

Datos generales

Universidad Modelo

Equipo SAF Nacional

Integrantes:

- Martínez Aguilar Juan Alejandro

- Kimberly Valeria Becerra Escalona

- Gúzman Uc María Jimena

Ingeniería en Energía y Petróleo

Cuarto Semestre

Asignatura: Proyectos IV

Profesora: Dra. Patricia Contreras Pool

Idea del proyecto

La industria aeronáutica enfrenta el desafío urgente de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, siendo responsable del 2.5% de las emisiones globales de CO₂. Una de las soluciones más prometedoras es el uso de combustibles sostenibles para aviación (SAF), entre ellos aquellos derivados de biomasa como la caña de azúcar. Este proyecto se enfoca en evaluar el impacto ambiental del SAF obtenido a partir de bioetanol de caña mediante el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), con el objetivo de identificar los puntos críticos del proceso y proponer estrategias para mejorar su sostenibilidad. A través de la aplicación de las normas ISO 14040 y 14044, se busca implementar un ACV completo desde el cultivo de la caña de azúcar hasta la producción final de bioturbosina por la vía Alcohol-to-Jet (ATJ). Se empleará software GREET especializado para modelar procesos, realizar balances de masa y energía, y capturar datos confiables (primarios y secundarios) que permitan una evaluación precisa de Combustibles Sostenibles de Aviación. Este estudio proporcionará indicadores ambientales clave como huella de carbono, uso de agua y consumo energético, lo que permitirá comparar esta alternativa con los combustibles fósiles tradicionales. Los resultados contribuirán a validar la viabilidad ambiental del SAF y reforzar el papel de la caña de azúcar como una materia prima estratégica en la transición energética del sector aéreo en México.

Objetivos:

- **General:** Evaluar el impacto ambiental del combustible sostenible para aviación (SAF) producido a partir de caña de azúcar mediante un análisis del ciclo de vida (ACV), con el fin de identificar los principales puntos críticos del proceso y proponer estrategias para mejorar su sostenibilidad.

Específicos

- Conocer y aplicar los principios metodológicos del análisis del ciclo de vida, con énfasis en las normativas ISO 14040 y 14044, para su correcta implementación en el estudio del SAF.
- Revisar y seleccionar el software especializado para análisis del ciclo de vida, así como familiarizarse con su uso para la captura de datos, modelado de procesos y presentación de resultados.
- Desarrollar el análisis de inventario del ciclo de vida (LCI) para cada una de las etapas del proceso: cultivo de caña de azúcar, producción de etanol y producción de SAF.
- Realizar balances de masa y energía por etapa del proceso, integrando datos primarios y secundarios según disponibilidad y confiabilidad.
- Actualizar y validar las simulaciones de procesos existentes, asegurando coherencia entre los flujos de materiales y energía con la información empleada en el ACV.
- Capturar la información recopilada en el software seleccionado, integrando todas las etapas del proceso en un modelo coherente y representativo.
- Interpretar los resultados del ACV mediante indicadores ambientales clave (huella de carbono, uso de agua, energía, etc.) y elaborar una presentación técnica de los hallazgos del estudio.

Diseño del Proyecto

El proyecto se dividió en tres áreas principales:

1. Cultivo, a cargo de Kimberly Becerra.
2. Producción de Etanol, a cargo de Jimena Guzmán.
3. Producción de SAF, a cargo de Alejandro Martínez.

Cada área desarrolló cinco actividades principales:

1. Recolección de datos

Se recopiló información necesaria para el ACV, incluyendo datos ambientales, energéticos y de proceso provenientes de artículos científicos y bases de datos.

Cultivo: datos de rendimiento agrícola, residuos, agua, energía, fertilizantes, pesticidas y emisiones.

Producción de Etanol: información sobre fermentación, consumo de agua, vapor, electricidad y emisiones de CO₂.

Producción de SAF: datos del proceso Alcohol-to-Jet, consumos energéticos, hidrógeno, catalizadores y emisiones.

2. Balances de masa y energía

Se realizaron cálculos para determinar entradas y salidas de materia y energía en cada etapa del proceso.

Cultivo: cálculo de agua, fertilizantes, diésel, biomasa y emisiones.

Producción de Etanol: balances de caña, agua, levadura, vapor, etanol, vinaza y energía.

Producción de SAF: análisis de flujos de etanol, hidrógeno, energía térmica y producción de SAF.

3. Actualización y validación de simulaciones

Se revisaron y ajustaron modelos de simulación para reflejar condiciones reales y validar resultados.

Cultivo: actualización de rendimientos y factores de emisión.

Producción de Etanol: ajuste de fermentación, destilación y consumo energético.

Producción de SAF: validación de modelos ATJ y balances de carbono.

4. Captura de información en el software

Los datos validados se introdujeron en software de ACV como SimaPro u OpenLCA.

Cultivo: registro de fertilizantes, agua, diésel y emisiones.

Producción de Etanol: integración de molienda, fermentación, destilación y tratamiento de residuos.

Producción de SAF: captura de procesos ATJ, consumos energéticos y emisiones.

5. Interpretación de resultados del ACV

Se analizaron los impactos ambientales y oportunidades de mejora.

Cultivo: evaluación de emisiones, acidificación y uso de agua.

Producción de Etanol: análisis del consumo energético y manejo de residuos.

Producción de SAF: comparación de la huella ambiental del SAF con combustibles fósiles y reducción de emisiones de GEI.

Características

- El proyecto utiliza la caña de azúcar como materia prima para la obtención de bioetanol, el cual es el principal insumo del proceso ATJ (Alcohol-to-Jet) para producir bioturbosina.
- Para el análisis y simulación se emplea el software Greet, además de balances de masa y energía para evaluar flujos y eficiencias del proceso.
- El trabajo es desarrollado por estudiantes de Ingeniería en Energía y Petróleo, encargados de la investigación, simulaciones, análisis de datos y elaboración de reportes.
- El proyecto se basa en normativas y criterios como CORSIA e ISO 14040/44 para validar el análisis de ciclo de vida del SAF.
- Para su realización se consideran actividades como la revisión de información sobre ACV y SAF ATJ, definición de límites del sistema y tamaño de muestra, análisis de inventario, actualización de simulaciones, realización de balances de masa y energía, captura de información en el software y presentación de resultados.

Pruebas

Inicialmente se trabajaba con el software OpenLCA; sin embargo, debido a algunos cambios en el CICY, se optó por utilizar GREET model.

Con el objetivo de comprender mejor el funcionamiento de este software, se elaboró una presentación en la que se explica de manera breve

el manual proporcionado por la Dra. Nancy.

Además, previamente se realizó una encuesta que servirá para identificar los datos que se utilizarán como entradas y los resultados esperados como salidas del análisis. Dicha encuesta fue revisada y corregida por la Dra. Nancy.

ETAPA 1: Cultivo de Caña de Azúcar

1. Preparación y Manejo del Suelo

1) ¿Qué tipo de preparación del suelo se realiza?

- ☐ Labranza convencional
- ☐ Labranza mínima
- ☐ Siembra directa
- ☐ Otro: _____

2) ¿Qué maquinaria se utiliza para la preparación del suelo?

(Especifique equipos: arado, rastra, subsolador, tractor, etc.)

3) ¿Se utiliza mano de obra humana en esta etapa (antes del cultivo o durante la recolección)?

- ☐ Sí
- ☐ No

4) Si respondió "Sí", indique lo siguiente:

- Número aproximado de personas involucradas: _____
- Tiempo aproximado de trabajo: _____
 - ☐ Por hectárea
 - ☐ Por jornada
 - ☐ Por semana
 - ☐ Por ciclo agrícola

4. Energía y Equipos de Bombeo

19) ¿Se utilizan bombas para el riego?

- ☐ Sí
- ☐ No

20) Tipo de bomba utilizada:

21) Potencia de la bomba:

_____ kW

22) Consumo energético promedio:

_____ kWh por ciclo o temporada

23) Fuente de energía utilizada:

- ☐ Red eléctrica
- ☐ Combustible fósil
- ☐ Energía renovable
- ☐ Otra: _____

5. Control de Plagas y Fumigación

Sección Final – Impactos Ambientales y Gestión

67) ¿Se monitorean emisiones al aire en el ingenio?

- ☐ Sí
- ☐ No

68) ¿Se monitorean descargas de agua residual?

- ☐ Sí
- ☐ No

69) ¿El ingenio cuenta con certificaciones ambientales?

- ☐ Sí (especifique): _____
- ☐ No

70) ¿Se generan residuos peligrosos?

- ☐ Sí
- ☐ No
- ☐ No sabe

71) ¿Cómo se gestionan los residuos sólidos generados en el ingenio?

- ☐ Reciclaje

INGENIO TALA S.A. DE C.V.

PARAMETROS PROMEDIO DE JUGO Y MIELES

PRODUCTO	JUGO CLARO	MIEL B	MIEL FINAL
PARAMETRO			
BRIX	15.00	82.00	90.00
POL	12.30	36.90	27.00
PUREZA	82.00	45.00	30.00
Ph	6.795	-	5.522
REDUCTORES	0.536	-	11.635

Se comparan tres productos: jugo claro, miel B y miel final, utilizando indicadores como °Brix, Pol, pureza, pH y azúcares reductores.

- brix indica la concentración de sólidos solubles, principalmente azúcares. Se observa que aumenta desde el jugo claro hasta la miel final debido a la concentración del proceso.
- Pol representa el contenido de sacarosa presente en cada producto.
- Pureza relaciona la cantidad de sacarosa respecto a los sólidos totales; disminuye en las mieles debido a la presencia de más impurezas y compuestos no azucarados.
- pH muestra el nivel de acidez de los productos.
- Reductores indica la cantidad de azúcares reductores presentes, los cuales aumentan en la miel final.

Estos parámetros son importantes para controlar la eficiencia del proceso y evaluar la calidad de los productos intermedios en la producción de azúcar y bioetanol.

Datos de producción de melaza

La tabla muestra datos de producción de melaza, alcohol y SAF del Ingenio Tala. Incluye información sobre molienda, capacidad de producción, generación de vinaza y rendimientos de conversión de caña y miel hacia alcohol.

También presenta una estimación total de litros de alcohol y SAF producidos durante toda la zafra, permitiendo evaluar la eficiencia y el potencial energético del proceso.

DATOS		
Ingenio Tala		
Molienda	13,500	tcd
	563	tch
Días de molienda	150	días
Capacidad de molienda zafra	2,025,000	ton/zafra
Producción de miel final @ 85° Bx	43	kg/tc
	581	ton por día
Producción de alcohol	230	lpt miel final
	134	klpd de alcohol
Generación de vinaza @ 60°Bx	2.77	ton/kl alcohol
	370	ton / día
	15.41	ton / hr
Producción de alcohol por ton de caña		
Base miel final	9.88	l/tc
Base miel B	17.10	l/tc
Base jugo de caña	80.00	l/tc
Producción de mieles por ton de caña		
miel final	43.00	kg/tc
miel B	61.00	kg/tc
% Rendimiento de azúcar en caña		
miel final a alcohol	11.50	%
miel B a alcohol	9.20	%
Rendimiento de caña / hectarea		
Promedio Mexico	72.08	tch
Promedio zona valles	82.00	tch
Hectareas / productor		
Promedio Mexico	4.00	hectareas

Moliendo toda la zafra
20,027,250 Litros de Alcohol
10,414,170 Litros de SAF
29,754.77 L SAF/ día

La imagen muestra la capacidad de producción del Ingenio Tala para generar alcohol y SAF a partir de miel final y miel B. Se presentan

datos de molienda, producción diaria de alcohol y rendimiento de azúcar por tonelada de caña. Además, se comparan distintos escenarios de producción y se estima la cantidad total de SAF que puede producirse durante la zafra. Estos datos permiten evaluar la eficiencia y el potencial productivo del ingenio para la obtención de biocombustibles.

Capacidad de producción de Ing Ta

Molienda	13,500	ton caña/día		Rendimiento	
Usando solo miel final	133,380	l/día alcohol	1,553	ton azucar/día	115.0 kg azucar/ton caña
Usando toda la miel B	230,850	l/día alcohol	1,242	ton azucar/día	92.0 kg azucar/ton caña
Usando jugo de la caña	1,080,000	l/día alcohol	0	ton azucar/día	97,470
sin producir azucar					
Estimado de superficie	24,695	ha			
Caña molida por zafra	2,025,000	ton caña			
Nº de productores	6,174	Productores			

Capacidad de producción de Ing Taretan

Molienda	1,800	ton caña/día			
Usando solo miel final	17,784	l/día alcohol	207	ton azucar/día	
Usando toda la miel B	30,780	l/día alcohol	166	ton azucar/día	12,996 L/día miel B en Taretan
Usando jugo de la caña	144,000	l/día alcohol	0	ton azucar/día	
sin producir azucar					

Capacidad de producción de Ing Tala & Taretan

Molienda	15,300	ton caña/día		Rendimiento	
Usando solo miel final	151,164	l/día alcohol	1,760	ton azucar/día	115.0 kg azucar/ton caña
Usando toda la miel B	261,630	l/día alcohol	1,408	ton azucar/día	92.0 kg azucar/ton caña
Usando jugo de la caña	1,224,000	l/día alcohol	0	ton azucar/día	261,630 L/día de Alcohol
sin producir azucar					Cual tipo de alcohol, a que concentración
					146,513 L/día de SAF
					21,976,920 Producción de la zafra 150 días
					62,791 Producción al día de SAF

39244500
112127.1429
163518.75

Precios de producción de azúcar

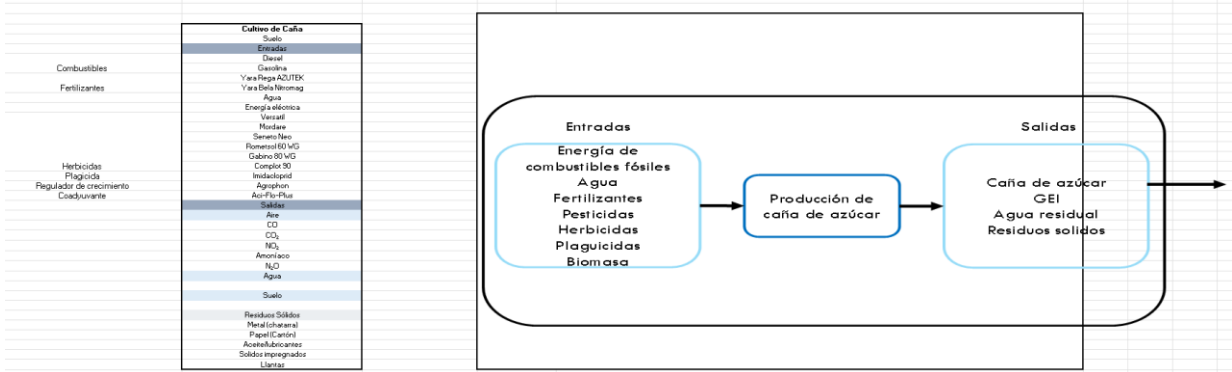
Datos preliminares importantes sobre el impacto económicos de al menos esta etapa.

Costos de producción agrícola					
	Categoría	Variable	Unidad	Dato	Observaciones
	Tierra	Renta o amortización	\$/ha-año	20,000	Si es arrendada o propia
	Preparación de suelo	Labranza	\$/ha	6,000	Incluye maquinaria
	Siembra	Semilla + mano de obra	\$/ha	25,000	Plantación inicial
	Fertilizantes	N, P, K	\$/ha	12,000	Según análisis suelo
	Agroquímicos	Herbicidas, pesticidas	\$/ha	3,000	
	Riego	Agua + energía	\$/ha	3,000	Si aplica
	Mano de obra	Jornales	\$/ha	5,000	Corte manual o
	Cosecha	Corte mecanizado	\$/t caña	120	
	Transporte	Campo → ingenio	\$/t caña	100	Distancia clave
	Rendimiento agrícola	t caña/ha	Variable crítica	84	Impacta costo
	Costo total	Ton de caña		1100	
Costos Industriales – Ingenio (Producción de Azúcar/Jugo)					
	Categoría	Variable	Unidad	Dato	Observaciones
	Recepción y molienda	OPEX	\$/t caña	N/A	Energía + mantenimiento
	Clarificación	Reactivos	\$/t jugo	N/A	Cal, floculantes
	Evaporación	Vapor	\$/t vapor	N/A	Energía térmica
	Mano de obra	Planta	\$/año	\$1,000 x ton de azúcar	Operativa
	Mantenimiento	% CAPEX	%	\$367 x ton de	3–5% típico
	Energía eléctrica	kWh/t caña	\$/kWh	\$2.43	Si no es
	Gestión ambiental	Tratamiento efluentes	\$/t	\$11.4/ m3 de agua tratada	Costo fijo
	Melasa	USD/Ton de caña	\$/ton de caña	\$80-120/tonde caña	Se vende

Costo de producción de SAF	Categoría	Variable	Unidad	Dato	Observaciones
	Producción de etanol	\$/L	Desde melaza o jugo		
	Deshidratación	Energía	\$/L		
	Catalizadores	\$/año	Reposición		
	Hidrogenación	Hidrógeno	\$/kg H ₂		Variable crítica
	Energía térmica	Vapor	\$/GJ		
	Electricidad	kWh/L SAF			
	Mantenimiento	% CAPEX			
	Operación	Personal	\$/año		

Resultados

Inventario de cultivo



Entradas				Plaguicidas			
Fertilizantes				Regulador de crecimiento			
Yara Rega AZUTEK®				Imidacloprid 350 SC			
Nitrógeno	Unidad (%)	13		Imidacloprid	Unidad (%)	23.83	Presentación
Oxido fosfórico (P ₂ O ₅)	4			Colormulantes	70.11		L
Oxido de potasio (K ₂ O)	25						
Azufre (S)	10						
Boro (B)	0.08						
Zinc (Zn)	0.08						
Yara Beta Nitromag				Agrophon			
Nitrógeno	Unidad (%)	27		Ethephon	Unidad (%)	21.65	Presentación
Oxido de calcio (CaO)	6			Inertes	78.35		L
Oxido de magnesio (MgO)	4						
Herbicidas							
Versatil				Ací-Flo-Plus			
Ametrina	Unidad (%)	25.50	Presentación	Ácido Orto-fosfórico	Unidad (%)	38	Presentación
2-4 D	16.40		L	1-2- Propanodiol	18		L
Solventes y emulsificantes	58.10		L	Noni fenol	7		L
Mordare				Dimetilpolisioxano	0.4		L
Pendimetalin	Unidad (%)	45.05	Presentación	Ácido 2-(4-(dimetilamino)etil)zadobenzóico	0.1		L
Solventes y emulsificantes	54.95		kg	Metanol	0.1		L
Seneto Neo				Agua	36		L
Diuron	Unidad (%)	53.5	Presentación				
Hexazinona	6.7		kg				
Inertes: Dispersante, humectante, estabilizante, relleno	33.8		kg				
Rometsol 30 WG							
Metsulfuron metil	Unidad (%)	60	Presentación				
Inertes: Dispersantes, portadores, antiespumantes	40		kg				
Gabino 80 WG							
Diuron	Unidad (%)	80	Presentación				
Surfactantes, humectante, estabilizador, excipiente, desintegrante, impurezas y compuestos relacionados	20		kg				
Complot 90							
Atrazina	Unidad (%)	90	Presentación				
Inertes: Surfactantes y diluyentes	10		kg				
Plaguicidas							
Imidacloprid 350 SC							
Imidacloprid	Unidad (%)	23.83	Presentación				
Colormulantes	70.11		L				
Regulador de crecimiento							
Agrophon							
Ethephon	Unidad (%)	21.65	Presentación				
Inertes	78.35		L				

Imágenes del excel que contiene el análisis de inventario del campo

La etapa de producción agrícola de la biomasa se ha modelado mediante un Inventario de Ciclo de Vida (ICV) detallado. El sistema comprende un análisis, donde se identifican como entradas principales los recursos energéticos, hídricos y agroquímicos.

El inventario especifica los químicos de fertilizantes nitrogenados, fosfatados y potásicos, permitiendo parámetros de óxido nitroso (N_2O) en campo. Asimismo, se integran datos de herbicidas, plaguicidas y reguladores de crecimiento, asegurando que las cargas ambientales asociadas sean contabilizadas en el balance de emisiones de la bioturbosina producida.

- Desglose de Insumos (Inventario Detallado)

El inventario se divide en categorías para el cálculo de impactos ambientales:

- **Fertilizantes (Nutrientes)** - Se detallan productos específicos como Yara Rega AZUTEK y Yara Bela Nitromag. La composición de Nitrógeno (N), Fósforo (P_2O_5) y Potasio (K_2O) es vital para GREET, ya que las emisiones de óxido nitroso (N_2O) dependen directamente del contenido de nitrógeno aplicado.
- **Herbicidas y Plaguicidas** - Se enlistan principios como Atrazina (Complot 90), Diuron (Gabino 80), e Imidacloprid. Estos datos permiten evaluar la toxicidad terrestre y acuática dentro del ACV.
- **Reguladores de Crecimiento** - El uso de Agrophon (Ethephon) indica un manejo para optimizar la maduración de la caña y el contenido de sacarosa.

Inventario de Campo

Labores agrícolas	
Labor	Consumo
Preparación del terreno	26 L/ha (diesel)
Siembra	12 L/ha (diesel)
Fertilización	10 L/ha (diesel)
Riego	2190 kWh/ha (electricidad)
Cosecha	32 L/ha (diesel)
	9.1 L/ha (gasolina)
Labor	Consumo de agua m ³ /ha
Riego	5040
Productos Químicos en las labores agrícolas	
Producto	Consumo
Fertilizantes	
NPK (Triple 16)	800 kg/ha.ciclo
Urea	325 kg/ha.ciclo
DAP	120 kg/ha.ciclo
Sulfato de amonio	150 kg/ha.ciclo
Fertilizantes foliares	10 L/ha.ciclo
Compost (RCC)	20000 kg/ha.ciclo
Herbicidas	15 L/ha.ciclo

La tabla cuantifica la intensidad energética del cultivo. En GREET se necesita saber cuánta energía se quema para aplicarlos.

- **Consumo de Combustibles (Diesel y Gasolina):** Se detalla el gasto por hectárea para cada labor (Preparación, Siembra, Fertilización, Cosecha).
- **Intensidad Hídrica y Eléctrica:** El dato de riego es masivo de 5040 m³/ha de agua y 2190 kWh/ha de electricidad lo que permite calcular el impacto del bombeo de agua.
- **Dosificación de Fertilizantes (Masa):** Multiplicando estos kg por los porcentajes de N del inventario de cultivo, se obtendrá el Nitrógeno total aplicado, dato indispensable para GREET.
- **Uso de Materia Orgánica:** En ACV, esto representa una reducción en la necesidad de fertilizantes sintéticos, mejorando el perfil de sostenibilidad de la bioturbosina.

Este incluye la demanda específica de combustibles fósiles (diésel y gasolina) desglosada por labores mecánicas, permitiendo el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a la combustión interna. Y reporta un balance entre fertilizantes de síntesis química (Urea, DAP, NPK) y enmiendas orgánicas (Compost), lo cual es fundamental para el modelado de nutrientes y las emisiones de N_2O , permitiendo establecer estrategias de mitigación en la huella de carbono total de la bioturbosina.

Ingenio azucarero

Etapas del proceso						
	Molienda					
	Concepto	Flujo (t/h)				
	Caña	600	1 ton			
	Agua de	27-30	0.0475 ton de agua/ton de caña	agua añadida para obtención del jugo		
	Agua de la caña		0.8315 ton de agua/ton de caña			
	Jugo extraído	99-100	0.166 ton de jugo/ton de caña			
	Bagazo	162	0.27 ton de bagazo/ton de caña			
	Pérdidas	0.600	0.001 ton de pérdidas/ton de caña			
	Contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina	2.05 pol % bagazo				
	Recuperación de condensados de jugo.					
	Clarificación					
	Concepto	Flujo (t/h)				
	Jugo mixto	616.45	1.027 ton de jugo mixto/ton de caña			
	Cal añadida	1.15 kg/ton de caña	1.15 kg/ton de caña			
	Agua extra para la etapa de clarificación		0.111 ton de agua/ton de caña	La diferencia entre jugo mixto y jugo clarificado indica la adición implícita de aproximadamente 0.111 ton de agua por tonelada de caña en la etapa de clarificación, atribuible a operaciones de lavado, dilución y recirculación del proceso		
	Jugo clarificado	683.13	1.139 ton de jugo clarificado/ton de caña			
	Cachaza	25.79	0.430 ton de cachaza/ton de caña			
	Evaporación					
	Concepto	Flujo (t/h)	Brix			
	Jugo claro	683.13	14.4	1.139 ton de jugo claro/ton de caña de azúcar		
	Jarabe concentrado	163.13	60.3	0.272 ton de jarabe concentrado/ton de caña de azúcar		
	Agua evaporada	520		azúcar		
	Cristalización y Centrifugación					
	Concepto	Flujo (t/h)	Pureza (%)			
	Masa cocida A	158.64	83.67	0.264 ton de masa cocida A/ton de caña de azúcar		
	Azúcar A	74.13	39.68	0.124 ton de azúcar A/ton de caña de azúcar	El rendimiento teórico calculado a partir de sólidos es de 0.132 ton/ton caña (Jarabe concentrado: 0.272 ton/ton caña Brix del jarabe: 60.3% = 0.603, se multiplican y dan 0.164 ton de sólidos en jarabe, 0.164-(0.040+0.80brix melaza) nos da 0.132), mientras que el rendimiento real del ingenio es de 0.124 ton/ton caña, lo que refleja pérdidas y eficiencias propias de la operación industrial."	
	Miel A	88.24	66	0.147 ton de Miel A/ton de caña		
	Masa cocida B	89.98	66.14	0.150 ton de masa cocida B/ton de caña		
	Azúcar B	34.58	32	0.058 Azúcar B/ton de caña		
	Miel B	49.49	44	0.083 ton de Miel B/ton de caña		
	Masa cocida C	46.41	49.12	0.077 ton de masa cocida C/ton de caña		
	Azúcar C	12.92	62	0.0215 ton de azúcar C/ton de caña		
	Melaza	29.83 kg de miel / ton de caña, en el ingenio comentaron de 38-42 kg de miel/ton de caña	28.95	0.040 ton de melaza/ton de caña de azúcar		

Se ha integrado un balance de materia detallado por etapas para cuantificar la eficiencia de conversión de la caña de azúcar en coproductos. Este inventario captura los coeficientes técnicos de salida por tonelada de caña procesada, incluyendo el rendimiento de bagazo para generación de bioenergía y la producción de melaza como precursor directo en la ruta de fermentación para bioturbosina. Los datos permiten un modelado preciso en GREET de las cargas ambientales distribuidas mediante asignación por masa o contenido energético entre el azúcar y los subproductos del ingenio.

- **Eficiencia de la Molienda:** Por cada tonelada de caña que entra, se generan 0.27 toneladas de bagazo. Este dato es fundamental porque el bagazo suele usarse como biomasa para generar el vapor y la electricidad que mueven el ingenio.
- **Gestión de Residuos y Subproductos:** El proceso identifica la salida de cachaza (0.43 ton/ton caña) en la clarificación y de melaza (0.04 ton/ton caña) al final de la cristalización. La melaza es un flujo crítico para ti, ya que es la materia prima directa para la fermentación de bioturbosina.
- **Intensidad de Insumos Químicos:** Se registra el uso de cal añadida (1.15 kg por tonelada de caña) para la purificación del jugo. En un ACV, la producción de esta cal también suma emisiones a la huella total.
- **Concentración de Azúcares:** El sistema monitorea los grados Brix (porcentaje de sólidos disueltos), que pasan de 14.4 en el jugo claro a 60.3 en el jarabe concentrado tras la evaporación. Esto indica cuánta energía térmica (vapor) se requiere para eliminar el agua sobrante.
- **Rendimiento de Cristalización:** Se detalla la obtención de azúcar en tres niveles (A, B y C) con diferentes purezas, siendo el Azúcar A el producto principal con un rendimiento de 0.124 toneladas por tonelada de caña procesada.

Balances del Ingenio azucarero

Balance de vapor

Diagrama de flujo del ingenio marrón indica 285

Balance de vapor considerando 600 toneladas de caña por hora

Concepto	Flujo (t/h)	Presión (bar)	Temp (°C)	Entalpía (kJ/kg)	
Vapor generado	280-290	64 y 20	430 y 350		0.475 ton de vapor/ton de caña
Vapor a evaporadores	280	1.4	128		0.467 ton vapor a evaporadores/ton de caña
Vapor a tachos	150		115		0.250 ton de vapor a tachos/ton de caña
Vapor a calentadores	60	0.5	108		0.100 ton de vapor a calentadores/ton de caña
Condensado retornado	260	N/A	37		0.433 ton de vapor retornado/ton de caña

Balance de caldera

Concepto	Valor	
Bagazo quemado (t/h)	No se cuenta con una medición de peso del combustible, se utiliza una estimación basada en el diseño de la caldera con una relación de 1.92 toneladas de vapor generadas por cada tonelada de bagazo quemado.	162 ton de bagazo/h
Poder calorífico (kJ/kg) (Máximo y mínimo)	No se cuenta con un resultado de laboratorio del bagazo de ITALA, sin embargo, se tienen valores de diseño tomados del performance de la caldera. Poder calorífico superior 2,023 kcal/kg. Poder calorífico inferior 1,558 kcal/kg.	
Energía generada (kJ/h)	intercambiado a la salida de la caldera es de 134.63 Gcal/h	25 MW/h, 10 MW se usan en el proceso
Eficiencia (%)	Los datos del performance son: Eficiencia P.C.S - 66.1%, Eficiencia P.C.S - 66.1%, Eficiencia P.C.I - 86.3%	
Carbón generado	Basado en estimaciones y datos teóricos del bagazo, se tiene una generación de 1,867 kg/h de carbón y cenizas	0.0031 ton de carbón/ton caña
Vapor producido (t/h)	La caldera tiene una capacidad de diseño de 191 ton/h. En operación continua llega a mantener una producción de 183 ton/h .	

Balance eléctrico

Concepto	kW	kWh/día
Generación turbina	En la planta eléctrica #1 se tiene una potencia instalada de tres unidades de 3,000 kW cada una. En la planta eléctrica #2 se tiene una unidad de 25,000 kW.	Durante la presente zafra se tiene un promedio de 570,070 kWh/día , llegando a generar un máximo de 649,838 kWh/día
Consumo molienda	No se tienen las cargas claramente segregadas	
Consumo bombas	No se tienen las cargas claramente segregadas	
Consumo centrifugas	No se tienen las cargas claramente segregadas	
Consumo total	En conjunto Ingenio Tala tiene picos de demanda de hasta	En conjunto Ingenio Tala tiene picos de demanda de hasta 10,500 kW
Consumo de energía		123,753 kWh

- **Balance de Vapor.** Este apartado detalla el flujo térmico a través de etapas del ingenio, considerando una generación base de 0.475 toneladas de vapor por cada tonelada de caña procesada. Se cuantifican las presiones, temperaturas y entalpías específicas para la alimentación de evaporadores, tachos y calentadores, así como la tasa de recuperación de condensados. Este balance es esencial para determinar la eficiencia termodinámica del sistema y la suficiencia energética de la planta.
- **Balance de Caldera.** El balance de caldera habla de la capacidad de transformación de biomasa (bagazo) en energía térmica, registrando una producción promedio de 183 t/h de vapor bajo condiciones de operación continua. El análisis integra parámetros de diseño críticos como el Poder Calorífico Inferior (PCI) y Superior (PCS) del bagazo, la eficiencia térmica del equipo y la generación de subproductos sólidos (carbón y ceniza). Estos datos permiten validar la sostenibilidad del proceso mediante el aprovechamiento de residuos lignocelulósicos para la autogeneración.
- **Balance Eléctrico.** En esta sección se caracteriza la infraestructura de potencia y la demanda energética de la planta, destacando una generación promedio de 570,070 kWh/día durante el periodo de zafra. Se registra la potencia instalada de las unidades de generación y se identifica la demanda industrial, alcanzando hasta 10,500 kW. Este balance facilita la evaluación de la autonomía eléctrica del ingenio y la identificación de excedentes potenciales para su gestión energética.

Tabla resumen

Indicador	Fórmula	Valor
Rendimiento azúcar (%)	$(\text{Azúcar} / \text{Caña}) \times 100$	11.2-11.5
% Bagazo	$(\text{Bagazo} / \text{Caña}) \times 100$	28-30
Extracción (%)	$(\text{Sacarosa extraída} / \text{Sacarosa en caña}) \times 100$	95-95.5
Eficiencia térmica	$\text{Energía útil} / \text{Energía del bagazo}$	
Contenido de azufre		
Contenido de humedad		43-51%
Agua utilizado en ingenio (m ³ /ton de caña)	7000 m ³ /día	0.4
Agua de lluvia recolectada para inicio de zafra		20,000 m ³

0.486 ton de agua/ton de caña
El consumo de agua del ingenio es de aproximadamente 0.503 ton por tonelada de caña, de los cuales 0.486 ton corresponden al proceso y 0.017 ton a servicios auxiliares. En el balance de materia se consideraron únicamente las corrientes de agua que interactúan directamente con el proceso Imbibición: 0.050, Clarificación: 0.111, Total: 0.161. Lo demás se considera agua de servicios industriales: enfriamiento condensadores, lavado de equipos, torres de enfriamiento, purgas de caldera, recirculaciones

Combustible

Transporte	Lizafra
Diesel en el ingenio	35,000 0.047 L/ton de caña

Insumos

Tratamiento físico-químico		
Reactivo	kg/ton de caña	ton/ton de caña
Azufre	0.213	0.000213
Óxido de calcio	1.135	0.001135
Ácido fosfórico	0.05	0.00005

Clarificación		
Reactivo	kg/ton de caña	ton/ton de caña
Sugar max	0.0456	0.0000456
Floculante	0.0143	0.0000143

Clarificación meladura		
Reactivo	kg/ton de caña	ton/ton de caña
Floculante	0.0022	0.0000022

Refinado		
Reactivo	kg/ton de azúcar	ton/ton de caña
Ácido fosfórico	0.3154	0.000315
Óxido de calcio (sacarato)	0.8838	0.000884
Floculante	0.5	0.0005
Decolorante	0.0326	0.0000326

Los insumos químicos empleados en el proceso (cal, ácido fosfórico, floculantes, entre otros) se incorporan al balance de materia como entradas adicionales, estimándose en 0.0038 ton por tonelada de caña, los cuales se concentran principalmente en la corriente de cachaza

Total de insumo	0.00373 ton/ton caña
Semilla	kg/haño de 2000 ft ³
	154

Compost

Producción	71500 ton de compost/año	0.033 ton de compost/ton de caña
Agua utilizada	7000 m ³ /año	0.00346 m ³ /ton de caña

Cachaza: **0.043**, Cenizas+carbón: 0.0031, 0.043+0.0031=0.0461, diferencia de 0.0131, La producción de cenizas y carbón se estimó en 0.0031 ton por tonelada de caña, valor consistente con rangos típicos de combustión de bagazo. Estos residuos, junto con la cachaza, son destinados a la producción de compost.

- **Tabla de Indicadores de Rendimiento.** Esta sección habla de la eficiencia global de la planta, destacando un rendimiento de azúcar de entre 11.2% y 11.5% y una extracción de sacarosa superior al 95%. Se registra una gestión hídrica del uso de agua de procesos (0.486 ton/ton caña) con la recuperación de 20,000 m³ de agua de lluvia, optimizando el consumo de recursos naturales durante el inicio de la zafra.
- **Consumo de Combustibles y Logística.** Se registra la intensidad energética asociada al transporte y operación interna del ingenio, con un consumo específico de 0.047 litros de diésel por tonelada de caña procesada. Es importante para el cálculo de las emisiones de alcance 1 y la evaluación de la eficiencia logística en el movimiento de biomasa e insumos.
- **Tratamiento Físicoquímico e Insumos.** El inventario registra el uso de reactivos químicos (cal, ácido fosfórico, floculantes y decolorantes) en las etapas de clarificación y refinado, estimándose un ingreso total de insumos de 0.00379 ton/ton caña. Estos datos permiten ingresar con precisión las entradas adicionales al balance de materia y su concentración en corrientes de subproductos como la cachaza.
- **Gestión de Subproductos y Compostaje.** Se describe la valorización de residuos sólidos (cachaza, cenizas y carbón) mediante su integración en un sistema de producción de compost, alcanzando un rendimiento de 0.033 toneladas de compost por tonelada de caña.

Balance Final del Ingenio

- **Balance de Materia**

Balance de materia			
	Corriente	ton/ton caña	
	Caña de azúcar	1	
	Agua de imbibición	0.05	
	Agua en clarificación	0.111	
	Insumos químicos	0.0038	
	TOTAL ENTRADAS	1.165	
	Corriente	ton/ton caña	
	Bagazo	0.27	
	Cachaza (ajustada con insumos)	0.047	
	Azúcar	0.124	
	Melaza	0.04	
	Cenizas + carbón	0.0031	
	TOTAL SALIDAS PARCIALES	0.484	

El balance de masa del proceso establece una relación de entrada total de 1.165 toneladas de insumos por cada tonelada de caña de azúcar procesada, integrando corrientes de agua de imbibición (0.05), agua de clarificación (0.111) y reactivos químicos (0.0038).

En cuanto a las salidas, se registra una recuperación de 0.124 toneladas de azúcar y 0.04 toneladas de melaza, la cual actúa como el precursor principal para la producción de bioturbosina. El balance se completa con la generación de subproductos y residuos, destacando el bagazo (0.27), la cachaza ajustada con insumos (0.047) y una fracción mínima de cenizas y carbón (0.0031).

- Balance de energía

Balance de energía				
Entrada	Corriente	ton vapor / ton caña	Descripción	
	Vapor de caldera	0.475	Vapor generado con bagazo	
	Vapor reutilizado	0.342	Vapor recuperado (evaporadores) (vapor de evaporadores, tachos y calentadores)	
	TOTAL ENTRADAS	0.817	El ingenio presenta una generación de vapor de 0.475 ton por tonelada de caña, mientras que el consumo total alcanza 0.817 ton/ton caña, lo cual es posible debido a la reutilización de vapor en el sistema de evaporación. Asimismo, se observa una recuperación de condensados de 0.433 ton/ton caña y una generación eléctrica de 41.7 kWh/ton caña, evidenciando un sistema eficiente de cogeneración	
Salida	Corriente	ton vapor / ton caña	Descripción	
	Evaporadores	0.467	Concentración de jugo	
	Tachos (cristalización)	0.25	Formación de cristales	
	Calentadores	0.1	Precalentamiento	
	TOTAL CONSUMO	0.817		
	Concepto	Valor		
	Vapor generado	0.475		
	Vapor reutilizado	0.342		
	Consumo total	0.817		
	Condensado recuperado	0.433		
	Energía generada	41.7 kWh/ton caña	10 MW=10,000 kWh/h, 10000/600 16.7kWh/ton de caña que se usa en el proceso, por cada tonelada de caña el ingenio genera, 41.7 kWh utiliza internamente 16.7 kWh y exporta 25 kWh	
	Transporte			
	Diesel en el ingenio	0.047 L/ton de caña		

El sistema demuestra una alta eficiencia termodinámica mediante un esquema de cogeneración que utiliza el bagazo para generar 0.475 toneladas de vapor por tonelada de caña. Gracias a la reutilización de 0.342 toneladas de vapor provenientes de evaporadores y tachos, el ingenio logra cubrir una demanda total de 0.817 toneladas de vapor; optimizando el consumo en las etapas de concentración y cristalización. En términos de potencia, el proceso genera 41.7 kWh por tonelada de caña, de los cuales el ingenio consume internamente 16.7 kWh y exporta un excedente de 25 kWh a la red, consolidando un perfil energético superavitario y sostenible.

Todos estos datos de inventario, entregados a modos de resultados, evidencian lo analizado durante este periodo, lo que permite comprender la información a trabajar; para facilitar el ingreso de la información en el software.

Seguimiento del plan de trabajo.

Actividades	Mes							
	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Revisar información sobre qué es ACV, límites de sistema, unidad funcional, función								
Revisar información sobre ACV's de SAF ATJ								
CORSIA ACV								
Definir límites del sistema								
Definir el tamaño de muestra								
Análisis de inventario por etapa (Definir quién hará cada etapa)								
Conocer el software a emplear								
Revisar y actualizar simulaciones								
Realizar balances de masa y energía por etapa								
Captura de información en el software								
Presentación de resultados								

Durante el desarrollo del proyecto se han realizado avances importantes en la recopilación de información, análisis de inventarios y balances de masa y energía correspondientes a la etapa agrícola y al ingenio azucarero. Asimismo, ya se cuenta con la instalación y revisión inicial del software GREET, el cual será utilizado para la captura y evaluación de datos del análisis de ciclo de vida (ACV) del SAF producido a partir de caña de azúcar.

Actualmente se han completado las siguientes actividades:

- Revisión bibliográfica sobre ACV y normativa ISO 14040/14044.
- Definición de límites del sistema y unidad funcional.
- Elaboración del inventario de cultivo.
- Desarrollo de balances de masa y energía del ingenio azucarero.
- Revisión de parámetros de entrada para el software GREET.
- Instalación y familiarización inicial con el software.
- Organización de información proveniente del CICY.

Sin embargo, todavía existen actividades pendientes que son fundamentales para continuar con la captura de información dentro del software. Actualmente hace falta disponer de:

- El inventario de la planta de producción de etanol.
- El inventario correspondiente a la producción de SAF mediante la ruta Alcohol-to-Jet (ATJ).

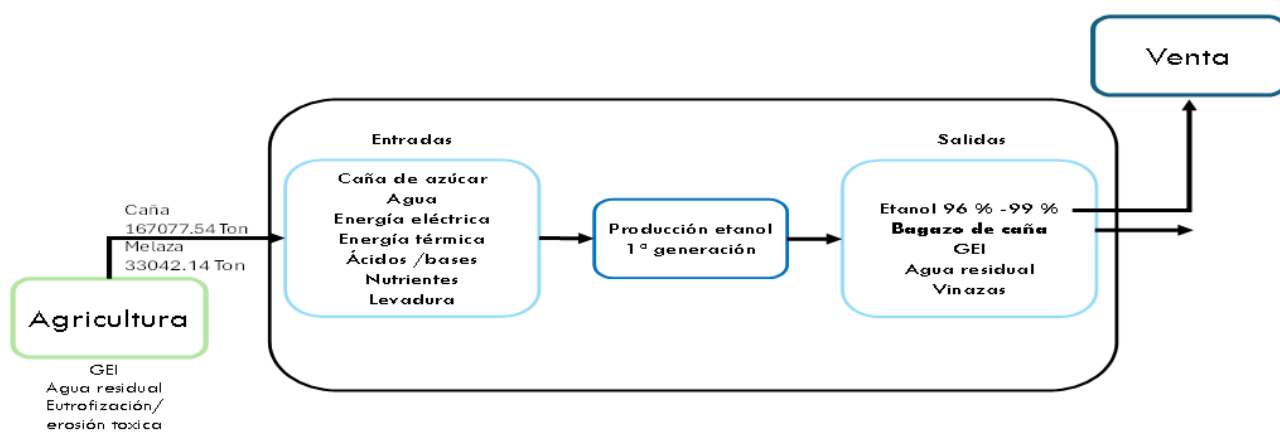
Las siguientes tablas son los formatos para llenar como parte del inventario:

Inventario de la planta de etanol

Etanol 16
Combustible
Bagazo
Autogeneración eléctrica
Entradas
Urea
Ácido sulfúrico (H2SO4)
Antiespumante
Bifloruro de amonio
Levadura
Fosfato de diamonio
Caña
Sulfato de Magnesio (MgSO4)
Sulfato de Zinc (ZnSO4)
Pantotenato de calcio (C18H32O16N2Ca)
Tiamina
Sulfato de manganeso (MgSO4)
Biocid
GNB 20B
Hidróxido de sodio (NaOH)
Ácido Clorhídrico (HCl)
Agua
Salidas
Aire
CO2
Partículas Suspendidas totales
NOx
Agua
Grasas y aceites
SST
SS
DBO
DBD
TOC
Huevos helado
E. coli
Enterococos fecales
Fósforo Total
Nitrógeno total
Arsénico total
Cadmio total
Cianuro
Cobalto
Cromo
Mercurio
Níquel
Plomo
Zinc
Sodio
Otros
Vitratos

Entradas		
Material	Unidad	Total anual
Melaza	kg	
Agua	L	
Urea	kg	
Ácido sulfúrico	kg	
Antiespumante	kg	
Bifloruro de amonio	kg	
Levadura	kg	
Fosfato de diamonio	kg	
Caña de azúcar	kg	
Sulfato de magnesio	kg	
Sulfato de zinc	kg	
Pantotenato de calcio	kg	
Tiamina	kg	
Sulfato de manganeso	kg	
Biocid	kg	
GNB 20B	kg	
Hidróxido de Sodio	kg	
Ácido clorhídrico	kg	
Energetico		
Combustible Caldera	Consumo Anual	MJ totales
Combustóleo (L)	1,190.11	
Combustóleo (L)	1,190.11	
Bagazo (kg)	98,167.47	
Total		
Combustible	Unidad	Total consumido
Red eléctrica CFE	MWh	
Salidas		
Aire		
Material	Cantidad Anual	
Dióxido de azufre (Ton)		
Óxidos de nitrógeno (Ton)		
Partículas suspendidas Totales (Ton)		
Monóxido de carbono (Ton)		
Bióxido de carbono (Ton)		

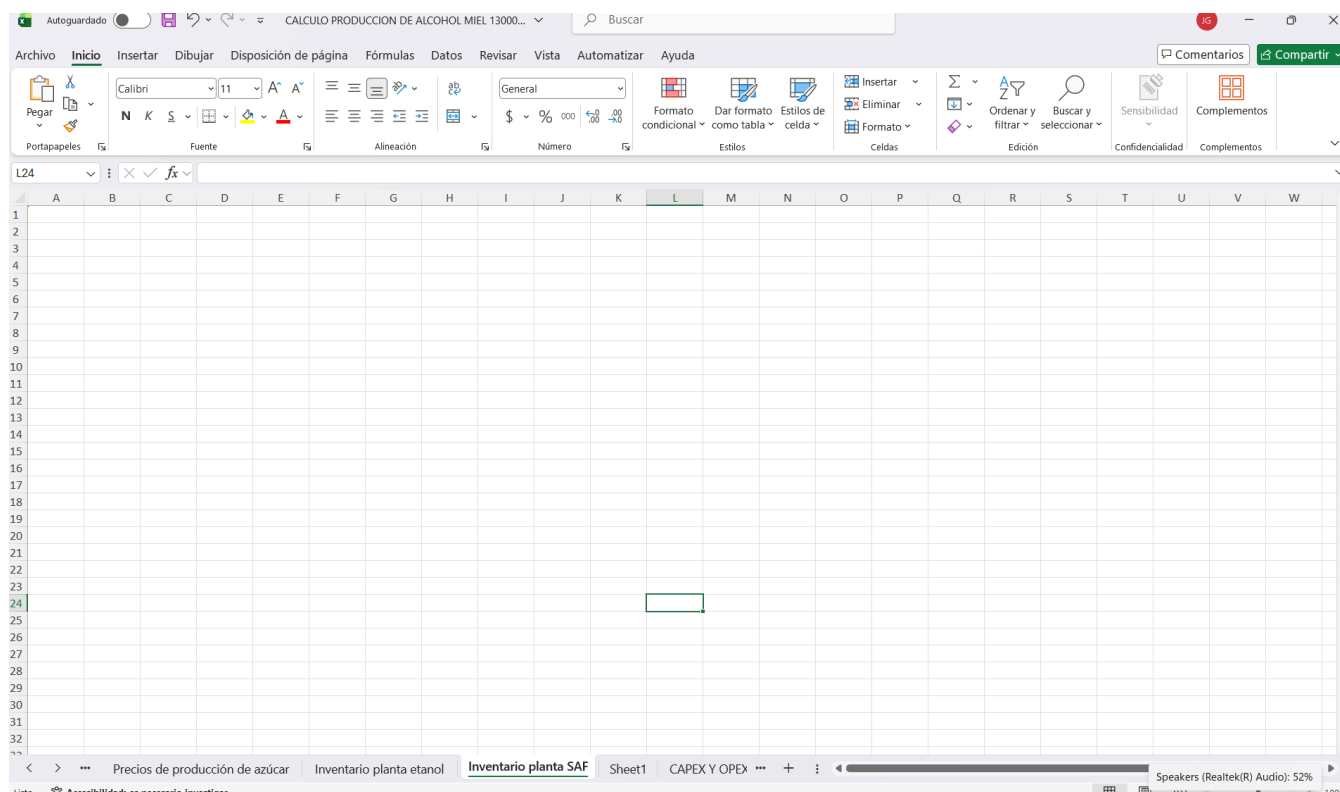
Agua	
Material	Cantidad Anual
Grasas y aceites	
SST	
SS	
DQO	
DBO	
TOC	
Huevos helminto	
<i>E. coli</i>	
Enterococos fecales	
Fosforo Total	
Nitrógeno total	
Arsénico total	
Cadmio total	
Cianuro	
Cobre	
Cromo	
Mercurio	
Níquel	
Plomo	
Zinc	



- Datos de los que depende a llenar en el software

Ethanol ATJ		EtOH ATJ - Sugarcane			
		User-defined	MIT	JRC	CTBE
EtOH Production		per MJ EtOH	per MJ EtOH	per MJ EtC	per MJ EtC
Feedstock (kg)		0.62	0.62	2.93	2.19
Natural gas (MJ)		0.00			
Diesel (MJ)					
Electricity (MJ)		0.00			
Alpha Amylase (g)		0.00			
Gluc Amylase (g)		0.00			
Cellulase (g)					
Yeast (g)		0.00			
Sulfuric Acid (g)		0.00			
Ammonia (g)		0.00			
Corn steep liquor (g)					
DAP (g)					
NaOH (g)		0.00			
CaO (g)		0.60		0.60	0.51
Urea (g)					0.37
[Co-product] Electricity (MJ)		0.20		0.20	0.018
[Co-product] Naphtha (MJ)		0.00			0.28
[Co-product] DDGS (MJ)		0.00			
[Co-product] Corn Oil (MJ)		0.00			
Allocation factor		84%		84%	98%
ATJ		per MJ jet	per MJ jet	per MJ jet	per MJ jet
EtOH (MJ)		1.78	1.78	1.02	2.1
H2 (MJ)		0.07	0.07	0.03	0.11
NG (MJ)		0.00		0.23	
Electricity (MJ)		0.00		0.021	
NaOH (g)					
[Co-product] Renewable Diesel (MJ)		0.25	0.25	0	0.083
[Co-product] Naphtha (MJ)		0.36	0.36	0	0.46
[Co-product] Heavy Oil (MJ)		0.08	0.08	0	
Allocation factor		59%	59%	100%	65%
Jet Fuel Transportation					
Barge (km)		837	837		
Rail (km)		1,287	1,287		
Truck (km)		80	80		
Barge (%)		8%	8%		
Rail (%)		29%	29%		
Truck (%)		63%	63%		
Jet Fuel Distribution					
Truck (km)		48	48		

El inventario correspondiente a la producción de SAF mediante la ruta Alcohol-to-Jet (ATJ)



Aun no nos han brindado esta información

Debido a la falta de estos dos inventarios, aún no es posible ingresar toda la información al software GREET, ya que el modelo requiere datos completos y validados para poder realizar correctamente el análisis de ciclo de vida. En especial, los datos de la planta de etanol son fundamentales porque representan una de las principales entradas del sistema y permiten establecer los flujos de materia, energía y emisiones necesarios para conectar el proceso agrícola con la producción de SAF.

Actualmente el apartado correspondiente al inventario de SAF en el archivo de Excel aún se encuentra vacío, por lo que no se han podido definir completamente los parámetros del proceso ATJ ni los factores necesarios para la simulación y evaluación ambiental dentro del software.

Una vez que se complete la información faltante, se podrá continuar con:

- *La captura total de datos en GREET.*
- *La integración de todas las etapas del proceso.*
- *La validación de resultados.*
- *El análisis final de impactos ambientales del SAF producido a partir de caña de azúcar.*

LISTA DE OBJETIVOS

CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS



- ☒ Revisar información sobre ACV, límites del sistema, unidad funcional y función.
- ☒ Revisar ACV's previos de SAF ATJ.
- ☒ Revisión de normativa CORSIA ACV.
- ☒ Definir límites del sistema.
- ☒ Definir el tamaño de muestra.
- ☒ Conocer el software a emplear
- ☒ Análisis de inventario por etapa e integrante.
- ☒ Revisar y actualizar simulaciones.
- ☒ Realizar balances de masa y energía por etapa.
- ☐ Captura de información en el software.
- ☐ Presentación de resultados.