



UNIVERSIDAD DON BOSCO
VICERRECTORÍA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

TRABAJO DE GRADUACIÓN
“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA PRODUCIR BIOETANOL A PARTIR DE LA
CAÑA DE AZÚCAR Y SU USO EN MEZCLA CON GASOLINA PARA VEHÍCULOS
AUTOMOTORES”

PARA OPTAR AL GRADO DE
MAESTRO EN GESTIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES

ASESOR:
DOCTOR EDUARDO BUENAVENTURA BADÍA SERRA

POR
VICTOR ARMANDO CORDERO DIAZ
OSCAR RENE CASTILLO ZAPATA
JUAN CARLOS MARTÍNEZ BENÍTEZ

Antiguo Cuscatlán, La Libertad, El Salvador, Centroamérica

Julio de 2019

Índice

1	Resumen Ejecutivo	9
2	Introducción	11
2.1	Marco Conceptual	12
2.2	Objetivo General	12
2.3	Objetivos Específicos	12
2.4	Alcance.....	12
2.5	Justificación.....	13
3	Marco teórico	14
3.1	Generación, uso de energía y contaminación ambiental	14
3.2	Agroindustria azucarera	14
3.2.1	Jugos de la caña de azúcar	14
3.2.2	Bagazo de la caña de azúcar	14
3.2.3	Melaza.....	15
3.2.4	Etanol	15
3.2.5	Proceso de obtención del etanol.....	16
3.2.6	Vinaza	17
3.3	Agroindustria de la caña de azúcar de El Salvador	18
3.4	Marco legal de la agroindustria azucarera de El Salvador	20
3.5	Importaciones de petróleo y parque vehicular de El Salvador.....	21
3.6	Emisiones de CO ₂ de la industria de la caña	23
4	Ingenios azucareros de El Salvador	26
4.1	Ingenio Central Izalco (CASSA).....	26
4.2	Ingenio Chaparrastique	27
4.3	Ingenio La Cabaña	29
4.4	Ingenio Jiboa	31
4.5	Ingenio El Ángel	33
4.6	Ingenio La Magdalena.....	35

5	Cálculos de producción de alcohol	38
5.1	Escenario 1: Producción de bioetanol a partir de la melaza de exportación	38
5.2	Escenario 2: Producción de bioetanol a partir del azúcar de exportación al mercado mundial	40
5.2.1	Mercado interno	40
5.2.2	Mercado preferencial	40
5.2.3	Mercado mundial	41
5.3	Escenario 3: Producción de bioetanol a partir de jugos secundarios	43
5.4	Análisis comparativo de escenarios de cálculo	48
6	Impacto ambiental de las emisiones de CO ₂ y O ₂ en la producción de etanol combustible a partir de caña de azúcar.....	53
6.1	Supuestos utilizados para los cálculos del balance de CO ₂ y O ₂	53
6.2	Explicación de la rutina de cálculo	54
6.2.1	Etapas de Crecimiento de la caña de azúcar para formación de biomasa	54
6.2.2	Etapas de transporte de la caña de azúcar desde el campo a la fábrica	55
6.2.3	Etapas de Producción de Etanol	56
6.2.4	Etapas de Combustión de bagazo	56
6.2.5	Balance Neto de emisiones para calcular el impacto ambiental	57
7	Implementación del proyecto de generación de bioetanol.....	58
7.1	Logística de distribución de bioetanol	58
7.2	Localización de las plantas de bioetanol	60
8	Análisis económico-financiero sobre la producción de bioetanol a partir de la caña de azúcar y sus sub-productos.....	63
8.1	Supuestos económicos considerados en el análisis	63
8.1.1	Volumen de etanol y combustible para mezcla etanol/gasolina (20/80)	63
8.1.2	Costo de combustibles para realizar mezcla etanol/gasolina (20/80)	64
8.1.3	Costos para etanol combustible	64
8.1.4	Inversión y depreciación	65
8.1.5	Gastos administrativos	65
8.1.6	Gastos servicios básicos: energía eléctrica, agua y comunicaciones	65

8.1.7	Gastos de mantenimiento	65
8.1.8	Gastos financieros	66
8.2	Crecimiento anual de cultivo de caña	66
8.3	Precios de venta óptimo de la mezcla etanol/gasolina (20/80)	66
8.4	Resultados del Análisis económico-financiero	66
9	Conclusiones	67
10	Bibliografía	69
11	Anexo 1. Análisis Económico-Financiero	72

Índice de Tablas

Tabla 1:	Capacidad instalada de generación eléctrica en ingenios de El Salvador	19
Tabla 2:	Producción de ingenios azucareros de El Salvador	19
Tabla 3:	Evolución de las exportaciones de bioetanol a la Unión Europea (2000-2010).....	20
Tabla 4:	Evolución del precio de gasolinas en El Salvador	22
Tabla 5:	Tributos vigentes a los combustibles de acuerdo a leyes salvadoreñas.....	23
Tabla 6:	CASSA: Producción de zafras 2013 a 2018.....	26
Tabla 7:	Ingenio Chaparrastique: Producción de zafras 2013 a 2018	28
Tabla 8:	Ingenio La Cabaña: Producción de zafras 2013 a 2018	31
Tabla 9:	Ingenio Jiboa: Producción de zafras 2013 a 2018.....	32
Tabla 10:	Ingenio El Angel: Producción de Zafras 2013 a 2018.....	34
Tabla 11:	Ingenio La Magdalena: Producción de Zafras 2013 a 2018.....	36
Tabla 12:	Producción de melaza 2013 – 2018 de ingenios de El Salvador (Toneladas Métricas)	39
Tabla 13:	Melaza disponible para generar bioetanol (Toneladas Métricas).....	39
Tabla 14:	Cálculo del potencial de bioetanol expresado en m ³ a partir de melaza.....	39
Tabla 15:	Producción total de azúcar de ingenios salvadoreños (TM) de zafras 2013 - 2018	41
Tabla 16:	Azúcar del mercado de exportación expresada en TM con potencial para generar bioetanol.....	42
Tabla 17:	Hectáreas de caña de azúcar relacionadas a la producción de azúcar de exportación con potencial para generar bioetanol	42

Tabla 18: Cálculo de potencial de bioetanol (m ³) a partir de sustitución de cuota de azúcar de exportación.....	43
Tabla 19: Comparación de propiedades de jugo primario y jugo mixto o diluido tomando como base 100 TM de caña	44
Tabla 20: Masa de jugo diluido utilizada para la producción de azúcar en El Salvador	44
Tabla 21: Caña molida por ingenios azucareros de El Salvador durante los últimos 5 períodos de Zafra.....	45
Tabla 22: Masa de agua de imbibición usada en proceso de molienda de caña de ingenios azucareros de El Salvador.....	45
Tabla 23: Masa de jugo primario disponible para la producción de azúcar al restar los jugos secundarios.....	46
Tabla 24: Azúcar producida por ingenios azucareros de El Salvador exclusivamente a partir de jugo primario.....	46
Tabla 25: Cálculo del potencial de bioetanol expresado en m ³ a partir de jugos secundarios	47
Tabla 26: Comparativo de escenarios de cálculo de producción de bioetanol a partir de caña de azúcar	48
Tabla 27: Azúcar requerida de cuota de exportación a mercado mundial para producción de bioetanol.....	50
Tabla 28: Hectáreas de caña de azúcar relativas a la sustitución de azúcar de exportación con potencial para generar bioetanol	50
Tabla 29: Cálculo del potencial de bioetanol expresado en m ³ a partir de sustitución del 15.3% cuota de azúcar de exportación hacia mercado mundial.....	51
Tabla 30: Masa de jugo diluido expresada en TM, utilizada para la producción de azúcar en El Salvador	51
Tabla 31: Volumen de jugo diluido o mixto expresado en m ³ , utilizado para la producción de azúcar en El Salvador.....	52
Tabla 32: Cálculo del potencial de bioetanol (m ³), obtenido de melaza y de la sustitución del 15.3% de cuota de azúcar de exportación hacia mercado mundial.....	52
Tabla 33: Cálculo de cantidades de CO ₂ retiradas y cantidades aportadas de O ₂ para la formación de biomasa a partir de 13,652.46 Ton de caña/día.....	55
Tabla 34: Balance neto de aportaciones de CO ₂ y O ₂ (valores negativos de aportaciones representan sustracciones).	57
Tabla 35: Vehículos (placas P, M y A), producción de melaza, jugos mixtos y etanol por zona geográfica.....	59

Tabla 36: Consumo de gasolinas regular y superior en El Salvador 2011-2017 (m ³).....	63
Tabla 37: Precios promedio de venta de gasolinas en El Salvador (US\$), sin impuestos (2011-2018)	64
Tabla 38: Costos de producción de etanol en Centroamérica.....	64
Tabla 39: Costos de producción por litro de etanol (US\$)	65

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Panorámica Ingenio Central Izalco	26
Ilustración 2: Caña de Azúcar procesada en Ingenio Izalco 2013-2018.....	27
Ilustración 3: Panorámica Ingenio Chaparrastique	28
Ilustración 4: Caña de Azúcar procesada en Ingenio Chaparrastique 2013-2018	29
Ilustración 5: Panorámica Ingenio La Cabaña	30
Ilustración 6: Caña de Azúcar procesada en Ingenio La Cabaña 2013-2018	31
Ilustración 7: Panorámica Ingenio Jiboa	32
Ilustración 8: Caña de Azúcar procesada en Ingenio Jiboa 2013-2018	33
Ilustración 9: Panorámica Ingenio El Ángel.	34
Ilustración 10: Caña de Azúcar procesada en Ingenio El Ángel 2013-2018	35
Ilustración 11: Panorámica Ingenio La Magdalena.....	36
Ilustración 12: Caña de Azúcar procesada en Ingenio La Magdalena 2013-2018.....	37
Ilustración 13: Etapas del proceso de transformación de caña involucradas en el cálculo de beneficio ambiental.	54
Ilustración 14: Ubicación de plantas y logística de distribución de bioetanol en El Salvador (propuesta)	60
Ilustración 15: Esquemático de logística de distribución.....	60
Ilustración 16: Panorámica Planta Central Anexa al Ingenio La Cabaña.	61
Ilustración 17: Panorámica Planta Oriente Anexa al Ingenio Chaparrastique.....	61
Ilustración 18: Panorámica Planta Occidente Anexa al Ingenio Central de Izalco.....	62

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Consumo de combustible en El Salvador: 2011 - 2017.....	22
---	----

1 Resumen Ejecutivo

En El Salvador, en promedio por zafra, 791.43 Km² son cultivados con caña de azúcar, equivalente a 6,433,130.24 TM de caña disponible para ser molida. Se tiene una producción por zafra de 733,734.74 TM de azúcar y 211,661.47 m³ de melaza.

El presente documento busca evaluar la factibilidad de producción de bioetanol a partir de los derivados de la caña de azúcar, esto con la finalidad de mezclarlo con gasolina y ser comercializado para uso en automotores en un porcentaje determinado que no requiera realizar ningún cambio de las características mecánicas de los vehículos.

Se presenta el potencial de producción de bioetanol considerando tres escenarios diferentes, el primero, a partir de la melaza de exportación, el segundo, utilizar los jugos destinados para la producción de azúcar de exportación para producir bioetanol y el tercero, producir bioetanol a partir de los jugos secundarios. De acuerdo a estudios previos para el país, teóricamente la mezcla bioetanol-gasolina contendría un 15% de bioetanol por las características del parque vehicular. La propuesta técnica es desarrollar un proyecto que produzca bioetanol a partir de la caña de azúcar equivalente a un 15% a 20% de la demanda actual de gasolina, en base a esta consideración, la producción de etanol requerida es de 140,742 m³/año.

En nuestro país se tiene experiencia de producción de bioetanol a partir de melaza, planteado en el primer escenario por parte del único ingenio azucarero local que cuenta con destilería, los escenarios 2 y 3, han sido implementados en proyectos a nivel mundial y en el país no se tiene ningún antecedente; por lo que se propone elegir un escenario combinado, implementando completamente el escenario 1, que sustituiría el 10.16% de la demanda de gasolina del país, equivalente a 71,473.47 m³ de bioetanol y el 10.03% restante, para completar 20.19%, se obtendría del escenario 2, sustituyendo un porcentaje de la azúcar de exportación al mercado mundial. Esto también considerando que el marco legal del país no tiene incentivos ni garantías para que los ingenios azucareros activos generen proyectos para diversificarse en la línea de producción de alcohol.

Para implementar el proyecto se propone instalar tres plantas de producción de bioetanol, las cuales debido a costos operativos, infraestructura, manejo de materia prima, mano de obra, y puntos estratégicos de distribución, deben ser plantas anexas a los ingenios Central Izalco en el occidente del país, Chaparrastique en el oriente y La Cabaña en la zona central, éste último ya posee una planta de producción de etanol, la cual se propone sea actualizada y ampliada en su capacidad, con ésta distribución se pretende cubrir todo el territorio nacional partiendo desde el punto en que las tres zonas tendrían cobertura para la distribución con la finalidad reducir los costos de transporte del etanol, el cual será transportado a cada una de las estaciones de servicio, en las que se realizará la mezcla con las gasolinas que cada una comercialice.

Tomando en cuenta los supuestos, se determinó un precio de venta para la mezcla bioetanol/gasolina de \$ 1.94 por galón (sin impuestos), se obtiene una TIR del proyecto de 17.49% y un VAN de \$ \$5,444,570.26 (colocando una tasa de descuento de 12.5%). Asimismo, el período de recuperación de la inversión es de 5.91 años. Este precio de venta es competitivo en el mercado salvadoreño.

Sobre la base de los resultados anteriores se concluye que el proyecto es rentable.

2 Introducción

Los últimos diez años, en El Salvador, el padrón vehicular ha ido creciendo a razón de 5.73% en promedio por año, para inicios del 2019 el padrón se estima en 1.19 millones de vehículos según el vice ministerio de Transporte, los cuales circulan consumiendo los diferentes productos derivados del petróleo que ofrece el mercado nacional, por medio las marcas de las 455 estaciones de servicio que tiene el país.

El incremento del padrón vehicular, marcado por las importaciones de vehículos usados, ha causado una reacción en el consumo de combustibles destilados. Entre el 2011 y 2017 el consumo de combustible DIESEL, en sus distintas presentaciones (Ion DIESEL, DIESEL bajo en azufre y DIESEL), ha incrementado en un 29.92%, y en el caso de las gasolinas, un 21.06% en gasolina regular y un considerable 127.56% en gasolina superior, así lo reflejan las estadísticas del Ministerio de Economía por medio de la Dirección de Hidrocarburos y Minas. Desde el año 2012, El Salvador dejó de importar combustible crudo para refinarlo, y comenzó a importar el 100% de los combustibles refinados.

Para finales del año 2018, las ventas al por menor de combustibles DIESEL y GASOLINA en sus diferentes calidades, se ven representadas con un 40.71% para el DIESEL y un 59.29% para la GASOLINA, lo cual refleja un mayor consumo de gasolina.

El Salvador, un país que depende en un 100% de las importaciones de combustibles y que se ve afectado por las variaciones de precio que los países exportadores de petróleo fijan, tiene la capacidad de amortiguar un poco estos costos, por medio de la implementación de la mezcla de combustibles fósiles con biocombustible, la respuesta está en la caña de azúcar.

La caña de azúcar y sus subproductos representan un 2.7% del PIB de El Salvador, pero uno de los subproductos que aún no ha sido explotado a gran escala y del cual se puede obtener un beneficio económico además de ambiental, es el bioetanol, el cual es un biocombustible que se obtiene de la fermentación de los jugos o mieles que resultan de los procesos de fabricación del azúcar, hay dos tipos de biocombustible, etanol anhidro e hidratado, la diferencia entre ambos radica en la cantidad de agua que poseen cada uno.

El Etanol hidratado, con contenido de agua de 5%, puede ser utilizado puro en motores que han sido diseñados o adaptados para este tipo de combustible, en cambio el Etanol anhidro con contenido de agua de 0.5%, se puede utilizar en un porcentaje de mezcla con gasolina, normalmente en un 5%, 10% y 15%, esto sin realizar cambios al motor del vehículo, en algunos lugares del mundo se llegan a realizar mezclas de mayor porcentaje, pero para esto se deben realizar ajustes al motor para que pueda operar con mezclas mayores a las mencionadas.

Este documento presenta la disponibilidad y capacidad que tiene la agroindustria azucarera del país, para hacer un proyecto sostenible con el cual se garantice el suministro

constante de biocombustible para suplir la demanda, en porcentaje de mezcla, que el padrón vehicular del país exige. Se presenta el análisis y la capacidad de producción de bioetanol de 3 escenarios: a partir de melaza (restando la cuota ganadera); la sustitución de azúcar asignada al mercado mundial o saldo de exportación, para destinar el jugo para la producción de bioetanol; y el uso de jugos secundarios provenientes de la molienda para introducirlos como materia prima en la línea de producción de bioetanol. Adicionalmente se presenta la logística de producción para lograr cobertura de abastecimiento en las tres zonas del país y un breve análisis financiero del escenario con más potencial.

2.1 Marco Conceptual

2.2 Objetivo General

Evaluar desde una perspectiva técnica y económica, la factibilidad de generar en El Salvador bioetanol a partir de caña de azúcar para utilizarlo en mezcla con gasolina como combustible para vehículos automotores.

2.3 Objetivos Específicos

- a) Calcular el potencial de producción de bioetanol, considerando 3 escenarios de materia prima, a partir de: i) la producción de melaza; ii) la cuota de exportación de azúcar reservada para el mercado mundial; y, iii) los jugos secundarios obtenidos en la molienda de caña de azúcar.
- b) Definir el porcentaje de etanol en una mezcla con gasolina que podría utilizarse, considerando las condiciones y características actuales del parque vehicular y la caña procesada en ingenios azucareros de El Salvador.
- c) Proponer la logística de distribución del bioetanol producido y los puntos sugeridos para mezclarlo con la gasolina.
- d) Determinar la factibilidad económica de incorporar el bioetanol como combustible, en el parque vehicular salvadoreño.

2.4 Alcance

El alcance de la investigación se limita a determinar el potencial de producción de bioetanol a partir del procesamiento de caña de azúcar en los ingenios salvadoreños y a sus subproductos generados, considerando las condiciones actuales. El modelo y cálculos no consideran un incremento en el área sembrada del cultivo de caña.

Los tipos de motores a ser considerados para utilizar la mezcla de gasolina con bioetanol son exclusivamente de combustión interna, es decir, que se aplican las condiciones reales del parque vehicular del país.

2.5 Justificación

La matriz energética de El Salvador está dominada por los combustibles fósiles. A pesar de que en los últimos 10 años, se han incorporado otros tipos de fuentes de energía, esto no ha sido lo suficiente para revertir o disminuir el uso de combustibles fósiles como fuentes de energía. Esta dependencia, impacta directamente en la balanza comercial y expone a El Salvador a los riesgos de un mercado en el que existe un monopolio por parte de los países productores de petróleo, quienes establecen el precio de acuerdo a sus intereses.

Para el caso de El Salvador al no ser un productor de petróleo todos los combustibles fósiles son importados, generando un gasto significativo para el país; sin embargo, Centroamérica por sus características climatológicas y geográficas es una región productora de biomasa, lo que indica que El Salvador es productor de este tipo de recurso en el que se incluye la caña de azúcar como uno de los cultivos más importantes del país.

En la actualidad existen proyectos de generación de energía renovable que han tenido éxito en el país usando el potencial y tecnología hidroeléctrica, solar fotovoltaica, solar térmica, calderas de biomasa, biodigestores, entre otros. Esto ha contribuido a ir gradualmente disminuyendo la dependencia en la matriz energética del país para generar energía eléctrica y térmica principalmente. Sin embargo, el uso de gasolina como combustible para vehículos automotores sigue siendo una de las oportunidades de mejora más grande que presenta El Salvador, ya que hay pocos avances en este tema y se mantiene totalmente la dependencia de combustibles fósiles en esta aplicación.

El cultivo y procesamiento de caña de azúcar se ha consolidado en el país durante las últimas décadas como una agroindustria fuerte, ordenada y de mejora continua en el manejo de la caña de azúcar a nivel industrial, que ha ido diversificándose, explotando en la actualidad la biomasa en aplicaciones energéticas. Su potencial máximo aún no se alcanza, por lo que mediante este estudio se busca hacer una propuesta para aprovechar este potencial. Es de reconocer que a pesar de que han existido ciertos avances a nivel industrial, aún existe trabajo a realizar mejorando las prácticas agrícolas que disminuyan impactos al ambiente y a la salud de esta fase.

Asociado a toda generación de energía, se produce una contaminación ambiental, la cual constituye una de las causas de emisión de los gases del efecto invernadero, que provienen, en gran medida, de la amplia variedad de actividades asociadas a su obtención, transformación y utilización. Una de las medidas tomadas a nivel mundial para reducir este impacto ambiental, es la de sustituir las fuentes de energía que contribuyen al efecto invernadero por otras que sean más amigables con el medio ambiente, esto contribuye a mejorar la calidad de aire, al evitar las emisiones de la quema de combustibles fósiles.

3 Marco teórico

3.1 Generación, uso de energía y contaminación ambiental

Todo proceso de generación, transformación y uso de energía provoca contaminación ambiental, constituyéndose en una de las causas principales de generación de gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 , N_2O , NO_x , CO y Clorofluorocarbonos).

El equilibrio del CO_2 , en su ciclo vegetal-animal, ha sido alterado permanentemente por el hombre, acentuándose radicalmente en los últimos 2 siglos. Antes de la revolución industrial, 1789, los niveles de CO_2 en la atmósfera no eran superiores a las 300 partes por millón (ppm); en 1989, este valor era 350 ppm; siete años después, en 1996, ya alcanzaba las 385 ppm. Durante los últimos 30 años se ha tenido un incremento del 10% del dióxido de carbono en la atmósfera como consecuencia, se estima un incremento de la temperatura media del planeta de 2 °C (Serway, 2001).

Actualmente, las emisiones a nivel mundial son estimadas en 7.5 GTon de carbono equivalente por año, de las cuales 34% provienen de la generación de electricidad, 23% del transporte, 25% de la industria y 18% de residencias (Pérez Ones, Rodríguez Ramos, Lombardi, & Corsini, 2004).

3.2 Agroindustria azucarera

La caña de azúcar es una especie de planta perteneciente a la familia de las poáceas, cuyo cultivo es propio de las zonas tropicales o subtropicales del mundo. Requiere agua y suelos adecuados para crecer bien. La composición aproximada de la caña en biomasa es: 12.5% sacarosa, 2.5 % xilosa, 7% celulosa y 2% de lignina (Orama & Penichet, 2003).

3.2.1 Jugos de la caña de azúcar

En los ingenios la caña se procesa para la obtención de azúcar como su principal producto; esta se coloca en los molinos, obteniendo aproximadamente entre un 65% a 76% de jugos del balance másico, los que son destinados para la producción de azúcar y el resto, que es el bagazo, se utiliza como materia para la generación de vapor.

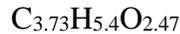
3.2.2 Bagazo de la caña de azúcar

En el proceso de molienda, además del jugo, también se obtiene un residuo sólido llamado bagazo, cuya humedad depende del grado de extracción del jugo (normalmente en valores de humedad cercanos al 50%). Este bagazo se quema en calderas de alta presión para generar vapor, el cual es utilizado para los procesos de calentamiento del ingenio, pero principalmente para la generación de energía eléctrica por medio de turbinas de vapor.

El bagazo, es un residuo fibroso remanente de los tallos de caña. Desde el punto de vista físico, el bagazo integral se compone de aproximadamente 45% de fibra, 2-3% de sólidos

insolubles, 2-3% de sólidos solubles y 50% de humedad; y, desde el punto de vista químico, su fibra se compone de 42.7% de celulosa, 33.1% de hemicelulosas y 24.2% de lignina (Montoya, 2014).

La composición elemental del bagazo de caña de azúcar es: 44.80% de Carbono (C), 5.4% de Hidrógeno (H), 39.55% Oxígeno (O), 0.38% de Nitrógeno (N), 0.01% de Azufre (S), 0.12% de Cloro (Cl) y un 9.79% de cenizas (valores promedio, debido a que su composición depende del tipo de caña). La fórmula empírica, con base en los valores promedio es:



El Poder Calorífico Superior del bagazo de caña es de 19.25 MJ/Kg en términos promedio y el Poder Calorífico Inferior tiene un valor de 17.79 MJ/Kg (Hugot, 1986) . Es importante comentar que este valor depende del contenido de humedad.

3.2.3 Melaza

La meladura (65% sólidos y 35% agua) pasa a un “tacho” (cristalizador evaporativo en el que el grado de sobresaturación se controla y mantiene por medio de la evaporación del disolvente); en tanto que el material disuelto se cristaliza, y evaporándose al vacío aún más, hasta alcanzar el punto de saturación, quedando una mezcla espesa. Esta mezcla espesa de sirope y cristales de azúcar pasa a las centrifugas, donde se separa la melaza de la azúcar cruda mediante el centrifugado. La melaza, va a los tanques de almacenamiento y puede ser utilizada para productos múltiples (alcoholes, licores, sacro-químicos y alimento animal).

3.2.4 Etanol

El etanol es el biocombustible más utilizado a nivel mundial en el sector del transporte. La mayor parte del etanol procede de materias primas como la caña de azúcar, pero también es producido a partir de remolacha o de granos de cereales.

Según el uso, el etanol se puede clasificar como:

- Potable: en la preparación de bebidas;
- Industrial: como desinfectante, solvente, anticongelante (en los radiadores de automóviles), o en la preparación de otros compuestos orgánicos; y,
- Combustible: principalmente para el transporte.

El etanol es un excelente combustible para motores, por las siguientes razones:

- Tiene un índice de octanos para motores, mayor al de la gasolina;
- Tiene una presión de vapor menor que el de la gasolina, lo que resulta en una emisión menor por evaporación;
- Es menos inflamable que la gasolina lo cual reduce el número y la severidad de los incendios de los vehículos; y,

- Tiene un contenido energético menor que la gasolina (2/3), pero un rendimiento similar.

En el caso muy particular de la caña de azúcar, el bioetanol es resultado de un proceso de destilación de la melaza. El etanol o alcohol etílico es un compuesto químico, que se presenta como un líquido incoloro e inflamable con un punto de ebullición de 78 °C, se perfila como un recurso energético potencialmente sostenible que puede ofrecer ventajas medioambientales y económicas a largo plazo en contraposición a los combustibles fósiles.

La fórmula química del etanol es C_2H_6O ; y su Poder Calorífico es 26.95 MJ/Kg, el cual es inferior al de la gasolina que tiene un valor de 43.40 MJ/Kg (Fernández & Gutiérrez, 2015).

3.2.5 Proceso de obtención del etanol

A continuación, se detalla el proceso para obtener el etanol.

3.2.5.1 Adecuación de materia prima

Proceso en el que se mezclan y preparan las materias primas (jugo claro, meladura y miel B), para que la mezcla de alimento resultante cumpla con las especificaciones requeridas en la fermentación (contenido de azúcares, sólidos y temperatura).

3.2.5.2 Fermentación

Proceso bioquímico efectuado por las levaduras, en el que los azúcares presentes en la mezcla de alimento son transformados en etanol y dióxido de carbono, principalmente. Constituye la etapa de mayor cuidado, por ser en la que se genera el producto de interés. En esta etapa se deben manejar condiciones específicas de temperatura, pH, concentración de azúcares y nutrientes, para el desarrollo y buen desempeño de las levaduras. La levadura utilizada para la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar es *Saccharomyces Cerevisiae*.

La fermentación alcohólica es el tipo de fermentación más antigua que se conoce. Es un proceso biológico que se lleva a cabo en ausencia de O_2 , originado por la actividad de algunos microorganismos que procesan los hidratos de carbono (por regla general azúcares de tipo hexosa: como por ejemplo la glucosa, la fructosa, la sacarosa), para obtener como productos finales alcohol en forma de etanol y dióxido de carbono (CO_2) en forma de gas.

3.2.5.3 Destilación

Operación de separación de mezclas líquidas en sus constituyentes primarios, mediante diferencias de puntos de ebullición. Esta técnica aprovecha que cada sustancia evapora a una temperatura diferente de las otras. Se lleva a cabo en columnas donde la diferencia

de temperaturas se logra adicionando calor en el fondo con equipos llamados re-hervidores, mientras que, por la parte superior o cima, las corrientes son retiradas y enfriadas con equipos denominados condensadores.

3.2.5.4 Deshidratación

Etapa del proceso de producción de etanol carburante en la que se busca obtener un producto de elevada concentración de etanol retirando el agua remanente, bien sea mediante técnicas de adsorción por tamices moleculares, o utilizando otras técnicas como la destilación azeotrópica, destilación extractiva o pervaporación.

3.2.5.5 Concentración de vinaza

Es la etapa de tratamiento de la vinaza producida en la columna despojadora; se realiza por medio de evaporadores Flubex, que son equipos en los que se concentra la vinaza desde 8% y 15% hasta 25% y 60% mediante evaporación del agua contenida en la corriente. Utiliza como fluido calefactor vapor de escape.

3.2.6 Vinaza

La vinaza, puede definirse como el efluente resultante de la producción de alcohol a partir de la fermentación y la destilación de una materia prima, en este caso, residuos de caña de azúcar, se caracteriza por ser un líquido de color marrón, con un gran contenido de sólidos suspendidos, olor a miel final y sabor a malta.

Este residuo presenta pH bajo, altos valores de DQO y DBO₅, gran contenido de sólidos en suspensión, entre otros. Por ello, se considera como un residuo líquido que impacta negativamente el ambiente, especialmente, al recurso hídrico, ya que disminuye la luminosidad de las aguas, la actividad fotosintética, y el oxígeno disuelto, producen además eutrofización del agua, contribuye al aumento de poblaciones de insectos y vectores, y como resultado al desarrollo de enfermedades. Por esta razón se han propuesto diversas alternativas de tratamiento, de uso y reutilización de modo que el impacto pueda ser reducido e incluso eliminado.

Por ello, todos los enfoques que se han dado al problema de la vinaza buscan eliminar o atenuar los efectos de la polución sobre los ríos, donde tradicionalmente estos derivados eran descargados, sobre todo antes de que existiera seguimiento a la legislación ambiental.

Existen varias posibilidades de aprovechamiento de las vinazas.

- a) Producción de gas Metano, a través de fermentación anaeróbica.
- b) Producción de proteína unicelular, a través de fermentación aeróbica.
- c) Concentración (alrededor de 60° Brix), con las siguientes posibilidades de uso:
 - Componentes de raciones animales
 - Empleo de la levadura como fertilizante

- Incinerado para producir fertilizante
- d) Utilización agrícola del residuo "in natura", sustituyendo total o parcialmente las fertilizaciones minerales.

3.3 Agroindustria de la caña de azúcar de El Salvador

La agroindustria azucarera constituye uno de los sectores más competitivos y dinámicos de la economía salvadoreña y está regulado por la "Ley de la producción, industrialización y comercialización de la agroindustria azucarera de El Salvador", así como por las demás leyes y reglamentos alusivos a medio ambiente, trabajo, salud y seguridad ocupacional. Actualmente, cuenta con aproximadamente 7,000 productores de caña de azúcar (CONSAA, 2016) localizados en diferentes zonas del país: 40 % caracterizados como productores independientes y 60 % como asociaciones cooperativas (CONSAA, 2016).

Existen 6 ingenios que realizan el proceso de extracción de los azúcares, cada uno tiene asignado una cuota o porcentaje de participación en la producción de azúcar para el mercado local y para la exportación hacia Estados Unidos. Los ingenios venden el excedente de su producción al mercado mundial.

Para la zafra 2017-2018, la cuota asignada para cada ingenio fue: Compañía Azucarera Salvadoreña, S.A. de C.V. (33.44%); Ingenio El Angel, S.A. de C.V. (21.75%); Ingenio Chaparrastique, S.A. de C.V. (13.33%); Ingenio La Cabaña, S.A. de C.V. (15.16%); Ingenio La Magdalena, S.A. de C.V. (5.74%); e, Ingenio Central Azucarero Jiboa, S.A (10.58%) (CONSAA, 2018).

En cuanto a la distribución de los ingresos netos generados por el autoconsumo industrial y las ventas de azúcar y miel final en los diferentes mercados, 54.5% corresponden a los productores de caña y 45.5% a las centrales azucareras o ingenios, -previo descuento del costo de la vitamina A y de la contribución al presupuesto de funcionamiento del Consejo Salvadoreño de la Agroindustria Azucarera (CONSAA, 2016)-.

Existen subproductos resultantes del proceso de extracción de los azúcares que sirven como materia prima para otras líneas de producción, tal como el bagazo, -según la literatura por cada tonelada de caña molida se genera aproximadamente un 30% de bagazo, que se utiliza como combustible en calderas de biomasa, en las que se genera vapor sobrecalentado, que es utilizado para mover turbogeneradores con los que se producen energía eléctrica. Esta energía es considerada como renovable.

De acuerdo a los datos reportados por el Consejo Nacional de Energía (CNE) al cierre del año 2015, los ingenios azucareros tenían una capacidad instalada de 226 MW, equivalente al 13.6% de la matriz energética eléctrica nacional, lo que representó el 6% como recurso de generación, considerando que la operación de ingenios es estacional (CNE / PROESA, 2016). En ese momento, existían 4 ingenios con plantas de cogeneración instaladas, tal como se muestra a continuación:

Ingenios	MW	% participación en sistema de generación de energía de El Salvador
CASSA	107.5	6.5
- Central Izalco	45	
- Chaparrastique	62.5	
Ingenio El Ángel	97.5	5.9
Ingenio La Cabaña	21.0	1.3
Total	226.0	13.7

Tabla 1: Capacidad instalada de generación eléctrica en ingenios de El Salvador (CNE / PROESA, 2016)

5 de los 6 ingenios han realizado inversiones en proyectos de cogeneración, exceptuando el Ingenio La Magdalena, produciendo energía eléctrica para abastecer su autoconsumo y vendiendo los excedentes en el mercado local, a un nivel tal, que algunos de ellos han aumentado su capacidad instalada.

Otro de los subproductos generados en el proceso de fabricación de azúcar es la miel final o melaza, utilizada como materia prima para la elaboración de alcohol carburante o bioetanol -al fermentarse-, para luego pasar por un proceso de destilación. También puede elaborarse bioetanol, utilizando los jugos secundarios. Actualmente, solo 1 de los 6 ingenios posee destilería, la que utiliza exclusivamente melaza como materia prima, y produce alcohol que abastece parte de las necesidades del mercado local.

El cultivo de caña y la producción de azúcar y melaza por parte de los ingenios en El Salvador está muy organizado y regulado, lo que permite una estabilidad y constancia en el área sembrada, así como de sus producciones (zafra). Una muestra de ello, son las producciones conjuntas de los últimos 5 años presentadas a continuación en la tabla, donde se observa que la caña molida promedio por zafra es de 6,433,130 TM, un área sembrada promedio por zafra de 79,143.03 hectáreas, una producción de azúcar promedio por zafra de 733,734 TM y una producción de melaza promedio por zafra de 211,661 m³.

Periodo	Caña molida (TM)	Área sembrada (Ha)	Producción de azúcar (TM)	Producción de melaza (m ³)
Z13-14	6,408,845.08	76,706.54	720,021.33	204,678.03
Z14-15	6,702,368.05	79,735.50	787,696.45	225,347.25
Z15-16	5,980,442.25	81,989.20	649,304.79	207,596.32
Z16-17	6,561,696.07	78,720.52	757,892.38	213,157.31
Z17-18	6,512,299.15	78,563.38	753,758.75	207,528.44
PROMEDIO	6,433,130.24	79,143.03	733,734.74	211,661.47

Tabla 2: Producción de ingenios azucareros de El Salvador (CONSAA, 2018)

La producción de bioetanol a partir de la caña de azúcar tiene un alto potencial técnico y comercial, lo que se comprueba en mercados similares al salvadoreño, tales como son Guatemala, Panamá y Nicaragua, no obstante, los ingenios no han realizado inversiones en el desarrollo de esta línea, con excepción de uno de ellos. Uno de los obstáculos principales que han evitado esta inversión, es la no existencia de un marco legal que asegure la competitividad del negocio.

Los países con mayor trayectoria en el cultivo de caña y producción de Etanol llevan a cabo investigaciones sobre distintos aspectos de la producción de materias primas para la producción de biocombustibles, pero la investigación e innovación para la producción de etanol es limitada a unos pocos países, EEUU, Brasil, México, Colombia, Argentina. Los países centroamericanos, necesitan colaboración técnica de otras naciones que han logrado un mayor desarrollo en este tema.

Si hablamos de las exportaciones de bioetanol por país centroamericano, el mayor mercado es el europeo, las exportaciones centroamericanas de bioetanol dirigidas a la Unión Europea han crecido significativamente en la última década, al pasar de 17,762 millones de litros en el año 2000 a 182,909 millones de litros en 2009. Nicaragua y Panamá han ido perdiendo participación en las exportaciones de bioetanol. Mientras que en el 2000 Nicaragua contribuyó con el 61,0 % del total de las exportaciones centroamericanas de bioetanol a la UE, en el 2009 su participación fue del 26,2 %. En el caso de Panamá, su participación pasó del 5,5 % al 0,1 % en el mismo periodo de tiempo. Por otro lado, Guatemala y Costa Rica aumentaron su proporción en las exportaciones centroamericanas de bioetanol, siendo las exportaciones desde Guatemala las que han mostrado un mayor dinamismo, al pasar del 18,2 % al 49,2 %. En 2009, las exportaciones de El Salvador comenzaron a ganar terreno frente al bioetanol panameño como se presenta en la siguiente tabla:

	2000		2005		2009		2010	
	Volumen	%	Volumen	%	Volumen	%	Volumen	%
Costa Rica	2,718.50	15.30%	11,963.20	17.40%	37,183.40	20.30%	3,186.30	9.90%
El Salvador	-	-	-	-	7,749.90	4.20%	-	-
Guatemala	3,239.70	18.20%	48,007.90	69.80%	89,939.70	49.20%	27,689.80	86.20%
Honduras	-	-	-	-	-	-	-	-
Nicaragua	10,829.20	61.00%	6,875.40	10.00%	47,996.90	26.20%	1,122.60	3.50%
Panamá	974.60	5.50%	1,941.60	2.80%	39.60	0.10%	118.00	0.40%
	17,762.00	100.00%	68,788.10	100.00%	182,909.50	100.00%	32,116.70	100.00%

Tabla 3: Evolución de las exportaciones de bioetanol a la Unión Europea (2000-2010)

3.4 Marco legal de la agroindustria azucarera de El Salvador

En El Salvador, las actividades de la agroindustria azucarera están regidas por la Ley de la Producción, Industrialización y Comercialización de la Agroindustria Azucarera de El Salvador, desde agosto de 2001, por medio del decreto legislativo N° 490. También el marco legal que aplica a este sector comprende la Ley de Medio ambiente y sus reglamentos, así como las demás leyes aplicables al trabajo digno y todo lo relativo a salud y seguridad ocupacional.

El objetivo de la Ley es normar las relaciones entre centrales azucareras o ingenios, y las de éstos con los productores de caña de azúcar; pero el Etanol no está considerado en dicha ley.

Hasta el día de hoy, aún no se tiene una Ley que motive a los inversionistas para desarrollar la industria de producción masiva de Etanol con finalidad de consumo como combustible carburante, por tanto, no existen incentivos y se percibe un riesgo por parte de los ingenios para realizar estas inversiones y aprovechar algunos de los subproductos, ya que no hay garantías para la sostenibilidad de estas nuevas líneas de producción.

3.5 Importaciones de petróleo y parque vehicular de El Salvador

Las repetidas crisis energéticas que se han venido dando desde 1970, han motivado la inquietud de introducir biocombustibles en El Salvador; no obstante, las políticas de regulación y asignación de precios a estos biocombustibles y su logística de distribución han sido barreras importantes para su implementación.

En marzo de 2007, Brasil y Estados Unidos firmaron el Memorándum de Entendimiento de Biocombustibles, el cual incluye aspectos para apoyar programas y proyectos sostenibles de bioenergía en varios países de América Latina y el Caribe. Bajo este contexto y con el objetivo de fortalecer la experiencia de El Salvador en la utilización de biocombustibles, por medio de los objetivos y lineamientos estratégicos de la Política Energética, el CNE, a través de su Dirección de Combustibles identificó el potencial existente en el país para la implementación de un proyecto piloto para la utilización de una mezcla de etanol y gasolina en la flota vehicular.

La iniciativa de utilización de etanol se enmarca dentro de los resultados del estudio denominado: “Diagnóstico de la Capacidad de Infraestructura y Logística para Implementar el Plan Piloto para el Consumo de Etanol Carburante en El Salvador”. Tomando en cuenta las barreras y dificultades encontradas por el mencionado estudio, se propuso la implementación del proyecto piloto bajo el concepto que involucraría la distribución de las mezclas de E5 (5% etanol y 95% gasolina), E10 (10% etanol y 90% gasolina) y E15 (15% etanol y 85% gasolina), a través de un dispensador móvil que abastecería periódicamente a los vehículos participantes en el proyecto. Este dispensador móvil, por su versatilidad en el transporte de combustible, podría apoyar a instituciones gubernamentales en situaciones de emergencia (CNE, 2015).

El consumo de gasolina especial y regular, durante los últimos años han presentado una tendencia al alza, con un promedio de crecimiento de 2.1% anual; este crecimiento, ha sido más pronunciado durante los últimos años, presentando tasas promedio cercana al 8% anual (MINEC).

Las participaciones de mercado de venta al detalle de combustibles “líquidos-gasolinas” en El Salvador, para el 2017, es el siguiente: PUMA-UNO con 39 %; CHEVRON-TEXACO con 36%; ALBA con 10%; Bandera Blanca con 12%; y, DLC con 3%.

De acuerdo a los datos del Ministerio de Economía del país año se tiene un promedio del año 2011 a 2017 de consumo de gasolina regular de 410,152 m³/año y 293,589 m³/año de gasolina especial o superior. Al sumar ambos tipos de combustible se obtiene una

demanda de gasolina de 703,740 m³/año. La gráfica 3, mostrada a continuación presenta el histórico de consumo de combustible (gasolina especial y regular al detalle).

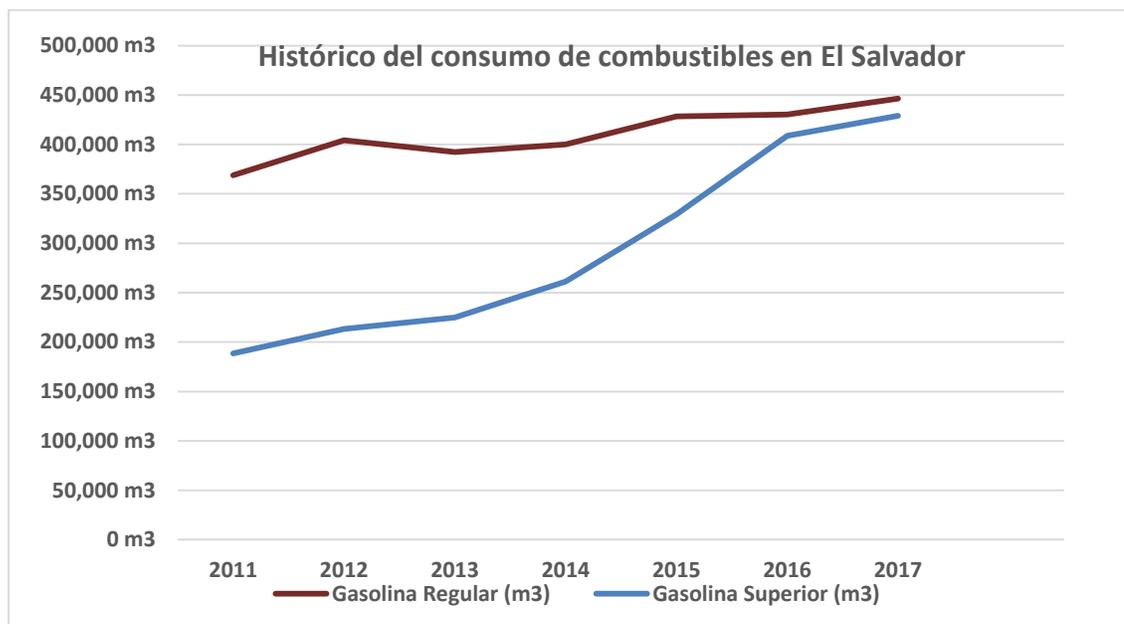


Gráfico 1. Consumo de combustible en El Salvador: 2011 - 2017
Fuente: (MINEC)

El comportamiento de la factura de consumo de gasolina expresada en \$/galón, se presenta en la tabla 3 en la cual observamos variaciones, que dependen siempre del comportamiento de los precios a nivel mundial, cuyas variaciones son especulativas.

Año	Precios de los combustibles (US\$)					
	Gasolina regular			Gasolina especial		
	Central	Occidental	Oriental	Central	Occidental	Oriental
2011	3.02	3.03	3.06	3.19	3.19	3.22
2012	3.19	3.19	3.22	3.42	3.43	3.46
2013	3.08	3.09	3.12	3.33	3.33	3.36
2014	2.93	2.93	2.96	3.19	3.19	3.22
2015	2.02	2.03	2.05	2.24	2.25	2.28
2016	1.79	1.79	1.83	1.94	1.95	1.98
2017	2.06	2.07	2.10	2.23	2.24	2.27
abr-18	2.40	2.41	2.44	2.57	2.58	2.61

Tabla 4. Evolución del precio de gasolinas en El Salvador
Fuente: (MINEC)

A nivel mundial, el petróleo sigue siendo la fuente de energía más importante con un 33.09% de participación, seguido del carbón mineral con el 29.9% y del gas natural con 23.94%; en el ámbito latinoamericano, hay algunas variaciones, por ejemplo, en El Salvador la energía hidroeléctrica tiene una participación del 24.91%, en contraste con el 6.67% a nivel mundial; además, desde el punto de vista del consumo de derivados del

petróleo, América Latina consume el 45.42%. En otras palabras, el patrón de consumo de Latinoamérica es completamente diferente al del resto del mundo, siendo el petróleo, la hidrología y el gas, los protagonistas de la matriz energética y los combustibles licuados la principal fuente de ignición de automotores (BP, 2013).

En nuestro país, el precio al consumidor de los hidrocarburos, está gravado con los siguientes impuestos: a) Contribución para la estabilización de tarifas del servicio público de transporte colectivo de pasajeros (COTRANS): utilizado para la estabilización de las tarifas del transporte colectivo, se aplica desde 2007; b) Impuesto Fondo de estabilización y fomento económico (FEFE): se aplica a las gasolinas y son \$0.16 por galón. Actualmente, es utilizado para subsidiar el gas propano de uso doméstico. Creado en 1981, por la Junta Revolucionaria de Gobierno con el objetivo de subsidiar los costos del conflicto armado. Luego, se continuó aplicando pero, al igual que el COTRANS, fue direccionado al subsidio del gas propano; c) Impuesto fondo de conservación vial (FOVIAL): consistente en \$0.20 por galón, tanto para gasolinas como para el diésel. El Estado lo utiliza para la reparación y mantenimiento de las carreteras. Este impuesto representa una recaudación promedio aproximada de \$6 millones mensuales y se abona directamente a una partida especial del presupuesto de la nación creada para la conservación vial; y, d) Impuesto al valor agregado (IVA): se aplica el 13% a cada galón de combustible, independientemente sea gasolina o diésel (MINEC).

Denominación del tributo	Impuesto	Aplicable a:
Fondo de Conservación Vial (FOVIAL)	\$0.20	Gasolinas y diésel
Contribución para la estabilización de tarifas del servicio público de transporte colectivo de pasajeros (COTRANS)	\$0.10	Gasolinas y diésel
Fondo de estabilización y fomento económico (FEFE)	\$0.158	Gasolinas
Impuesto a la transferencia de bienes muebles y a la prestación de servicios	13%	Gasolinas y diésel

Tabla 5: Tributos vigentes a los combustibles de acuerdo a leyes salvadoreñas
Fuente: (CNE)

De acuerdo al Viceministerio de Transporte, el padrón o parque vehicular salvadoreño está constituido por 1,127,740 unidades, de las cuales 785,637 (69.6%) circulan en los 4 departamentos más significativos económicamente, que son: San Salvador, La Libertad, San Miguel y Santa Ana- (VMT).

3.6 Emisiones de CO₂ de la industria de la caña

La incorporación del bioetanol como mezcla en el combustible provoca un ciclo virtuoso, que evita la acumulación o adición neta del CO₂ en la atmósfera, atenuando el efecto invernadero.

El nivel de fijación total de CO₂ durante la formación de la biomasa cañera, está dado por dos contribuciones: las partes aéreas (tallos, cogollos y hojas) y las raíces; en tanto su magnitud depende de la composición y del aporte a la biomasa total de la planta de cada

una de sus partes. Esta composición provoca un nivel de fijación de CO₂ de 11.96 kilomoles por tonelada métrica de biomasa de caña (tallos, cogollos y hojas). Al incorporar la raíz (considerando un 11% en peso de raíces por tonelada de caña integral), el índice anterior aumenta hasta 13.48 kilomoles por tonelada métrica de caña integral. Si una tonelada de caña integral sin considerar raíces, fija el equivalente de 526.3 kilogramos de CO₂, esto significa que un cultivo del orden de 6.5 a 7.0 millones de toneladas métricas de caña integral, como el que se tiene en el país, fijaría unos tres y medio millones de toneladas de dicho compuesto al año, contribuyendo con ello a disminuir el impacto causado por el mismo, si esos tres millones de toneladas hubieran contribuido al efecto invernadero al emitirse a la atmósfera. Como puede verse, la contribución es apreciable y beneficiosa para el medio ambiente.

Las operaciones del proceso de producción de azúcar que provocan emisiones de CO₂ al medio ambiente, pueden agruparse en: a) emisiones provenientes del uso de combustibles fósiles, tales como: cosecha, transporte, fertilización y uso de plaguicidas y herbicidas; y, b) provenientes del proceso fabril, donde la fuente de energía es el bagazo, las que se compensan por la fijación de CO₂ del mismo cultivo. Las primeras representan, un aporte del orden de 25.0 NM³ (Singer, 1981).

Por otra parte, dado que el bioetanol no contiene los contaminantes típicos de la gasolina (azufre, benceno, compuestos aromáticos, metales pesados, entre otros.) y produce una combustión limpia y libre de impurezas, al utilizarlo como mezcla con gasolina generará beneficios al medio ambiente. De acuerdo con la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA), adicionar un 6 % en volumen de etanol a la gasolina reduce las emisiones tóxicas en un 9 % (NO₂, compuestos orgánicos volátiles, CO) (Calero & Briceño, 2003), y la adición de un 10 % reduce el nivel de los óxidos de nitrógeno en un 22 %, de monóxido de carbono en un 50 %, de hidrocarburos en un 3 %, (Ocampo, 1998), de CO₂ en un 5 % (El País, 2004), además de aumentar el octanaje alrededor de 4 puntos.

Evita además el uso de aditivos antidetonantes, como el tetraetilo de plomo, el cual es tóxico y se mantiene en el medio ambiente, reduciendo la emisión de compuestos orgánicos aromáticos, así como las impurezas de naturaleza clorada, sulfurada y organometálica. De acuerdo con la Asociación de Recursos Naturales de Canadá, el agregar un 10 % de etanol como combustible en las gasolinas traería los siguientes beneficios: reducción de un 30 % en las emisiones de monóxido de carbono, de un 6 a 10 % de las de dióxido de carbono, y una reducción en la formación de ozono en la red de producción y uso del etanol (NRCAN).

Existe una postura o concepto errado sobre el uso de energías renovables, ya que existe la creencia que representan un balance negativo en relación a energía, es decir, que en su producción se gasta más energía que la que se produce, lo cual no es cierto. Esta confusión se repite en relación con otros factores como son los índices de precios y los costos de

producción. Esta creencia que con el paso del tiempo va disminuyendo gradualmente, ha contribuido y contribuye a que no existan inversiones ni un desarrollo acelerado acorde al potencial que representan los proyectos de energías renovables.

4 Ingenios azucareros de El Salvador

4.1 Ingenio Central Izalco (CASSA)

Está ubicado en el km 63 de la Carretera a Sonsonate, en el Municipio de Izalco, Departamento de Sonsonate, al Oeste de El Salvador. Sus coordenadas son 13°43'53" N y 89°43'14" W. A continuación, se presenta una panorámica de sus instalaciones.



Ilustración 1: Panorámica Ingenio Central Izalco
Fuente:(Google Earth)

En 1964, nació la Compañía Azucarera Salvadoreña (CASSA), con la inauguración de su planta de producción de azúcar denominada Central Izalco.

Actualmente, el Ingenio produce una variedad de tipos de azúcar para los mercados nacionales, industriales y de consumo directo; asimismo, posee su planta de cogeneración de energía. La capacidad de molienda diaria es de 13,000 toneladas de caña de azúcar. Este es el ingenio salvadoreño más grande (CASSA, 2018). En la Tabla 5 se presentan los datos de producción de los últimos 5 períodos de zafra (2013-2014 a la 2017-2018).

Período	Caña molida (TM)	Producción de azúcar (TM)	Producción de melaza (m ³)	Rendimiento melaza (m ³ /TM)	Rendimiento azúcar (kg/TM)
Z13-14	1,879,038.93	204,893.97	60,976.15	0.03245	109.04
Z14-15	2,025,320.35	234,525.86	69,790.65	0.03446	115.80
Z15-16	1,750,588.25	186,089.00	58,935.61	0.03367	106.30
Z16-17	1,836,950.63	208,693.95	57,756.02	0.03144	113.61
Z17-18	1,758,176.01	202,191.19	55,936.20	0.03181	115.00
PROMEDIO	1,850,014.83	207,278.79	60,678.93	0.03277	111.95

Tabla 6: CASSA: Producción de zafras 2013 a 2018
(CONSAA, 2018)

En la tabla anterior, es posible observar que, por período de zafra, en promedio, este ingenio en las últimas 5 zafras ha procesado en su molienda 1,850,014.83 TM de caña, una producción promedio de azúcar 207,278.79 TM con un rendimiento promedio de 111.95 kg de azúcar/TM de caña, y una producción promedio de melaza de 60,678.93 m³ con un rendimiento promedio de 0.03277 m³ de melaza/TM.

El área sembrada promedio en los últimos 5 períodos ha sido de 19,813.76 hectáreas y se ha tenido un porcentaje de participación promedio de 27.51%.

A continuación, se presenta el proceso el flujo de materiales principales de Central Izalco:

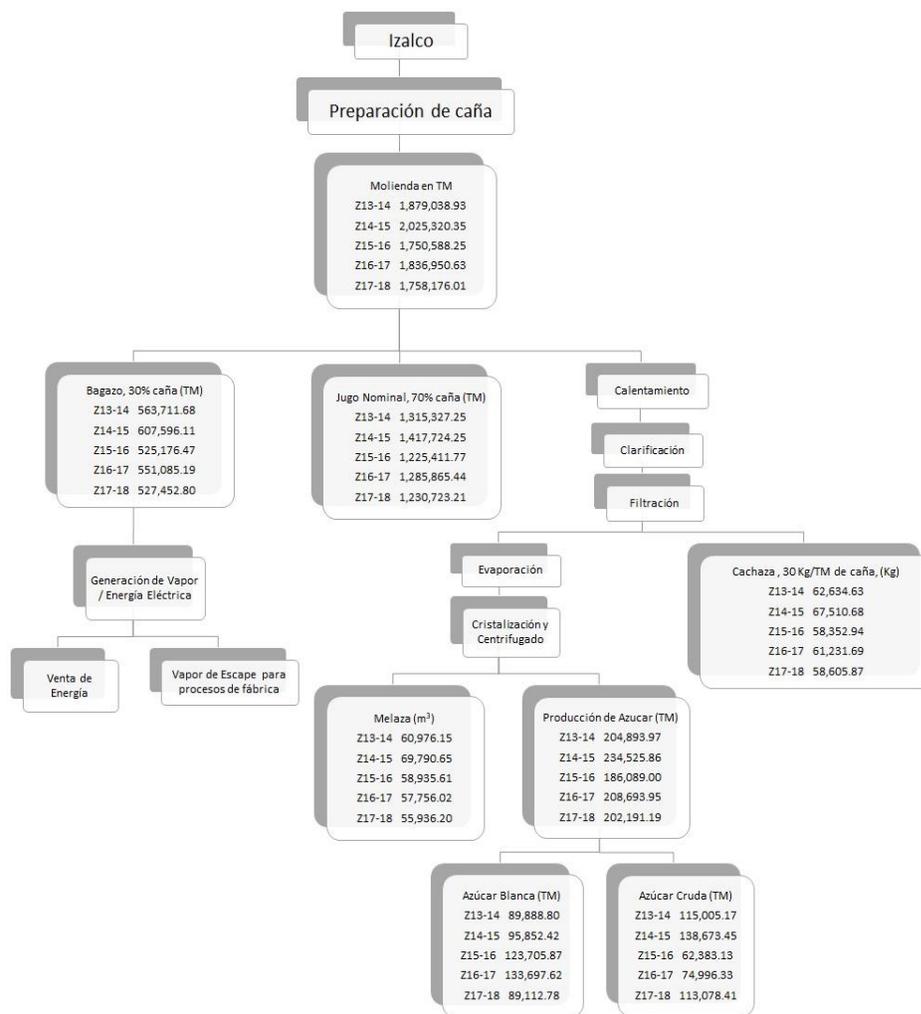


Ilustración 2: Caña de Azúcar procesada en Ingenio Izalco 2013-2018

4.2 Ingenio Chaparrastique

Está ubicado en el km 144, Carretera al Cuco, Cantón el Jute, Departamento de San Miguel, el cual se encuentra en el oriente del país. Sus coordenadas son 13°26'22" N y 88°09'11" W. La ubicación se muestra en la siguiente figura:



Ilustración 3: Panorámica Ingenio Chaparrastique
Fuente: Google Earth

La fundación del Ingenio Chaparrastique se remonta hacia 1982, cuando el Gobierno decide construirlo en la zona oriental y que sea administrado por INAZUCAR. Inicialmente, su capacidad instalada de molienda fue 3,000 toneladas de caña por día.

Hacia 1995 y con el objetivo de ser líder de Centroamérica en la producción y comercialización de azúcar, energía y derivados de la caña, la Ley de Privatizaciones promovió la venta de acciones del Ingenio y fue así como Ingenio Chaparrastique se convirtió en Sociedad Anónima, e incrementó su molida diaria a 6,000 toneladas de caña.

En 2005, Compañía Azucarera Salvadoreña (CASSA) adquirió Ingenio Chaparrastique y dio inicio a una nueva etapa de reconversión industrial, tecnología agrícola y un compromiso por reactivar la cañicultura en la zona.

Con esa visión, se apostó a mejorar las condiciones del recurso humano, invertir en maquinaria y en tecnología agrícola, e iniciar el desarrollo de procesos más ágiles y eficientes. Actualmente se tiene una capacidad de molida diaria de 8,000 toneladas de caña y una planta de cogeneración (CASSA, 2018).

En la Tabla 6 se muestran los datos de producción de los últimos 5 períodos de Zafra de Ingenio Chaparrastique (2013-2014 a la 2017-2018):

Período	Caña molida (TM)	Producción de azúcar (TM)	Producción de melaza (m ³)	Rendimiento melaza (m ³ /TM)	Rendimiento azúcar (kg/TM)
Z13-14	1,047,086.15	117,557.99	34,682.49	0.03312	112.27
Z14-15	1,034,302.94	119,418.00	35,253.42	0.03408	115.46
Z15-16	809,765.72	80,973.37	30,037.03	0.03709	100.00
Z16-17	1,110,347.32	122,529.47	38,726.22	0.03488	110.35
Z17-18	1,220,273.32	140,571.87	37,636.17	0.03084	115.20
PROMEDIO	1,044,355.09	116,210.14	35,267.06	0.03400	110.65

Tabla 7: Ingenio Chaparrastique: Producción de zafras 2013 a 2018

(CONSAA, 2018)

En la tabla anterior, es posible observar que por período de zafra en promedio este ingenio en las últimas 5 zafras ha procesado en su molienda 1,044,355.09 TM de caña, una producción promedio de azúcar 116,210.14 TM con un rendimiento promedio de 110.65 kg de azúcar/TM de caña, y una producción promedio de melaza de 35,267.06 m³ con un rendimiento promedio de 0.034 m³ de melaza/TM.

El área sembrada promedio en los últimos 5 períodos ha sido de 14,190.23 hectáreas y se ha tenido un porcentaje de participación promedio de 16.60%.

A continuación, se presenta el flujo de materiales principales de Ingenio Chaparrastique:

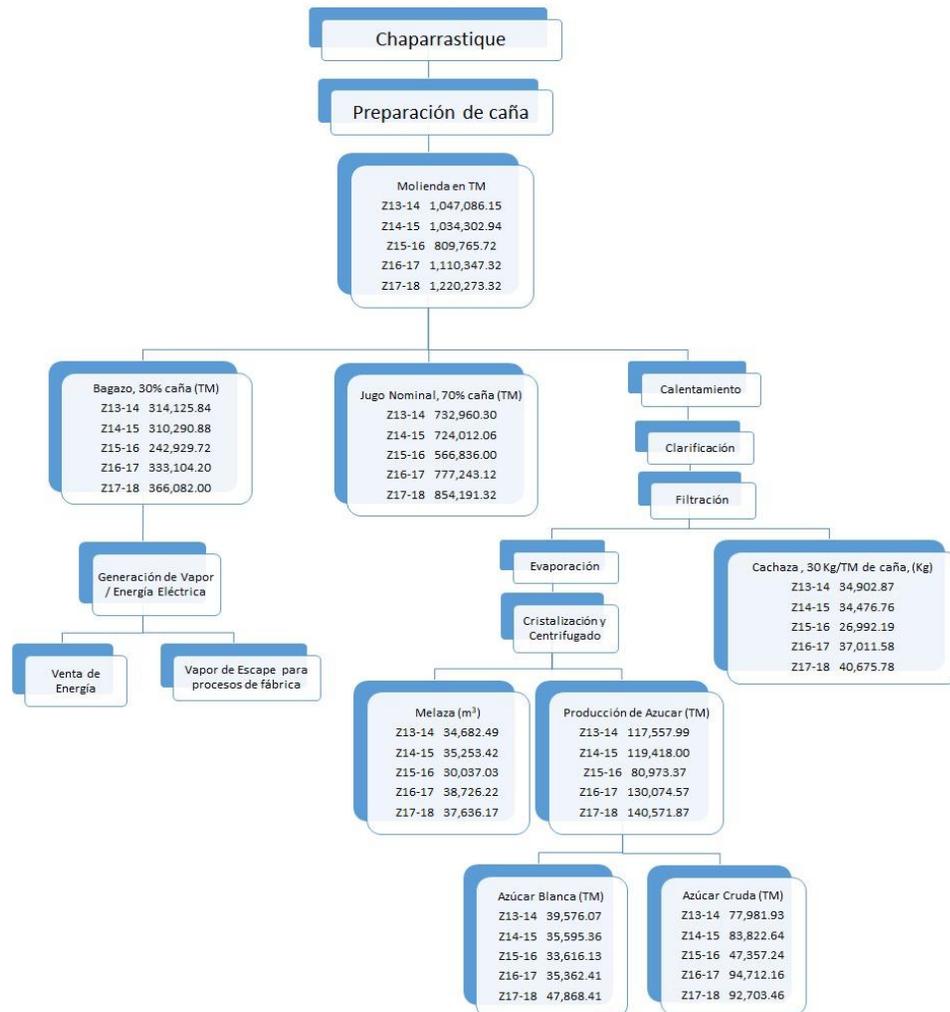


Ilustración 4: Caña de Azúcar procesada en Ingenio Chaparrastique 2013-2018

4.3 Ingenio La Cabaña

Ingenio La Cabaña, S.A de C.V, además de su actividad principal, molienda de caña de azúcar de la cual produce el azúcar y melaza, cuenta con una moderna planta de alcohol abasteciendo

de este producto a diferentes sectores licoreros y sectores industriales del país y Centro América y se continúa en la búsqueda de oportunidades en el mercado internacional.

Está localizado en el Kilómetro 39 ½ de la Carretera Troncal del Norte, en el municipio de El Paisnal, departamento de San Salvador. Sus coordenadas son 14°01'06" N y 89°10'56" W. Posee una capacidad instalada de molida diaria de 7,000 toneladas de caña. Su ubicación se muestra en la figura presentada a continuación:



Ilustración 5: Panorámica Ingenio La Cabaña
Fuente: Google Earth

Fue fundado en el año 1946 y desde hace varios años, se ha insistido en la necesidad de la diversificación de los productos como base de la estabilidad y crecimiento en los resultados del Ingenio, en consecuencia, se han hecho esfuerzos e inversiones que han dado fruto; la producción de alcoholes y la generación de energía es una muestra del crecimiento y potencial del Ingenio La Cabaña, S.A de C.V (CORSAIN, 2018).

Adicionalmente, la generación de energía es considerada como un negocio promisorio porque la demanda crece a una velocidad mayor que la oferta y el potencial de producción, basado en el uso eficiente del bagazo y de combustibles de biomasa es muy grande, además de ser un sistema de generación no contaminante el cual es compatible con programas de prevención del cambio climático, motivo por el cual posee planta de cogeneración (Ingenio La Cabaña, 2018).

A continuación, se presentan los datos de producción de los últimos 5 períodos de Zafra de Ingenio La Cabaña que incluye de la temporada 13-14 a la 17-18 en la Tabla 7:

Período	Caña molida (TM)	Producción de azúcar (TM)	Producción de melaza (m ³)	Rendimiento melaza (m ³ /TM)	Rendimiento azúcar (kg/TM)
Z13-14	942,462.59	108,426.78	28,580.24	0.03033	115.05
Z14-15	966,118.90	113,101.82	32,274.48	0.03341	117.07
Z15-16	941,453.35	104,731.61	32,919.96	0.03497	111.24

Período	Caña molida (TM)	Producción de azúcar (TM)	Producción de melaza (m ³)	Rendimiento melaza (m ³ /TM)	Rendimiento azúcar (kg/TM)
Z16-17	930,829.19	109,591.65	30,599.52	0.03287	117.74
Z17-18	946,439.89	108,610.93	31,376.80	0.03315	114.76
PROMEDIO	945,460.78	108,892.56	31,150.20	0.03294	115.17

Tabla 8: Ingenio La Cabaña: Producción de zafras 2013 a 2018 (CONSA, 2018)

Este ingenio en las últimas 5 zafras ha molido un promedio de 945,460.78 TM de caña y procesado 108,892.56 TM de azúcar, obteniéndose un rendimiento promedio de 115.17 kg de azúcar/TM de caña. Asimismo, proceso un promedio de 31,150.20 m³ de melaza, con un rendimiento promedio de 0.03294 m³ de melaza/TM. El área sembrada promedio en los últimos 5 períodos ha sido de 11,448.28 hectáreas y se ha tenido un porcentaje de participación promedio de 14.86%.

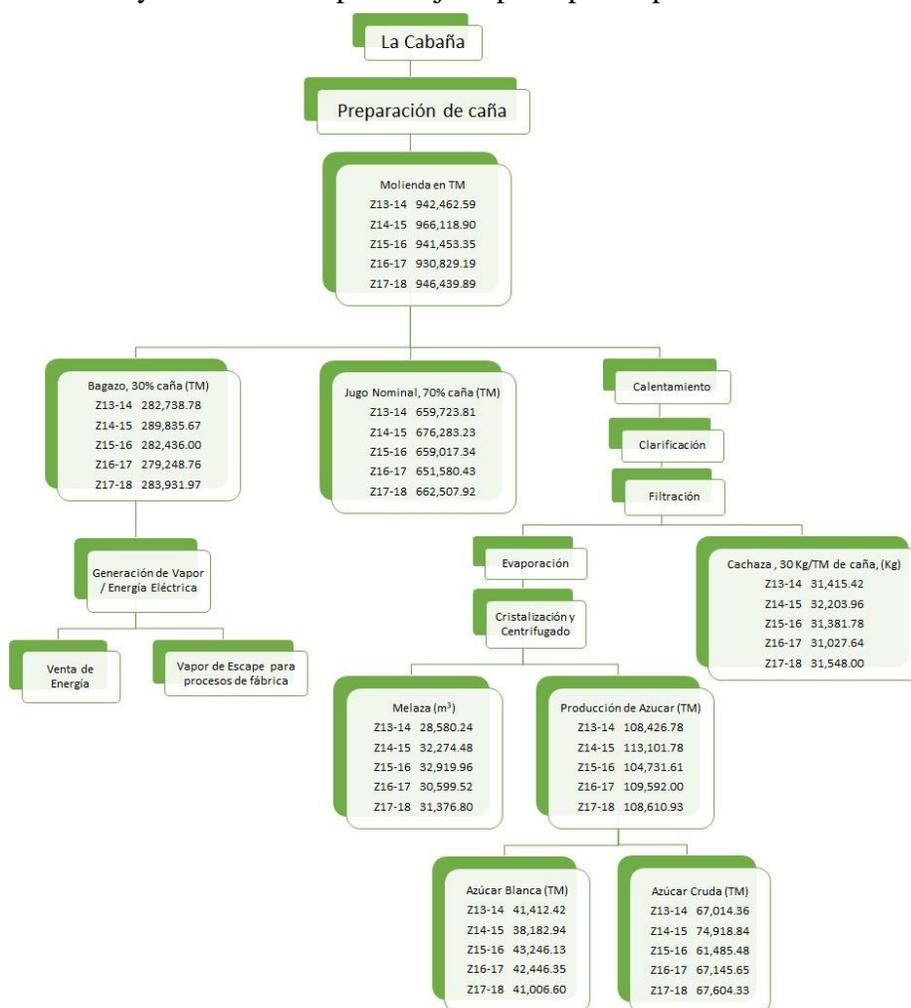


Ilustración 6: Caña de Azúcar procesada en Ingenio La Cabaña 2013-2018

4.4 Ingenio Jiboa

Está localizado en el Cantón San Antonio Caminos, Km. 68 ½ de la carretera que conduce de San Vicente a Zacatecoluca. Ocupa una extensión de 48 manzanas. Sus coordenadas

son 13°35'00" N y 88°47'03" W. Su ubicación se muestra en la figura presentada a continuación:



Ilustración 7: Panorámica Ingenio Jiboa
Fuente: Google Earth

Fue fundado en el año 1976. Su actividad principal es molienda de caña, de la cual se derivan los procesos de fabricación y producción de azúcar cruda, cristal y refinada, así como el subproducto melaza. En tiempo de molienda se genera empleo para 900 personas (CORSAIN, 2018).

Actualmente, Ingenio Jiboa está en proceso de expansión, ha invertido en una planta de cogeneración y tiene una capacidad de molienda de 6,000 toneladas de caña por día.

A continuación, se presentan los datos de producción de los últimos 5 períodos de Zafra de Ingenio Jiboa que incluye de la temporada 13-14 a la 17-18:

Período	Caña molida (TM)	Producción de azúcar (TM)	Producción de melaza (m ³)	Rendimiento melaza (m ³ /TM)	Rendimiento azúcar (kg/TM)
Z13-14	802,280.93	89,250.99	23,986.26	0.02990	111.25
Z14-15	859,645.21	97,769.00	27,160.25	0.03159	113.73
Z15-16	703,940.17	72,683.69	25,050.40	0.03559	103.25
Z16-17	848,526.87	95,839.66	27,871.17	0.03285	112.95
Z17-18	825,194.75	93,000.27	27,985.56	0.03391	112.70
PROMEDIO	807,917.59	89,708.72	26,410.73	0.03277	110.78

Tabla 9: Ingenio Jiboa: Producción de zafra 2013 a 2018
(CONSAA, 2018)

En la tabla anterior, es posible observar que por período de zafra en promedio este ingenio en las últimas 5 zafra ha procesado en su molienda 807,917.59 TM de caña, una producción promedio de azúcar 89,708.72 TM con un rendimiento promedio de 110.78 kg de

azúcar/TM de caña, y una producción promedio de melaza de 26,410.73 m³ con un rendimiento promedio de 0.03277 m³ de melaza/TM.

El área sembrada promedio en los últimos 5 períodos ha sido de 10,781.76 hectáreas y se ha tenido un porcentaje de participación promedio de 12.17%.

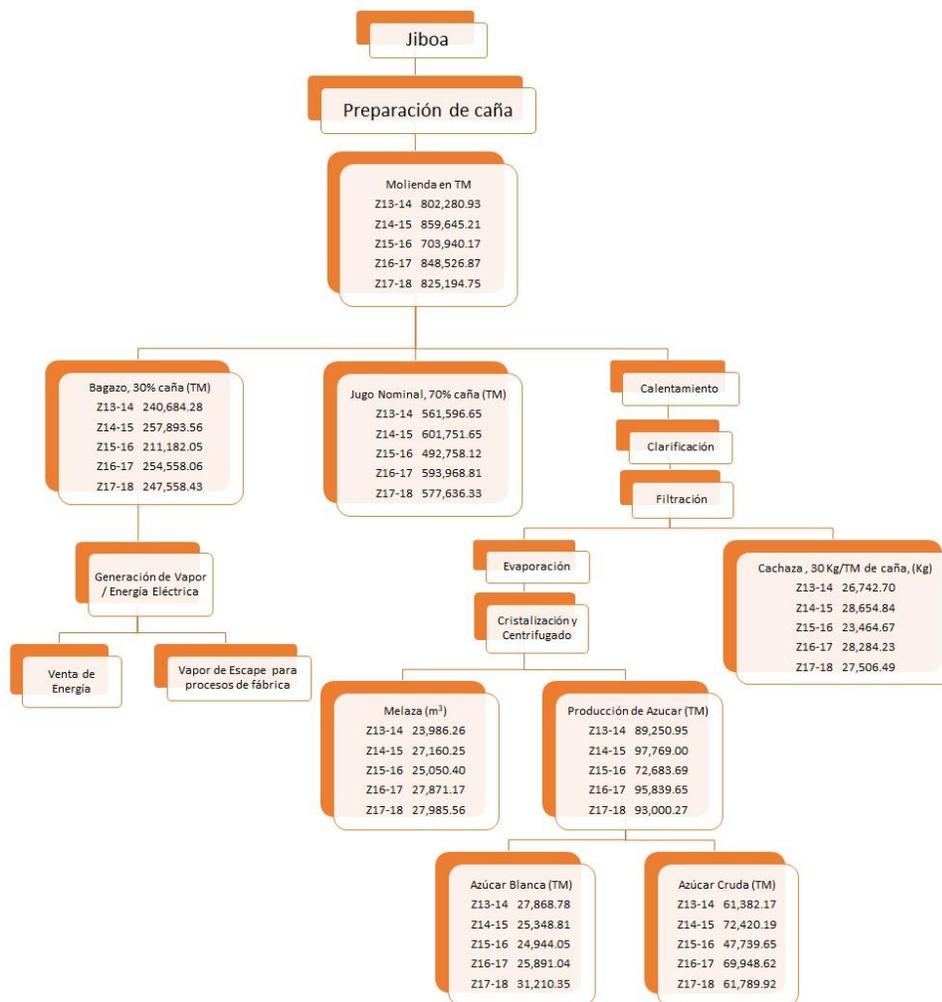


Ilustración 8: Caña de Azúcar procesada en Ingenio Jiboa 2013-2018

4.5 Ingenio El Ángel

Está ubicado en Carretera a Quezaltepeque, Km. 4 1/2, Apopa, cantón Joya Galana, departamento de San Salvador, El Salvador. Sus coordenadas son 13°48'14" N y 89°12'00" W. Posee una capacidad instalada de 14,000 toneladas de caña. La ubicación se muestra en la figura presentada a continuación:



Ilustración 9: Panorámica Ingenio El Ángel.
Fuente:(Google Earth)

Su historia se remonta al año 1900. Ingenio El Ángel produce azúcar cruda y refinada, melaza y energía renovable, avanzando con éxito en los mercados globales gracias a sus valores empresariales. La empresa es reconocida no solo por la calidad de sus productos, sino por sus alianzas con productores, encadenamientos productivos y programas sociales que benefician, principalmente, a comunidades aledañas al ingenio y zonas de influencia. El Ángel continúa elevando sus niveles de desempeño mediante certificaciones de estándares mundiales (COEXPORT, 2018) .

A continuación, se presentan los datos de producción de los últimos 5 períodos de Zafra de Ingenio El Ángel que incluye de la temporada 13-14 a la 17-18

Período	Caña molida (TM)	Producción de azúcar (TM)	Producción de melaza (m ³)	Rendimiento melaza (m ³ /TM)	Rendimiento azúcar (kg/TM)
Z13-14	1,375,831.81	160,392.45	44,721.13	0.03250	116.58
Z14-15	1,454,835.36	179,004.07	48,639.30	0.03343	123.04
Z15-16	1,366,549.55	157,715.98	46,009.19	0.03367	115.41
Z16-17	1,530,292.89	184,797.30	47,481.67	0.03103	120.76
Z17-18	1,413,306.16	168,767.82	42,846.94	0.03032	119.41
PROMEDIO	1,428,163.15	170,135.52	45,939.65	0.03219	119.04

Tabla 10: Ingenio El Ángel: Producción de Zafras 2013 a 2018
(CONSAA, 2018)

En la tabla anterior, es posible observar que por período de zafra en promedio este ingenio en las últimas 5 zafras ha procesado en su molienda 1,428,163.15 TM de caña, una producción promedio de azúcar 170,135.52 TM con un rendimiento promedio de 119.04 kg

de azúcar/TM de caña, y una producción promedio de melaza de 45,939.65 m³ con un rendimiento promedio de 0.03219 m³ de melaza/TM.

El área sembrada promedio en los últimos 5 períodos ha sido de 17,974.54 hectáreas y se ha tenido un porcentaje de participación promedio de 23.16%.

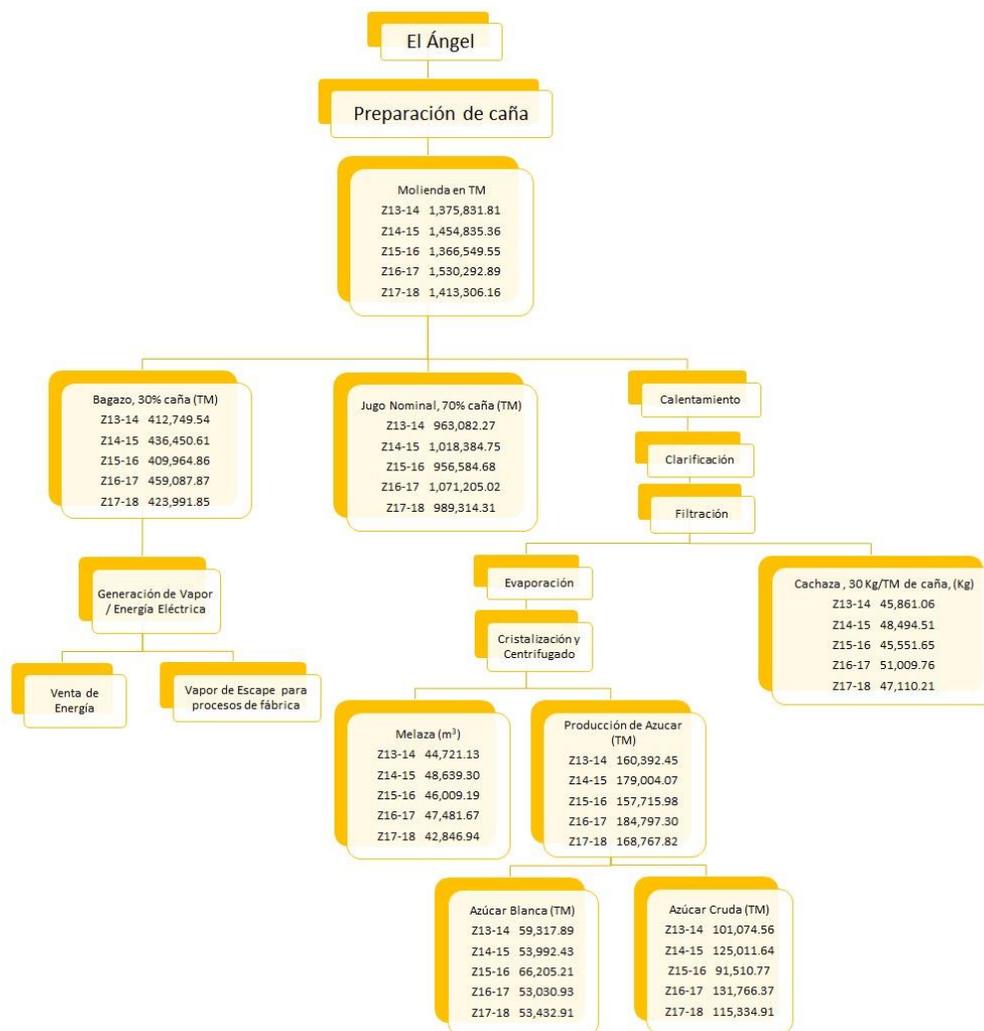


Ilustración 10: Caña de Azúcar procesada en Ingenio El Ángel 2013-2018

4.6 Ingenio La Magdalena

Está ubicado en el km 8, Calle Chalchuapa y frontera el Coco, Cantón La Magdalena, en el occidente del país en el municipio de Chalchuapa, departamento de Santa Ana. Es el ingenio más pequeño del país, fundado en 1946 y ha sido adquirido por Ingenio El Ángel. Sus coordenadas son 14°02'58" N y 89°42'06" W. Su ubicación se muestra en la figura presentada a continuación:



Ilustración 11: Panorámica Ingenio La Magdalena
(Google Earth)

A continuación, se presentan los datos de producción de los últimos 5 períodos de zafra del Ingenio La Magdalena que incluye de la temporada 13-14 a la 17-18

Período	Caña molida (TM)	Producción de azúcar (TM)	Producción de melaza (m ³)	Rendimiento melaza (m ³ /TM)	Rendimiento azúcar (kg/TM)
Z13-14	362,145.28	39,499.15	11,731.76	0.03240	109.07
Z14-15	362,145.28	43,877.69	12,229.17	0.03377	121.16
Z15-16	408,145.22	47,111.13	14,644.14	0.03588	115.43
Z16-17	304,749.17	36,440.35	10,722.73	0.03519	119.57
Z17-18	348,909.02	40,616.67	11,746.77	0.03367	116.41
PROMEDIO	357,218.79	41,509.00	12,214.91	0.03418	116.33

Tabla 11: Ingenio La Magdalena: Producción de Zafras 2013 a 2018
(CONSAA, 2018)

En la tabla anterior, es posible observar que por período de zafra en promedio este ingenio en las últimas 5 zafras ha procesado en su molienda 357,218.79 TM de caña, una producción promedio de azúcar 41,509.0 TM con un rendimiento promedio de 116.33 kg de azúcar/TM de caña, y una producción promedio de melaza de 12,214.91 m³ con un rendimiento promedio de 0.03418 m³ de melaza/TM.

El área sembrada promedio en los últimos 5 períodos ha sido de 4,786.34 hectáreas y se ha tenido un porcentaje de participación promedio de 5.69%.

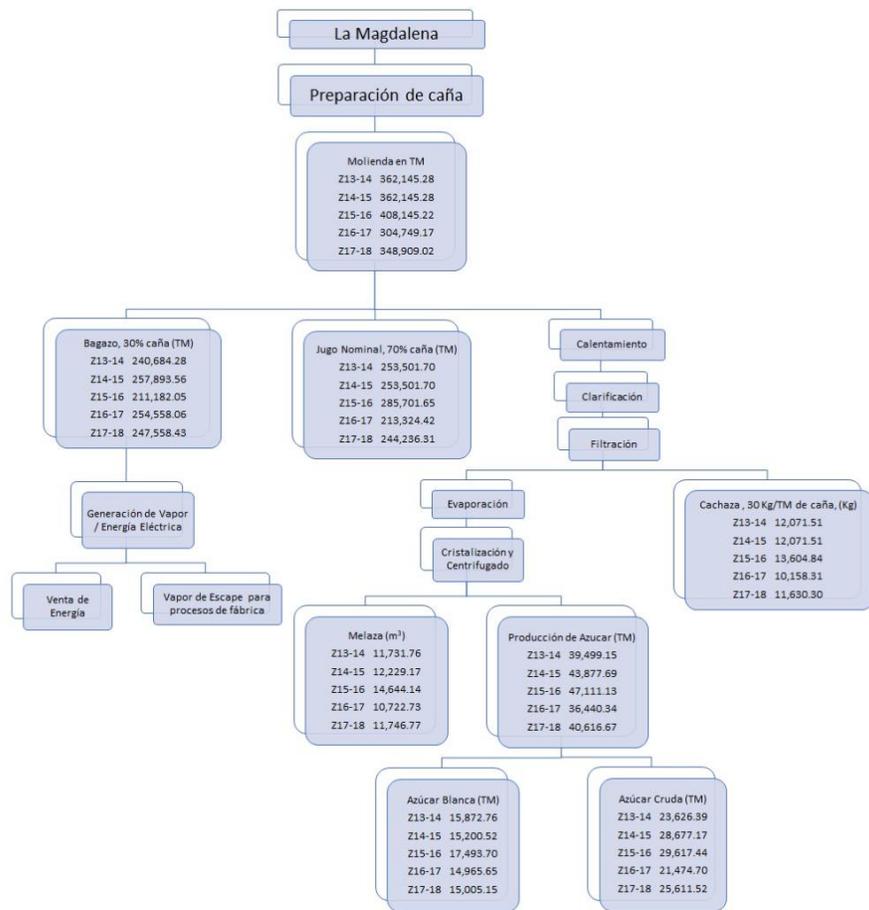


Ilustración 12: Caña de Azúcar procesada en Ingenio La Magdalena 2013-2018

5 Cálculos de producción de alcohol

Para realizar los cálculos correspondientes al potencial para producir bioetanol que posee la industria azucarera de El Salvador con el objetivo de efectuar mezclas con gasolina, se considerarán tres escenarios, en los cuales no se aumenta la cantidad de área sembrada actual del cultivo de caña de azúcar:

El primero de ellos corresponde al escenario de producción de bioetanol a partir de melaza o miel final, subproducto de la fabricación de azúcar que actualmente es utilizada como alimento de ganado a nivel local y la mayor parte se exporta como materia prima para procesos industriales. En este escenario, al total de melaza generada como subproducto de la fabricación de azúcar se restarán la cuota ganadera y la de producción de alcohol industrial, para no retirar este uso importante en el mercado local. La melaza restante se tomará como materia prima para ser enviada a la producción de bioetanol.

El segundo escenario considera la sustitución de la azúcar asignada al mercado mundial o saldo de exportación, para destinar el jugo para la producción de bioetanol.

El tercer escenario corresponde a tomar los jugos secundarios provenientes de la mollienda o etapa de extracción para introducirlos como materia prima en la línea de producción de bioetanol.

5.1 Escenario 1: Producción de bioetanol a partir de la melaza de exportación

La melaza o miel final es un residuo con consistencia de jarabe, que queda después de separar el azúcar cristalizado del líquido madre. La melaza ya no contiene azúcar cristalizabile, pero sí todavía, entre un 30% a 40% de sacarosa y mucha glucosa.

La melaza se ha empleado casi siempre como alimento para el ganado ya que, al igual que el salvado de los cereales, estaba considerado un subproducto alimenticio de poco valor. También se utiliza para la obtención de alcohol, cría de levaduras, en panadería, preparación de jaleas, jugos y otros. Tiene cantidades importantes de vitaminas y minerales (MAG, 2011). El 80% de la melaza producida por los ingenios salvadoreños se destina a la exportación (CONSAA, 2015).

Para calcular el primer escenario se tomará como materia prima la melaza de exportación. Se ha excluido el consumo interno de melaza para el sector ganadero y lo utilizado como materia prima para la producción de alcohol utilizado en diversos procesos de la industria local. Esto con el objetivo de no competir con usos ya establecidos e importantes de este recurso para el país.

En la Tabla 11, se presentan los datos de producción de melaza expresados en toneladas métricas (TM) de los 6 ingenios de El Salvador.

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	88,916.96	65,213.48	50,574.87	41,676.42	34,977.36	17,107.55	298,466.63
Z14-15	101,770.49	70,927.04	51,407.41	47,063.45	39,605.75	17,832.88	328,607.03
Z15-16	85,941.38	67,091.75	43,800.75	48,004.71	36,529.12	21,354.45	302,722.17
Z16-17	84,221.28	69,239.06	56,471.54	44,620.98	40,642.44	15,636.15	310,831.45
Z17-18	80,792.93	61,887.11	54,360.79	45,319.91	40,421.68	16,966.76	299,749.18
PROMEDIO	88,328.61	66,871.69	51,323.07	45,337.09	38,435.27	17,779.56	308,075.29

Tabla 12 Producción de melaza 2013 – 2018 de ingenios de El Salvador (Toneladas Métricas)

Fuente: Elaboración propia

Se observa que el promedio de las producciones totales de las últimas 5 zafas de los ingenios salvadoreños es 308,075.29 TM de melaza. Sin embargo, como se ha indicado anteriormente, en el mercado local la melaza tiene usos establecidos en el sector ganadero y en la producción de bioetanol para uso industrial. En la tabla 12, se presenta la melaza disponible, restando el 20% de los mencionados usos en el mercado interno.

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	71,133.57	52,170.78	40,459.90	33,341.13	27,981.89	13,686.04	238,773.31
Z14-15	81,416.39	56,741.63	41,125.93	37,650.76	31,684.60	14,266.31	262,885.62
Z15-16	68,753.10	53,673.40	35,040.60	38,403.77	29,223.30	17,083.56	242,177.73
Z16-17	67,377.03	55,391.25	45,177.23	35,696.78	32,513.95	12,508.92	248,665.16
Z17-18	64,634.34	49,509.69	43,488.63	36,255.93	32,337.34	13,573.41	239,799.34
PROMEDIO	70,662.89	53,497.35	41,058.46	36,269.67	30,748.22	14,223.65	246,460.23

Tabla 13: Melaza disponible para generar bioetanol (Toneladas Métricas)

Fuente: Elaboración propia

El promedio del total anual de melaza disponible de las zafas del período 2013-2018, para los 6 ingenios salvadoreños, es 246,460.23 TM. Este volumen se constituye en la materia prima potencial para la producción de bioetanol.

Una fermentación con alta calidad de materiales tendría un rendimiento aproximado de 290 litros de alcohol/TM de melaza o su equivalente a 0.29 m³/TM de melaza (Jacques, 2003). Al utilizar esta relación de conversión de melaza a bioetanol, se obtienen los siguientes resultados, expresados m³ de alcohol, para cada uno de los 6 ingenios:

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	20,628.73	15,129.53	11,733.37	9,668.93	8,114.75	3,968.95	69,244.26
Z14-15	23,610.75	16,455.07	11,926.52	10,918.72	9,188.53	4,137.23	76,236.83
Z15-16	19,938.40	15,565.29	10,161.77	11,137.09	8,474.76	4,954.23	70,231.54
Z16-17	19,539.34	16,063.46	13,101.40	10,352.07	9,429.05	3,627.59	72,112.90
Z17-18	18,743.96	14,357.81	12,611.70	10,514.22	9,377.83	3,936.29	69,541.81
PROMEDIO	20,492.24	15,514.23	11,906.95	10,518.21	8,916.98	4,124.86	71,473.47

Tabla 14: Cálculo del potencial de bioetanol expresado en m³ a partir de melaza

Fuente: Elaboración propia

Considerando los 6 ingenios salvadoreños, el potencial de producción promedio de bioetanol es 71,473.47 m³.

Los datos de consumo de gasolina del año 2011 al 2017 de El Salvador, indican que el promedio anual de consumo de gasolina regular es 410,151.18 m³ y de gasolina especial 293,588.91 m³, por lo que en total el consumo anual es de 703,740.09 m³. De acuerdo al cálculo realizado el potencial de producción de bioetanol a partir de melaza brinda un valor de 71,473.47 m³, esto significa que representa un 10.16% del total de combustible demandado por el país, y que podría ser sustituido al realizar mezcla de bioetanol-gasolina.

Este resultado coincide con el estudio publicado por el Ministerio de Agricultura y ganadería en el 2011, dónde se presenta que es posible implementar un programa de producción de etanol para mezcla del 5 a 10% con gasolina a partir de melaza en destilerías anexas a los ingenios, considerando la misma área cultivada de caña de azúcar (González Trabanino, 2011).

5.2 Escenario 2: Producción de bioetanol a partir del azúcar de exportación al mercado mundial

La industria azucarera de El Salvador tiene presencia en el mercado interno, mercado preferencial y mercado mundial:

5.2.1 Mercado interno

Según la Ley de la producción, industrialización y comercialización de la agroindustria azucarera de El Salvador, a cada ingenio que está procesando caña y extrayendo azúcar se le asigna un porcentaje de la demanda de azúcar tanto en el mercado interno como el preferencial. Las asignaciones y autorizaciones, según la Ley, estarán sujetas a la obligación de los ingenios que se encuentran extrayendo azúcar en el país, de abastecer prioritariamente el mercado interno (MAG, 2011).

Las cuotas actuales de los ingenios para las últimas 5 zafras son las siguientes: Ingenio Central Izalco (CASSA): 30.89%, Ingenio El Ángel: 21.75%, Ingenio Chaparrastique: 15.88%, Ingenio La Cabaña: 15.16%, Ingenio Jiboa: 10.58% e Ingenio La Magdalena con 5.74%.

La regulación del mercado interno incluye la demanda industrial que comprende panaderías, pastelerías, dulcerías, bebidas carbonatadas y no carbonatadas, farmacéutica, entre otras; y la demanda del consumidor final. El sector azucarero de El Salvador destina un 39% de la producción de azúcar al mercado interno, el cual lo garantiza y lo mantiene estable para la demanda de los consumidores nacionales (CONSAA, 2015).

5.2.2 Mercado preferencial

El Artículo 24, del capítulo III, Mercados establece que las cuotas de azúcar para el mercado preferencial incluyendo la que se refiere al Sistema Generalizado de Preferencia,

establecida por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América y cualquier otra cuota preferencial de azúcar asignada al Gobierno de El Salvador, será distribuida entre todas las centrales azucareras o ingenios de la misma forma indicada en el Artículo 20 de la Ley.

La Ley es clara en relación a la cantidad de azúcar que cada ingenio podrá comercializar en el mercado interno y establece que hasta la duodécima parte de la cantidad de azúcar que le ha sido asignada para su comercialización anual podrá ser comercializada en dicho mercado, (art. 21, capítulo III, Mercados) (MAG, 2011).

De la producción de los ingenios de El Salvador, un 11% se vende en el mercado preferencial, cuyos precios son mejores que en mercado mundial, estos son mercados como: Estados Unidos, Unión Europea y Taiwán (CONSAA, 2015).

5.2.3 Mercado mundial

Los excedentes que no son colocados en el mercado interno o preferencial son vendidos en el mercado mundial. El 50% de la producción de azúcar de El Salvador se destina al mercado mundial, bajo precios internacionales que son muy volátiles (CONSAA, 2015).

Este escenario tomará el 50% de la producción nacional de azúcar actualmente destinado al mercado mundial o saldo exportable para utilizarlo para producción de bioetanol. Una de las premisas o consideraciones importantes en este modelo es que la población salvadoreña es un consumidor racional de azúcar teniendo un valor aproximado de 100 gramos/día-persona, tomando en cuenta la ingesta mínima para el adulto de 50 gramos/día-persona y el techo fisiológico de 140 gramos/día-persona (Badía Serra, 2012).

El crecimiento de población debido a las características de emigración, mortalidad y natalidad se mantiene dentro de un rango estable en el que no se estima un aumento significativo para los próximos años, lo que conlleva a que también el consumo de azúcar se proyecte con la misma tendencia.

La producción total promedio de azúcar para los últimos 5 períodos de zafra es de 733,734.74 TM, distribuidas entre los 6 ingenios azucareros activos del país de la siguiente manera:

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	204,893.97	160,392.45	117,557.99	108,426.78	89,250.99	39,499.15	720,021.33
Z14-15	234,525.86	179,004.07	119,418.00	113,101.82	97,769.00	43,877.69	787,696.45
Z15-16	186,089.00	157,715.98	80,973.37	104,731.61	72,683.69	47,111.13	649,304.79
Z16-17	208,693.95	184,797.30	122,529.47	109,591.65	95,839.66	36,440.35	757,892.38
Z17-18	202,191.19	168,767.82	140,571.87	108,610.93	93,000.27	40,616.67	753,758.75
PROMEDIO	207,278.79	170,135.52	116,210.14	108,892.56	89,708.72	41,509.00	733,734.74

Tabla 15: Producción total de azúcar de ingenios salvadoreños (TM) de zafras 2013 - 2018

Fuente: (CONSAA, 2018)

Al restar la producción de azúcar requerida para el mercado interno (39%) y el mercado preferencial (11%), se obtiene un saldo disponible para el mercado de exportación de aproximadamente un 50% del volumen total de producción.

Al considerar que la producción de azúcar de los 6 ingenios busca cubrir estos mercados, la cantidad de azúcar de exportación que potencialmente puede ser sustituida para producir bioetanol es de 366,867.37 TM, distribuida entre los 6 ingenios azucareros activos del país de la siguiente manera:

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	102,446.98	80,196.23	58,779.00	54,213.39	44,625.49	19,749.57	360,010.66
Z14-15	117,262.93	89,502.03	59,709.00	56,550.91	48,884.50	21,938.84	393,848.22
Z15-16	93,044.50	78,857.99	40,486.69	52,365.80	36,341.85	23,555.57	324,652.39
Z16-17	104,346.98	92,398.65	61,264.74	54,795.83	47,919.83	18,220.18	378,946.19
Z17-18	101,095.60	84,383.91	70,285.94	54,305.47	46,500.14	20,308.34	376,879.38
PROMEDIO	103,639.40	85,067.76	58,105.07	54,446.28	44,854.36	20,754.50	366,867.37

Tabla 16: Azúcar del mercado de exportación expresada en TM con potencial para generar bioetanol
Fuente: Elaboración propia

Estimada la cantidad de azúcar potencial que puede ser sustituida para elaborar bioetanol con los jugos, se calcula la cantidad de hectáreas que estarían destinadas a este uso, para ello se utiliza la relación que una hectárea de caña produce 9.543 TM de azúcar, por lo que el cociente de la producción disponible para ser sustituida entre el factor 9.543 brindaría las hectáreas que podrían dedicarse a la producción de bio-alcohol.

Al sumar el promedio de los 6 ingenios, se deduce que podríamos contar con 38,445.23 hectáreas de cultivo de caña para producir alcohol. En los últimos 5 años para producir azúcar, se tiene un área cultivada promedio total de 79,143.03 hectáreas. La cantidad potencial de área sembrada que destinaría cada ingenio a este uso se muestra en la Tabla 17:

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	10,735.75	8,404.02	6,159.64	5,681.20	4,676.45	2,069.62	37,726.69
Z14-15	12,288.36	9,379.21	6,257.10	5,926.15	5,122.77	2,299.04	41,272.64
Z15-16	9,750.44	8,263.79	4,242.73	5,487.58	3,808.38	2,468.46	34,021.38
Z16-17	10,934.86	9,682.76	6,420.13	5,742.23	5,021.68	1,909.35	39,711.01
Z17-18	10,594.14	8,842.86	7,365.49	5,690.85	4,872.90	2,128.18	39,494.42
PROMEDIO	10,860.71	8,914.53	6,089.02	5,705.60	4,700.43	2,174.93	38,445.23

Tabla 17: Hectáreas de caña de azúcar relacionadas a la producción de azúcar de exportación con potencial para generar bioetanol
Fuente: Elaboración propia

Conociendo la cantidad de hectáreas de caña disponibles se utilizan la relación que 1 hectárea de caña produce 1,585.2 galones de alcohol (Badía Serra, 2012) o su equivalente de 6.00062 m³. Para estimar el potencial de cada ingenio se multiplica la cantidad de hectáreas por este factor, los resultados de este cálculo se presentan en la Tabla 18:

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	64,421.13	50,429.32	36,961.65	34,090.69	28,061.59	12,419.01	226,383.38
Z14-15	73,737.76	56,281.04	37,546.46	35,560.58	30,739.75	13,795.67	247,661.25
Z15-16	58,508.62	49,587.80	25,459.00	32,928.88	22,852.63	14,812.31	204,149.25
Z16-17	65,615.89	58,102.50	38,524.74	34,456.94	30,133.14	11,457.29	238,290.50
Z17-18	63,571.35	53,062.64	44,197.49	34,148.59	29,240.41	12,770.37	236,990.83
PROMEDIO	65,170.95	53,492.66	36,537.87	34,237.13	28,205.50	13,050.93	230,695.04

Tabla 18: Cálculo de potencial de bioetanol (m³) a partir de sustitución de cuota de azúcar de exportación

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior es posible observar que en total al sumar los 6 ingenios tienen un potencial de producción promedio de bioetanol de 230,695.04 m³. Ingenio Central Izalco tiene un potencial de producción de 65,170.95 m³, Ingenio El Ángel de 53,492.66 m³, Ingenio Chaparrastique de 36,537.87 m³, Ingenio La Cabaña de 34,237.13 m³, Ingenio Jiboa de 28,205.50 m³ e Ingenio La Magdalena de 13,050.93 m³.

Tal como se había indicado anteriormente el consumo anual de gasolina en el país es de 703,740.09 m³. De acuerdo al cálculo realizado el potencial de producción de bioetanol a partir de la sustitución del azúcar de exportación brinda un valor de 230,695.04 m³, esto significa que representa un 32.78% del total de combustible demandado por el país, y que podría ser sustituido al realizar mezcla de bioetanol-gasolina.

5.3 Escenario 3: Producción de bioetanol a partir de jugos secundarios

El objetivo de la molienda de caña es separar al jugo que contiene sacarosa del resto de la caña, constituido principalmente por fibra. El término extracción se emplea para expresar el porcentaje de sacarosa que ha sido extraído de la caña en los molinos y es igual a la sacarosa en el jugo crudo o diluido (Rein, 2012).

A partir de caña preparada es posible extraer normalmente entre 60 a 75% en un primer molino convencional. Para permitir a los molinos siguientes extraer la mayor cantidad de sacarosa que se encuentra en el poco jugo que ha quedado libre en el bagazo se agrega agua denominada imbibición (Rein, 2012).

El tercer escenario a estudiar plantea utilizar los jugos secundarios de la operación de molienda para direccionarlos como materia prima para la producción de bioetanol. El jugo primario es aquel que se obtiene de la primera extracción, es decir en el primer molino y se considera un jugo de molienda en seco ya que no se utiliza agua para obtenerlo. Los jugos secundarios son los que obtienen desde el segundo molino hasta el final del tándem y se utiliza agua para generarlos.

A continuación, se presenta en la Tabla 19 una comparación de las características principales del jugo primario, obtenido en el primer molino y el jugo mixto o diluido obtenido de la operación de todo el tándem de molinos con uso de agua de imbibición.

Variable	Jugo Molino 1	Jugo Mixto
Fibra (T/h)	1.58	0.28
Sólidos disueltos (T/h)	11.08	15.32
Brix de jugo (%)	19.70	13.80
Pol	9.54	13.19
Extracción de sacarosa (%)	70.20	97.00

Tabla 19: Comparación de propiedades de jugo primario y jugo mixto o diluido tomando como base 100 TM de caña
Fuente: (Rein, 2012)

En la práctica la extracción de trenes de molinos se incrementa rápidamente con el aumento de la tasa de imbibición hasta al menos un 250 a 280 % fibra (Rein, 2012).

En la actualidad los ingenios azucareros del país trabajan con tandems de 5 o 6 molinos para lograr la mayor eficiencia posible de extracción de sacarosa de la caña de azúcar y se cuenta con un sistema de agua de imbibición compuesta.

Para iniciar con el cálculo del potencial que poseen los jugos secundarios para la producción de bioetanol se estimará la cantidad de jugo diluido o mixto que se está utilizando con la configuración de trabajo actual de los ingenios para la producción de azúcar. Por ello partimos del total de azúcar de cada ingenio mostrada anteriormente en la Tabla 14.

Una tonelada de caña contiene alrededor de 120 kg de sacarosa, de las que aproximadamente el 83% se recuperan en la producción de azúcar (Otero, 2009). Este porcentaje se considerará una eficiencia típica en la fabricación de azúcar, ya que existen pérdidas en bagazo, cachaza y miel final durante el proceso.

El pol o contenido de sacarosa del jugo mixto o diluido tiene un valor de 13.19 como se observa en la Tabla 19. Por lo que para obtener la masa de jugo mixto se procede a dividir la cantidad de azúcar entre la eficiencia de recuperación multiplicada por el pol del jugo mixto. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 20:

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	1,871,570.9	1,465,079.0	1,073,814.5	990,406.9	815,248.8	360,798.6	6,576,918.7
Z14-15	2,142,238.7	1,635,083.8	1,090,804.4	1,033,110.4	893,055.2	400,793.7	7,195,086.1
Z15-16	1,699,799.9	1,440,631.2	739,638.2	956,654.0	663,917.5	430,329.1	5,930,969.9
Z16-17	1,906,281.2	1,688,001.1	1,119,225.7	1,001,047.3	875,431.9	332,858.5	6,922,845.7
Z17-18	1,846,882.8	1,541,582.4	1,284,031.1	992,089.0	849,496.0	371,006.4	6,885,087.7
PROMEDIO	1,893,354.7	1,554,075.5	1,061,502.8	994,661.5	819,429.9	379,157.2	6,702,181.6

Tabla 20: Masa de jugo diluido utilizada para la producción de azúcar en El Salvador
Fuente: Elaboración propia

Del cuadro anterior al sumar los valores promedio de las últimas 5 zafas de cada uno de los ingenios se obtiene un total de 6,702,181.6 TM de jugo diluido. Para obtener el volumen de jugo se utiliza la densidad considerando que para el jugo mixto típicamente se tiene un brix de 13.8% tal como se presentó en la Tabla 18, por lo que al utilizar tablas de densidad de la solución de sacarosa, se obtiene un dato de 8.788 lb/gal o su equivalente

de 1.05 TM/m³. Al dividir la masa de 6,702,181.6 TM entre la densidad de 1.05 TM/m³ se obtiene un volumen de jugo mixto de 6,364,665.8 m³.

Como se había indicado previamente, el jugo primario es un jugo de molienda en seco, por lo que se considera que la masa de agua de imbibición añadida en la molienda es equivalente a la masa de jugo secundario.

Típicamente se tienen valores de imbibición de 250 a 280% fibra y un valor de fibra en caña de 15% (Rein, 2012). Al tomar como valor de agua de imbibición la relación de 280% fibra y considerar un 15% de fibra en caña, se obtiene un dato de 0.42 TM de agua de imbibición/TM de caña al multiplicar ambos factores.

A continuación, se presenta en la Tabla 21 los datos de caña molida para cada uno de los ingenios azucareros de El Salvador durante los últimos 5 períodos de Zafra. En total se ha molido un total de 6,433,130.2 TM promedio por período de zafra:

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	1,879,038.93	1,375,831.81	1,047,086.15	942,462.59	802,280.93	362,145.28	6,408,845.7
Z14-15	2,025,320.35	1,454,835.36	1,034,302.94	966,118.90	859,645.21	362,145.28	6,702,368.0
Z15-16	1,750,588.25	1,366,549.55	809,765.72	941,453.35	703,940.17	408,145.22	5,980,442.2
Z16-17	1,836,950.63	1,530,292.89	1,110,347.32	930,829.19	848,526.87	304,749.17	6,561,696.1
Z17-18	1,758,176.01	1,413,306.16	1,220,273.32	946,439.89	825,194.75	348,909.02	6,512,299.2
PROMEDIO	1,850,014.83	1,428,163.15	1,044,355.09	945,460.78	807,917.59	357,218.79	6,433,130.2

Tabla 21: Caña molida por ingenios azucareros de El Salvador durante los últimos 5 períodos de Zafra.
Fuente: (CONSAA, 2018)

Para obtener la masa de agua de imbibición se procede a multiplicar la cantidad de toneladas de caña molida por el factor o relación encontrado previamente de 0.42 TM de agua de imbibición por TM de caña. Al sumar el promedio de las últimas 5 zafras de todos los ingenios se obtiene un total de 2,701,914.7 TM de agua de imbibición utilizada en el proceso de molienda. En la Tabla 22 se presentan los resultados para cada ingenio:

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	789,196.35	577,849.36	439,776.18	395,834.29	336,957.99	152,101.02	2,691,715.19
Z14-15	850,634.55	611,030.85	434,407.23	405,769.94	361,050.99	152,101.02	2,814,994.58
Z15-16	735,247.06	573,950.81	340,101.60	395,410.41	295,654.87	171,420.99	2,511,785.74
Z16-17	771,519.26	642,723.01	466,345.87	390,948.26	356,381.29	127,994.65	2,755,912.35
Z17-18	738,433.92	593,588.59	512,514.79	397,504.75	346,581.80	146,541.79	2,735,165.64
PROMEDIO	777,006.23	599,828.52	438,629.14	397,093.53	339,325.39	150,031.89	2,701,914.70

Tabla 22: Masa de agua de imbibición usada en proceso de molienda de caña de ingenios azucareros de El Salvador
Fuente: Elaboración propia

Para obtener la cantidad de masa de jugo primario disponible para la producción de azúcar, se resta la masa de jugo mixto de la masa de agua de imbibición que es equivalente

a la masa de jugos secundarios ya que son los que utilizan agua, es decir, los valores de la tabla 20 menos los valores de la tabla 22.

Al sumar los valores promedio de las últimas 5 zafas de cada ingenio, se obtiene un total de 4,000,266.9 TM de jugo primario que estaría disponible para la producción de azúcar al desviar todos los jugos secundarios a la producción de bioetanol. Los resultados obtenidos de este cálculo se presentan a continuación en la Tabla 23:

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	1,082,374.54	887,229.63	634,038.35	594,572.63	478,290.78	208,697.57	3,885,203.5
Z14-15	1,291,604.12	1,024,052.95	656,397.25	627,340.43	532,004.17	248,692.65	4,380,091.6
Z15-16	964,552.88	866,680.37	399,536.61	561,243.60	368,262.60	258,908.06	3,419,184.1
Z16-17	1,134,761.96	1,045,278.12	652,879.81	610,098.99	519,050.63	204,863.85	4,166,933.4
Z17-18	1,108,448.89	947,993.85	771,516.28	594,584.27	502,914.17	224,464.63	4,149,922.1
PROMEDIO	1,116,348.48	954,246.98	622,873.66	597,567.98	480,104.47	229,125.35	4,000,266.9

Tabla 23: Masa de jugo primario disponible para la producción de azúcar al restar los jugos secundarios.
Fuente: Elaboración propia

Para obtener la cantidad de azúcar que se produciría en este escenario, se procede a multiplicar la masa de jugo primario, el pol del jugo primario (mostrado en la Tabla 18 con un valor de 9.54) y la eficiencia de fabricación de azúcar utilizada anteriormente con un valor de 83%. Los resultados obtenidos del cálculo realizado se presentan a continuación en la Tabla 24:

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	85,704.58	70,252.62	50,204.42	47,079.45	37,872.02	16,525.09	307,638.18
Z14-15	102,271.80	81,086.56	51,974.85	49,674.07	42,125.15	19,691.98	346,824.41
Z15-16	76,375.23	68,625.49	31,636.11	44,440.39	29,159.77	20,500.86	270,737.84
Z16-17	89,852.72	82,767.21	51,696.33	48,308.86	41,099.47	16,221.53	329,946.12
Z17-18	87,769.20	75,064.05	61,090.20	47,080.37	39,821.75	17,773.56	328,599.13
PROMEDIO	88,394.71	75,559.18	49,320.38	47,316.63	38,015.63	18,142.60	316,749.14

Tabla 24: Azúcar producida por ingenios azucareros de El Salvador exclusivamente a partir de jugo primario
Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior es posible observar que en total al sumar los 6 ingenios se obtiene una producción promedio por zafa de azúcar de 316,479.14 TM. Ingenio Central Izalco tendría una producción de 88,394.71 TM, Ingenio El Ángel de 75,559.18 TM, Ingenio Chaparrastique de 49,320.38 TM, Ingenio La Cabaña de 47,316.63 TM, Ingenio Jiboa de 38,015.63 TM e Ingenio La Magdalena de 18,142.6 TM.

Al comparar estos resultados con los datos de Tabla 14, es posible identificar que se tiene una disminución significativa en la producción de azúcar al utilizar los jugos secundarios totalmente para la producción de bioetanol.

En la configuración actual de trabajo de los ingenios en los que se utiliza el jugo mixto o diluido se obtiene una producción total de azúcar promedio de 733,734.74 TM, lo que

implica que al lograr una producción de 316,479.14 TM con este nuevo esquema se cubre un 43% de la producción actual. Esta cantidad no es suficiente para cubrir la cuota de mercado local y mercado preferencial que juntas representan aproximadamente un 50% de la producción actual.

A pesar de esta situación que no sería posible dedicar completamente los jugos secundarios a la producción de bioetanol, se procederá a estimar el potencial que tienen si se implementara el escenario indicado.

Para ello se considera la relación que se producen 2,666 litros por cada 4.8 Tonelada de jugo secundario (Otero, 2009), al convertir esta relación se obtiene un valor de 0.555 m³ de bioetanol/Tonelada de jugo secundario.

Los resultados del cálculo de potencial de bioetanol a partir de jugos secundarios se presentan a continuación en la Tabla 25:

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	438,003.97	320,706.39	244,075.78	219,688.03	187,011.68	84,416.07	1,493,901.93
Z14-15	472,102.17	339,122.12	241,096.01	225,202.32	200,383.30	84,416.07	1,562,321.99
Z15-16	408,062.12	318,542.70	188,756.39	219,452.77	164,088.45	95,138.65	1,394,041.09
Z16-17	428,193.19	356,711.27	258,821.96	216,976.28	197,791.61	71,037.03	1,529,531.35
Z17-18	409,830.83	329,441.67	284,445.71	220,615.14	192,352.90	81,330.69	1,518,016.93
PROMEDIO	431,238.46	332,904.83	243,439.17	220,386.91	188,325.59	83,267.70	1,499,562.66

Tabla 25: Cálculo del potencial de bioetanol expresado en m³ a partir de jugos secundarios
Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior es posible observar que en total al sumar los 6 ingenios tienen un potencial de producción promedio de bioetanol de 1,499,562.66 m³. Ingenio Central Izalco tiene un potencial de producción de 431,238.46 m³, Ingenio El Ángel de 332,904.83 m³, Ingenio Chaparrastique de 243,439.17 m³, Ingenio La Cabaña de 220,386.91 m³, Ingenio Jiboa de 188,325.59 m³ e Ingenio La Magdalena de 83,267.70 m³.

Tal como se había indicado anteriormente el consumo anual de gasolina en el país es de 703,740.09 m³. De acuerdo al cálculo realizado el potencial de producción de bioetanol a partir de jugos secundarios brinda un valor de 1,499,562.66 m³, esto significa que representa un 213.08% del total de combustible demandado por el país, y que podría ser sustituido al realizar mezcla de bioetanol-gasolina. Por lo anterior con esta opción se cubre completamente la demanda de combustible del país para automotores, incluso sobrepasándola, generando un exceso de bioetanol, pero tal como se indicó previamente falta aproximadamente un 7% de producción de azúcar para cumplir con las cuotas de mercado local y preferencial.

Sabiendo que la demanda de alcohol como combustible para vehículos es de 703,740.09 m³ para estimar la cantidad de jugo secundario requerido, se procede a dividir el bioetanol

entre la relación 0.555 m³ de bioetanol/Tonelada de jugo secundario. Este cálculo brinda un valor de 1,268,000.17 TM de jugo secundario.

Tal como se mostró previamente el total disponible de agua de imbibición que equivale a jugo secundario con el área cultivada actual de caña de azúcar en el país es de 2,701,914.7. Al restar este dato al valor calculado de jugo secundario requerido para cubrir la demanda de bioetanol en el país, brinda un valor de 1,433,914.53 TM de jugo secundario que puede utilizarse para la producción de azúcar.

A esta cantidad de jugo secundario disponible de 1,433,914.53 TM al ser sumado con la cantidad de jugo primario que es de 4,000,266.93 TM, se obtiene un total de 5,434,181.46 TM de jugo mixto o diluido. La masa de jugo diluido al ser multiplicada por la eficiencia de fábrica (83%) y por el pol de jugo mixto usado anteriormente (13.19) se obtiene la cantidad de azúcar en este nuevo escenario que es de 549,917.83 TM. Este dato equivale al 81% de la producción actual de azúcar por período de zafra.

5.4 Análisis comparativo de escenarios de cálculo

En el país actualmente no existe una legislación que incentive la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar y dadas las limitantes técnicas de diseño de los vehículos automotores del país, de acuerdo a una investigación del Consejo Nacional de Energía (CNE) de El Salvador, la mezcla bioetanol-gasolina máxima teórica que podría manejarse es de 15%. La propuesta técnica es generar un proyecto que produzca etanol a partir de la caña de azúcar equivalente a un 15 a 20% de la demanda de gasolina actual sobre la base de la realidad nacional.

Considerando el 20% de la demanda actual de gasolina del país, la producción de etanol requerida es de 140,742 m³/año. Con esta información, la elección más idónea sería aquella que no represente un riesgo económico para los ingenios, al mantener los valores de producción del producto principal azúcar, utilizando un método probado con éxito en El Salvador o en otros países y generando un volumen de alcohol que esté cercano al volumen requerido para esta mezcla (80% gasolina/20% bioetanol) y que puede ser utilizada de acuerdo a las especificaciones de los motores del parque vehicular salvadoreño.

A partir del cálculo de los 3 escenarios propuestos del potencial de producción de bioetanol, se presenta el análisis comparativo de los mismos en la siguiente tabla:

Escenario	Alcohol (m ³)	Azúcar (TM)	% sustitución mezcla
1	71,473.47	733,734.74	10.16
2	230,695.04	366,867.37	32.78
3	703,740.09	549,917.83	100.00

Tabla 26: Comparativo de escenarios de cálculo de producción de bioetanol a partir de caña de azúcar
Fuente: Elaboración propia

El escenario 1 mantiene la producción actual de azúcar de los ingenios, ya que solo toma la melaza o miel final que es un subproducto que actualmente es generado y, en su mayoría, se guarda en tanques para luego ser exportada; luego, al restar la cuota ganadera, se enviaría como materia prima a la producción de bioetanol. Este escenario estima una producción promedio anual de 71,473.47 m³, con lo que, en condiciones óptimas, es posible lograr una mezcla de 10.16% de bioetanol con gasolina. Este es el mecanismo más común utilizado con éxito a nivel mundial; en El Salvador, ya se tiene un caso de éxito, dado que la destilería activa en el país utiliza este método para producir bio-alcohol.

El escenario 2 y 3 generan una reducción de la producción de azúcar del país, ya que hacen uso de la cuota de exportación y los jugos secundarios respectivamente, por esta razón los cálculos indican una mayor cantidad de bioetanol, con lo que se logra un % de mezcla de 32.78% y 100% respectivamente. Con estos métodos de producción de bioetanol, se tiene menos experiencia a nivel mundial y en el país no se tiene ningún antecedente.

Sobre la base de lo anterior, técnicamente se propone elegir un escenario combinado, implementando completamente el escenario 1, que sustituiría el 10.16% de la demanda de gasolina del país, equivalente a 71,473.47 m³ de bioetanol. El 10% restante, para completar el 20% propuesto, se obtendría del escenario 2, sustituyendo un porcentaje de la azúcar de exportación al mercado mundial (para complementar este cálculo se estimará la cantidad de jugo a la que equivale esta azúcar).

Los cálculos asociados a este nuevo planteamiento se presentan a continuación:

En el escenario 2 se había considerado una sustitución de toda la azúcar de exportación al mercado mundial que aproximadamente es del 50%. Al correr el modelo brindó un potencial de producción de bioetanol de 230,695.04 m³ que equivale al 32.78% de sustitución de la demanda de gasolina del país. En el escenario combinado, se requiere suplir un 10% de producción de bioetanol a partir de la azúcar de exportación para completar el 20% necesitado en la propuesta, ya que el escenario 1, que es el modelo a partir de melaza suple un 10.16%.

De acuerdo a los resultados obtenidos del modelo del escenario 2, se plantea la siguiente relación que permite obtener el porcentaje de azúcar de exportación al mercado mundial que se debe sustituir:

$$\% \text{ azúcar a sustituir} = \frac{50\% \text{ azúcar de exportación} * 10\% \text{ de producción bioetanol}}{32.78\% \text{ de producción de bioetanol}} = 15.3\%$$

El cálculo anterior indica que se necesita sustituir el 15.3% de la azúcar de exportación al mercado mundial para obtener un 10% de etanol. Es decir, al implementar este escenario combinado, la producción de azúcar disminuiría al 84.7% de la producción actual, que implica pasar de una producción promedio nacional de 733,734.74 TM de azúcar a 621,473.52 TM por período de zafra. Este cambio no afecta los compromisos y cuotas

asociadas al mercado local y preferencial, tal como se mostró anteriormente con los datos de cuotas actuales.

Al desarrollar este escenario combinado, podemos estimar la cantidad de azúcar que se sustituiría de la exportación del mercado mundial al aplicar este 15.13%, obteniendo un volumen promedio de 112,261.41 TM. Las cantidades por cada ingenio se muestran a continuación en la Tabla 27:

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	31,348.78	24,540.05	17,986.37	16,589.30	13,655.40	6,043.37	110,163.26
Z14-15	35,882.46	27,387.62	18,270.95	17,304.58	14,958.66	6,713.29	120,517.56
Z15-16	28,471.62	24,130.54	12,388.93	16,023.94	11,120.61	7,208.00	99,343.63
Z16-17	31,930.17	28,273.99	18,747.01	16,767.52	14,663.47	5,575.37	115,957.53
Z17-18	30,935.25	25,821.48	21,507.50	16,617.47	14,229.04	6,214.35	115,325.09
PROMEDIO	31,713.66	26,030.74	17,780.15	16,660.56	13725.43	6350.88	112,261.41

Tabla 27: Azúcar requerida de cuota de exportación a mercado mundial para producción de bioetanol

Fuente: Elaboración propia

Una vez teniendo la cantidad de azúcar que potencialmente puede ser sustituida para elaborar bioetanol, se procede a estimar la cantidad de hectáreas que estarían destinadas a este uso. Para esto, se utiliza la relación que una hectárea de caña produce 9.543 TM de azúcar, por lo que el cociente de la producción disponible para ser sustituida entre el factor 9.543 brindaría las hectáreas que podrían dedicarse a la producción de bio alcohol.

Al sumar el promedio de los 6 ingenios azucareros se obtiene que se necesitaría dedicar 11,764.24 hectáreas del cultivo de caña a la producción de alcohol en este escenario combinado. En total para la producción de azúcar se tiene un área cultivada promedio en los últimos 5 años de 79,143.03 hectáreas. La cantidad potencial de área sembrada que destinaría cada ingenio a este uso se muestra en la Tabla 28:

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	3,285.14	2,571.63	1,884.85	1,738.45	1,430.99	633.30	11,544.37
Z14-15	3,760.24	2,870.04	1,914.67	1,813.40	1,567.57	703.51	12,629.43
Z15-16	2,983.63	2,528.72	1,298.28	1,679.20	1,165.36	755.35	10,410.54
Z16-17	3,346.07	2,962.92	1,964.56	1,757.12	1,536.63	584.26	12,151.57
Z17-18	3,241.81	2,705.92	2,253.84	1,741.40	1,491.11	651.22	12,085.29
PROMEDIO	3,323.38	2,727.85	1,863.24	1,745.91	1,438.33	665.53	11,764.24

Tabla 28: Hectáreas de caña de azúcar relativas a la sustitución de azúcar de exportación con potencial para generar bioetanol

Fuente: Elaboración propia

Conociendo la cantidad de hectáreas de caña disponibles, se utiliza la relación que 1 hectárea de caña produce 1,585.2 galones de alcohol (Badía Serra, 2012) o su equivalente de

6.00062 m³. Para estimar el potencial de cada ingenio azucarero, se multiplica la cantidad de hectáreas por este factor, los resultados se presentan a continuación en la Tabla 29:

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	19,712.87	15,431.37	11,310.26	10,431.75	8,586.85	3,800.22	69,273.31
Z14-15	22,563.75	17,222.00	11,489.22	10,881.54	9,406.36	4,221.48	75,784.34
Z15-16	17,903.64	15,173.87	7,790.46	10,076.24	6,992.90	4,532.57	62,469.67
Z16-17	20,078.46	17,779.36	11,788.57	10,543.82	9,220.74	3,505.93	72,916.89
Z17-18	19,452.83	16,237.17	13,524.43	10,449.47	8,947.56	3,907.73	72,519.19
PROMEDIO	19,942.31	16,368.75	11,180.59	10,476.56	8,630.88	3,993.58	70,592.68

Tabla 29: Cálculo del potencial de bioetanol expresado en m³ a partir de sustitución del 15.3% cuota de azúcar de exportación hacia mercado mundial
Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior es posible observar que en total al sumar los 6 ingenios se obtendría una producción promedio de bioetanol al sustituir el 15.3% de azúcar de exportación al mercado mundial de 70,592.04 m³, que equivale al 10.03% de la demanda de gasolina del país. Ingenio Central Izalco tiene un potencial de producción de 19,942.31 m³, Ingenio El Ángel de 16,368.75 m³, Ingenio Chaparrastique de 11,180.59 m³, Ingenio La Cabaña de 10,476.56 m³, Ingenio Jiboa de 8,630.88 m³ e Ingenio La Magdalena de 3,993.58 m³.

En el escenario 3 desarrollado previamente se explicó el cálculo para transformar de azúcar a masa de jugo diluido o mixto y luego obtener el volumen de jugo mixto que esta cantidad de azúcar representa. Al aplicar la misma metodología se presentan a continuación los resultados en las tablas 30 y 31:

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	286,350.35	224,157.08	164,293.62	151,532.26	124,733.06	55,202.18	1,006,268.56
Z14-15	327,762.52	250,167.82	166,893.09	158,065.89	136,637.44	61,321.43	1,100,848.18
Z15-16	260,069.39	220,416.57	113,164.65	146,368.06	101,579.37	65,840.35	907,438.39
Z16-17	291,661.03	258,264.17	171,241.53	153,160.23	133,941.08	50,927.35	1,059,195.39
Z17-18	282,573.07	235,862.11	196,456.75	151,789.62	129,972.88	56,763.98	1,053,418.42
PROMEDIO	289,683.27	237,773.55	162,409.93	152,183.21	125,372.77	58,011.06	1,025,433.79

Tabla 30: Masa de jugo diluido expresada en TM, utilizada para la producción de azúcar en El Salvador
Fuente: Elaboración propia

En el escenario 1 se presentó que deben destinarse 246,460 TM de melaza para producir el 10.16% del bioetanol requerido. Para completar el 10% restante de la producción de bioetanol adicionalmente deben emplearse 1,025,433.79 TM de jugo diluido o mixto, tal como se muestra en la tabla anterior al sumar los datos de los 6 ingenios azucareros de El Salvador. La conversión a volumen se presenta a continuación:

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	271,930.00	212,868.74	156,019.95	143,901.23	118,451.62	52,422.25	955,593.78
Z14-15	311,256.69	237,569.60	158,488.50	150,105.83	129,756.50	58,233.34	1,045,410.46
Z15-16	246,972.53	209,316.59	107,465.78	138,997.10	96,463.93	62,524.68	86,1740.61
Z16-17	276,973.24	245,258.22	162,617.96	145,447.22	127,195.93	48,362.70	1,005,855.27
Z17-18	268,342.95	223,984.31	186,563.37	144,145.63	123,427.57	53,905.40	1,000,369.22
PROMEDIO	275,095.08	225,799.49	154,231.11	144,519.40	119,059.11	55,089.67	973,793.87

Tabla 31: Volumen de jugo diluido o mixto expresado en m³, utilizado para la producción de azúcar en El Salvador
Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior es posible observar que en este escenario combinado deben destinarse 973,793.87 m³ de jugo diluido o mixto, adicionales a la melaza que utiliza el escenario 1 de 169,329.18 m³ para generar la producción de bioetanol.

Al relacionar los resultados obtenidos en este escenario combinado, con el consumo anual de gasolina en el país, que es de 703,740.09 m³, se obtiene mediante la sustitución del 15.3% de azúcar de exportación al mercado mundial un 10.03% del total de combustible demandado por el país, al sumar con el 10.16% que se produce en el escenario 1 a partir de melaza, tendríamos un potencial total de 20.19% de bioetanol que podría ser sustituido al realizar mezcla de bioetanol-gasolina.

Para obtener los datos de la producción total de bioetanol en este escenario combinado se procede a sumar los valores reportados en la Tabla 13 que hace referencia a la producción a partir de melaza y la Tabla 28 que hace referencia a la producción a partir de la sustitución del 15.3% de la azúcar de exportación al mercado mundial.

La producción total promedio de bioetanol por período de zafra en este escenario combinado es de 142,066.15 m³, dato que se obtiene al sumar las producciones de los 6 ingenios. En la tabla 32 se observan las producciones por cada uno de los ingenios del país. Ingenio Central Izalco tiene un potencial de producción de 40,434.55 m³, Ingenio El Ángel de 31,882.99 m³, Ingenio Chaparrastique de 23,087.54 m³, Ingenio La Cabaña de 20,994.77 m³, Ingenio Jiboa de 17,547.87 m³ e Ingenio La Magdalena de 8,118.44 m³.

Período	CASSA	El Ángel	Chaparrastique	La Cabaña	Jiboa	La Magdalena	Total
Z13-14	40,341.60	30,560.90	23,043.63	20,100.68	16,701.59	7,769.17	138,517.57
Z14-15	46,174.51	33,677.07	23,415.74	21,800.26	18,594.90	8,358.71	152,021.17
Z15-16	37,842.04	30,739.15	17,952.23	21,213.33	15,467.66	9,486.80	132,701.21
Z16-17	39,617.80	33,842.83	24,889.97	20,895.89	18,649.79	7,133.52	145,029.79
Z17-18	38,196.79	30,594.98	26,136.14	20,963.69	18,325.39	7,844.02	142,061.00
PROMEDIO	40,434.55	31,882.99	23,087.54	20,994.77	17,547.87	8,118.44	142,066.15

Tabla 32: Cálculo del potencial de bioetanol (m³), obtenido de melaza y de la sustitución del 15.3% de cuota de azúcar de exportación hacia mercado mundial.

Fuente: Elaboración propia

A este nuevo escenario combinado que suministra un 20.19% de bioetanol para ser mezclado con gasolina se le procederá a calcular su beneficio ambiental y su factibilidad económica.

6 Impacto ambiental de las emisiones de CO₂ y O₂ en la producción de etanol combustible a partir de caña de azúcar.

El cultivo y procesamiento de caña de azúcar para la producción de bioetanol genera impactos al ambiente y salud en la fase agrícola, transporte, industrial, distribución de productos y uso final (González Trabanino, 2011). Para efectos de la presente sección se desarrollará exclusivamente el balance de CO₂ y O₂ asociado a la producción de bioetanol a partir de melaza, tomando como referencia el estudio realizado por el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cuba) y el Laboratorio de Termodinámica y Fluidos de la Universidad de Sao Paulo (Brasil), para aplicarlo a la realidad del sector cañero de El Salvador (Zumalacárregui, 2008).

6.1 Supuestos utilizados para los cálculos del balance de CO₂ y O₂.

Los supuestos utilizados para el análisis salvadoreño son los siguientes:

- a) El terreno se encuentra limpio de vegetación al inicio de la cosecha
- b) La producción diaria de alcohol es de 947.11 m³/día durante un período de 150 días. Este dato es obtenido al dividir la cantidad de alcohol total que es posible obtener a partir del escenario combinado por zafra de 142,066.15 m³ entre los días zafra promedio.
- c) La densidad del etanol a temperatura ambiente es igual a 789.5 Kg/m³, por lo que la producción de las destilerías potenciales del país sería de 747,267.95 Kg de etanol por día.
- d) La productividad en los últimos 7 períodos de producción de alcohol de la destilería funcionando en el país al solo utilizar melaza es de 9.22 L etanol/Ton caña, o su equivalente de 0.00922 m³/Ton caña. Según datos bibliográficos la productividad de caña integral es de 67 a 70 L etanol/Ton caña (Cardona, 2005).
- e) La composición aproximada de la caña en biomasa es la siguiente: 12.5% Sacarosa, 7% celulosa, 2.5%, Xilosa y 2% Lignina (Orama & Penichet, 2003).
- f) 1 tonelada de caña produce aproximadamente 30% de bagazo con una humedad de 50%. Por lo anterior se obtiene una relación promedio de 0.15 Ton bagazo seco/Ton caña (Hugot, 1986).
- g) El tiempo de vida de la caña hasta su corte es de un año (365 días). La combustión de bagazo y etanol es durante el período de producción, se tomará una zafra con duración de 150 días promedio de acuerdo a los datos de los 6 ingenios del país, tiempo en el cual se recoge y procesa la caña, y operan las calderas, dónde se quema el bagazo generado. Los cálculos asumen que el crecimiento de la caña se consolida en un año con un aumento lineal de la masa en función del tiempo hasta el día de su corte, por lo anterior durante los 365 días la caña estará retirando CO₂ del ambiente, fijando el carbono para su crecimiento y retornado O₂ al medio.

- h) El bagazo seco tiene contiene 50% de celulosa, 30% de hemicelulosas y 20% de lignina. En cuanto a su composición elemental aproximada es posible considerar valores de 48.3% de C, 6% de H, 43.3% de O y 2.4% de ceniza (Orama & Penichet, 2003).
- i) La raíz de la caña representa el 11% de la masa de la caña cortada y se asume su misma composición (Rodríguez & Lombardi, 2001).

6.2 Explicación de la rutina de cálculo

En el estudio que se ha tomado como referencia se presentan 7 etapas del proceso de transformación de la caña involucrada en la evaluación de los impactos ambientales derivados de las emisiones de CO₂ y O₂, sin embargo, en el estudio aplicado a El Salvador se limitará a 4 etapas, tal como la ilustración presentada a continuación, ya que se ha dejado fuera del análisis y de los cálculos la digestión de vinazas y la combustión del metano, debido a que no es parte del alcance del proyecto propuesto para el caso de estudio.

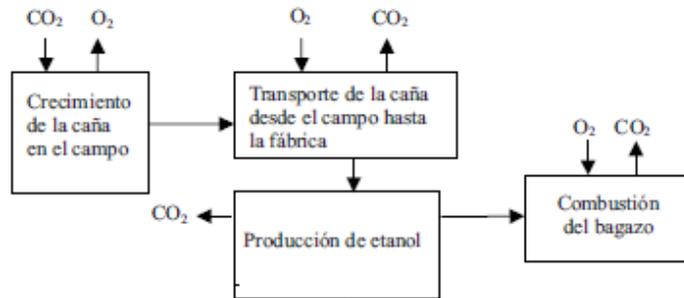


Ilustración 13: Etapas del proceso de transformación de caña involucradas en el cálculo de beneficio ambiental.
Fuente: (Zumalacárregui, 2008)

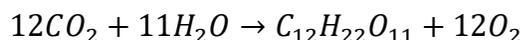
A continuación, se explicará brevemente el cálculo de cada una de las etapas:

6.2.1 Etapa de Crecimiento de la caña de azúcar para formación de biomasa

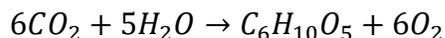
Tomando como base los supuestos presentados en la sección anterior, la producción de etanol en un período de zafra es de 142,066.15 m³, al considerar una operación promedio de todos los ingenios de 150 días/zafra, se obtiene un valor de producción de 947.10 m³/día. La productividad real que está teniendo El Salvador es de 9.22 L etanol/Ton caña al producir solamente con melaza, por lo que se obtiene que deben estar disponibles para el corte y procesamiento 27,136.7 Ton caña/día para la producción de etanol.

Considerando la información de composición de la caña presentada en la sección de supuestos, las cantidades de CO₂ a consumir del medio y de O₂ a devolver se calcularán a través de la estequiometría de las siguientes reacciones químicas:

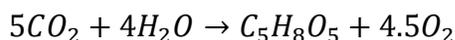
1.2.1 Sacarosa:



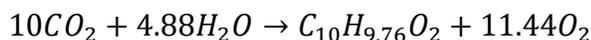
2.2.1 Celulosa



3.2.1 Xilosa



4.2.1 Lignina



El resumen de los cálculos se presenta a continuación en la Tabla 33, donde se han utilizado las relaciones estequiométricas de cada una de las reacciones anteriores para obtener el CO₂ retirado y el O₂ aportado, considerando un total de caña de 13,652.46 Ton Caña/día.

Componente	% componente	Relación Este- quiométrica CO ₂ /componente	Relación Estequi- ométrica O ₂ /compo- nente	CO ₂ retirado (Ton/d)	O ₂ aportado (Ton/d)
Sacarosa	12.50%	528/342	348/342	5,236.90	3,451.59
Celulosa	7.00%	264/162	192/162	3,095.59	2,251.34
Xilosa	2.50%	220/148	144/148	1008.46	660.08
Lignina	2.00%	440/161.8	366.1/161.8	1475.91	1228.03
Total				10,816.86	7,591.04

Tabla 33: Cálculo de cantidades de CO₂ retiradas y cantidades aportadas de O₂ para la formación de biomasa a partir de 13,652.46 Ton de caña/día.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 33 puede observarse que el proceso de formación de biomasa consume 10,816.86 Ton CO₂/día y entrega un total de 7,591.04 Ton O₂/día

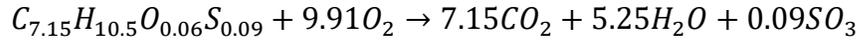
Como se había indicado en los supuestos, las raíces constituyen el 11% de masa de la caña y estas también se desarrollan durante el crecimiento. Por lo anterior, al incluir este 11% en los datos calculados se obtienen los valores de 12,006.72 Ton CO₂/día consumido y un total de 8,426.06 Ton O₂/día entregado.

6.2.2 Etapa de transporte de la caña de azúcar desde el campo a la fábrica

El consumo promedio de combustible para el transporte de la caña desde el campo a la fábrica es de 6 Kg de petróleo equivalente/Ton Caña (Orama & Penichet, 2003). De

acuerdo a la composición en peso del petróleo equivalente: 85.7 % de C, 10.5% de H, 0.92% de O y 2.8% en S, la fórmula empírica es la siguiente: $C_{7.15}H_{10.5}O_{0.06}S_{0.09}$.

Por lo tanto, la reacción química que representa la combustión del petróleo es la siguiente:



A partir de la ecuación anterior, al utilizar la estequiometria es posible identificar que existe un aporte de CO_2 al medio de 3.15 Kg de CO_2 /Kg de petróleo equivalente y un consumo de 3.17 Kg de O_2 /Kg de petróleo equivalente.

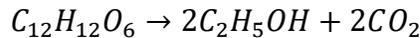
De acuerdo a los supuestos presentados se requiere procesar 27,136.7 Ton caña/día con lo anterior, el cálculo del aporte CO_2 y consumo de O_2 es el siguiente:

$$3.15 \frac{Kg CO_2}{Kg p.e} * 6 \frac{Kg p.e}{Ton Caña} * 27136.7 \frac{Ton Caña}{día} * \frac{1 Ton CO_2}{1000 Kg CO_2} = 512.88 Ton CO_2$$

$$3.17 \frac{Kg O_2}{Kg p.e} * 6 \frac{Kg p.e}{Ton Caña} * 27136.7 \frac{Ton Caña}{día} * \frac{1 Ton O_2}{1000 Kg O_2} = 516.14 Ton O_2$$

6.2.3 Etapa de Producción de Etanol

El etanol es un producto obtenido a partir de la fermentación de azúcares. Este proceso se representa por la siguiente reacción química:



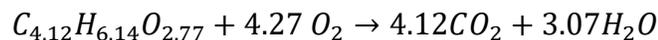
De acuerdo a la estequiometria de la reacción anterior, se obtienen 0.956 Kg de CO_2 por Kg de etanol producido. Al aplicar la siguiente relación a la producción diaria presentada en el apartado de supuestos equivalente a 747,267.95 Kg de etanol o 747.17 Ton de etanol, se obtiene una generación de 714.29 Ton CO_2 /día.

6.2.4 Etapa de Combustión de bagazo

El porcentaje de bagazo seco en la caña estimado en la sección de supuestos es del 15%, por lo anterior la cantidad de bagazo seco que se quemara considerando un total de 27,139.7 Ton Caña es 4,070.96 Ton bagazo/día.

De acuerdo a la composición del bagazo presentada en los supuestos, es posible deducir la fórmula empírica del bagazo, la cual es la siguiente: $C_{4.12}H_{6.14}O_{2.77}$

Por lo anterior la reacción de combustión del bagazo es la siguiente:



Al aplicar la estequiometria a la siguiente ecuación química, se obtienen las siguientes relaciones:

$$Kg CO_2 liberado/Kg bagazo quemado = 181.28/99.9 = 1.815$$

$$Kg O_2 consumido/Kg bagazo quemado = 136.64/99.9 = 1.368$$

Al tomar la cantidad de bagazo producida por día de 4,070.96 Ton bagazo/día, y aplicar las relaciones estequiométricas se obtiene un valor de 7,388.79 Ton liberadas de CO₂/día y 5,569.07 Ton consumidas de O₂/día.

6.2.5 Balance Neto de emisiones para calcular el impacto ambiental

Para realizar el balance neto y confirmar si todo el proceso tiene un beneficio ambiental, es decir, está removiendo CO₂ y aportando O₂, se efectuará la suma de los aportes y remociones de cada una de las etapas desarrolladas. Esto es posible al multiplicar la cantidad de toneladas de cada compuesto por la cantidad de días en el que está vigente cada etapa. El resumen del cálculo y los resultados se presentan a continuación:

Etapas de proceso	Ton CO2 aportadas/día	Ton O2 aportadas/día	días/año	Ton CO2 aportadas/año	Ton O2 aportadas/año
Formación de biomasa	(12,006.72)	8,426.06	365.00	(4,382,452.80)	3,075,511.90
Transporte de caña	512.88	(516.14)	150.00	76,932.0	(77,421.00)
Producción de etanol	714.29	0	150.00	107,143.50	0
Combustión de bagazo	7,388.79	(5,569.07)	150.00	1,108,318,.50	(835,360.50)
Total				(3,090,058.80)	2,162,730.40

Tabla 34: Balance neto de aportaciones de CO₂ y O₂ (valores negativos de aportaciones representan sustracciones).
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 34 es posible observar que para un procesamiento de 27,136.7 Ton Caña/día vinculados directamente a la producción de etanol realizada por los ingenios del país, se retiran 3,090,058.8 Ton CO₂/año y aporta 2,162,730.40 Ton O₂/año, por lo que este proceso al analizarlo de manera integral tiene un beneficio ambiental en términos de CO₂ y O₂ pues retira mayor cantidad de CO₂ de la que incorpora y también contribuye restituyendo O₂.

7 Implementación del proyecto de generación de bioetanol

7.1 Logística de distribución de bioetanol

Cada una de las plantas debe estar dimensionada en cada una de las etapas del proceso de obtención del etanol, acorde a la producción que las zonas en las cuales está dividido el territorio nacional. Las capacidades de tanques de melaza, tanques de jugo mixto, pre fermentadores, fermentadores, evaporadores, torres de destilación, etapa de deshidratación y tanques de producto terminado deben estar dimensionados para una producción que cubra una demanda de mezcla de combustible de un 20% de etanol con 80% de gasolina. Importante mencionar que los pre fermentadores y fermentadores deben ser acondicionados para trabajar con melazas y jugo mixto.

Se propone que las plantas de producción de bioetanol sean un complejo anexo a los ingenios en los cuales estarán ubicados, la propuesta se basa en los costos que de una planta autónoma en comparación a los costos del proyecto y operativos, que tuviera una planta anexa. El aprovechamiento del calor residual y la energía eléctrica generada por los ingenios, costos de transporte y almacenamiento de la materia prima se ven reducidos al considerar complejos anexos.

En El Salvador el tiempo promedio de zafra es alrededor de 150 días, con lo cual tenemos un 42% de factor de planta, período al cual se limitaría la producción de etanol, con la prolongación de la producción fuera del período de zafra, se incurrirían en mayores costos operativos.

Se proponen tres plantas anexas a los ingenios: Central de Izalco en Sonsonate (Zona Occidental), Chaparrastique en San Miguel (Zona Oriental) y La Cabaña en San Salvador (Zona Central). Los ingenios Central de Izalco y Chaparrastique son los mayores productores de materia prima en cada una de sus regiones, es por ello que se sugiere emplazar la planta de producción anexo a estos, El Ingenio La Magdalena será surtidor de jugos y melaza de Central Izalco y Jiboa de Chaparrastique; en el caso del ingenio La Cabaña, que es el único en El Salvador que actualmente posee una planta operativa de producción de etanol, se determina que la inversión sería menor que construir una nueva planta anexa al ingenio El Ángel. Se proyecta una renovación y ampliación de la planta del ingenio La Cabaña para que sea capaz de procesar melaza y jugos propios y del ingenio El Ángel.

La recepción de la materia prima se haría por medio de bombeo directo desde la línea final de cada proceso y por medio de pipas que la transportarían desde los ingenios surtidores, previo acuerdo de la cuota que cada uno de ellos debe aportar y mantener para surtir a las plantas de procesamiento de su zona.

Hablando específicamente de los jugos mixtos, estos son los jugos que hubieran sido utilizados para la producción de azúcar de exportación al mercado mundial, con los cuales se espera cubrir un 10% de la producción de etanol más el otro 10% que se obtendría con la cuota de la melaza para así cumplir con un 20% necesaria para la mezcla con gasolina.

Debido a los procesos de fermentación y operativos, durante el período de zafra todas las plantas estarán en producción, almacenaje y distribución; finalizada la zafra, todas las plantas quedarían operando el almacenaje y distribución del etanol hacia los centros de servicio, en los cuales se realizará la mezcla entre etanol/gasolina para la venta al consumidor final, siendo estos los responsables que la venta de combustibles sea en una mezcla garantizada de porcentaje de etanol y porcentaje de gasolina, ya sea de 88 octanos, conocida como gasolina regular, o 95 octanos conocida como gasolina especial o premium.

La razón por la cual se sugiere que la mezcla se realice en cada uno de los centros de servicio es que los gastos se verían incrementados principalmente en el rubro transporte y administrativo. Auditorías a cada centro de servicio, garantizarían que la calidad de los productos individuales y su mezcla se mantengan.

La demanda de combustibles está focalizada en su mayoría en la zona central, seguida por la zona oriental y por último la zona occidental; la producción de materia prima se escala de mayor a menor en la zona central, occidental y oriental, respectivamente (Tabla 35), es por ello que se proyecta que la distribución del producto terminado (etanol), debe ser en un corredor en dirección de occidente a oriente, como se muestra en la gráfica de ubicación y distribución (Ilustración 14). Este corredor se cubre desde dos vías estratégicas de distribución, utilizando las dos vías de comunicación terrestre más importantes del país, en la parte norte, la carretera Panamericana y en la parte sur, la carretera Litoral.

Zona geográfica	Central	Oriental	Occidental
Vehículo /Zona	637,689	240,823	176,211
Melaza m3/Zona	61,671.87	49,342.23	58,315.07
Jugos Mixtos m3/Zona	370,318.89	273,290.22	330,184.75
Producción de etanol requerido por planta	52,877.76	40,635.41	48,552.99

Tabla 35: Vehículos (placas P, M y A), producción de melaza, jugos mixtos y etanol por zona geográfica
Elaboración propia.

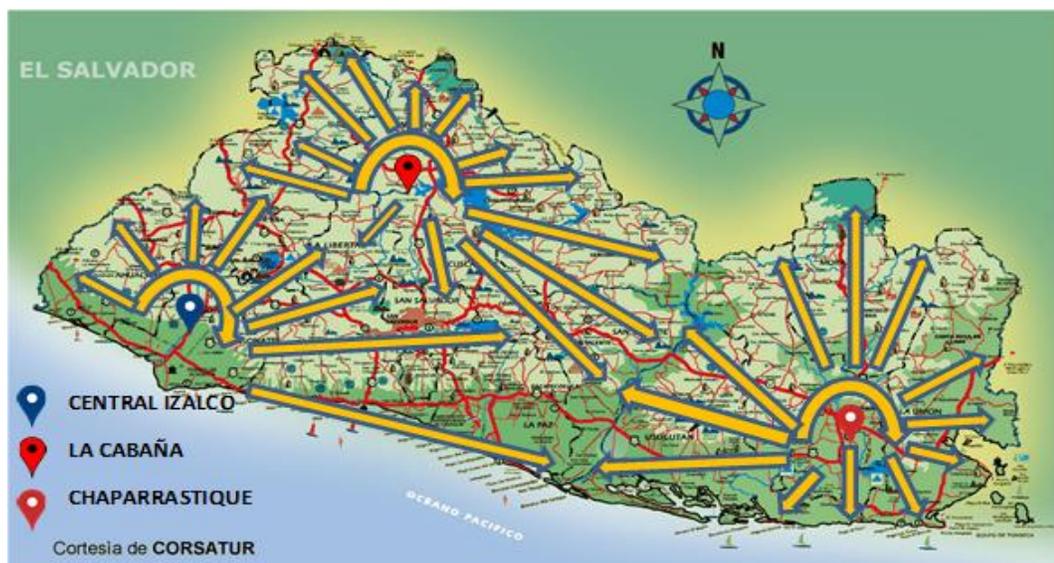


Ilustración 14: Ubicación de plantas y logística de distribución de bioetanol en El Salvador (propuesta)

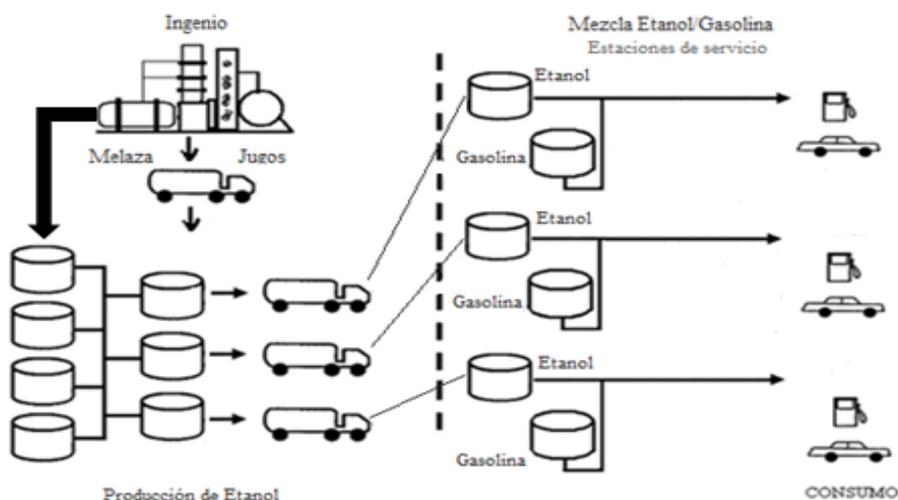


Ilustración 15: Esquemático de logística de distribución

7.2 Localización de las plantas de bioetanol

Planta Central, anexa al ingenio La Cabaña, el cual se ubica sobre el Km 39 ½ carretera Troncal del Norte, El Paisnal, en el departamento de San Salvador, actualmente el ingenio tiene una planta operativa con una capacidad de producción de etanol de 120 m³/día (estadísticas CNE, 2015), se propone que esta planta sea modernizada y ampliada en su capacidad para recibir jugos y melaza procedente del ingenio El Ángel, el cual se encuentra a una distancia en carretera, de 34.9 Km. La producción de esta planta tendría como prioridad de distribución en la zona central y apoyo para suministro a la zona centro oriental del país, la carretera Panamericana es la vía de comunicación terrestre que recorre toda la parte norte del territorio nacional, siendo esta vía el afluente principal para la distribución hacia la zona oriental, asimismo como el punto de distribución en la parte norte y central, considerando que el mayor consumo de combustible se concentra en la zona metropolitana en San Salvador.

La planta debe tener la capacidad de almacenamiento para una producción anual de melazas de 61,671.87 m³ y jugos mixtos de 370,318.89 m³, producidos por ambos ingenios de la zona central y debe tener una capacidad de producción de 52,877.76 m³ de etanol al año.



Ilustración 16: Panorámica Planta Central Anexa al Ingenio La Cabaña.

(Google Earth)

Planta Oriente, anexa al ingenio Chaparrastique, ubicado sobre carretera al Cuco Km. 144 ½ Cantón El Jute, en el departamento de San Miguel, en la zona oriental es el ingenio de mayor producción y cercano a la Carretera Litoral, que es la con conexión directa desde el centro hacia el oriente del país, se determina que es la mejor ubicación para la planta de producción de etanol ya que se encuentra en el centro del área de producción y es el punto de partida para la toda la zona en segundo lugar en consumo de combustibles, pero la tercera en producción de etanol, además de la producción propia de melazas y jugos, la planta será alimentada de la misma materia prima por el ingenio Jiboa, ubicado a 103 Km de distancia sobre la carretera Litoral.

La planta debe tener la capacidad de almacenamiento para una producción anual de Melazas de 49,342.23 m³ y jugos mixtos de 273,290.22 m³, producidos por ambos ingenios y debe tener una capacidad de producción de 40,635.41 m³ de etanol al año.



Ilustración 17: Panorámica Planta Oriente Anexa al Ingenio Chaparrastique.

(Google Earth)

Planta Occidente, anexa al Ingenio Central Izalco, ubicado sobre el Km. 62 ½, carretera a Sonsonate, Cantón Huiscoyolate, Izalco en el departamento de Sonsonate, además de la producción propia de melazas y jugos, la planta será alimentada de la misma materia prima por el ingenio La Magdalena ubicado a 57.2 Km de distancia por la carretera a Chalchuapa y CA 12S al Puerto de Acajutla; cercano a la Carretera Litoral, principal vía de comunicación de la región sur del país y conexión directa a la zona occidental, este centro de distribución, suministrará producto a las zonas occidental y sur-central del país.

La planta debe tener la capacidad de almacenamiento para una producción anual de melazas de 58,315.07 m³ y jugos mixtos de 330,184.75 m³, producidos por ambos ingenios y debe tener una capacidad de producción de 48,552.99 m³ de etanol al año.



Ilustración 18: Panorámica Planta Occidente Anexa al Ingenio Central de Izalco.

(Google Earth)

8 Análisis económico-financiero sobre la producción de bioetanol a partir de la caña de azúcar y sus sub-productos

El análisis económico-financiero tiene como objetivo determinar la factibilidad de incorporar la mezcla de etanol con gasolina (20/80), como combustible de uso regular para el actual parque vehicular salvadoreño, Al respecto, se simulan los flujos de efectivo de una planta procesadora de melaza y jugos integrada al proceso de producción de caña de azúcar de un ingenio. Se asume que la mezcla alcohol/gasolina posee las especificaciones técnicas para ser utilizada, sin que haya que realizar alguna modificación en el motor de los vehículos.

La variable dependiente del estudio es el precio de venta óptimo de la mezcla etanol/gasolina (20/80), que nos permita obtener los ingresos suficientes para cubrir al menos, costos de operación y mantenimiento, gastos administrativos, gastos financieros, impuestos y una tasa de rendimiento razonable sobre el capital aportado.

8.1 Supuestos económicos considerados en el análisis

El periodo de evaluación del proyecto es 15 años. La tasa de descuento utilizada es de 12.5%.

De acuerdo a la base de datos del Banco Mundial, el promedio de la inflación interanual en El Salvador en los últimos años ha sido de aproximadamente 3.5%.

8.1.1 Volumen de etanol y combustible para mezcla etanol/gasolina (20/80)

El volumen de venta de etanol utilizado es el estimado en la sección 6.4, que considera el uso de melaza y una porción de la azúcar asignada para la exportación del mercado mundial. Esto es 142,066.15 m³/año de etanol, lo que para una zafra de 150 días representa 947.11 m³/día.

Dado que la mezcla es 20/80, el volumen de combustible requerido para mezclar con el etanol es 568,264.64 m³, de los cuales, al tomar en cuenta el consumo histórico de gasolinas de los últimos años, el 58.28% es gasolina regular y 41.72% gasolina especial (Tabla 36).

AÑO	GASOLINA REGULAR (m3)	%	GASOLINA ESPECIAL (m3)	%
2011	368,890		188,533	
2012	404,330		213,391	
2013	392,308		224,755	
2014	400,145		261,378	
2015	428,348		329,229	
2016	430,453		408,813	
2017	446,591		429,028	
TOTAL	2,871,066	58.28%	2,055,128	41.72%

Tabla 36: Consumo de gasolinas regular y superior en El Salvador 2011-2017 (m³)

8.1.2 Costo de combustibles para realizar mezcla etanol/gasolina (20/80)

El costo de los combustibles que se utiliza para el análisis es el precio promedio de venta de los últimos 7 años (2011-2018), sin considerar los impuestos, tal como se muestra en la Tabla 37:

	PRECIO GASOLINA REGULAR			PRECIO GASOLINA ESPECIAL		
	CENTRO	OCCID	ORIENTE	CENTRO	OCCID	ORIENTE
	\$2.56	\$2.57	\$2.60	\$2.76	\$2.77	\$2.80
(-) Fondo de Conservación Vial	\$(0.2000)	\$(0.2000)	\$(0.2000)	\$(0.2000)	\$(0.2000)	\$(0.2000)
(-) Estabilización tarifas p/transp. colectivo	\$(0.1000)	\$(0.1000)	\$(0.1000)	\$(0.1000)	\$(0.1000)	\$(0.1000)
(-) F. Estabilización y Fomento Económico	\$(0.1580)	\$(0.1580)	\$(0.1580)	\$(0.1580)	\$(0.1580)	\$(0.1580)
(-) IVA	\$(0.3330)	\$(0.3338)	\$(0.3377)	\$(0.3593)	\$(0.3601)	\$(0.3640)
Precio promedio de venta sin impuestos	\$1.7703	\$1.7757	\$1.8018	\$1.9465	\$1.9519	\$1.9780

Tabla 37: Precios promedio de venta de gasolinas en El Salvador (US\$), sin impuestos (2011-2018)

Cabe resaltar la variabilidad de precios del mercado de combustibles, dadas las estrategias utilizadas por los países productores de petróleo. Para el período considerado, la gasolina regular tuvo un valor promedio máximo de US\$3.22 (2012) y uno mínimo de US\$1.79 (2016), que al quitar los impuestos equivalen a US\$2.34 y US\$1.10, respectivamente; y, para la gasolina especial un valor promedio máximo de \$3.46 (2012) y \$1.94 (2016), equivalentes a US\$2.55 y US\$1.23, respectivamente, al quitar los impuestos (Ver Gráfica 1: Consumo de combustible en El Salvador: 2011 – 2017).

8.1.3 Costos para etanol combustible

Para establecer los costos de producción del etanol, tomamos como referencia valores contenidos en estudios previos, dado que en El Salvador no existe una planta con las características requeridas. En ese sentido, el costo de fabricación del etanol anhidro de acuerdo a Forbes Energy es US\$0.23/litro de etanol (Asociados & Marín Pons, 2012).

Asimismo, de acuerdo a CEPAL (Horta Nogueira, 2006), los costos para el etanol combustible en Centroamérica son los siguientes:

País	Costo total US\$/litro
Costa Rica	0.306
El Salvador	0.323
Guatemala	0.321
Honduras	0.311
Nicaragua	0.248
Panamá	0.291
Costo promedio	0.300

Tabla 38: Costos de producción de etanol en Centroamérica

Para nuestro análisis, tomamos el costo determinado por CEPAL para El Salvador, es decir US\$ 0.292/litro de etanol producido, resultante de restar el 9.52% (que se explica en la sección 8.1.4 siguiente) al costo total de US\$0.323/litro de etanol.

8.1.4 Inversión y depreciación

Para estimar las inversiones y la depreciación de capital, tomamos como referencia valores utilizados en estudios relacionados, dada las limitantes de información sobre plantas de etanol en El Salvador. En este sentido, tomamos como referencia el porcentaje para la depreciación de capital establecida en la estructura de costos de la Tabla 39 siguiente (Quintero & Sánchez, 2005), el cual fu aplicado al costo total indicado en la sección 8.1.3:

Costos de producción por litro de etanol (US\$/Lt)		
Materia Prima	0.2075	72.35%
Fluidos de servicio	0.0233	8.12%
Otros costos de operación	0.0287	10.01%
Depreciación de capital	0.0273	9.52%
Total	0.2868	100.00%

Tabla 39: Costos de producción por litro de etanol (US\$)

Por lo tanto, al aplicar este porcentaje al costo de producción de etanol en El Salvador, tenemos que los costos de depreciación de capital son de US\$0.03075/litro (US\$0.323/litro x 9.52%).

En lo que respecta a la inversión inicial, se toma como referencia lo establecido en la Ley de Impuesto sobre la Renta, que establece que el período máximo para depreciar linealmente maquinarias es de 5 años, es decir 20%. De tal manera, que al multiplicar este período de cinco años por la depreciación anual de US\$1,795,043.71 (que se obtiene de multiplicar \$0.03075/litro por 142,066,160 litros), resulta el monto de inversión inicial considerado para el análisis de US\$21,839,698.47.

8.1.5 Gastos administrativos

Los gastos administrativos cubrirán la mano de obra directa de la planta: 1 jefe de planta (US\$1,200.00/mes), 2 operadores ((US\$650.00/mes), 1 supervisor (US\$800.00/mes) y 1 ayudante (US\$475.00/mes). Estimándose en \$59,343.00 anuales, incluyendo un factor de 1.31 para las prestaciones laborales.

8.1.6 Gastos servicios básicos: energía eléctrica, agua y comunicaciones

Los gastos de servicios básicos se estiman de acuerdo al tarifario salvadoreño: 0.169652 US\$/KWh, para el servicio de energía eléctrica y de 0.4 US\$/m³ para el agua potable. Asimismo, el servicio de internet tiene un costo de US\$50/mes. Se aplica un incremento de 5%, cada 5 años, para estos servicios.

8.1.7 Gastos de mantenimiento

Los gastos de mantenimiento, es un costo que varía ampliamente. De acuerdo al USDA's Ethanol Cost Of Production Survey (Shapouri & Gallagher, July 2005), este costo puede

variar de \$0.01 a \$0.07 por galón de etanol producido, por lo que tomaremos el promedio de estos valores, es decir \$0.04, equivalentes \$8.80/m³.

8.1.8 Gastos financieros

Se asume que el 50% de la inversión inicial será financiado a una tasa de 6.5% anual.

8.2 Crecimiento anual de cultivo de caña

Se toma en consideración la falta de disponibilidad de tierra para el cultivo de la caña de azúcar, de tal manera que durante el período de evaluación del proyecto se excluyen incrementos y por lo tanto el volumen de bioetanol fabricado.

8.3 Precios de venta óptimo de la mezcla etanol/gasolina (20/80)

Para determinar el precio de venta del bioetanol se simulan escenarios para diferentes tasas internas de retorno, de tal manera que se toma el valor que permita obtener valores aceptables para los inversionistas. Para nuestro caso, al aplicar una tasa de descuento del 12.5%

8.4 Resultados del Análisis económico-financiero

Al realizar el flujo de caja con los datos (Anexo 1) y supuestos antes comentados, se determinó un precio de venta (quitando impuestos) para la mezcla etanol/gasolina de US\$1.9441 por galón, el cual es competitivo con respecto a los precios de mercado promedio (antes de impuestos) de los últimos 5 años de los combustibles, en El Salvador. Este precio, nos permite obtener ingresos brutos de operación anuales de US\$303,773,423.94.

En lo que respecta a la inversión, para una operación de la requerida en el estudio es de US\$ 21,839,698.47, la cual se deprecia de acuerdo al período máximo establecido en la Ley del Impuesto sobre la Renta, es decir 5 años.

El período de recuperación de la inversión, de acuerdo al análisis es de 5.91 años

Aplicando una tasa de descuento de 12.5%, se obtiene una TIR del proyecto de 17.49% y un VAN de \$\$5,444,570.26.

Sobre la base de los resultados anteriores se concluye que el proyecto es rentable y atractivo para inversionistas.

9

Conclusiones

1. El potencial de producción de bioetanol a partir de melaza de exportación, es decir restando la cuota utilizada por el sector ganadero del país (20%), brinda un valor de 71,473.47 m³/año de alcohol, esto significa que representa un 10.16% del total de combustible demandado por el país, y que podría ser sustituido al realizar mezcla de bioetanol-gasolina. En este modelo no existe incremento del área total sembrada del cultivo, así como ninguna modificación en los valores de cuotas nacionales, preferenciales y saldos exportables al mercado mundial de azúcar.
2. El potencial de producción de bioetanol a partir de la sustitución del azúcar de exportación (50% de la producción total de azúcar actual), brinda un valor de 230,695.04 m³/año, esto significa que representa un 32.78% del total de combustible demandado por el país, y que podría ser sustituido al realizar mezcla de bioetanol-gasolina. La producción de azúcar de El Salvador en este modelo disminuye de 733,734.74 TM a 366,867.37 TM.
3. El potencial de producción de bioetanol a partir de jugos secundarios brinda un valor de 1,499,562.66 m³/año, esto significa que representa un 213.08% del total de combustible demandado por el país, y que podría ser sustituido al realizar mezcla de bioetanol-gasolina. Es decir que con esta opción se cubre completamente la demanda de combustible del país para automotores, incluso sobrepasándola, generando un exceso de bioetanol, pero en este modelo faltaría aproximadamente un 7% de producción de azúcar para cumplir con las cuotas de mercado local y preferencial.
4. La propuesta técnica de acuerdo a las condiciones actuales del país es generar un proyecto que produzca etanol a partir de la caña de azúcar equivalente a un 15 a 20% de la demanda de gasolina actual. Esto debido a que en el país actualmente no existe una legislación que incentive la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar y dadas las limitantes técnicas de diseño de los vehículos automotores del país. Considerando el 20% de la demanda actual de gasolina del país, la producción de etanol requerida es de 140,742 m³/año
5. De acuerdo al análisis y cálculos realizados se evidencia que la mejor opción de producción de bioetanol a partir de caña de azúcar para el país, es tener un escenario combinado de materias primas, el cual sería implementar completamente el escenario 1, que sustituiría el 10.16% de la demanda de gasolina del país, equivalente a 71,473.47 m³/año proveniente de melaza, y el 10.03% restante, se obtendría del escenario 2, sustituyendo un porcentaje de 15.3% de la azúcar de exportación al mercado mundial. Esto generaría un volumen total de 142,066.15 m³/año que equivale al 20.19% de mezcla.

6. Para la producción de 142,066.15 m³/año de etanol a partir de caña de azúcar, que se produciría para suplir la demanda de combustible para automóviles al mezclarse con gasolina en una proporción 20/80 respectivamente, se procedió a realizar el cálculo del beneficio ambiental en relación a la disminución de CO₂ y aportes de O₂, del cual se obtuvo el resultado que al considerar las etapas de formación de biomasa, transporte de caña, producción de etanol, combustión de bagazo, se retiran 3,090,058.8 Ton CO₂/año y aporta 2,162,730.40 Ton O₂/año, por lo que este proceso al analizarlo de manera integral tiene un beneficio ambiental en términos de CO₂ y O₂ pues retira mayor cantidad de CO₂ de la que incorpora y también contribuye restituyendo O₂. No obstante, en términos de impactos al ambiente y salud del cultivo de la caña de azúcar aún hay mucho por mejorar, por lo que sería de interés que un programa nacional de bioetanol considere también estos aspectos para un abordaje más amplio de la temática de impactos al ambiente y a la salud.
7. De acuerdo a la distribución geográfica de los 6 ingenios ubicados en el país, es adecuado tener 3 plantas de producción de bioetanol anexas a tres ingenios, distribuidas estratégicamente una en cada zona del país, esto con la finalidad reducir los costos de transporte de la materia prima y distribución del producto final, ya que los ingenios están localizados de igual manera en las tres zonas geográficas y se pretende comercializar en todo el país, hay infraestructura ya instalada y operando en el Ingenio La Cabaña, por tal motivo en este caso particular se sugiere se actualice e incremente su capacidad de producción reduciendo los costos de inversión de un proyecto nuevo, se cree conveniente que las nuevas instalación anexas deben ser en los Ingenios Central Izalco y Chaparrastique, debido a su capacidad de producción y ubicación de cada uno de ellos.
8. Al realizar el flujo de caja del proyecto para tener un centro de elaboración de mezcla y distribución en una proporción 20% etanol y 80% gasolina, se determinó un precio de venta para la mezcla etanol/gasolina de \$1.9361 por galón, se obtiene una TIR del proyecto de 17.51% y un VAN de \$5,486,980.47 (colocando una tasa de descuento de 12.5%). Asimismo, el período de recuperación de la inversión es de 5.90 años. Como punto positivo, este precio de venta es competitivo en el mercado salvadoreño. Sobre la base de los resultados anteriores se concluye que el proyecto es rentable.

10 Bibliografía

- (BUN-CA), B. U. (2002). *Manual sobre energía renovable. Fortalecimiento de la capacidad en energía renovable para América Central* (1a. Edición ed.). San José, Costa Rica: Biomass Users Network (BUN-CA).
- Asociados, M. P., & Marín Pons, A. (2012). *Estudio preliminar para producir etanol de la caña de azúcar en la República Dominicana*. Santo Domingo.
- Badía Serra, E. (2012). *Situación de las energías alternativas en El Salvador. Los casos del alcohol carburante y del biodiesel*. San Salvador, El Salvador.
- BP. (Junio de 2013). *BP Statistical Review of World Energy*. BP. Recuperado el Junio de 2018
- Cabaña, I. L. (4 de Agosto de 2018). *Ingenio La Cabaña*. Obtenido de <http://www.ilcabana.com/>
- Calero, C., & Briceño, C. (2003). Proyecto Nacional de Oxigenación de las Gasolinas. *Carta Trimestral*.
- Cardona, O. S. (2005). *Producción biotecnológica de alcohol carburante I: obtención a partir de diferentes materias primas*. Interciencia.
- CASSA. (5 de Agosto de 2018). *Compañía Azucarera Salvadoreña*. Obtenido de <http://www.grupocassa.com/en/grupo-cassa/>
- CNE / PROESA. (2016). *Sector Eléctrico de El Salvador*. Comisión Nacional de Energía / Organismo Promotor de Exportaciones e Inversiones de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- CNE. (2015). *Diagnóstico de la capacidad de infraestructura y logística para implementar el plan piloto para el consumo de etanol carburante en El Salvador*. Consejo Nacional de Energía.
- CNE. (2016). Consejo Nacional de Energía.
- CNE. (s.f.). *Hidrocarburos y biocombustible*.
- COEXPORT. (17 de Agosto de 2018). Obtenido de El Salvador Trade: <http://elsalvadortrade.com.sv/coexport/elangel.html>
- CONSAA. (2015). Consejo Salvadoreño de la Agroindustria Azucarera, San Salvador.
- CONSAA. (2015). *Informe de rendición de cuentas*. El Salvador: CONSAA.
- CONSAA. (2016). Consejo Salvadoreño de la Agroindustria Azucarera, San Salvador.
- CONSAA. (2018). Consejo Salvadoreño de la Agroindustria Azucarera, San Salvador.
- CONSAA. (10 de Junio de 2018). Obtenido de <http://www.consaa.gob.sv/>
- CONSAA. (10 de Junio de 2018). *Sitio Web Consejo salvadoreño de agroindustria azucarera*. Obtenido de <http://www.consaa.gob.sv/>

- CORSAIN. (5 de Agosto de 2018). *Corporación salvadoreña de inversiones*. Obtenido de <http://corsain.gob.sv>
- El País. (2004). Uso de etanol como carburante a partir de 2005. <http://www.construyendo.info>.
- EPA. (s.f.). United States Enviromental Protection Agency.
- Fernández, J., & Gutiérrez, F. (2015). *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*. España: Ediciones Mundi Prensa.
- González Trabanino, A. M. (2011). *Asistencia para la determinación de beneficios ambientales de la producción, agroindustrialización y uso de biocombustibles en El Salvador*. El Salvador: Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria (CENTA).
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (Séptima ed.). México: Mc Graw Hill.
- Horta Nogueira, L. A. (2006). *Costos y precios para etanol combustible en América Central*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Hugot, E. (1986). *Handbook of cane sugar Engineering*. USA: Elsevier.
- Ingenio La Cabaña. (4 de Agosto de 2018). *Ingenio La Cabaña*. Obtenido de <http://www.ilcabana.com/>
- Jacques, K. (2003). *The Alcohol Textbook*. Pennsylvania, USA: Nottingham University.
- MAG. (2011). *Recopilación de información sobre caña de azúcar Zafra 2010-2011*. El Salvador: Ministerio de agricultura y ganadería. Dirección general de economía agropecuaria.
- MINEC. (s.f.). Ministerio de Economía de El Salvador, San Salvador.
- Montoya R., M. I., Quintero S., J. A., Sánchez T., O. J., & Cardona A., C. A. (2005). Evaluación económica del proceso de obtención de alcohol carburante a partir de caña de azúcar y maíz. *Revista Universidad EAFIT*, 41(139), 76-87.
- Montoya, J. (2014). *Pirólisis rápida de biomasa*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- NRCAN. (s.f.). Natural Resources Canada. NRCAN.
- Ocampo, A. (Noviembre de 1998). Gasohol un combustible limpio para Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería*, 17.
- Orama, J. M., & Penichet, L. G. (2003). *Balance de CO2 en la obtención de energía renovable a partir de caña de azúcar*.
- Otero, M. (2009). *Producción de bioetanol a partir de mezclas de jugos-melazas de caña de azúcar*. Cuba: Instituto Cubano de investigaciones de los derivados de la caña de azúcar (ICIDCA).

- Pérez Ones, O., Rodríguez Ramos, P. A., Lombardi, G., & Corsini, R. (2004). *Alternativa tecnológica para la producción de alcohol combustible*. La Habana / Sao Pablo, Cuba / Brasil: CUJAE / EESC.
- Quintero, J. A., & Sánchez, O. (2005). *Evaluación económica del proceso de obtención de alcohol carburante a partir de la caña de azúcar*. Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- Rein, P. (2012). *Ingeniería de la caña de azúcar*. Alemania: Elbe Druckerei Wittenberg.
- Rodríguez, P. R., & Lombardi, G. (2001). *Viabilidad económica do projeto conceitual para execucao do projeto dimensional da MUAI*. Brasil: Universidad de Sao Paulo.
- Sauer, I. (2007). Biocombustibles en Brasil. Comercialización y logística. *Biocombustibles en Brasil. Realidades y perspectivas*.
- Serway, R. (2001). *Física*. México: Pearson Educación.
- Shapouri, H., & Gallagher, P. (July 2005). *USTDA's Ethanol Cost of Production Survey*. United States Department of Agriculture, Office of Energy Policy and New Uses.
- Singer, J. G. (1981). *Combustion Power Analysis*. Combustion Engineering, Inc.
- VMT. (s.f.). Viceministerio de Transporte de El Salvador, San Salvador.
- Zumalacárregui, L. (2008). *Cálculo del beneficio ambiental de la caña de azúcar para la producción de etanol combustible*. Colombia: Universidad del valle.

Anexo 1. Análisis Económico-Financiero

	1	2	3	4	5
Producción de Bioetanol					
Bioetanol a partir de Melaza	71,473.47	71,473.47	71,473.47	71,473.47	71,473.47
Bioetanol a partir de Azúcar de exportación	70,592.68	70,592.68	70,592.68	70,592.68	70,592.68
Total bioetanol anual	142,066.15	142,066.15	142,066.15	142,066.15	142,066.15
Gasolina a utilizar para mezcla (80/20)					
Zona Central	211,511.04	211,511.04	211,511.04	211,511.04	211,511.04
Zona Occidental	194,211.96	194,211.96	194,211.96	194,211.96	194,211.96
Zona Oriental	162,541.64	162,541.64	162,541.64	162,541.64	162,541.64
Total	568,264.64	568,264.64	568,264.64	568,264.64	568,264.64
Total bioetanol + gasolina	710,330.79	710,330.79	710,330.79	710,330.79	710,330.79
Precio de venta de mezcla etano/gasolina (\$/galón)	1.9441	1.9441	1.9441	1.9441	1.9441
Precio de venta de mezcla etano/gasolina (m ³ /galón)	427.65	427.65	427.65	427.65	427.65
Ingreso Bruto	303,773,423.94	303,773,423.94	303,773,423.94	303,773,423.94	303,773,423.94
Costo de producción (Costo de ventas)					
Bioetanol a partir de Melaza	41,519,426.76	41,519,426.76	41,519,426.76	41,519,426.76	41,519,426.76
Bioetanol a partir de Azúcar de exportación	20,631,006.10	20,631,006.10	20,631,006.10	20,631,006.10	20,631,006.10
Gasolina regular (58.28%)					
Centro	48,003,233.60	48,003,233.60	48,003,233.60	48,003,233.60	48,003,233.60
Occidente	44,212,526.20	44,212,526.20	44,212,526.20	44,212,526.20	44,212,526.20
Oriente	37,546,624.18	37,546,624.18	37,546,624.18	37,546,624.18	37,546,624.18
Gasolina especial (41.72%)					
Centro	37,780,560.65	37,780,560.65	37,780,560.65	37,780,560.65	37,780,560.65
Occidente	34,787,470.56	34,787,470.56	34,787,470.56	34,787,470.56	34,787,470.56
Oriente	29,503,955.29	29,503,955.29	29,503,955.29	29,503,955.29	29,503,955.29
Costo de ventas etanol + combustibles	293,984,803.33	293,984,803.33	293,984,803.33	293,984,803.33	293,984,803.33
Transporte de bioetanol a CDR	3,750,022.11	3,750,022.11	3,750,022.11	3,750,022.11	3,750,022.11
Mantenimiento	1,250,007.46	1,250,007.46	1,250,007.46	1,250,007.46	1,275,007.61
Costo de Ventas Total	298,984,832.89	298,984,832.89	298,984,832.89	298,984,832.89	299,009,833.04
Gastos Administrativos					
Mano de Obra	59,343.00	59,343.00	59,343.00	59,343.00	62,310.15
Servicios básicos - Agua / Electricidad	551.16	551.16	551.16	551.16	578.72
Comunicaciones (Internet)	600.00	600.00	600.00	600.00	630.00
Gastos Administrativos totales	1,310,501.62	5,060,523.73	5,060,523.73	5,060,523.73	5,088,548.59
EBITDA	3,478,089.42	-271,932.69	-271,932.69	-271,932.69	-324,957.69
Gastos financieros	101,398.60	101,398.60	101,398.60	101,398.60	101,398.60
Depreciaciones	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71
Utilidad antes de impuestos	6,581,676.67	2,831,654.57	2,831,654.57	2,831,654.57	2,803,629.71
Impuesto sobre la renta (30%)	1,974,503.00	849,496.37	849,496.37	849,496.37	841,088.91
Utilidad Neta	4,607,173.67	1,982,158.20	1,982,158.20	1,982,158.20	1,962,540.80
(+) Depreciaciones	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71
Flujo Libre	6,402,217.38	3,777,201.91	3,777,201.91	3,777,201.91	3,757,584.51
Flujo de Efectivo	-15,437,481.09	-11,660,279.18	-7,883,077.27	-4,105,875.37	-348,290.86

	6	7	8	9	10
Producción de Bioetanol					
Bioetanol a partir de Melaza	71,473.47	71,473.47	71,473.47	71,473.47	71,473.47
Bioetanol a partir de Azúcar de exportación	70,592.68	70,592.68	70,592.68	70,592.68	70,592.68
Total bioetanol anual	142,066.15	142,066.15	142,066.15	142,066.15	142,066.15
Gasolina a utilizar para mezcla (80/20)					
Zona Central	211,511.04	211,511.04	211,511.04	211,511.04	211,511.04
Zona Occidental	194,211.96	194,211.96	194,211.96	194,211.96	194,211.96
Zona Oriental	162,541.64	162,541.64	162,541.64	162,541.64	162,541.64
Total	568,264.64	568,264.64	568,264.64	568,264.64	568,264.64
Total bioetanol + gasolina	710,330.79	710,330.79	710,330.79	710,330.79	710,330.79
Precio de venta de mezcla etano/gasolina (\$/galón)	1.9441	1.9441	1.9441	1.9441	1.9441
Precio de venta de mezcla etano/gasolina (m ³ /galón)	427.65	427.65	427.65	427.65	427.65
Ingreso Bruto	303,773,423.94	303,773,423.94	303,773,423.94	303,773,423.94	303,773,423.94
Costo de producción (Costo de ventas)					
Bioetanol a partir de Melaza	41,519,426.76	41,519,426.76	41,519,426.76	41,519,426.76	41,519,426.76
Bioetanol a partir de Azúcar de exportación	20,631,006.10	20,631,006.10	20,631,006.10	20,631,006.10	20,631,006.10
Gasolina regular (58.28%)	62,150,432.85	62,150,432.85	62,150,432.85	62,150,432.85	62,150,432.85
Centro	48,003,233.60	48,003,233.60	48,003,233.60	48,003,233.60	48,003,233.60
Occidente	44,212,526.20	44,212,526.20	44,212,526.20	44,212,526.20	44,212,526.20
Oriente	37,546,624.18	37,546,624.18	37,546,624.18	37,546,624.18	37,546,624.18
Gasolina especial (41.72%)	129,762,383.98	129,762,383.98	129,762,383.98	129,762,383.98	129,762,383.98
Centro	37,780,560.65	37,780,560.65	37,780,560.65	37,780,560.65	37,780,560.65
Occidente	34,787,470.56	34,787,470.56	34,787,470.56	34,787,470.56	34,787,470.56
Oriente	29,503,955.29	29,503,955.29	29,503,955.29	29,503,955.29	29,503,955.29
Costo de ventas etanol + combustibles	293,984,803.33	293,984,803.33	293,984,803.33	293,984,803.33	293,984,803.33
Transporte de bioetanol a CDR	3,750,022.11	3,750,022.11	3,750,022.11	3,750,022.11	3,750,022.11
Mantenimiento	1,275,007.61	1,275,007.61	1,275,007.61	1,275,007.61	1,300,507.76
Costo de Ventas Total	299,009,833.04	299,009,833.04	299,009,833.04	299,009,833.04	299,035,333.20
Gastos Administrativos					
Mano de Obra	62,310.15	62,310.15	62,310.15	62,310.15	65,425.66
Servicios básicos - Agua / Electricidad	578.72	578.72	578.72	578.72	607.66
Comunicaciones (Internet)	630.00	630.00	630.00	630.00	661.50
Gastos Administrativos totales	5,088,548.59	5,088,548.59	5,088,548.59	5,088,548.59	5,117,224.68
EBITDA	-324,957.69	-324,957.69	-324,957.69	-324,957.69	-379,133.94
Gastos financieros	101,398.60	101,398.60	101,398.60	101,398.60	101,398.60
Depreciaciones	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71
Utilidad antes de impuestos	2,803,629.71	2,803,629.71	2,803,629.71	2,803,629.71	2,774,953.61
Impuesto sobre la renta (30%)	841,088.91	841,088.91	841,088.91	841,088.91	832,486.08
Utilidad Neta	1,962,540.80	1,962,540.80	1,962,540.80	1,962,540.80	1,942,467.53
(+) Depreciaciones	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71
Flujo Libre	3,757,584.51	3,757,584.51	3,757,584.51	3,757,584.51	3,737,511.24
Flujo de Efectivo	3,409,293.64	7,166,878.15	10,924,462.66	14,682,047.16	18,419,558.40

	11	12	13	14	15
Producción de Bioetanol					
Bioetanol a partir de Melaza	71,473.47	71,473.47	71,473.47	71,473.47	71,473.47
Bioetanol a partir de Azúcar de exportación	70,592.68	70,592.68	70,592.68	70,592.68	70,592.68
Total bioetanol anual	142,066.15	142,066.15	142,066.15	142,066.15	142,066.15
Gasolina a utilizar para mezcla (80/20)					
Zona Central	211,511.04	211,511.04	211,511.04	211,511.04	211,511.04
Zona Occidental	194,211.96	194,211.96	194,211.96	194,211.96	194,211.96
Zona Oriental	162,541.64	162,541.64	162,541.64	162,541.64	162,541.64
Total	568,264.64	568,264.64	568,264.64	568,264.64	568,264.64
Total bioetanol + gasolina	710,330.79	710,330.79	710,330.79	710,330.79	710,330.79
Precio de venta de mezcla etano/gasolina (\$/galón)	1.9441	1.9441	1.9441	1.9441	1.9441
Precio de venta de mezcla etano/gasolina (m ³ /galón)	427.65	427.65	427.65	427.65	427.65
Ingreso Bruto	303,773,423.94	303,773,423.94	303,773,423.94	303,773,423.94	303,773,423.94
Costo de producción (Costo de ventas)					
Bioetanol a partir de Melaza	41,519,426.76	41,519,426.76	41,519,426.76	41,519,426.76	41,519,426.76
Bioetanol a partir de Azúcar de exportación	20,631,006.10	20,631,006.10	20,631,006.10	20,631,006.10	20,631,006.10
	62,150,432.85	62,150,432.85	62,150,432.85	62,150,432.85	62,150,432.85
Gasolina regular (58.28%)					
Centro	48,003,233.60	48,003,233.60	48,003,233.60	48,003,233.60	48,003,233.60
Occidente	44,212,526.20	44,212,526.20	44,212,526.20	44,212,526.20	44,212,526.20
Oriente	37,546,624.18	37,546,624.18	37,546,624.18	37,546,624.18	37,546,624.18
	129,762,383.98	129,762,383.98	129,762,383.98	129,762,383.98	129,762,383.98
Gasolina especial (41.72%)					
Centro	37,780,560.65	37,780,560.65	37,780,560.65	37,780,560.65	37,780,560.65
Occidente	34,787,470.56	34,787,470.56	34,787,470.56	34,787,470.56	34,787,470.56
Oriente	29,503,955.29	29,503,955.29	29,503,955.29	29,503,955.29	29,503,955.29
	102,071,986.50	102,071,986.50	102,071,986.50	102,071,986.50	102,071,986.50
Costo de ventas etanol + combustibles	293,984,803.33	293,984,803.33	293,984,803.33	293,984,803.33	293,984,803.33
Transporte de bioetanol a CDR	3,750,022.11	3,750,022.11	3,750,022.11	3,750,022.11	3,750,022.11
Mantenimiento	1,300,507.76	1,300,507.76	1,300,507.76	1,300,507.76	1,326,517.91
Costo de Ventas Total	299,035,333.20	299,035,333.20	299,035,333.20	299,035,333.20	299,061,343.35
Gastos Administrativos					
Mano de Obra	65,425.66	65,425.66	65,425.66	65,425.66	68,696.94
Servicios básicos - Agua / Electricidad	607.66	607.66	607.66	607.66	638.04
Comunicaciones (Internet)	661.50	661.50	661.50	661.50	694.58
Gastos Administrativos totales	5,117,224.68	5,117,224.68	5,117,224.68	5,117,224.68	5,146,569.58
EBITDA	-379,133.94	-379,133.94	-379,133.94	-379,133.94	-434,488.99
Gastos financieros	101,398.60	101,398.60	101,398.60	101,398.60	101,398.60
Depreciaciones	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71
Utilidad antes de impuestos	2,774,953.61	2,774,953.61	2,774,953.61	2,774,953.61	2,745,608.72
Impuesto sobre la renta (30%)	832,486.08	832,486.08	832,486.08	832,486.08	823,682.62
Utilidad Neta	1,942,467.53	1,942,467.53	1,942,467.53	1,942,467.53	1,921,926.10
(+) Depreciaciones	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71	1,795,043.71
Flujo Libre	3,737,511.24	3,737,511.24	3,737,511.24	3,737,511.24	3,716,969.81
Flujo de Efectivo	22,157,069.64	25,894,580.88	29,632,092.12	33,369,603.36	37,086,573.17