúcar es del 12% en el jugo con un 5% sobre base seca en el bagazo. El bagazo tiene humedad residual que puede variar entre el 31% y el 50%. En lo que respecta a la unidad de concentración, el suministro continuo de los reactores de fermentación está previsto concentrando a un 80% la mayoría de jugo azucarado (54,5% de la cantidad total) y a un 45% sólo un 27,3% de la cantidad total, sin ningún tipo de concentración o una concentración reducida (15-18%) y se utiliza directamente para producir bioetanol el 18,2%. La siguiente fermentación del jugo azucarado nuevamente diluido se lleva a cabo con un proceso en batch. La eficiencia aplicada de la fermentación alcohólica es el 90% de la teórica. El bioetanol anhídrico obtenido tiene una pureza del 99,7% w/w y es adecuado para producir Bio-ETBE o para su mezcla con gasolina.

En cuanto al aprovechamiento de los subproductos, el bagazo húmedo se almacena y se seca hasta un 10-20% inmediatamente antes de su quema en la planta de cogeneración. Durante el almacenamiento se calcula una pérdida de biomasa del 5% (principalmente azúcares). La planta de cogeneración está equipada con un quemador de biomasa, un generador de vapor y una turbina de vapor; su eficiencia térmica es de 0,90 y una eficiencia energética es de 0,29. A diferencia de las otras unidades, esta planta de cogeneración funciona durante 360 días al año. El biogás obtenido a partir de las vinazas suministra una micro-turbina de gas con una eficiencia eléctrica del 34%.

En el caso de estudio, la electricidad se vende a la red y el calor se utiliza para el autoconsumo de la planta. En España, existen incentivos a la generación eléctrica a partir de energías renovables y, específicamente a partir de biomasa, con un precio de 16,81 c€/kWh a partir de biomasa (cuando la planta de cogeneración cuenta con más de 2 MW de potencia instalada), si este bagazo se considera como cultivo energético, y 11,38 c€/kWh, si el bagazo se considera como residuo biomásico procedente de instalaciones industriales.

Teniendo en cuenta la cantidad de 77.310 toneladas anuales de bagazo, la instalación eléctrica puede ser de 10 MWe.

El calor es capaz de cubrir el consumo térmico de la planta. Los mayores consumos se refieren a las siguientes unidades: la concentración del jugo de azúcar (sólo durante el período de cosecha), las unidades de destilación y rectificación, el secado del bagazo. En este caso de estudio, la venta de calor a través de una red de calefacción de distrito no se considera, ya que hay una dificultad razonable en la búsqueda de usuarios en el área considerada.

Aparte de estos supuestos, el caso de estudio aplica los contenidos del modelo 1 de la EU.

Análisis Económico

Los principales costes e ingresos considerados en el análisis económico se resumen en la Tabla 32.

Tabla 32: Principales costes e ingresos incluidos en el análisis económico en el caso de estudio.

| Análisis Económico | | | |
|--------------------|----------------------------|---|-----------------------------|
| Costes | Costes de Inversión | 30 millones € | |
| | Costes de Operación | Biomasa 29-34 €/t (34 €/t db con un 38% de azúcares en el tallo db) | 6,23-7,30 millones €/año |
| | | O&M | 2,69 millones €/año |
| | | Otros | 1,22 millones €/año |
| Ingresos | Productos Finales | Precio del Bioetanol 450-800 €/m ³ | 5,63-10,00 millones €/año |
| | | Precio de la electricidad a partir de biomasa 16,81 – 11,38 c€/kWh (10 MWe instalados tienen una producción de 86.400 MWh por año, 360 días y 24 horas por día) | 14,52 – 9,83 millones €/año |

Los costes de inversión incluye edificios, equipos, mantenimiento extraordinario, gastos generales (5%), gastos técnicos (5%), imprevistos (4%); la adquisición de terrenos, licencias eventuales y patentes no están incluidos.

En los costes operativos de la compra de productos químicos, la gestión del agua (por ej., la descarga de aguas residuales de la unidad de concentración, la compra de agua potable para la dilución del jarabe), la eliminación de las cenizas, el movimiento de la biomasa y el seguro están incluidos en el concepto denominado "Otros".

El precio de la biomasa y los valores de los ingresos son detallados como un rango.

La recompensa adecuada para los agricultores como proveedores de biomasa es el requisito previo para el desarrollo de la cadena. En consecuencia, la cuantificación del precio de la biomasa requiere un enfoque muy preventivo. Suponiendo que en la zona en cuestión los gastos agrícolas son 16-18 €/t sobre base húmeda (correspondiente a 1.040-1.170 €/ha, incluido el transporte a la planta con una distancia media de 10 km), el umbral de asequibilidad se estima en 30 €/t. De hecho, en las peores condiciones, otros cultivos son más competitivos que el sorgo dulce y la seguridad en el suministro se vuelve crítica. Dependiendo de la concentración de azúcar en los tallos de sorgo dulce, el precio de la biomasa puede variar, lo que aumenta el precio por tonelada si la cantidad de azúcar es más elevada. El precio del bioetanol depende del mercado internacional de energía, teniendo en cuenta el precio internacional del bioetanol de Brasil, los EE.UU. o India. Considerando este precio y el coste de transporte a Europa o el impuesto en Europa para el bioetanol externo, el precio final debe tener un valor máximo de 80 a 85 c€/l. Por otro lado, el precio mínimo de bioetanol se puede fijar en 45 c€/l. Este valor puede ser evaluado con los datos del coste de producción en Brasil, que es alrededor de unos 30 c€/l. Teniendo en cuenta la evaluación del coste del proceso de producción de bioetanol, el objetivo del gerente de la planta debe ser el uso de la máxima cantidad de biomasa de sorgo dulce para la generación de energía.

Teniendo en cuenta la información que se presenta en la Tabla 33, el rango del coste total es de 10,14 a 11,21 millones de €/año y el rango de ingresos es desde 15,46 hasta 24,52 millones de €/año.

Si el coste total de la inversión se fija en 30 millones de €, el retorno de la inversión puede variar entre 2,5 años (en el mejor de los casos) y 7,5 años (en el peor de los casos).

Ahorro de emisiones de GHGs

Fase de Cultivo

La evaluación se ha realizado teniendo en cuenta el área de cultivo de Jédua (Cádiz) en España, donde el rendimiento del sorgo dulce es de 31 t/ha en base seca.

En la Figura 26, se indica el rendimiento de la producción en Andalucía.

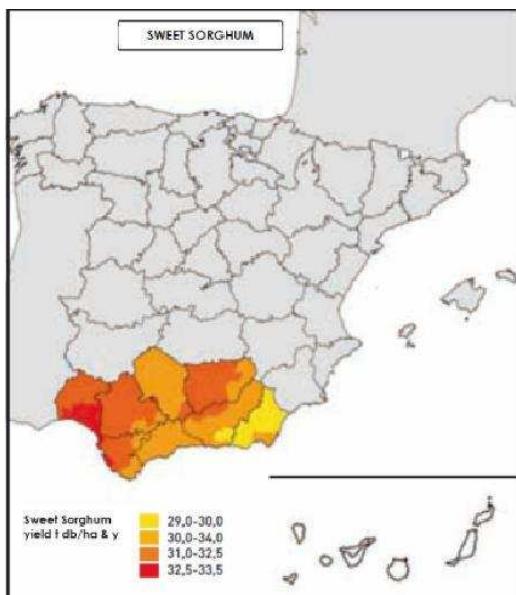


Figura 26: Producción de sorgo dulce en Andalucía (fuente: IDAE 2011 en página 28)

La producción de sorgo dulce en Andalucía dio muy buen resultado sólo con el riego. Los datos de riego obtenidos para este cultivo en Andalucía puede variar entre 4,0 y 4,3 m³/ha. Por lo tanto, si la eficiencia en el uso del agua para este cultivo es de 0,16-0,27 m³/kg en base seca, la cantidad total de agua necesaria para el cultivo (con una producción de 31 t/ha) es de 4,96 a 8,37 m³/ha, que es la suma del riego y la lluvia.

Con la información antes mencionada, se realizó el cálculo de las GHGs y los consumos de energía, para obtener el ahorro en estos aspectos debido a la utilización de sorgo dulce como materia prima para la producción de bioetanol.

Tabla 33: Consumo de energía fósil en los medidas agrícolas (como megajulios de energía fósil por gigajulios de biocarburante producido)⁶⁴

| Biocarburante | Cultivo | Energía consumida por la producción de fertilizantes | Consumo de Energía mediante consumo de combustible en trabajos de cultivo | Consumo de energía por la producción de plantas | Consumo de energía por el uso | Emisiones de la siembra de semilla | Total |
|---------------|--------------------------------------|--|---|---|-------------------------------|------------------------------------|-------|
| Bioetanol | Sorgo dulce (con riego) en Andalucía | 49,59 | 17,53 | 2,80 | 0,03 | 0,13 | 70,08 |

Tabla 34: Emisiones de GHGs en los pasos de cultivo (como g CO₂eq/MJ bioetanol)⁶⁵

| Biocarburante | Cultivo | Emisiones por la producción de fertilizantes | Emisiones por el consumo de combustible en los trabajos de cultivo | Emisiones por la producción de plantas | Emisiones por el consumo de energía | Emisiones por el N ₂ O de la tierra | Emisiones de la siembra de semilla | Total |
|---------------|--------------------------------------|--|--|--|-------------------------------------|--|------------------------------------|-------|
| Bioetanol | Sorgo dulce (con riego) en Andalucía | 5,70 | 1,20 | 0,10 | 1,81 | 5,65 | 0,03 | 14 |

Transporte y fases de distribución

El cálculo de los costes de transporte y el consumo del transporte de las materias primas se han realizado, teniendo en cuenta el tipo de carreteras y la distancia entre los cultivos y la planta de producción.

La Figura 27 muestra el posicionamiento de la planta de producción y la superficie de cultivos que pueden ser utilizados para la producción de bioetanol.

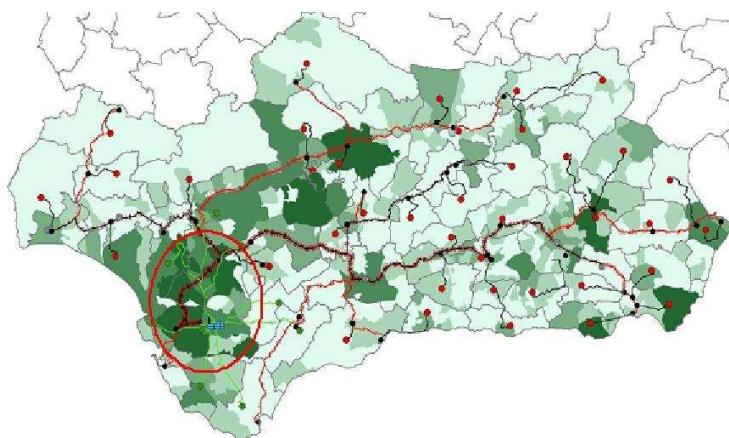


Figura 27: Área considerada en el caso de estudio (fuente: IDAE 2011 en página 39)

Teniendo en cuenta estos aspectos, el consumo de energía y el cálculo de emisiones GHGs se han realizado y mostrado en la Tabla 35.

Tabla 35: Consumo de energía y emisiones de GHGs debido al transporte de las materias primas en el caso de estudio⁶⁶

| | Consumo de energía fósil [MJ/MJ] | GHG [g CO _{2eq} /MJ] |
|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Sorgo dulce (con riego) en Andalucía | 0,014 | 1,9 |

Fase de Procesamiento

En la fase de procesado, en la evaluación del proceso de producción se ha tenido en cuenta el proceso de producción estándar descrito anteriormente.

Las entradas y salidas del proceso de producción se indican en la Tabla 36. Esta información permite el posterior cálculo de las emisiones de GHGs y el balance energético del proceso de producción de bioetanol.

Tabla 36: Consumo energético y de materias primas en la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce⁶⁷

| | |
|-----------------------|----------|
| Bioetanol anhídrido | 1 kg |
| Potencia | 0,74 kWh |
| Bagazo (exceso) | 0,32 kg |
| Vinazas | 13,20 kg |
| Ácido Sulfúrico | 0,04 kg |
| Sulfato de Amonio | 0,01 kg |
| Fosfato de Di-amonio | 0,01 kg |
| Tallos de sorgo dulce | 17,18 kg |

Teniendo en cuenta el uso de bagazo para producir toda la energía que necesita el proceso, las emisiones de GHG son producidas por las materias primas, como se indica en la Tabla 37.

Tabla 37: Emisiones de GHGs en el proceso de producción de bioetanol a partir de sorgo dulce (como g CO_{2eq}/MJ bioetanol)⁶⁸

| | |
|--------------------|-----|
| Materias primas | 0,4 |
| Consumo de Energía | 0 |
| Potencia | 0 |
| Energía Térmica | 0 |
| e _p | 0,4 |
| e _{ee} | 0 |
| e _{ccr} | 0 |

Tabla 38: Balance energético en el proceso de producción de bioetanol a partir de sorgo dulce (como MJf/MJ bioetanol)⁶⁹

| | |
|--------------------|-----|
| Materias primas | 0,1 |
| Consumo de Energía | 0 |
| Potencia | 0 |
| Energía Térmica | 0 |
| Total | 0,1 |

Ahorro de emisiones de los GHGs en el caso de estudio

Después de la evaluación de toda la información referida al proceso de producción de bioetanol a partir de sorgo dulce en Jédula, los resultados más importantes son los ahorros calculados, debido a la utilización de sorgo dulce como materia prima en lugar de combustibles fósiles. Este aspecto es muy importante y garantiza la sostenibilidad de la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce.

Los resultados concretos obtenidos en la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce se mostraron en la Tabla 39 y 40. El ahorro de emisiones de GHGs en el caso de estudio corresponde a un 79%.

Tabla 39: Consumo de energía fósil de la producción de bioetanol en España (Jédula) (como MJf/MJ bioetanol)⁷⁰

| Biocombustible | Cultivo | Consumo de energía para la agricultura | Consumo de energía para el transporte | Consumo de energía por producción de bioetanol | Total [MJ/MJ] | Ahorro [%] |
|----------------|--------------------------------------|--|---------------------------------------|--|---------------|------------|
| Bioetanol | Sorgo dulce (con riego) en Andalucía | 0,07 | 0,021 | 0,01 | 0,10 | 92 |

Tabla 40: Emisiones de GHGs en la producción de bioetanol en España (Jédula) (como g CO_{2eq}/MJ bioetanol)⁷¹

| Biocombustible | Cultivo | Emisiones para la agricultura e _{ec} | Emisiones para el transporte | Emisiones por producción de bioetanol e _p | Crédito de emisiones de potencia e _{ee} | CO ₂ capturado e _{ccr} | Total [gCO _{2eq} /MJ] | Ahorro [%] |
|----------------|--------------------------------------|---|------------------------------|--|--|--|--------------------------------|------------|
| Bioetanol | Sorgo dulce (con riego) en Andalucía | 14,3 | 2,3 | 0,4 | - | - | 17,2 | 79 |

9. MODELO 2 EN LA EU: SORGO DULCE Y REMOLACHA AZUCARERA COMO MATERIAS PRIMAS DE LA PLANTA

Este modelo está dirigido a desarrollar en la EU una cadena basada en sorgo dulce y otro cultivo para producción de bioetanol como materia prima para las mismas plantas descentralizadas de pequeña y mediana escala.

Este modelo ha sido estudiado como alternativa al primero, porque el modelo 1 es penalizado por la dependencia de una sola materia prima. Además, el modelo 2 tiene la ventaja de permitir procesar principalmente materia prima fresca y, en consecuencia, minimizar la concentración de azúcarado. De hecho, el reducido número de días del período de cosecha obliga a realizar una alta concentración del jugo azucarado para mantener el proceso de producción de la planta de bioetanol (fermentación, destilación y deshidratación) durante casi todo el año (11 meses al año). Por el contrario utilizando también otra biomasa fresca, el nivel de concentración requerida puede reducirse significativamente.

La desventaja del modelo 2 se debe a la necesidad de que en un área dos cultivos de bioetanol deben ser cultivados en diferentes períodos del año. Esta condición puede ser o no satisfecha en las diferentes regiones.

9.1 Caso de Estudio: desarrollo del modelo 2 de la EU en Andalucía en España

Para explicar este modelo para la EU, las pautas descritas en el capítulo 7 se aplican a una planta como ejemplo con capacidad para bioetanol anhídrico de 10.000 t/año.

En concreto, el caso de estudio se contextualizó en Jédua (España, Andalucía), y la remolacha azucarera se consideró como complementaria al sorgo dulce.

La remolacha azucarera en Andalucía tiene un período de cosecha desde Junio hasta Julio y el almacenamiento de la remolacha azucarera se puede realizar durante un mes sin perder más de un 3-4% de azúcares. Por lo tanto, la planta de producción de bioetanol puede trabajar con materia prima fresca desde Junio hasta Noviembre, combinando remolacha azucarera durante Junio, Julio y Agosto, y sorgo dulce a principios de Septiembre, y sorgo dulce estándar en Octubre y Noviembre.

Desde Diciembre a Abril (5 meses) la planta de bioetanol trabaja con el jugo azucarado concentrado. En el mes de Mayo se lleva a cabo el mantenimiento de la planta y de los equipos.

Fase Agronómica

Las mismas condiciones indicadas en Jédua en la Tabla 30 se tomaron en cuenta.

La producción de remolacha azucarera puede variar entre 80.000-120.000 kg/ha con riego. Teniendo en cuenta el porcentaje de azúcar por kilogramo de remolacha azucarera, la variación puede ser de entre 13% y el 16% de las muestras frescas. Por lo general, la cantidad de azúcar se puede fijar en un 14%.

Esta cantidad de azúcar por kilogramo y la productividad de la remolacha azucarera por hectárea indica una variación de entre 6.600-10.000 litros por hectárea de bioetanol.

Los cálculos del modelo se han realizado teniendo en cuenta una planta de bioetanol con una capacidad de 12.500 m³/año (es decir, 10.000 t/año). Por lo tanto, si la remolacha azucarera es la materia prima durante tres meses al año, la cantidad de bioetanol a partir de la remolacha azucarera debe ser aproximadamente 3.500 m³/año. Esta producción requiere desde 350 a 525 hectáreas de remolacha azucarera, en función de su productividad.

Logística

El sistema de logística de este modelo es similar para ambas materias primas en relación con el transporte desde los campos hasta la planta de producción.

Una diferencia importante entre los dos cultivos es el tiempo necesario desde la cosecha hasta el proceso.

Además de la densidad de los cultivos, el tipo de maquinaria para realizar la cosecha, la principal diferencia es que el almacenamiento del sorgo dulce no es posible debido a la pérdida de azúcar y al inicio de la fermentación después de 7-8 horas, pero, por otro lado, en el caso de la remolacha azucarera, el almacenamiento se puede hacer en el campo o en la planta de producción durante un mes. Aparte de esto, el mantenimiento de la remolacha azucarera en los campos sin cosechar es posible sin perder los azúcares.

Por lo tanto, la remolacha azucarera puede ser utilizada como materia prima para aumentar el tiempo entre la cosecha y el proceso. Esto permite hacer una mejor estructuración del transporte desde los campos hasta la planta de producción y reducir el coste del transporte utilizando grandes camiones y remolques.

Procesamiento

El proceso de producción debe adaptarse a la utilización de la remolacha azucarera y el sorgo dulce como materia prima. Esto no es un problema importante, debido al hecho de que los tipos de azúcar almacenada en la remolacha azucarera y en los tallos del sorgo dulce son sacarosa, glucosa y fructosa. Por lo tanto, la fermentación, destilación y deshidratación son similares.

La principal diferencia entre el uso de remolacha azucarera o sorgo dulce está en el primer paso del proceso, durante la limpieza de la materia prima, corte y extracción del azúcar.

En este modelo la incorporación de una línea de limpieza es necesaria para eliminar los lodos y piedras de la remolacha azucarera antes de la etapa de corte. En el caso del sorgo dulce, no hay un proceso de limpieza, y después de la recepción de los tallos, éstos son triturados antes de la extracción.

El proceso de extracción debe hacerse con un difusor continuo para garantizar el mejor rendimiento en el proceso de extracción y el uso de los mismos equipos para la extracción del sorgo dulce y la remolacha azucarera. Por el contrario el molino no se puede utilizar en la extracción de los azúcares de la remolacha azucarera.

Después de la extracción, los otros pasos del proceso son similares, independientemente del tipo de materia prima.

Análisis Económico

El análisis económico puede ser similar al indicado en la evaluación del modelo 1 del caso de estudio en España.

Ahorro en las emisiones de GHGs

El cálculo del ahorro de emisiones de GHGs se ha realizado teniendo en cuenta dos alternativas. La primera es considerar el uso de gas natural como combustible para obtener la energía requerida por la planta de producción. La segunda opción es el uso de biomasa como combustible en la caldera. Esta biomasa podría ser el bagazo obtenido en la etapa de extracción del azúcar del sorgo dulce. Esto significa que la biomasa debe ser almacenada durante todo el año para ser utilizada independientemente de la materia prima, sorgo dulce o remolacha azucarera, que no tiene biomasa en el cultivo.

| Production of Ethanol from Sugarbeet (steam from NG boiler) | | | | | | | | |
|--|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------|----------------|------------------------------|---|--------------------|
| Overview Results | | | | | | | | |
| All results in g CO ₂ ,eq / MJ _{Ethanol} | Non-allocated results | Allocation factor | Allocated results | Total | Actual/Default | Default values RED Annex V.D | Allocation factors | Emission reduction |
| Cultivation e_{cc} | | | | 7,2 | A | 12 | 71,3% ethanol to Sugar 28,7% beet pulp | |
| Cultivation of sugarbeet | 10,07 | 71,3% | 7,18 | | | 11,54 | | |
| Processing e_p | | | | 26,3 | A | 26 | | |
| Ethanol plant | 36,82 | 71,3% | 26,26 | | | 26,42 | | |
| Transport e_{td} | | | | 2,9 | A | 2 | | |
| Transport of sugarbeet | 1,85 | 71,3% | 1,32 | | | 0,84 | | |
| Transport of ethanol | 1,10 | 100% | 1,10 | | | 1,10 | | |
| Filling station | 0,44 | 100% | 0,44 | | | 0,44 | | |
| Land use change e_l | 0,0 | 71,3% | 0,0 | 0,0 | | 0 | | |
| e_{ca} + e_{cc} + e_{cs} | 0,0 | 100% | 0,0 | 0,0 | | 0 | | |
| Totals | 50,3 | | | 36,3 | | 40 | | |

Figura 28: Emisiones de GHGs de bioetanol obtenido a partir de remolacha azucarera que utiliza gas natural como combustible (fuente: www.biograce.eu)

Si el proceso de producción utiliza gas natural como combustible en la planta de producción, la reducción de emisiones es del 57% por el uso de la remolacha azucarera como materia prima para la producción de bioetanol. Entonces, teniendo en cuenta la cantidad de hectáreas de remolacha azucarera, el cálculo final para todo el proceso se aplica un 57% de la reducción de un 27,3% de la producción total y un 79% de reducción para el 72,7% producido a partir de sorgo dulce.

El promedio del proceso de producción global, teniendo en cuenta esta alternativa, es del 73% de la reducción de las emisiones de GHGs a partir de remolacha y sorgo dulce combinados. Este cálculo se ha realizado utilizando gas natural como combustible en la planta de producción durante la producción de bioetanol a partir de remolacha azucarera y bagazo durante la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce.

La segunda opción para la producción de bioetanol a partir de remolacha azucarera y sorgo dulce es el uso de biomasa para todo el año y para toda la producción de bioetanol sin tener en cuenta el tipo de materia prima.

| Production of Ethanol from Sugarbeet (steam from biomass boiler) | | | | | | | | |
|--|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------|----------------|------------------------------|---|--------------------|
| Overview Results | | | | | | | | |
| All results in g CO ₂ ,eq / MJ _{Ethanol} | Non-allocated results | Allocation factor | Allocated results | Total | Actual/Default | Default values RED Annex V.D | Allocation factors | Emission reduction |
| Cultivation e_{cc} | | | | 7,2 | A | 12 | 71,3% ethanol to Sugar 28,7% beet pulp | |
| Cultivation of sugarbeet | 10,07 | 71,3% | 7,18 | | | 11,54 | | |
| Processing e_p | | | | 4,5 | A | 26 | | |
| Ethanol plant | 6,32 | 71,3% | 4,51 | | | 26,42 | | |
| Transport e_{td} | | | | 2,9 | A | 2 | | |
| Transport of sugarbeet | 1,85 | 71,3% | 1,32 | | | 0,84 | | |
| Transport of ethanol | 1,10 | 100% | 1,10 | | | 1,10 | | |
| Filling station | 0,44 | 100% | 0,44 | | | 0,44 | | |
| Land use change e_l | 0,0 | 71,3% | 0,0 | 0,0 | | 0 | | |
| e_{ca} + e_{cc} + e_{cs} | 0,0 | 100% | 0,0 | 0,0 | | 0 | | |
| Totals | 19,8 | | | 14,5 | | 40 | | |

Figura 29: Emisiones de GHGs de bioetanol obtenido a partir de remolacha azucarera que utiliza biomasa como combustible (fuente: www.biograce.eu)

Si el combustible utilizado en el bioetanol a partir de la remolacha azucarera es biomasa (es decir, el bagazo del sorgo dulce del anterior período de producción), las emisiones de GHG en el proceso de producción de bioetanol a partir de remolacha azucarera como materia prima son menores. El ahorro de emisiones con remolacha azucarera como materia prima es del 83%.

Por lo tanto, si la cantidad de bioetanol producido a partir de la remolacha azucarera es un 27,3% de la producción total, y la reducción de las emisiones con sorgo dulce es del 79% para el 72,7% de la capacidad total de la planta, el promedio de la reducción de emisiones para el proceso global es del 80%.

11. FUENTES Y BIBLIOGRAFÍA

- ¹ Almodares A., and Hadi M.R. (2009) "Production of bioethanol from sweet sorghum: A review". African Journal of Agricultural Research Vol. 4 (9) September, 2009: 772 - 780
- ² Curt M.D., Fernández J., Martínez M. (1995) "Productivity and water use efficiency of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cv Keller in relation to water regime". Biomass and Bioenergy 8(6):401-409
- ³ Curt M.D., Fernandez J., Martinez M. (1998) "Productivity and radiation use efficiency of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cv. Keller in central Spain". Biomass and Bioenergy 14(2): 168-178
- ⁴ Fernández J., Curt M.D., Martínez M., Olalla L., González J. (1996) "Perspectivas del cultivo de sorgo azucarero para bioetanol en España en base a resultados varietales en ensayos multilocales". ITEA 17(extra): 73-81
- ⁵ Fernández J. and Curt M.D. (2005) "New energy crops for bioethanol production in the Mediterranean region". International Sugar Journal, 107(1283): 622-628
- ⁶ Köppen S., Reinhardt G., Gärtner S. (2009) "Assessment of energy and greenhouse gas inventories of sweet sorghum for first and second generation bioethanol". FAO 2009
- ⁷ Guiying L., Weibin G., Hicks A., Chapman K.R. (2010) "A training manual for sweet sorghum". Chapter 4. Genetics and Breeding. Food and Agriculture Organisation of United Nations
- ⁸ Dillon S.L., Shapter F.M., Henry R.J., Cordeiro G., Izquierdo L., Slade L. (2007) "Domestication to crop improvement: genetic resources for Sorghum and Saccharum (Andropogoneae)". Annals of Botany 100: 975-989
- ⁹ Guiying L., Weibin G., Hicks A., Chapman K.R. (2010) "A training manual for sweet sorghum". Chapter 4. Genetics and Breeding. Food and Agriculture Organisation of United Nations
- ¹⁰ Petrini C., Belletti A., Salamini F. (1993) "Breeding and growing sweet sorghum for fuel". Chapter 1. Morphology and Reproduction. Elsevier Science Publishers BN
- ¹¹ Price H.J., Dillon S.L., Hodnett G., Rooney W.L., Ross L., Johnston S. (2005) "Genome evolution in the genus Sorghum (Poaceae)". Annals of Botany 95: 219-227
- ¹² Sánchez-Monje E. (2001) "Sorghum bicolor (L.) Moench". Sánchez-Monje E.: Plantas de interés agrícola. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación: 1132-1134
- ¹³ Smith, C.W., Frederiksen, R.A. (Eds.) (2000) "Sorghum. Origin, history, technology and production". Wiley Series in Crop Science. ISBN 0471242373: 840
- ¹⁴ Belletti A., Petrini C., Minguzzi A., Landini V., Piazza C., Salamini F. (1991) "Yield potential and adaptability to Italian conditios of sweet sorghum as biomass crop for energy production". Maydica 36: 283-291
- ¹⁵ Berenji J. and Dahlberg J. (2004) "Perspectives of sorghum in Europe". J. Agronomy & Crop Science 190: 332-338
- ¹⁶ Curt M.D., Fernández J., Martínez M. (1995) "Productivity and radiation use efficiency of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cv. Keller in relation to water regime". Biomass and Bioenergy 14(2): 168-178
- ¹⁷ Petrini C., Belletti A., Salamini F. (1993) "Breeding and growing sweet sorghum for fuel". Chapter 1. Morphology and Reproduction. Elsevier Science Publishers BN

- ¹⁸ Price H.J., Dillon S.L., Hodnett G., Rooney W.L., Ross L., Johnston S. (2005) "Genome evolution in the genus *Sorghum* (Poaceae)". *Annals of Botany* 95: 219-227
- ¹⁹ Sánchez-Monje E. (2001) "Sorghum bicolor (L.) Moench". Sánchez-Monje E., Plantas de interés agrícola. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación: 1132-1134
- ²⁰ Smith, C.W. and Frederiksen, R.A. (Eds.) (2000) "Sorghum. Origin, history, technology and production". Wiley Series in Crop Science. ISBN 0471242373: 840
- ²¹ Guiying L., Weibin G., Hicks A., Chapman K.R. (2010) "A training manual for sweet sorghum". Chapter 4. Genetics and Breeding. Food and Agriculture Organisation of United Nations
- ²² Janssen R., Rutz D., Branconnier S., Reddy B., Rao S., Schaffert R., Parella R., Zaccarias A., Rettenmaier N., Reinhardt G., Monti A., Amaducci S., Marocco A., Snijman W., Terblanche H., Zavala-Garcia F. (2010) "Sweet sorghum - An alternative energy crop". Proceedings of the 18th European Biomass Conference and Exposition, Lyon, France: 200-206
- ²³ Petrini C., Belletti A., Salamini F. (1993) "Breeding and growing sweet sorghum for fuel". Chapter 1. Morphology and Reproduction. Elsevier Science Publishers BN
- ²⁴ Price H.J., Dillon S.L., Hodnett G., Rooney W.L., Ross L., Johnston S. (2005) "Genome evolution in the genus *Sorghum* (Poaceae)". *Annals of Botany* 95: 219-227
- A.A.V.V. (1943) "L'Alcole". Prospettive Autarchiche – Quaderni, Anno IV, n°11
- ²⁵ Losavio, N., Ventrella, D., Vonella, A.V. (1999) "Water requirements - water and radiation use efficiency. Parameters in order to evaluate the introduction of new crops in the Mediterranean environment [*Hibiscus cannabinus* L. - *Sorghum bicolor* (L.) Moench. - *Helianthus tuberosum* L. - *Basilicata*]". (Istituto Sperimentale Agronomico, Bari, Italy)
- ²⁶ Patanè C., Copani V., Cosentino S. (1997) "Yield potential evaluation of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) genotypes in the Mediterranean environment". Proceedings of the 1st International Sweet Sorghum Conference, Beijing, China, 14-19 September 1997: 444-455
- ²⁷ Dolciotti I., Mambelli S., Grandi S., Venturi G. (1998) "Comparison of two Sorghum genotypes for sugar and fibre production". *Industrial Crops and Products*, 7, 2-3: 265-272
- ²⁸ Bortolazzo E., Ligabue M., Davolio R., Ruozzi F. (2010) "Il sorgo: una pianta di sicuro interesse". I supplementi di Agricoltura, n° 41: 17-20.
- ²⁹ Reggiani R., Amaducci S. (2010) "Le prove agronomiche di raccolta e di stoccaggio del sorgo da biomassa". Proceedings of the Final Conference of "Progetto Bioetanolo di seconda generazione I risultati di un biennio di sperimentazione", Parma, Italy, 28th September 2010
- ³⁰ Amaducci S., Monti A., Venturi G. (2004) "Non structural carbohydrates and fibre components in sweet and fibre sorghum as affected by low and normal input techniques". *Industrial Crops and Products*, 20, 1: 111-118
- ³¹ Assirelli A. (2010) "Processo di disidratazione del sorgo in campo". Proceedings of the Technical Seminars EIMA Energy, Bologna, Italy, 11th November 2010
- ³² Branconnier S., Trouche G., Gutjhard S., Luquet D., Reddy B., Rao S., Schaert R., Parella R., Zacharias A., Rettenmaier N., Reinhardt G., Monti A., Zegada-Lizarazu W., Amaducci S., Marocco A., Snijman W., Terblanche H.,

Zavala-Garcia F., Janssen R., Rutz D. (2011) "Definition of new sorghum ideotypes to meet the increasing demand of bioenergy". Proceedings of the 19th European Biomass Conference and Exposition, Berlin, Germany, 6-10 June 2011

³³ Di Candilo M., Ceotto E., Del Gatto A., Mangoni L., Pieri S., Dirozzi M. (2010) "Valutazione delle caratteristiche produttive ed energetico-qualitative di varietà di sorgo da fibra e da zucchero in ambienti del centro-nord Italia". Dal Seme n°3: 47-56.

³⁴ Pin M., Picco D., Migliardi D., Tomasinsig E. (2009) "Il sorgo zuccherino come coltura per la produzione decentralizzata di bioetanolo". Dal Seme, Anno IV, giugno 2009: 54-59

³⁵ Picco D., Pin M., Vecchiet A., Balducchi R., Di Natale G., Piscioneri L., Fornasier F., Mondini C., Tomat E. (2011) "Sweet sorghum: integrated bioethanol and biogas production from a high water-use efficient energy crop". Proceedings of the 19th European Biomass Conference and Exhibition, Berlin, Germany, 6-10 June 2011, ISBN 978-88-89407-55-7: 1905-1912.

³⁶ <http://web.etaflorence.it/51.0.html?&L=1>

Dalianis C., Alexopoulou E., Dercas N., Sooter C. (1996) "Effect of plant density on growth, productivity and sugar yields of sweet sorghum in Greece". Biomass for Energy and Environment, Proceedings on the 9th European Bioenergy Conference, Vol. 1, Copenhagen, Denmark, June 1996

³⁷ Dalianis C., Sooter C.A., Christou M. (1994) "Sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) biomass productivity, sugar yields and ethanol potential in Greece". Proceedings of the 8th European Biomass Conference "Biomass for Energy Environment Agriculture and Industry", Vienna, Austria, October 1994

³⁸ Dalianis C. (1996) "Adaption, productivity and agronomic aspects of sweet sorghum under EU conditions". Proceedings of the 1st European Seminar on Sorghum for Energy and Industry, Toulouse, France, April 1996: 15-25

³⁹ Dercas N., Panoutsou C., Dalianis C., Sooter C. (1995) "Sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) response to four irrigation and two nitrogen fertilization rates". Centre for Renewable Energy Sources, Pikermi, Greece

⁴⁰ Dercas N., Panoutsou C., Dalianis K. (1995) "Radiation use efficiency, water and nitrogen effects on sweet sorghum productivity". Chartier et al. editors, Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industrial. Proceedings 8th EU Biomass Conference, Oxford, UK

⁴¹ Kavadakis G., Dercas N., Nikolaou A. (2000) "Evaluation of productivity, water and radiation use efficiency of two sweet sorghum varieties under Greek conditions". Proceedings of the 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, June 2000

⁴² Dercas N., Panoutsou C., Dalianis C. (1996) "Water and nitrogen effects on sweet sorghum growth and productivity". Biomass for Energy and Environment, Proceedings on the 9th European Bioenergy Conference, Vol. 1, Copenhagen, Denmark, June 1996

⁴³ Curt M.D., Sanz M., Esteban B., Sánchez G., Barreiro M., Fernández J. (2011) "Assessment of commercial varieties of sorghum as short cycle crops for biomass and sugars production". In: Faulstich M., Ossenbrink H., Dallemand J.F., Baxter D., Grassi A. and Helm P (Ed.), Proceedings of the 19th European Biomass Conference and Exposition. Berlin (Germany) 6-11 July 2011, ISBN 978-88-89407-55-7: 157-163

⁴⁴ Curt M.D., Fernández J., Olalla L., González A. (1996) "Summary of 5 years varietal experimentation on sweet sorghum in Spain". Proceedings of the 1st European Seminar on Sorghum for Energy and Industry, Toulouse, France, 1-3 April 1996

⁴⁵ Olalla L., Muriel J.L., Ruiz J.C., Navarro E., Mira A. (1983) "Sorgo dulce: aportación al estudio de su cultivo para producción de azúcares y/o alcohol en Andalucía (España)". Anales INIA, Ser. Agr. 23

⁴⁶ Braconnier S., Trouche G., Gutjhard S., Luquet D., Reddy B., Rao S., Schaert R., Parella R., Zacharias A., Rettenmaier N., Reinhardt G., Monti A., Zegada-Lizarazu W., Amaducci S., Marocco A., Snijman W., Terblanche H., Zavala-Garcia F., Janssen R., Rutz D. (2011) "Definition of new sorghum ideotypes to meet the increasing demand of bioenergy". Proceedings of 19th European Biomass Conference and Exposition, Berlin, Germany, 6-10 June 2011

⁴⁷ Picco D., Pin M., Vecchiet A., Balducchi R., Di Natale G., Piscioneri I., Fornasier F., Mondini C., Tomat E. (2011) "Sweet sorghum: integrated bioethanol and biogas production from a high water use efficiency energy crop". Proceedings of the 19th European Biomass Conference and Exposition, Berlin, Germany, 6-10 June 2011, ISBN 978-88-89407-55-7: 1905-1912

⁴⁸ Pin M., Picco D., Vecchiet A., Macchia E. (2011) "Sweet sorghum to produce in Italy sustainable ethanol, electricity and heat in decentralised small-medium biorefinery". Proceedings of the 19th International Symposium of Alcohol Fuels, Verona, Italy, 10-14 October 2011 (in printing)

⁴⁹ Pin M., Picco D., Migliardi D., Tomasinsig E. (2010) "Bioetanolo da sorgo, un'opportunità di reddito", Supplemento a L'Informatore Agrario, 6/2010: 26-31

⁵⁰ Gnansounou E., Dauriat A., Wyman C.E. (2005) "Refining sweet sorghum to ethanol and sugar: economic trade-offs in the context of North China". Bioresource Technology 96: 985-1002

⁵¹ Picco D., Pin M., Vecchiet A., Balducchi R., Di Natale G., Piscioneri I., Fornasier F., Mondini C., Tomat E. (2011) "Sweet sorghum: integrated bioethanol and biogas production from a high water-use efficient energy crop".

⁵² Proceedings of the 19th European Biomass Conference and Exhibition, Berlin, Germany, 6-10 June 2011, ISBN 978-88-89407-55-7: 1905-1912

⁵³ A.A.V.V. (2006) "Energia dalle biomasse. Le tecnologie, i vantaggi per i processi produttivi, i valori economici e ambientali", Progetto Novimpresa

⁵⁴ Picco D., Pin M., Vecchiet A., Balducchi R., Di Natale G., Piscioneri I., Fornasier F., Mondini C., Tomat E. (2011) "Sweet sorghum: integrated bioethanol and biogas production from a high water-use efficient energy crop".

⁵⁵ Proceedings of the 19th European Biomass Conference and Exhibition, Berlin, Germany, 6-10 June 2011, ISBN 978-88-89407-55-7: 1905-1912

⁵⁶ http://cirrus.meteo.noa.gr/forecast/deltio_noa042003.pdf

⁵⁷ Sakellariou-Makradonaki M., Papalexis D., Nakos N., Kalavrouziotis I.K. (2007) "Effects of modern irrigation methods on growth and energy production of sweet sorghum on a dry year in central Greece". Agric. Water Manage, 90: 181-189.

⁵⁸ Zhao Y.I., Dolat A., Steinberger Y., Wang X., Osman A., Xie G.H. (2009) "Biomass yield changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuels". Field Crop Res, 111: 55-64

⁵⁹http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/BUCKET/General/A1602_SAM01_DT_DC_00_2011_01_F_GR.pdf

⁶⁰http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/BUCKET/A0101/PressReleases/A0101_SJO01_DT_QQ_02_2011_01_F_GR.pdf

⁶¹ [http://www.etvavipe.gr/\(6813443974285511\)/Documents/Table_New_Values.pdf](http://www.etvavipe.gr/(6813443974285511)/Documents/Table_New_Values.pdf)

⁶² Greek Payment Agency (O.P.E.K.E.P.E.). A private legal entity operating for the public interest, supervised by the Minister of Rural Development and Food.

⁶³ IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Biocarburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020". Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 544

⁶⁴ IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Biocarburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020". Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 66

⁶⁵ IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Biocarburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020". Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 70

⁶⁶ IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Biocarburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020". Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 82

⁶⁷ IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Biocarburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020." Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 43

⁶⁸ IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Biocarburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020". Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 77

⁶⁹ IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Biocarburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020". Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 76

⁷⁰ IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Biocarburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020". Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 83

⁷¹ IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Biocarburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020". Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 85



Este manual técnico contiene las directrices técnicas para poner en marcha la cadena de producción de energía en la EU (es decir, bioetanol, electricidad y calor) a partir de sorgo dulce.

Las directrices se aplicaron en algunos casos de estudio en Italia, Grecia y España, con el fin de completar la descripción técnica con datos económicos y ambientales para utilizar estas directrices en estudios de viabilidad.

El manual se ha orientado principalmente a los agricultores, asociaciones agrícolas, procesadores de combustibles, PYMEs y empresas agrícolas y de semillas.



Agricultural co-operative
of Halastra