



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de la prefactibilidad técnica y económica para la
implementación de una planta de biodiésel mediante
transesterificación de aceite vegetal en la ciudad de Lima**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Industrial y de Sistemas

Anny Antonella Medina Gomez

Asesor:
Dr. Ing. Erick Alexander Miñán Ubillús

Piura, enero de 2026



Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Anny Antonella Medina Gomez, egresado del Programa Académico de Ingeniería Industrial y de Sistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI: 73131157, declaro que:

Soy autor del trabajo final titulado:

“Análisis de la prefactibilidad técnica y económica para la implementación de una planta de biodiésel mediante transesterificación de aceite vegetal en la ciudad de Lima”

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Industrial y de Sistemas.

El texto de mi trabajo final es original y no vulnera los derechos de terceros o, de ser el caso, derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para lo cual, he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas. Asimismo, el texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico; y que la investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces. En caso de detectarse el incumplimiento de lo declarado asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

La asesoría del trabajo estuvo a cargo de los siguientes docentes de la Universidad de Piura:

- Dr. Ing. Erick Alexander Miñán Ubillús, identificado con DNI: 02820885

Declaro (declaramos) que:

Luego de haber empleado el software de coincidencia Turnitin, revisado las fuentes de información señaladas por el autor, y en razón de mi (nuestra) experiencia como investigador(es), declaro (declaramos) que las ideas expuestas en el trabajo final alcanzan las condiciones de calidad, integridad y originalidad acorde a los objetivos institucionales y estándares en materia de investigación. Finalmente, no asumo (asumimos) responsabilidad por la posible vulneración de derechos de autor en el trabajo final referido, pues tal responsabilidad es exclusiva del autor.

Fecha: 02/01/2026.

Firma del autor¹

Firma del asesor¹

¹ Firma idéntica al DNI. No se admite digital, salvo certificado.



Dedicatoria

Me gustaría dedicar este trabajo de investigación a mi querida Universidad de Piura, institución que me brindó años de aprendizaje, amistades para toda la vida y el ejemplo constante de que las personas formadas en valores y con vocación de excelencia pueden llegar lejos.

Agradezco profundamente a los profesores del programa académico de titulación por su tiempo, guía y dedicación a lo largo de estos meses, cuyo compromiso ha sido fundamental durante esta etapa.

En particular, deseo expresar un agradecimiento especial a mi asesor, por su orientación y apoyo constante en el desarrollo de este trabajo.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por bendecirme diariamente.

A mis padres, por su apoyo incondicional y por todo su esfuerzo para brindarnos siempre las mejores oportunidades.

A mis hermanos, por ser mi ejemplo, mi fortaleza y un apoyo constante en cada etapa de mi vida.

A mis colegas por los conocimientos y el cariño brindados durante mi vida profesional.

Resumen

El presente estudio desarrolla un análisis de prefactibilidad técnica y económica para la implementación de una planta de biodiésel en la ciudad de Lima, utilizando aceite vegetal refinado como materia prima. La investigación surge ante la insuficiente producción local de biodiésel, situación que incrementa la dependencia de importaciones y limita el cumplimiento de los mandatos de mezcla establecidos en la normativa peruana. El objetivo general es evaluar la viabilidad de instalar una nueva capacidad productiva que contribuya a fortalecer la seguridad energética nacional.

La metodología empleada integra un enfoque mixto. En el componente cuantitativo se aplica un modelo de regresión lineal entre la demanda nacional de diésel y el Producto Bruto Interno, permitiendo proyectar el consumo de biodiésel al 2030. Asimismo, se analizan flujos internacionales de aceite de soya y la oferta exportable de aceite de palma para determinar la disponibilidad de materias primas. En el componente técnico se elabora un diseño conceptual del proceso de transesterificación, incluyendo balances de materia, dimensionamiento preliminar de equipos y estimación de capacidades. Finalmente, en el componente económico-financiero se calcula la inversión requerida (CAPEX), los costos operativos (OPEX) y los indicadores de rentabilidad.

Los resultados muestran que una planta de 1,000 barriles diarios, con un CAPEX estimado de 8.7 MMUSD y un OPEX de 61.6 MMUSD/año, presenta un Valor Actual Neto de 11.7 MMUSD y una Tasa Interna de Retorno del 18 %, evidenciando viabilidad preliminar. Se concluye que el proyecto puede contribuir significativamente a reducir la dependencia de importaciones y apoyar los objetivos nacionales de sostenibilidad energética.

Tabla de contenido

Introducción	10
Capítulo 1 Marco Contextual	11
1.1 Planteamiento del problema	11
1.2 Justificación del estudio.....	13
1.3 Objetivos de la investigación	13
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	13
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	13
1.4 Alcances y limitaciones	14
1.4.1 <i>Alcances</i>	14
1.4.2 <i>Limitaciones</i>	14
1.5 Antecedentes del biodiesel en el Perú	15
Capítulo 2 Marco Teórico	17
2.1 Biodiesel y características generales	17
2.1.1 <i>Definición</i>	17
2.1.2 <i>Características</i>	18
2.1.3 <i>Tipos de Biodiesel</i>	18
2.2 Proceso de transesterificación	20
2.3 Normativa nacional e internacional sobre biocombustibles.....	21
2.3.1 <i>Normativa internacional</i>	21
2.3.2 <i>Normativa nacional</i>	23
2.4 Normativa de calidad nacional del biodiésel.....	24
2.5 Materias primas: aceites vegetales y aceites usados.....	26
2.5.1 <i>Importancia del tipo de materia prima</i>	26
2.5.2 <i>Aceites vegetales vírgenes</i>	26
2.5.3 <i>Aceites usados</i>	27
Capítulo 3 Metodología.....	29
3.1 Tipo y diseño de la investigación	29
3.2 Fuentes de información y técnicas de recolección de datos.....	29
3.3 Metodología de análisis técnico	30
3.4 Metodología de análisis económico-financiero	31
Capítulo 4 Análisis de la demanda y evaluación de materias primas	33
4.1 Análisis de la demanda nacional y proyecciones	33
4.1.1 <i>Análisis exploratorio</i>	33
4.1.2 <i>Proyección mediante regresión lineal: Demanda vs PBI</i>	36
4.2 Evaluación de materias primas locales e internacionales.....	39
4.2.1 <i>Análisis del suministro internacional</i>	39
4.2.2 <i>Análisis del suministro local</i>	41
4.2.3 <i>Análisis de precios</i>	43
Capítulo 5 Diseño del Proceso.....	46
5.1 Determinación de la capacidad	46
5.2 Balance de materiales.....	47
5.3 Identificación de maquinaria y equipos	47
5.3.1 <i>Etapas del proceso</i>	48
5.3.2 <i>Equipos principales del proceso</i>	49
5.4 Personal directo e indirecto	50
5.5 Costo del terreno	52

Capítulo 6 Análisis económico y financiero.....	53
6.1 Cálculo preliminar del Capex y Opex.....	53
6.1.1 <i>Inversión del capital (CAPEX)</i>	53
6.1.2 <i>Costos operativos (OPEX)</i>	55
6.2 Cálculo preliminar del VAN y TIR.....	59
Capítulo 7 Análisis y discusión de resultados.....	63
7.1 Comparación con estudios y experiencias previas.....	63
7.1.1 <i>Coincidencias con estudios previos</i>	63
7.1.2 <i>Diferencias respecto a investigaciones anteriores</i>	64
7.2 Identificación de oportunidades y limitaciones del proyecto.....	65
7.2.1 <i>Oportunidades</i>	65
Conclusiones.....	67
Lista de abreviaturas	69
Referencias.....	70



Lista de tablas

Tabla 1	Definiciones de biodiésel según distintas entidades	17
Tabla 2	Especificaciones del biodiésel B100 según la NTP 321.125:2019	24
Tabla 3	Promedio mensual de la demanda nacional de diésel e índice estacional asociado	35
Tabla 4	Métricas del modelo.....	38
Tabla 5	Proyecciones de crecimiento del PBI consideradas	38
Tabla 6	Resultados del modelo	39
Tabla 7	Importaciones de aceite de soya por país de origen y vía de importación [KTM].....	43
Tabla 8	Precios CIF de importación [USD/TM].....	44
Tabla 9	Precios FOB de exportación de aceite de palma [USD/TM].....	45
Tabla 10	Producción nacional de Biodiesel.....	46
Tabla 11	Equipos principales del proceso de producción de biodiésel y sus capacidades nominales	50
Tabla 12	Personal directo requerido para operación 24/7.....	51
Tabla 13	Personal indirecto requerido.....	51
Tabla 14	Terminología de cálculo del PEC	53
Tabla 15	Resultados del CAPEX.....	55
Tabla 16	Valores de consumo típicos.....	56
Tabla 17	Precios estimados de cada servicio	56
Tabla 18	Estimación de costos de mantenimiento y reparaciones	57
Tabla 19	Variación típica en porcentaje de la inversión fija de capital para gastos de construcción	57
Tabla 20	Balance de materiales anual	58
Tabla 21	Desglose de costos variables por tipo de insumo y servicio	58
Tabla 22	Resumen del costo operativo anual (OPEX).....	59
Tabla 23	Supuestos y parámetros utilizados para la evaluación económica del proyecto	61
Tabla 24	Flujo de caja del proyecto	61
Tabla 25	Resultados del proyecto.....	62

Lista de figuras

Figura 1	Abastecimiento de Biodiesel en el Perú.....	12
Figura 2	Demanda de Biodiesel en el Perú	12
Figura 3	Reacción general de transesterificación de triglicéridos	20
Figura 4	Etapas de la reacción de transesterificación: conversión progresiva de triglicéridos a diglicéridos, monoglicéridos y glicerol	21
Figura 5	Principales productores mundiales de biodiésel en 2022	22
Figura 6	Materia prima utilizada en la producción de Biodiesel de primera generación.....	27
Figura 7	Materia prima utilizada en la producción de Biodiesel de segunda generación.....	28
Figura 8	Diagrama de la estructura de la metodología del estudio.....	32
Figura 9	Evolución mensual de la demanda nacional.....	34
Figura 10	Variación mensual de la demanda	34
Figura 11	Variación interanual promedio (YoY) por año	35
Figura 12	Índice estacional promedio mensual.....	35
Figura 13	Distribución de la demanda mensual.....	36
Figura 14	Relación entre PBI y Demanda de Diésel	37
Figura 15	Resumen del modelo	37
Figura 16	Resultados del modelo.....	39
Figura 17	Importaciones de aceite de soya por importador [KTM/Año]	40
Figura 18	Importaciones de aceite de soya por país de origen [KTM/Año]	41
Figura 19	Exportaciones de aceite de palma por exportador [KTM/Año].....	42
Figura 20	Exportaciones de aceite de palma por destino [KTM/Año].....	42
Figura 21	Demanda nacional de biodiesel vs capacidad de producción nominal	46
Figura 22	Diagrama de flujo del proceso de producción de biodiésel y balance de materiales por tonelada de aceite vegetal	47

Introducción

La transición hacia fuentes de energía más limpias se ha convertido en un objetivo prioritario para los países que buscan reducir su dependencia del petróleo y mitigar los efectos del cambio climático. En este contexto, el biodiésel ha adquirido un rol cada vez más relevante como alternativa renovable y sostenible para el sector transporte, especialmente en mercados donde su mezcla con diésel fósil es obligatoria. En el Perú, la normativa vigente establece que el diésel comercializado debe incorporar un porcentaje mínimo de biodiésel; sin embargo, la producción local es insuficiente para cubrir la demanda interna, generando dependencia de importaciones y vulnerabilidad frente a fluctuaciones internacionales de precios y restricciones logísticas.

La presente tesis aborda esta problemática mediante un análisis de prefactibilidad técnica y económica para la implementación de una planta de biodiésel en Lima, empleando aceite vegetal como materia prima principal. El estudio integra cuatro dimensiones fundamentales: el marco normativo, la evolución de la demanda, la disponibilidad de materias primas y la evaluación técnica y económica del proceso de transesterificación, con el fin de determinar la viabilidad de una nueva capacidad productiva bajo las condiciones actuales del mercado.

Para ello, se desarrolla un marco contextual que analiza la normativa nacional e internacional sobre biocombustibles y los antecedentes del biodiésel en el país. Posteriormente, se presenta un marco teórico que detalla las características del biodiésel y los fundamentos del proceso. La metodología describe las fuentes de información empleadas y el enfoque técnico-económico aplicado. Luego, se analiza la demanda nacional mediante modelos basados en el PBI y se evalúa la disponibilidad de materias primas locales e importadas, con énfasis en aceite de soya y palma.

Asimismo, se elabora el diseño conceptual del proceso, incluyendo balances de materia, identificación de equipos, dimensionamiento preliminar y estimación de la capacidad requerida para atender parte del déficit nacional. Finalmente, se calculan la inversión (CAPEX), los costos operativos (OPEX) y los ingresos proyectados para obtener indicadores como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), que permiten evaluar la rentabilidad del proyecto.

En conjunto, esta tesis ofrece un análisis integral que sustenta la viabilidad preliminar de instalar una planta de biodiésel en Lima, contribuyendo a fortalecer la seguridad energética, reducir la dependencia de importaciones y promover el desarrollo de una industria nacional alineada con los objetivos de sostenibilidad del país.

Capítulo 1

Marco Contextual

El presente capítulo desarrolla el marco contextual de la investigación, en el cual se expone la problemática que origina la necesidad del estudio, así como la justificación que respalda su relevancia. Asimismo, se formulan los objetivos que guiarán el trabajo, se precisan los alcances y limitaciones que condicionan la investigación y se revisan los antecedentes relacionados con la producción y uso del biodiésel en el Perú. De esta manera, se establece la base conceptual y situacional necesaria para comprender la pertinencia del proyecto y su aporte dentro del sector energético nacional.

1.1 Planteamiento del problema

Durante los últimos años, la creciente preocupación por el calentamiento global y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero han reforzado la necesidad de acelerar la transición hacia energías más limpias. En 2023, las emisiones globales de CO₂ asociadas al consumo energético alcanzaron un récord, con un incremento del 1,1 % respecto al año anterior; no obstante, el despliegue de energías renovables ha permitido moderar parcialmente este crecimiento (International Energy Agency [IEA], 2024). Es por este motivo que las entidades públicas y privadas de distintos países vienen estableciendo medidas de aportes de fuentes de energía renovable dentro de sus matrices energéticas.

En el caso del Perú, la normativa vigente establece la obligatoriedad de incorporar biodiésel en el diésel que se comercializa en el mercado interno. El Decreto Supremo N.º 021-2007-EM, que aprueba el Reglamento para la Comercialización de Biocombustibles, establece un porcentaje de biodiésel en la mezcla con diésel N.º 2, dando lugar al combustible conocido como diésel B5 (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2007). Esta disposición responde a los objetivos de la Ley N.º 28054, que en su artículo 2 establece como finalidad “diversificar la matriz energética, promover el desarrollo agroindustrial, reducir la contaminación ambiental y generar empleo productivo” (Congreso de la República del Perú, 2003).

No obstante, la producción local de biodiésel resulta insuficiente para cubrir la demanda nacional. De acuerdo con la información publicada por la Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (SUNAT) y Osinergmin, entre el 60 % y el 65 % del biodiésel consumido en el país se cubre mediante importaciones, ya sea como producto terminado (diésel B5) o como biodiésel para la mezcla con diésel N.º 2, tal como se puede apreciar en la Figura 1 y Figura 2 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Esta dependencia se ve agravada por la imposición de derechos antidumping a las importaciones originarias de países altamente competitivos en exportación, como Estados Unidos y Argentina. En el caso de Estados Unidos, dichos derechos se aplicaron inicialmente mediante la Resolución N.º 116-2010/CFD-INDECOPI (Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI), 2010) y se mantuvieron por la Resolución N.º 218-2016/CDB-INDECOPI (INDECOPI, 2016); mientras que en el caso de

Argentina fueron establecidos por la Resolución N.º 189-2016/CDB-INDECOPI (INDECOPI, 2016). Estas medidas limitan el acceso a los proveedores más cercanos y competitivos de la región, obligando al Perú a abastecerse de mercados más lejanos y a precios superiores, lo que incrementa los costos de importación y reduce la competitividad del suministro nacional de biodiésel.

Figura 1

Abastecimiento de Biodiesel en el Perú

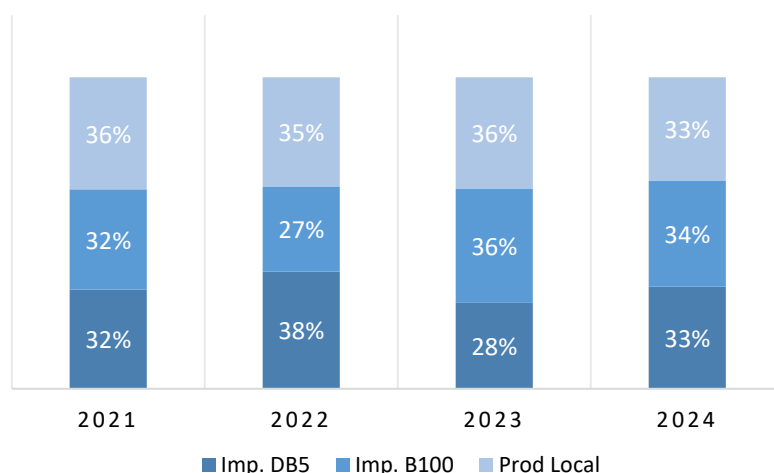
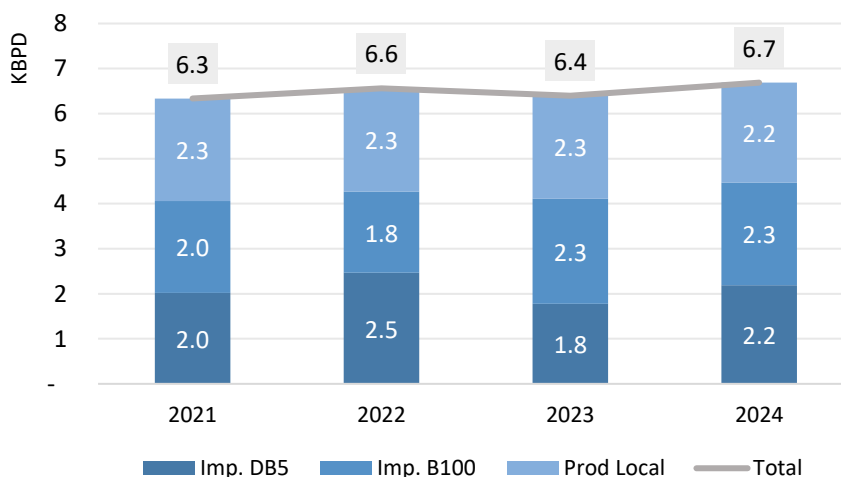


Figura 2

Demanda de Biodiesel en el Perú



A esta problemática se suma la perspectiva de incremento en la demanda futura, de la información publicada por Osinergmin, la demanda de diésel B5 ha venido creciendo a una tasa aproximada de 4 % anual, en los últimos 10 años. Este crecimiento, sumado a la obligación normativa de mantener un porcentaje mínimo de biodiésel en la mezcla, implica que, de no incrementarse la capacidad de producción local, el país dependerá cada vez más de importaciones para atender su consumo interno. Esta situación incrementa la vulnerabilidad

frente a precios internacionales y restricciones comerciales, y compromete la seguridad energética y el cumplimiento de las metas ambientales nacionales.

1.2 Justificación del estudio

Ante el escenario anteriormente descrito, surge la necesidad de evaluar la viabilidad de implementar nueva capacidad de producción nacional. La construcción de una planta de biodiésel en Lima permitiría atender de forma más competitiva la demanda interna, garantizar el cumplimiento de las normativas de mezcla y fortalecer la seguridad energética del país.

En este contexto, resulta relevante mencionar que la autora del presente estudio se desempeña en una empresa del sector hidrocarburos que comercializa combustibles y, para ello, adquiere biodiésel en el mercado local e internacional. Dicha empresa enfrenta directamente los desafíos descritos, ya que la creciente dependencia de importaciones y las limitaciones de la producción nacional impactan en la planificación del abastecimiento, los costos de importación y la competitividad. A partir de esta necesidad identificada, la autora plantea el presente estudio como un esfuerzo orientado a evaluar alternativas que permitan fortalecer la producción local y reducir la vulnerabilidad frente a la dependencia externa.

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la prefactibilidad técnica y económica de implementar una planta de producción de biodiésel en Lima, mediante el proceso de transesterificación de aceite vegetal, con el fin de contribuir a la seguridad energética del país y promover el cumplimiento de la normativa vigente sobre biocombustibles.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar el marco normativo nacional e internacional aplicable a la producción, comercialización y uso de biodiésel en el Perú.
- Caracterizar la demanda actual y proyectada de biodiésel en el mercado nacional, considerando la normativa de mezcla obligatoria y las tendencias de consumo.
- Analizar la disponibilidad y costos asociados a los aceites vegetales, con énfasis en el aceite de soya, como materia prima para la producción de biodiésel en el Perú.
- Diseñar un esquema preliminar del proceso de producción de biodiésel mediante transesterificación, definiendo las principales etapas y parámetros de operación a nivel conceptual (determinación de la capacidad, balance de materiales, identificación de la maquinaria y equipos, personal directo e indirecto y estimación de costo de alquiler del terreno).
- Elaborar un análisis económico referencial de la planta propuesta, incluyendo estimación preliminar de inversión, costos operativos y rentabilidad esperada.

1.4 Alcances y limitaciones

1.4.1 Alcances

El alcance del presente estudio está orientado a evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar una planta de biodiésel en Lima, considerando como materia aceite vegetal y aplicando el proceso de transesterificación.

En el plano técnico, el estudio comprende el diseño conceptual de un esquema de producción, incluyendo balances de materia simplificados, la identificación de equipos principales, requerimientos de personal y estimaciones preliminares de capacidad y costos asociados. En el plano económico, se desarrolla un análisis referencial de inversión (CAPEX) y costos de operación (OPEX), complementado con indicadores financieros básicos como el VAN, la TIR y el periodo de recuperación.

Asimismo, se realiza un análisis del marco normativo nacional e internacional aplicable a la producción y comercialización de biodiésel, así como de la demanda actual y proyectada en el mercado peruano. La proyección de demanda se construye con base en información de Osinergmin y utilizando la herramienta R. De igual forma, se evalúa la disponibilidad y precios de diferentes materias primas para definir la materia prima principal, tomando como fuentes reportes técnicos y series estadísticas oficiales.

El estudio busca servir como referencia inicial para la toma de decisiones, estableciendo lineamientos generales que orienten la conveniencia de invertir en una planta de biodiésel, sin llegar al detalle de diseño definitivo.

1.4.2 Limitaciones

El presente estudio reconoce limitaciones propias de su alcance metodológico. La mayor parte de los análisis se fundamentan en información secundaria publicada por organismos oficiales, literatura científica y reportes especializados, lo que implica que las estimaciones de inversión, costos de operación y demanda proyectada constituyen valores indicativos y no definitivos, sujetos a ajustes en un escenario de factibilidad o de implementación real.

En segundo lugar, aunque se evalúan diferentes materias primas, el análisis detallado se limita al aceite vegetal como insumo principal, quedando fuera del alcance otras opciones como aceites usados o grasas animales, que podrían ser exploradas en futuras investigaciones.

Asimismo, el diseño de proceso se circunscribe a un nivel conceptual, con balances de materia simplificados y estimaciones preliminares de equipos y costos, sin alcanzar especificaciones de ingeniería de detalle, en ese sentido, no se abarcará el diseño de localización ni disposición en Planta. El análisis económico se centra en estimaciones referenciales y no incorpora aspectos relacionados con financiamiento, incentivos tributarios ni esquemas de asociación empresarial, factores que deberían evaluarse en fases posteriores.

Finalmente, el estudio no contempla una evaluación ambiental ni un análisis social exhaustivo sobre la implementación de la planta, los cuales requerirían estudios específicos para dimensionar los impactos y beneficios más allá de la viabilidad técnica y económica inicial.

1.5 Antecedentes del biodiesel en el Perú

En el contexto peruano, diversas investigaciones han explorado la viabilidad de producir biodiésel a partir de diferentes materias primas y bajo distintos enfoques técnicos, económicos y estratégicos. Estos estudios resultan relevantes porque permiten comprender cómo se ha desarrollado la industria local de biocombustibles, qué oportunidades existen para su consolidación y cuáles son los retos que enfrenta el país para asegurar un abastecimiento sostenible. A continuación, se presentan algunos antecedentes nacionales.

En la Universidad de Piura, Cabrera Deceno et al. (2023) desarrollaron un trabajo orientado a la producción de biodiésel y glicerina a partir de aceite vegetal residual. Se analizaron parámetros del proceso de transesterificación, como temperatura, relación molar entre el alcohol, el aceite y tipo de catalizador, además de la calidad del biodiésel obtenido. El estudio evidenció que es posible cumplir con parámetros de calidad establecidos por normas internacionales; sin embargo, se limitó al análisis experimental de laboratorio sin una evaluación financiera integral, lo que reduce su aplicabilidad a proyectos de mayor escala.

Por otro lado, en la Universidad de Lima, Migliori Ruiz (2022) realizó un estudio de prefactibilidad para la producción y comercialización de biodiésel a base de grasa animal. El trabajo incluyó balances de materia y energía, dimensionamiento de equipos y estimaciones de inversión y operación. Entre sus aportes destaca el uso de grasa animal como alternativa de menor costo frente a aceites vegetales vírgenes, con beneficios ambientales asociados al reaprovechamiento de residuos. No obstante, la investigación identificó limitaciones vinculadas a la disponibilidad de materia prima, la logística de acopio y la variabilidad de composición, lo que compromete la sostenibilidad de la producción a gran escala.

Por su parte, en la Pontificia Universidad Católica del Perú, Godinez Viacava (2013) abordó la producción de biodiésel a partir de aceites usados, desarrollando un estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta en Lima. Su metodología comprendió la recolección, pretratamiento y transesterificación de aceites residuales, así como una evaluación preliminar de factibilidad económica. El trabajo aportó evidencia sobre el potencial de esta materia prima como fuente de biodiésel sostenible y de bajo costo, pero también resaltó restricciones relacionadas con el acopio masivo de residuos, la calidad del insumo y la falta de infraestructura para su procesamiento a nivel industrial.

Finalmente, dentro del ámbito institucional, Osinergmin (2016) publicó el documento titulado Mercado de biocombustibles en el Perú, donde se analizó la evolución de la oferta y demanda de biodiésel y bioetanol en el país, junto con el impacto de la normativa vigente

sobre la comercialización. El documento sistematizó información clave sobre el sector y advirtió sobre la creciente dependencia de importaciones frente a la limitada producción nacional. No obstante, sus conclusiones han quedado desactualizadas debido a cambios en la infraestructura energética y a la promulgación de nuevas normas, como la Ley N.° 31555 en 2022.

En conjunto, estos antecedentes nacionales evidencian un interés sostenido en la investigación y producción de biodiésel en el Perú. Sin embargo, también presentan limitaciones comunes: predominio de análisis experimentales sin estudios financieros profundos, insumos con disponibilidad restringida, ausencia de validación industrial y falta de actualizaciones regulatorias. Estas brechas justifican la necesidad del presente trabajo, que busca integrar un análisis técnico y económico de la implementación de una planta de biodiésel en Lima a partir de aceite vegetal, considerando las condiciones normativas y de mercado vigentes.



Capítulo 2 Marco Teórico

El presente capítulo desarrolla los fundamentos conceptuales, técnicos y normativos que sustentan el estudio de prefactibilidad para la implementación de una planta de biodiésel en Lima. Su objetivo es proporcionar un marco de referencia integral que permita comprender las características del biodiésel, los procesos tecnológicos asociados a su producción, así como las diferentes materias primas que pueden emplearse. Adicionalmente, se expone el contexto regulatorio vigente a nivel nacional e internacional y la normativa de calidad que debe cumplirse para satisfacer los requerimientos establecidos en el Perú. De esta manera, se busca ofrecer al lector una base sólida que facilite la comprensión de los conceptos abordados en los apartados siguientes.

2.1 Biodiesel y características generales

2.1.1 Definición

El biodiésel ha sido definido por diferentes organismos nacionales e internacionales. La Tabla 1 resume las principales definiciones consideradas en el presente estudio.

Tabla 1

Definiciones de biodiésel según distintas entidades

Entidad	Definición	Enfoque principal
EIA (2024)	“Renewable fuel consisting of mono alkyl esters (long chain fatty acids) that are produced through the conversion of animal fats, vegetable oils, and recycled grease feedstocks (transesterification) to produce biodiesel. Biodiesel is typically blended with petroleum diesel in concentrations of 2% to 20% biodiesel, or B2 to B20”	Resalta el origen renovable y su uso en la mezcla con diésel.
ASTM International (2023)	“A fuel comprised of mono-alkyl esters of long chain fatty acids derived from vegetable oils or animal fats, designated B100, for use in diesel engines.”	Define al biodiésel desde un enfoque técnico-químico, enfatizando su estructura molecular y uso en motores.
MINEM (DS N.º 021-2007-EM)	“Combustible compuesto de ésteres mono-alquílicos de ácidos grasos de cadenas largas derivados de recursos renovables tales como aceites vegetales o grasas animales, para ser usados en motores de ciclo Diesel.”	Definición normativa y legal, orientada a garantizar estándares de producción y uso en el mercado nacional.

Nota. Extraído de U.S. Energy Information Administration (2024), ASTM International (2023) y Ministerio de Energía y Minas (2007)

En conjunto, las definiciones analizadas coinciden en que el biodiésel es un biocombustible renovable obtenido a partir de aceites vegetales o grasas animales mediante procesos de conversión química, destinado a sustituir parcial o totalmente al diésel fósil en motores de combustión interna.

2.1.2 Características

Las características del biodiésel dependen fundamentalmente del tipo de materia prima y de las condiciones del proceso de producción. Según Jerryraj Kumar y Thangapandian (2015) en su artículo titulado *Biodiesel and its Properties from Various Feedstocks* las propiedades del biodiésel varían según la materia prima, el procesamiento del aceite vegetal, los métodos de producción y el grado de purificación. No obstante, el biodiésel presenta propiedades generales que lo distinguen del diésel fósil:

- Procede de un recurso renovable, lo que reduce la dependencia del petróleo y ayuda a preservarlo.
- Es biodegradable.
- Reduce la mayoría de las emisiones del escape de los vehículos (con la excepción de los óxidos de nitrógeno).
- Posee un punto de inflamación más alto, lo que permite un manejo y almacenamiento más seguros.
- Ofrece una excelente lubricidad, característica que ha cobrado mayor importancia con la introducción de combustibles diésel de bajo contenido de azufre, cuya lubricidad se ha visto muy reducida. La adición de biodiésel en bajos porcentajes (1–2 %) restaura esta propiedad. [traducción propia] (Knothe et al., 2005, p. 2)

2.1.3 Tipos de Biodiesel

El biodiésel puede clasificarse según el tipo de materia prima utilizada en su producción, criterio que permite comprender su evolución tecnológica y los cambios en el enfoque de sostenibilidad a lo largo del tiempo. Esta clasificación evidencia la transición desde el uso de cultivos oleaginosos tradicionales hacia recursos residuales y biotecnológicos, capaces de ofrecer un menor impacto ambiental y una mejor eficiencia en el aprovechamiento de recursos.

De acuerdo con el European Academies Science Advisory Council (2012, pág. 7) los biocombustibles, incluido el biodiésel, se agrupan tradicionalmente en tres generaciones, definidas por la naturaleza de la materia prima empleada. Sin embargo, investigaciones más recientes amplían esta clasificación a una cuarta generación, vinculada al uso de microorganismos y microalgas modificados genéticamente mediante procesos de ingeniería metabólica. Esta evolución conceptual pone de relieve el avance de las tecnologías de conversión y la búsqueda de sistemas de producción más sostenibles y eficientes.

La primera generación de biodiésel comprende los biocombustibles producidos a partir de aceites vegetales comestibles, como los de palma, soya, colza, coco y oliva. Estos aceites fueron las primeras materias primas utilizadas a escala industrial, ya que presentan una amplia disponibilidad agrícola, una composición química estable y una facilidad notable para la reacción de transesterificación. Su principal fortaleza radica en la madurez de la cadena productiva y la experiencia acumulada en su procesamiento. Sin embargo, su uso ha sido objeto de debate, pues genera competencia con la producción de alimentos y puede presionar los precios de los cultivos agrícolas, además de requerir grandes extensiones de tierra y agua (Zhang et al., 2022). Estas limitaciones impulsaron la búsqueda de fuentes alternativas que no afecten la seguridad alimentaria.

El biodiésel de segunda generación se obtiene a partir de materias primas no comestibles o residuales, tales como los aceites de *Jatropha*, *Nim* y *Pongamia*, junto con aceites usados de cocina y grasas animales recicladas. Estas fuentes reducen significativamente los costos de producción y disminuyen la dependencia de cultivos alimentarios, además de aprovechar residuos que de otro modo serían desechados. Este enfoque contribuye a una economía circular al valorizar subproductos y minimizar impactos ambientales. No obstante, la composición química de estas materias suele variar ampliamente, lo que puede afectar la eficiencia del proceso de transesterificación y requerir etapas adicionales de purificación o pretratamiento (Elgharbawy et al., 2021). Aun así, su adopción ha crecido de forma sostenida en países con cadenas de reciclaje consolidadas o programas de gestión de aceites usados.

La tercera generación de biodiésel surge como respuesta a las limitaciones de las fuentes agrícolas y residuales. Se basa en el uso de microalgas y otros microorganismos oleaginosos capaces de acumular lípidos y de capturar dióxido de carbono (CO_2) durante la fotosíntesis. A diferencia de las materias primas agrícolas, las microalgas pueden cultivarse en aguas salobres o residuales y en terrenos no agrícolas, sin interferir con la producción de alimentos. Además, pueden cumplir una doble función al actuar como agentes de biorremediación de aguas mientras generan biomasa aprovechable para biocombustibles (Chozhavendhan et al., 2020).

La cuarta generación de biodiésel representa una etapa emergente de investigación orientada a integrar la biotecnología avanzada en la producción de biocombustibles. Esta generación se basa en el uso de microorganismos y microalgas modificados genéticamente mediante técnicas de ingeniería metabólica y biología sintética (Zhang et al., 2022).

En conjunto, las cuatro generaciones de biodiésel muestran un tránsito progresivo hacia sistemas de producción más eficientes, sostenibles y tecnológicamente sofisticados, donde la materia prima se consolida como el eje central que define la viabilidad económica, ambiental y técnica del biocombustible.

2.2 Proceso de transesterificación

La transesterificación es el proceso químico más utilizado para la obtención de biodiésel a partir de aceites vegetales y grasas animales. Según Gebremariam y Marchetti (2017) mediante este proceso los triglicéridos contenidos en los aceites y grasas se convierten en ésteres alquílicos de ácidos grasos, reduciendo significativamente su viscosidad hasta niveles cercanos a los del diésel convencional. El resultado es un combustible con propiedades físicas y de combustión semejantes al diésel fósil, lo que permite su uso en motores diésel existentes sin necesidad de modificaciones.

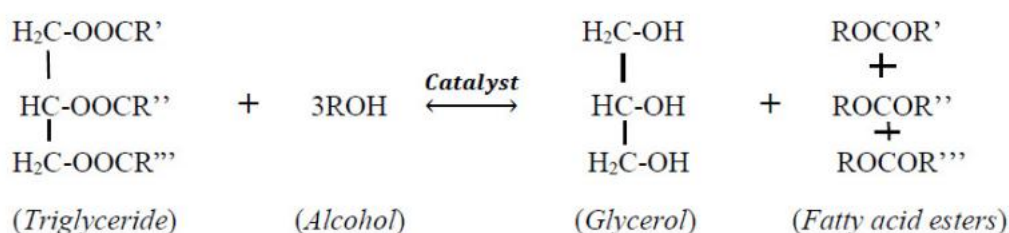
En términos químicos, la transesterificación consiste en la reacción de un triglicérido con un alcohol de cadena corta (metanol o etanol) en presencia de un catalizador, obteniéndose ésteres de ácidos grasos (biodiésel) y glicerol como subproducto. El proceso ocurre a través de tres etapas reversibles en las que se forman sucesivamente diglicéridos, monoglicéridos y finalmente glicerina, liberando una molécula de éster en cada paso.

Entre los factores que determinan el rendimiento del proceso se incluyen la relación molar alcohol/aceite, la temperatura, el tiempo de reacción y el tipo y concentración del catalizador (Jeryraj Kumar & Elangovan, 2015).

La Figura 3 muestra de manera esquemática la reacción general de transesterificación, en la cual un triglicérido reacciona con un alcohol de cadena corta (ROH), en presencia de un catalizador, para formar ésteres de ácidos grasos (biodiésel) y glicerol como subproducto. Este proceso, de naturaleza reversible, puede ser llevado a cabo mediante distintas rutas catalíticas, que varían según el tipo de catalizador empleado y las condiciones de operación.

Figura 3

Reacción general de transesterificación de triglicéridos



Fuente: Gebremariam y Marchetti (2017, pág. 431)

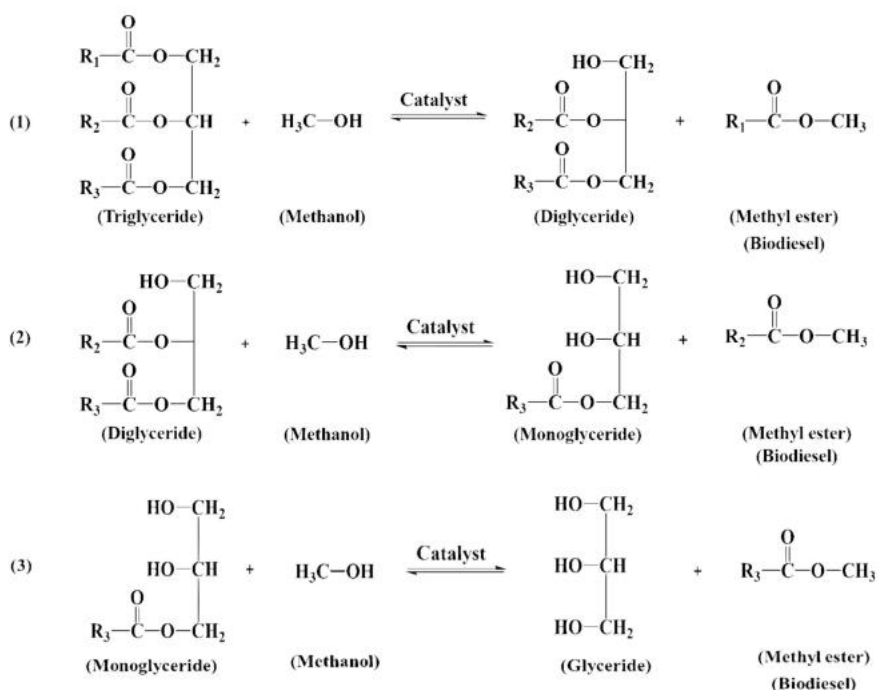
Complementando lo mostrado en la Figura 3, estudios recientes han profundizado en el mecanismo interno que permite esta conversión. Según Naseef y Tulaimat (2025), la transesterificación avanza mediante un mecanismo escalonado compuesto por tres etapas sucesivas, en las que el triglicérido se transforma progresivamente en diglicérido, monoglicérido y finalmente glicerol, liberándose en cada etapa una molécula de éster metílico de ácido graso (biodiésel). Este comportamiento explica por qué la etapa inicial (triglicérido a diglicérido) suele ser la más lenta debido a la baja miscibilidad entre el aceite y el alcohol,

mientras que las etapas posteriores avanzan con mayor facilidad al incrementarse la homogeneidad del sistema.

La Figura 4 muestra cómo cada cadena de ácido graso del triglicérido es reemplazada por el grupo proveniente del metanol, generando los ésteres metílicos que constituyen el biodiésel. Al integrar tanto la representación de la reacción global de la Figura 3, y el mecanismo escalonado descrito por Naseef y Tulaimat (2025), se obtiene una comprensión más completa de la dinámica cinética de la transesterificación y de la importancia de controlar parámetros como la relación molar alcohol/aceite, la intensidad de agitación y la selección del catalizador para asegurar una conversión eficiente hacia los ésteres.

Figura 4

Etapas de la reacción de transesterificación: conversión progresiva de triglicéridos a diglicéridos, monoglicéridos y glicerol



Fuente: Naseef y Tulaimat (2025)

2.3 Normativa nacional e internacional sobre biocombustibles

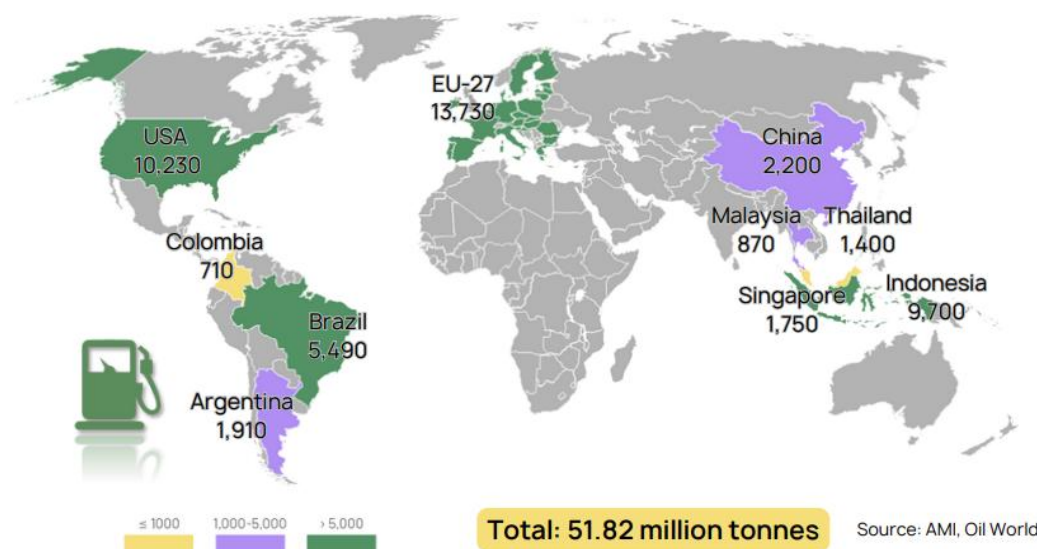
2.3.1 Normativa internacional

A nivel internacional, los marcos regulatorios sobre biocombustibles buscan promover fuentes de energía renovable que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de combustibles fósiles. En cifras globales, la producción de biodiésel se concentra en tres grandes regiones: la Unión Europea, los Estados Unidos y Brasil, que en conjunto representan más del 56 % de la producción. Según el European Biodiesel Board (2023) en 2022 la Unión Europea lideró con 13.7 millones de toneladas, seguida por los

Estados Unidos (10.2 millones) y Brasil (5.5 millones), sobre un total global estimado de 51.8 millones de toneladas, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5

Principales productores mundiales de biodiésel en 2022



Fuente: Biodiesel Board (2023)

Estas cifras explican la relevancia de sus respectivos marcos regulatorios (RED II/III en Europa, RFS2 en Estados Unidos y el PNPB en Brasil) como referentes internacionales en materia de sostenibilidad, trazabilidad e incentivos a la producción de biocombustibles.

En la Unión Europea, la principal norma es la Directiva (UE) 2018/2001, conocida como RED II (Renewable Energy Directive), que establece el objetivo vinculante de alcanzar al menos un 14 % de energía renovable en el transporte para 2030. Esta directiva promueve el uso de biocombustibles avanzados (procedentes de residuos, aceites usados y materias no alimentarias) e introduce criterios estrictos de sostenibilidad relacionados con la reducción de emisiones, la trazabilidad y el uso del suelo (European Parliament & Council of the European Union, 2018). Además, la RED II consolidó un sistema de certificación de sostenibilidad reconocido por la Comisión Europea, que exige verificar el origen de las materias primas y el cumplimiento de metas de reducción de emisiones. Este mecanismo de control y trazabilidad se ha convertido en un referente internacional, adoptado progresivamente por otros países productores de biocombustibles.

En 2023 se aprobó la RED III, que refuerza los objetivos anteriores, fijando una reducción mínima del 14.5 % en la intensidad de emisiones del transporte para 2030 (European Parliament & Council of the European Union, 2023).

En los Estados Unidos, el marco legal está definido por el Renewable Fuel Standard (RFS), administrado por la Environmental Protection Agency (EPA), el cual fija volúmenes

anuales obligatorios de biocombustibles y categorías específicas según su tipo y reducción de emisiones. Este programa impulsa la mezcla de biodiésel y bioetanol en combustibles fósiles mediante un sistema de créditos conocidos como RINs (Renewable Identification Numbers), que incentivan la producción y el cumplimiento regulatorio (United States Environmental Protection Agency, s.f.).

Por su parte, Brasil implementó en 2005 el Programa Nacional de Producción e Uso de Biodiesel (PNPB), mediante el cual se establecieron metas obligatorias de mezcla de biodiésel en el diésel fósil, junto con un sistema de subastas públicas para su comercialización. El país mantiene una de las tasas de mezcla más altas del mundo, actualmente del 14 % (B14), sustentada en políticas fiscales, programas de investigación agrícola y un marco regulatorio estable bajo (Ministério de Minas e Energia (MME)). Asimismo, el Consejo Nacional de Política Energética (CNPE) aprobó un cronograma de incremento progresivo que establece una mezcla del 15 % (B15) en 2025 y del 20 % (B20) a partir de 2026, conforme a la Resolución CNPE n° 3/2023 (2023).

Estos modelos internacionales reflejan tres enfoques regulatorios complementarios: la sostenibilidad ambiental (UE), el cumplimiento por cuotas (EE. UU.) y la planificación productiva y agrícola (Brasil), que en conjunto sirven como referentes para las estrategias nacionales de países en desarrollo.

2.3.2 Normativa nacional

En el Perú, el marco normativo sobre biocombustibles se estableció con la Ley N.º 28054, Ley de Promoción del Uso de Biocombustibles, que tiene por objeto fomentar la producción, comercialización y uso de biocombustibles como el bioetanol y el biodiésel (Congreso de la República del Perú, 2003). Esta ley fue reglamentada mediante el Decreto Supremo N.º 021-2007-EM, el cual define los porcentajes de mezcla, los procedimientos de registro de productores y comercializadores, y las competencias del Ministerio de Energía y Minas (MINEM) como entidad rectora (2007).

El reglamento estableció la obligatoriedad de mezclar biodiésel con diésel fósil destinado al consumo automotor, fijando un porcentaje inicial de 2 % (B2) en 2009, que progresivamente se incrementó hasta el B5. Asimismo, delegó a OSINERGMIN la supervisión del cumplimiento de las especificaciones técnicas y a INACAL la normalización de los estándares de calidad bajo la norma NTP 321.125. En su versión vigente, dicha norma es la NTP 321.125:2019, aprobada por Resolución Directoral N.º 018-2019-INACAL/DN, que reemplaza ediciones anteriores y adapta los requisitos técnicos para las condiciones nacionales.

En la actualidad, este marco legal constituye la base para el desarrollo del mercado nacional de biocombustibles, al promover el uso de fuentes renovables y la reducción de emisiones contaminantes. No obstante, su efectividad depende de la capacidad de producción

local, de la estabilidad en las políticas de mezcla y del fortalecimiento de mecanismos de fiscalización y trazabilidad que garanticen la calidad del biodiésel distribuido en el país.

2.4 Normativa de calidad nacional del biodiésel

Como se mencionó en el apartado anterior, la calidad del biodiésel producido y comercializado en el Perú se encuentra regulada por la Norma Técnica Peruana NTP 321.125:2019 – Biocombustibles. Biodiésel. Esta norma establece las propiedades fisicoquímicas y los métodos de ensayo del biodiésel B100, determinando los parámetros mínimos de pureza, contenido de glicerina libre y total, estabilidad a la oxidación, acidez, número de cetano, viscosidad cinemática, punto de inflamación, contenido de agua y sedimentos, contaminación metálica y contenido de azufre, entre otros.

Las especificaciones técnicas detalladas se presentan en la Tabla 2, elaborada a partir de la NTP 321.125:2019 (Instituto Nacional de Calidad, 2019).

Tabla 2

Especificaciones del biodiésel B100 según la NTP 321.125:2019

Propiedad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Apariencia	Limpia y brillante	Sin material visible	Inspección visual
Densidad a 15 °C (kg/m ³)	860	900	ASTM D4052
Viscosidad cinemática a 40 °C (mm ² /s)	3.5	5.0	ASTM D445
Número de cetano	47	-	ASTM D613
Punto de inflamación (°C)	120	-	ASTM D93
Número ácido (mg KOH/g)	-	0.5	ASTM D664
Contenido de éster (% masa)	96.5	-	EN 14103
Contenido de glicerina libre (% masa)	-	0.02	ASTM D6584
Contenido de glicerina total (% masa)	-	0.25	ASTM D6584
Contenido de agua y sedimentos (% vol.)	-	0.05	ASTM D2709 / D6304

Propiedad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Estabilidad a la oxidación a 110 °C (h)	6	-	EN 14112
Punto de obstrucción de filtro en frío (POFF)	Depende del clima		ASTM D6371
Contenido de azufre (mg/kg)	-	15	ASTM D5453
Contenido de fósforo (mg/kg)	-	10	ASTM D4951
Na + K (mg/kg)	-	5	EN 14538
Ca + Mg (mg/kg)	-	5	EN 14538
Monoglicéridos (% masa)	-	0.8	EN 14105
Diglicéridos (% masa)	-	0.2	EN 14105
Triglicéridos (% masa)	-	0.2	EN 14105
Cenizas sulfatadas (% masa)	-	0.02	ASTM D874
Carbono residual (10 % destilado) (% masa)	-	0.05	ASTM D4530
Punto de nube (°C)	Reportar	-	ASTM D2500
Punto de fluidez (°C)	Reportar	-	ASTM D97

Asimismo, la NTP 321.125:2019 incorpora requisitos dependientes del clima peruano, ajustando los límites de monoglicéridos saturados y las propiedades de flujo en frío según las temperaturas promedio de las distintas regiones del país, con el fin de asegurar la adecuada operatividad del biodiésel en condiciones ambientales variables. Su estructura técnica se encuentra armonizada con los estándares internacionales ASTM D6751 (Estados Unidos) y UNE-EN 14214 (Unión Europea), adaptados al contexto nacional.

En conjunto, esta norma constituye el principal referente técnico para productores, importadores, comercializadores y laboratorios de control de calidad del biodiésel, garantizando la uniformidad de las especificaciones a lo largo de la cadena de suministro y contribuyendo al cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad y eficiencia energética establecidos por el Estado peruano.

2.5 Materias primas: aceites vegetales y aceites usados

2.5.1 Importancia del tipo de materia prima

El tipo de materia prima es el factor más determinante en la producción de biodiésel, tanto por su impacto económico como por su influencia en la calidad del producto final. Diversos estudios estiman que el costo de la materia prima representa entre 70 % y 80 % del costo total de producción de biodiésel, lo que convierte su selección en un elemento crítico para la viabilidad del proceso industrial (Elgharbawy et al., 2021; Chozhavendhan et al., 2020).

La composición química del aceite empleado como materia prima influye directamente en la eficiencia del proceso de transesterificación y en la calidad del biodiésel obtenido. Factores como el contenido de triglicéridos, ácidos grasos libres, humedad y presencia de impurezas determinan el rendimiento de la reacción y las propiedades del producto final. En general, los aceites con mayor proporción de ácidos grasos saturados generan biodiésel más estables y con puntos de inflamación más altos, mientras que aquellos con predominio de ácidos grasos insaturados presentan un mejor comportamiento a bajas temperaturas (Chozhavendhan et al., 2020).

En síntesis, el tipo de materia prima determina no solo el costo y rendimiento del proceso, sino también la huella ambiental y la sostenibilidad del ciclo productivo. Por ello, la evaluación de las fuentes de aceite disponibles constituye un aspecto esencial en el diseño de proyectos de biodiésel orientados a la eficiencia económica y la reducción de emisiones.

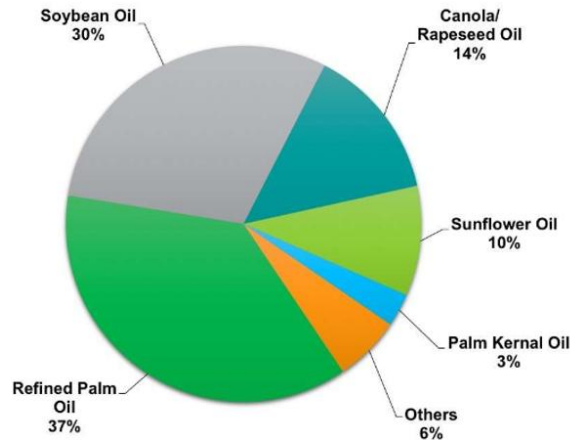
2.5.2 Aceites vegetales vírgenes

Según Osman et al. (2024) los aceites vegetales constituyen la materia prima predominante para la producción de biodiésel a nivel mundial, aunque su tipo y disponibilidad varían ampliamente entre regiones. En Norteamérica, el aceite de soya es el insumo más utilizado debido a su amplia disponibilidad y a la infraestructura agrícola desarrollada para su cultivo. En los países europeos, en cambio, predomina el uso del aceite de colza (canola), valorado por su elevado contenido de aceite por hectárea y su buena adaptación a climas templados, lo que lo convierte en una opción económicamente viable dentro del contexto agrícola del continente.

En regiones tropicales del sudeste asiático, como Malasia e Indonesia, la producción de biodiésel se basa principalmente en aceites de palma y coco, los cuales se obtienen de cultivos abundantes y de alto rendimiento.

Figura 6

Materia prima utilizada en la producción de Biodiesel de primera generación



Fuente: (IHS Markit, 2021)

En relación con el aceite de Palma, según Elgharbawy et al. (2021), entre el 70 % y 90 % del aceite de palma se destina a la industria alimentaria, mientras que el porcentaje restante se utiliza en aplicaciones industriales, incluida la elaboración de biodiésel. Este aceite permite obtener un rendimiento considerable en la elaboración de biodiesel, ya que aproximadamente 1.25 L de aceite de palma permiten obtener 1 L de producto. Antes de la transesterificación, requiere un proceso de purificación para eliminar impurezas, humedad y compuestos volátiles, reduciendo el contenido de ácidos grasos libres a alrededor de 0.1 %.

Por otro lado, el aceite de soya representa otra materia prima esencial para el biodiésel. Para obtener 1 L de biodiésel se requieren aproximadamente 1.3 L de aceite de soya, lo que refleja su elevada eficiencia de conversión. Además, este aceite es apreciado por su disponibilidad estacional y su papel dual como producto alimentario y energético

En el contexto peruano, los aceites de palma y soya son los de mayor disponibilidad, debido a la producción local en regiones como San Martín y Ucayali y a las importaciones complementarias provenientes de países vecinos. Estas fuentes representan alternativas viables para la producción de biodiésel a nivel industrial, siempre que se garantice la trazabilidad y la sostenibilidad de su cadena de suministro.

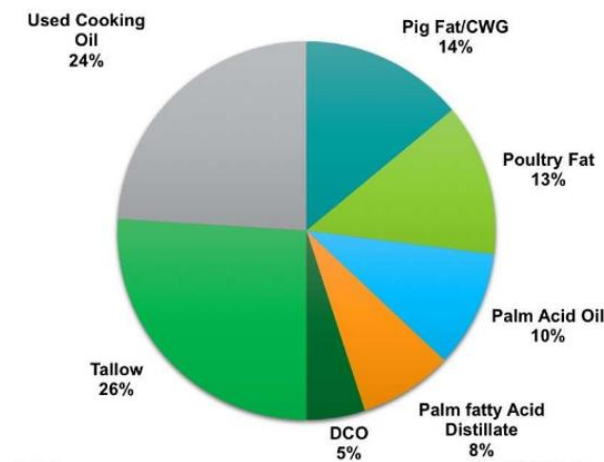
2.5.3 Aceites usados

El aceite de cocina usado (WCO, por sus siglas en inglés) se ha consolidado en los últimos años como una de las materias primas más sostenibles para la producción de biodiésel, debido a que ayuda a reducir la contaminación generada por la mala disposición de estos aceites en el medio ambiente y a su bajo costo comparado con los aceites vegetales (Osman et al., 2024). Este residuo, generado en hogares, restaurantes e industrias alimentarias, permite reutilizar aceites y grasas sin necesidad de destinar nuevas áreas agrícolas para cultivos oleaginosos, lo que reduce tanto los costos de producción como la

presión ambiental sobre los suelos agrícolas (Elgharbawy et al., 2021). Asimismo, su aprovechamiento contribuye al desarrollo de una economía circular, al transformar un residuo con alto potencial contaminante en una fuente energética renovable (Cerón Ferrusca et al., 2023)

Figura 7

Materia prima utilizada en la producción de Biodiesel de segunda generación



Fuente: (IHS Markit, 2021)

No obstante, la calidad del aceite usado varía significativamente según su origen y número de ciclos de uso, lo que puede generar altos contenidos de ácidos grasos libres, humedad e impurezas (Farouk et al., 2024). Estas características afectan la reacción de transesterificación y disminuyen el rendimiento del proceso (Chozhavendhan et al., 2020). Debido a estas limitaciones técnicas, el presente estudio no se centra en el uso de aceites residuales, sino en materias primas de composición más estable y controlada.

Capítulo 3

Metodología

El presente capítulo expone el enfoque metodológico empleado para el desarrollo del estudio, detallando el tipo de investigación, las fuentes de información utilizadas y los procedimientos técnicos y financieros aplicados. La metodología adoptada busca integrar criterios normativos, técnicos y económicos, de modo que el análisis obtenido permita sustentar con rigor la viabilidad del proyecto propuesto.

3.1 Tipo y diseño de la investigación

El estudio corresponde a una investigación de prefactibilidad, orientada a analizar, a nivel conceptual, los aspectos técnicos, económicos, regulatorios y de mercado que condicionan la implementación de una planta de producción de biodiésel en Lima. Este tipo de investigación permite establecer una base referencial para evaluar la conveniencia y el potencial desarrollo del proyecto en etapas posteriores.

La investigación presenta un enfoque mixto, que combina métodos cualitativos y cuantitativos de manera complementaria. Desde el enfoque cualitativo, se realiza un análisis documental del marco normativo nacional e internacional aplicable a la producción y comercialización de biodiésel, con el propósito de identificar los requisitos legales y regulatorios relevantes. Desde el enfoque cuantitativo, se efectúan estimaciones de demanda, balances de materia y evaluaciones económico-financieras a partir de información estadística y técnica proveniente de fuentes oficiales y literatura especializada.

Asimismo, el estudio tiene un carácter descriptivo y exploratorio, ya que no busca probar hipótesis ni establecer relaciones de causa y efecto, sino describir, analizar y comprender las condiciones que influyen en la factibilidad técnica y económica del proyecto. Su carácter exploratorio responde a que en el contexto peruano existen pocos estudios recientes sobre la producción de biodiésel a nivel industrial, mientras que el enfoque descriptivo permite detallar las características del entorno normativo, del mercado y de los costos asociados. Por esta razón, se adopta un diseño no experimental y de corte transversal, dado que la investigación se basa en información secundaria ya existente, sin manipular variables, y se desarrolla en un periodo de tiempo determinado. En conjunto, este enfoque metodológico busca elaborar un diagnóstico integral del entorno técnico, económico y regulatorio, que sirva como base para evaluar la viabilidad del proyecto de prefactibilidad.

3.2 Fuentes de información y técnicas de recolección de datos

La investigación se sustenta principalmente en fuentes de información secundaria, recopiladas de organismos oficiales, literatura académica y reportes técnicos del sector energético. Entre las fuentes nacionales destacan el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinergmin), la Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (SUNAT) y el Instituto

Nacional de Calidad (INACAL), que proporcionan datos actualizados sobre producción, importaciones, consumo, precios de combustibles y normas técnicas aplicables al biodiésel en el país.

De manera complementaria, se considerarán fuentes internacionales como la Agencia Internacional de Energía (IEA), la Administración de Información Energética de los Estados Unidos (EIA) y la American Society for Testing and Materials (ASTM), así como publicaciones indexadas en bases de datos científicas como ScienceDirect, SpringerLink y MDPI. Estas fuentes aportan información técnica y estadística sobre políticas energéticas, procesos de transesterificación, estándares internacionales de calidad del biodiésel, costos de producción y experiencias operativas de plantas en otros países.

Las técnicas de recolección de datos comprenden la revisión documental y bibliográfica, la sistematización de información estadística y la consulta de publicaciones especializadas. Los datos obtenidos serán organizados en matrices comparativas para facilitar su análisis, y posteriormente procesados mediante herramientas informáticas como Microsoft Excel y R, que permitirán elaborar proyecciones, estimaciones de demanda y análisis de costos. Esta combinación de fuentes y técnicas asegura la validez y consistencia de la información empleada en el estudio.

3.3 Metodología de análisis técnico

El análisis técnico se orienta a evaluar la viabilidad operativa y conceptual de una planta de producción de biodiésel en Lima, considerando como materia prima principal los aceites vegetales vírgenes. Esta etapa comprende el diseño conceptual del proceso productivo, la definición de las principales etapas de operación y la estimación preliminar de los requerimientos técnicos del proyecto.

En primer lugar, se elaborará un diagrama de flujo de proceso (PFD) que represente las etapas esenciales de la producción de biodiésel mediante transesterificación: pretratamiento del aceite, reacción química, separación de fases, purificación del biodiésel y recuperación de glicerina. A partir de este esquema, se establecerán los balances de materia simplificados que permitirán estimar los consumos de insumos, reactivos y utilidades por unidad de producción.

Posteriormente, se identificarán los equipos principales necesarios para el proceso (reactores, bombas, tanques de almacenamiento, separadores, sistemas de purificación y unidades auxiliares), así como sus condiciones básicas de operación. Se considerarán parámetros de diseño y rendimientos referenciales reportados en literatura especializada y estudios técnicos de plantas de biodiésel a escala industrial.

El objetivo de esta metodología técnica es definir las características conceptuales del proceso y establecer los criterios de dimensionamiento general, que servirán como insumo para el análisis económico-financiero. En esta fase no se busca un diseño detallado, sino una

estimación representativa a nivel de prefactibilidad, que permita evaluar la factibilidad técnica y los requerimientos básicos de implementación del proyecto.

3.4 Metodología de análisis económico-financiero

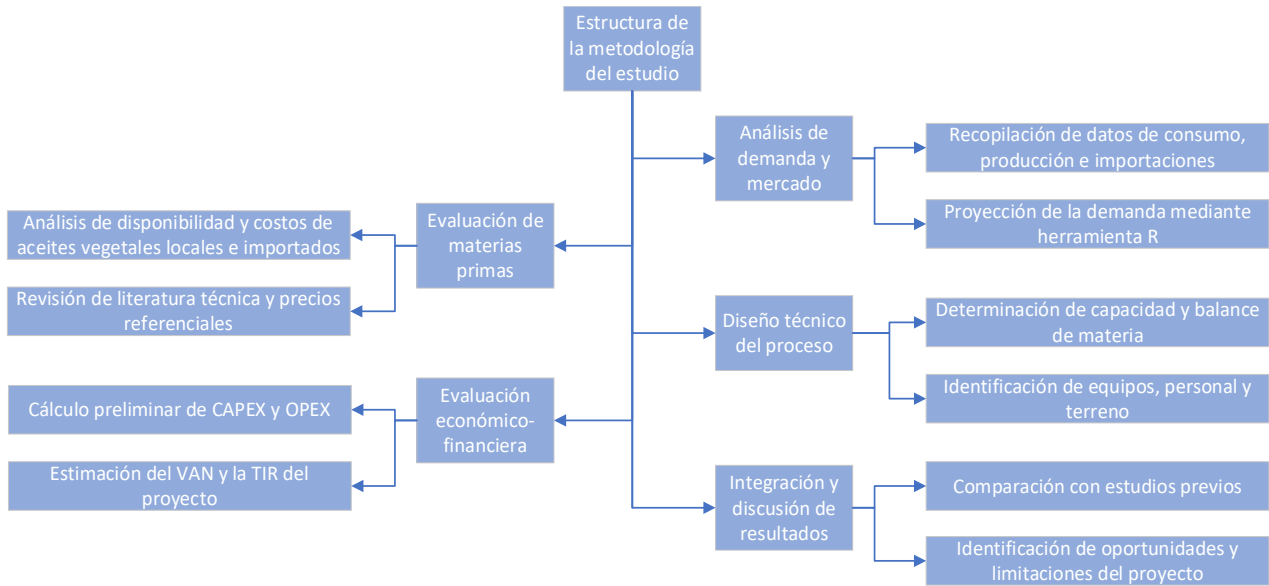
El análisis económico-financiero tiene como objetivo evaluar la rentabilidad y sostenibilidad económica del proyecto propuesto, a partir de los resultados obtenidos en el análisis técnico. Para ello, se estimarán de manera referencial los costos de inversión (CAPEX) y los costos de operación (OPEX) de la planta, con base en precios de mercado, literatura especializada y reportes oficiales de organismos como el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) y Osinergmin.

El CAPEX incluirá las inversiones asociadas a la infraestructura, adquisición e instalación de equipos, servicios auxiliares, y costos de ingeniería, mientras que el OPEX abarcará los gastos recurrentes de operación, tales como consumo de materia prima, reactivos, energía, mantenimiento, mano de obra y logística.

Para la estimación de ingresos, se utilizarán los precios de referencia del biodiésel publicados por Osinergmin, complementados con información sobre precios históricos de importación y proyecciones del mercado nacional. A partir de estas variables, se determinará un precio de venta proyectado y se construirá un flujo de caja base que permita analizar los resultados económicos del proyecto.

Posteriormente, se calcularán los principales indicadores financieros de evaluación como: Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR), a fin de determinar la viabilidad económica del proyecto a nivel de prefactibilidad.

La metodología previamente descrita se sintetiza en el diagrama de flujo presentado en la Figura 8, el cual resume de manera ordenada las principales etapas consideradas en el estudio. Este esquema permite visualizar la secuencia lógica del trabajo, desde la evaluación de materias primas y el análisis de demanda hasta el diseño técnico del proceso, la evaluación económico-financiera y la integración de los resultados obtenidos.

Figura 8*Diagrama de la estructura de la metodología del estudio*

Capítulo 4

Análisis de la demanda y evaluación de materias primas

El presente capítulo aborda dos aspectos fundamentales para determinar la viabilidad técnica y económica de implementar una planta de biodiésel en Lima: la demanda nacional del biocombustible y la disponibilidad de materias primas para su producción.

En primer lugar, se analiza la evolución del consumo de biodiésel en el mercado peruano, identificando las tendencias históricas, los factores que inciden en la demanda, así como las proyecciones de requerimiento para los próximos años.

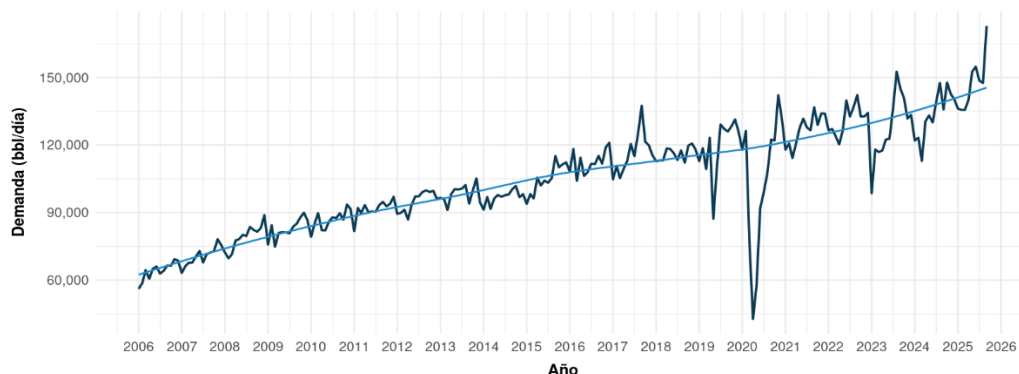
En segundo lugar, se evalúan las principales materias primas disponibles tanto a nivel local como internacional, considerando criterios de disponibilidad, costo, calidad y sostenibilidad. Este análisis permite identificar las alternativas más competitivas y alineadas con las condiciones del mercado nacional, sirviendo de base para la selección del insumo que será considerado en el diseño conceptual del proyecto.

4.1 Análisis de la demanda nacional y proyecciones

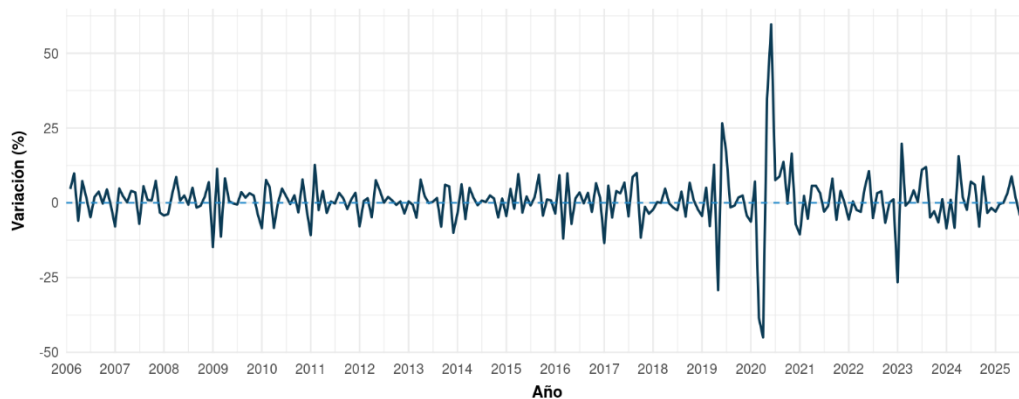
4.1.1 Análisis exploratorio

Antes de desarrollar los modelos de proyección de la demanda nacional de diésel, resulta fundamental realizar un análisis exploratorio de la serie histórica. Este análisis permite identificar patrones de comportamiento, tendencias de largo plazo, estacionalidad recurrente, variabilidad mensual y posibles eventos atípicos que hayan afectado el consumo a lo largo de los años. Comprender estas características preliminares es clave para seleccionar adecuadamente las metodologías de pronóstico, validar la estabilidad estadística de la serie y evitar sesgos en la construcción de los escenarios prospectivos.

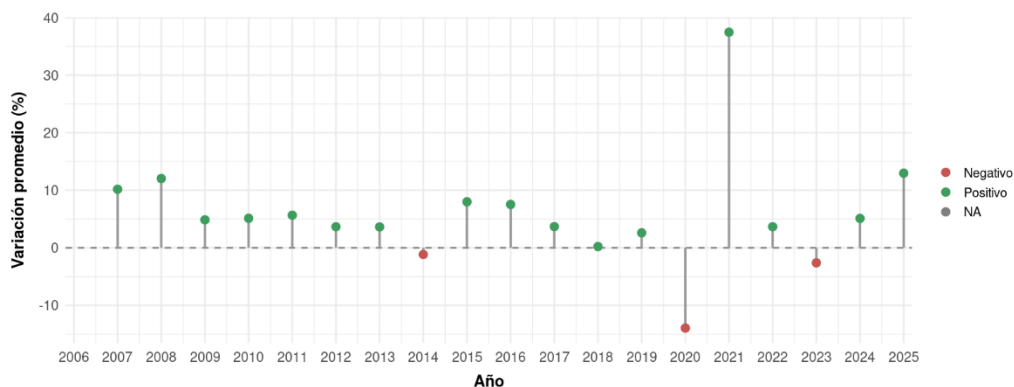
La **Figura 9** presenta la evolución mensual de la demanda nacional de diésel entre 2006 y 2026. Se observa una trayectoria creciente de largo plazo, con una tendencia lineal positiva, impulsada principalmente por el crecimiento económico y la expansión del parque automotor y del transporte de carga. La demanda muestra fluctuaciones de corto plazo propias de la actividad económica, así como eventos atípicos marcados, especialmente durante el año 2020, asociados a las restricciones de movilidad por la pandemia. En los últimos años, la demanda retoma su senda creciente y alcanza niveles máximos hacia 2025.

Figura 9*Evolución mensual de la demanda nacional*

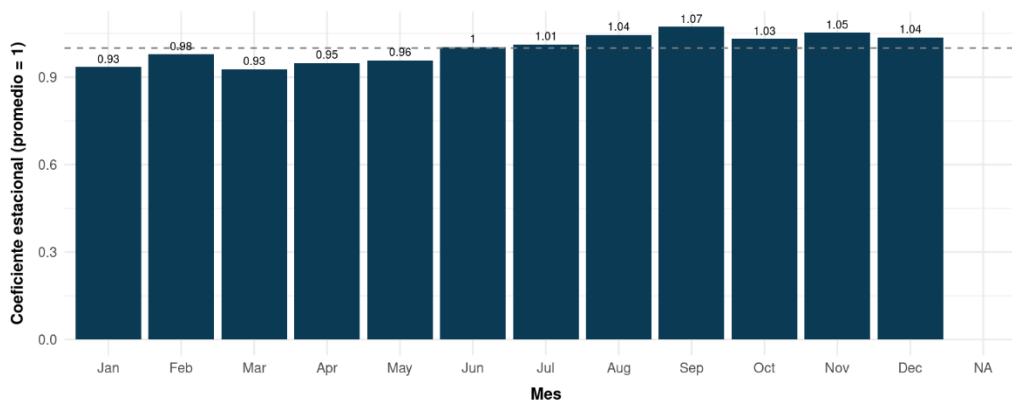
La Figura 10 muestra la variación porcentual mensual de la demanda nacional de diésel. Los resultados evidencian que, en condiciones normales, la demanda presenta oscilaciones relativamente moderadas y centradas alrededor de cero, reflejando la estacionalidad y la actividad económica mensual. Sin embargo, destacan variaciones extremas observadas durante 2020, cuando las medidas de confinamiento generaron caídas abruptas en la demanda, seguidas de incrementos pronunciados durante la recuperación. Fuera de este periodo excepcional, la serie se mantiene estable y sin volatilidad significativa.

Figura 10*Variación mensual de la demanda*

La Figura 11 resume la variación interanual promedio (YoY) de la demanda para cada año del periodo evaluado. Se aprecia que la mayoría de los años presenta un crecimiento positivo, consistente con la tendencia de largo plazo observada. Existen, no obstante, años con disminución de la demanda, como 2014 y, de manera más marcada, 2020, debido a las razones antes mencionadas. En contraste, 2021 muestra un repunte extraordinario asociado al efecto rebote tras la reapertura económica. En los años más recientes (2023–2025), el crecimiento se normaliza dentro de rangos moderados.

Figura 11*Variación interanual promedio (YoY) por año*

La Figura 12 y presenta el índice estacional promedio mensual de la demanda, donde un valor de 1 representa el nivel promedio anual. Se observa un patrón estacional definido: los meses de enero a mayo registran coeficientes inferiores al promedio, indicando menor consumo relativo en el primer semestre. A partir de junio, la demanda aumenta gradualmente, alcanzando sus picos entre agosto y noviembre, meses en los que el índice supera 1.04. Este comportamiento concuerda con la mayor actividad logística, minera y de transporte en la segunda mitad del año. Diciembre mantiene también un nivel elevado debido al incremento del transporte asociado a la campaña comercial de fin de año.

Figura 12*Índice estacional promedio mensual***Tabla 3**

Promedio mensual de la demanda nacional de diésel e índice estacional asociado

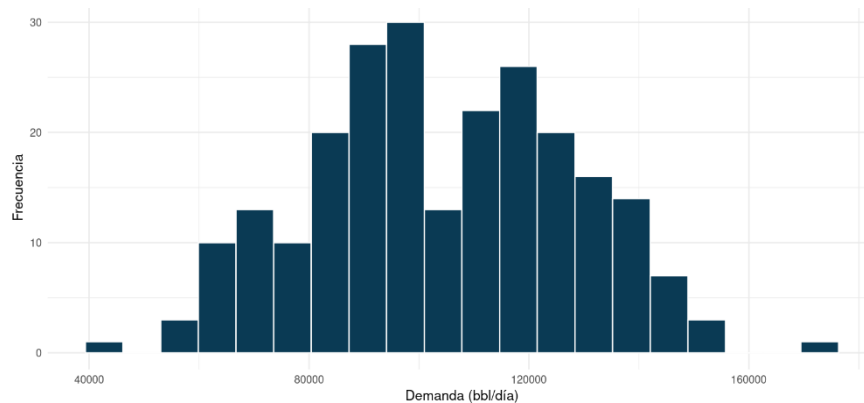
Mes	Promedio	Coefficiente
Enero	97,833	0.934
Febrero	102,410	0.978
Marzo	97,050	0.927
Abril	99,306	0.948

Mes	Promedio	Coficiente
Mayo	100,235	0.957
Junio	105,057	1
Julio	106,015	1.01
Agosto	109,389	1.04
Setiembre	112,263	1.07
Octubre	107,991	1.03
Noviembre	110,248	1.05
Diciembre	108,582	1.04

La Figura 13 muestra la distribución de frecuencia de la demanda mensual de diésel durante el periodo analizado. La forma aproximadamente unimodal y simétrica indica que la demanda se concentra principalmente entre 90,000 y 130,000 bbl/día, con pocos valores extremos. La presencia de caídas atípicas hacia 2020 y algunas observaciones elevadas en los años recientes explica las colas externas del histograma. Esto confirma que, aunque existen shocks puntuales, la demanda mantiene una distribución estable alrededor de su media histórica.

Figura 13

Distribución de la demanda mensual



En conjunto, los resultados del análisis exploratorio evidencian que la demanda nacional de diésel presenta una tendencia creciente sostenida, un patrón estacional definido con incrementos marcados en la segunda mitad del año y una variabilidad moderada. Estas características proporcionan una base sólida para el desarrollo de los modelos de proyección.

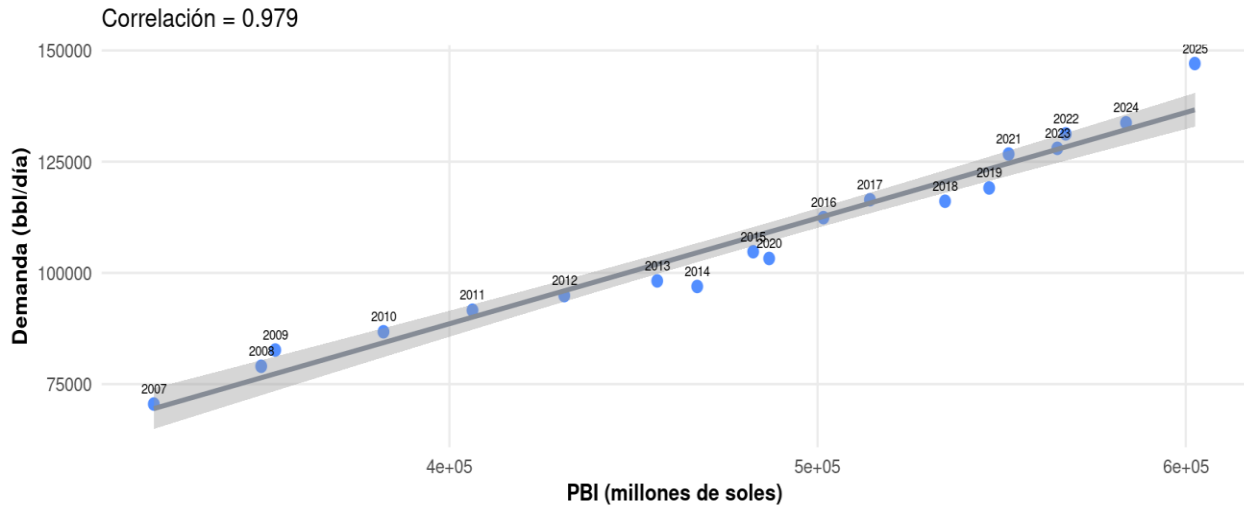
4.1.2 Proyección mediante regresión lineal: Demanda vs PBI

La Figura 14 muestra la relación histórica entre el Producto Bruto Interno (PBI) y la demanda nacional de diésel, evidenciando un vínculo marcadamente lineal entre ambas variables. Cada punto representa el promedio anual de demanda asociado al nivel de PBI correspondiente. Se observa que, conforme el PBI aumenta, la demanda de diésel también se incrementa de manera proporcional, lo que sugiere una fuerte dependencia del consumo energético respecto al nivel de actividad económica. Este comportamiento es coherente con

la naturaleza del diésel, ampliamente utilizado en los sectores transporte, minería, construcción e industria. La alta correlación observada ($r = 0.979$) confirma una relación estrecha y consistente a lo largo del periodo analizado.

Figura 14

Relación entre PBI y Demanda de Diésel



Después de confirmar la alta correlación entre el PBI y la demanda nacional de diésel, se procedió a estimar el modelo de regresión lineal simple. El resumen estadístico del ajuste obtenido se presenta en la Figura 15, donde se muestran los coeficientes del modelo, su significancia y los principales indicadores de desempeño.

Figura 15

Resumen del modelo

```
Call:
lm(formula = Demanda ~ PBI, data = df)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-7603.0 -3591.0  754.3  2264.2 10406.1

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -6.423e+03  5.867e+03  -1.095    0.289
PBI          2.375e-01  1.207e-02  19.681  3.89e-13 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 4386 on 17 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.958,    Adjusted R-squared:  0.9555
F-statistic: 387.4 on 1 and 17 DF,  p-value: 3.89e-13
```

Adicionalmente, los indicadores de desempeño del modelo se complementan con las métricas presentadas en la Tabla 4, las cuales confirman la solidez estadística y la capacidad predictiva del ajuste obtenido.

Tabla 4*Métricas del modelo*

R2	R2 ajustado	Sigma	Estadístico F	p_value	AIC	BIC	RMSE	MAE	MAPE pct
0.958	0.955	4386.278	387.357	3.89e-13	376.483	379.317	4149.003	3245.792	3.058

El modelo de regresión lineal simple entre la demanda nacional de diésel (bbl/día) y el Producto Bruto Interno (PBI, millones de soles) presentó un excelente nivel de ajuste. El coeficiente de determinación $R^2 = 0.958$ indica que aproximadamente el 95.8 % de la variabilidad observada en la demanda de diésel puede explicarse a partir de las variaciones del PBI, lo cual evidencia una relación económica sólida entre ambas variables. Asimismo, el R^2 ajustado (0.955) confirma la robustez del modelo, reflejando que la inclusión del PBI como variable explicativa mantiene un alto poder predictivo sin sobreajuste.

El estadístico F (387.36) con un p-valor de 3.89×10^{-13} demuestra que el modelo global es altamente significativo ($p < 0.001$), es decir, la probabilidad de que esta relación se deba al azar es prácticamente nula. En consecuencia, se concluye que el PBI es un determinante estadísticamente significativo de la demanda nacional de diésel.

En términos de precisión, los indicadores de error ($RMSE = 4,149$ bbl/día, $MAE = 3,246$ bbl/día y $MAPE = 3.06\%$) evidencian que las diferencias promedio entre los valores estimados y los observados son reducidas. Esto sugiere que el modelo tiene un buen desempeño predictivo, con una capacidad adecuada para proyectar la demanda a partir del comportamiento esperado del PBI.

En conjunto, estos resultados confirman que el PBI constituye una variable explicativa confiable para estimar la demanda nacional de diésel. La alta correlación positiva y la significancia estadística del modelo respaldan su uso en las proyecciones futuras del estudio, especialmente como insumo para los escenarios de demanda utilizados en la evaluación de la viabilidad técnica y económica de la planta de biodiésel propuesta.

A fin de ejecutar la proyección con el modelo de regresión lineal generado, se recopilaron las estimaciones oficiales y más recientes del crecimiento del PBI peruano para el horizonte 2025–2030, provenientes del Banco Central de Reserva del Perú (BCRP) y del Banco Mundial. Estas proyecciones servirán como insumo para calcular la demanda estimada de diésel en los próximos años. La Tabla 5 resume las tasas de crecimiento consideradas y sus respectivas fuentes.

Tabla 5*Proyecciones de crecimiento del PBI consideradas*

Año	Crecimiento del PBI (%)	Fuente
2025	3.0 %	BCRP (2025)

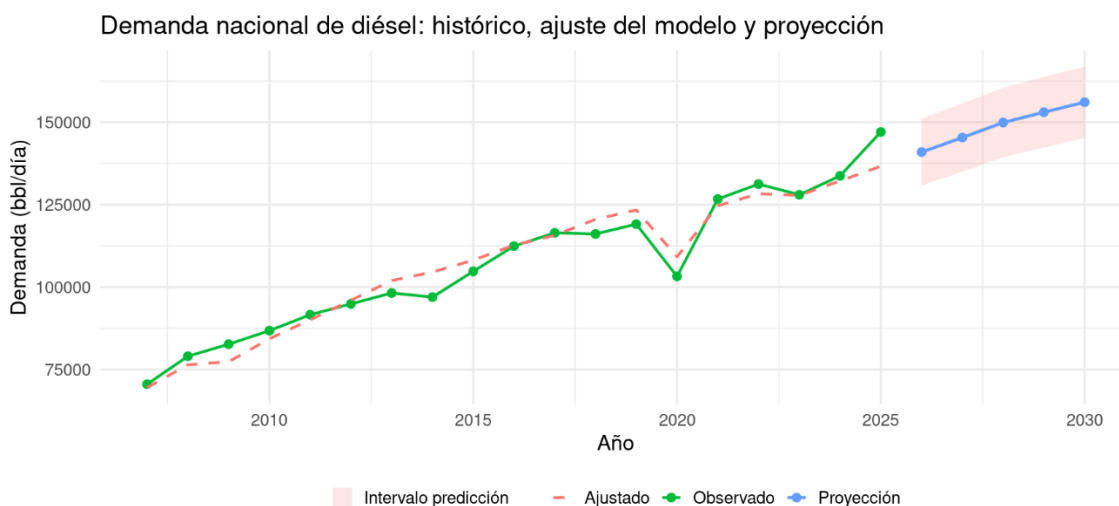
Año	Crecimiento del PBI (%)	Fuente
2026	3.0 %	BCRP (2024, pág. 59)
2027	3.0 %	BCRP (2024, pág. 59)
2028	3.0 %	BCRP (2024, pág. 59)
2029	2.0 %	Banco Mundial (2024)
2030	2.0 %	Banco Mundial (2024)

A continuación, en la Tabla 6 y Figura 16 se presentan los resultados de la proyección obtenida con el modelo de regresión lineal, considerando la evolución esperada del PBI para el periodo 2026–2030. La tabla detalla los valores estimados de demanda, junto con los intervalos inferior y superior asociados al nivel de confianza del modelo, mientras que la figura ilustra visualmente el ajuste histórico y la proyección futura.

Tabla 6
Resultados del modelo

Año	PBI	Fit	Lower	Higher
2026	620,539	140,946.2	130,791.0	151,101.3
2027	639,155	145,367.2	135,034.4	155,700.0
2028	658,330	149,921.0	139,386.1	160,455.9
2029	671,496	153,047.8	142,363.3	163,732.2
20230	684,296	156,087.6	145,249.9	166,925.3

Figura 16
Resultados del modelo



4.2 Evaluación de materias primas locales e internacionales

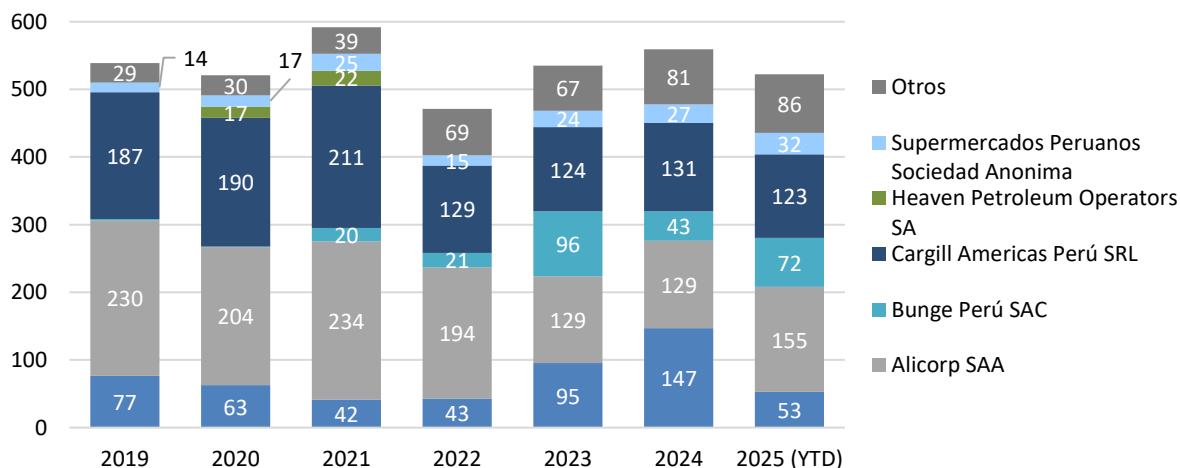
4.2.1 Análisis del suministro internacional

A fin de evaluar la disponibilidad de materias primas para la producción de biodiésel, resulta indispensable analizar la estructura y dinámica del suministro internacional de aceite de soya, ya que esta constituye una de las principales alternativas de abastecimiento para una planta de escala industrial en el país. Este análisis permite identificar la capacidad de oferta

de los principales exportadores, la estabilidad del flujo de importaciones hacia el Perú y el grado de concentración por proveedor y país de origen, aspectos esenciales para determinar la viabilidad y seguridad del abastecimiento en el largo plazo.

En la Figura 17 se muestra la evolución de las importaciones peruanas de aceite de soya entre 2019 y 2025 (YTD), expresadas en miles de toneladas. Durante el período analizado se observa una participación constante de los principales actores del mercado, destacando Alicorp S.A.A. (36 %), Cargill Américas Perú S.R.L. (31 %), ADM Andina Perú S.R.L. (15 %) y Bunge Perú S.R.L. (7 %), que en conjunto concentran la mayor parte de las importaciones totales. Adicionalmente, se aprecia un flujo estable de abastecimiento de esta materia prima hacia el país, con un promedio anual de 535,000 toneladas importadas al año, tanto para uso alimentario como para aplicaciones industriales.

Figura 17
Importaciones de aceite de soya por importador [KTM/Año]

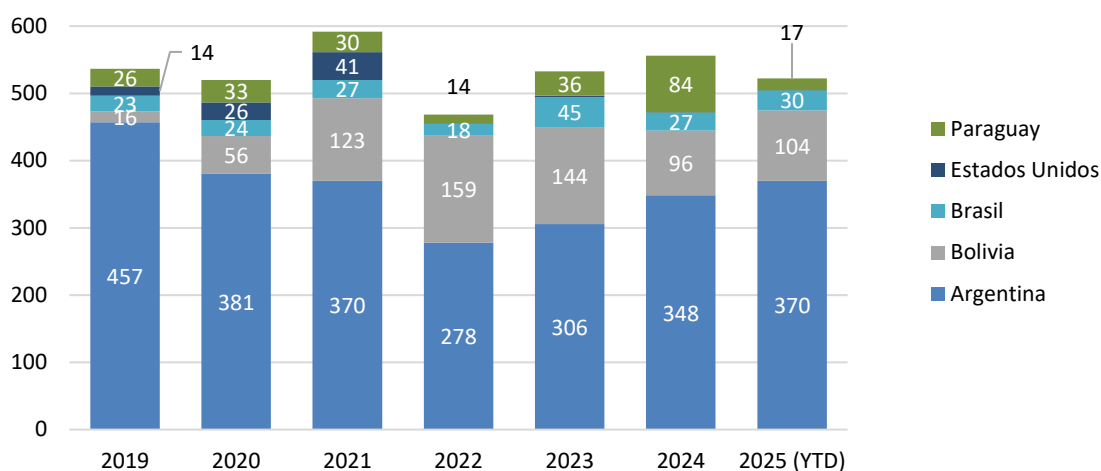


Nota: Datos del 2025 octubre

Siguiendo con la evaluación del aceite de soya, la Figura 18 muestra la distribución de las importaciones peruanas según país de origen entre 2019 y 2025 (YTD). Este análisis permite identificar la estructura geográfica del suministro y las principales fuentes que abastecen al mercado nacional, aspecto clave para determinar la estabilidad y competitividad de esta materia prima en el contexto de una planta de biodiésel.

Figura 18

Importaciones de aceite de soya por país de origen [KTM/Año]



Nota: Datos del 2025 octubre

Se observa una marcada concentración del suministro proveniente de Argentina, que en promedio representa alrededor del 67 % del total importado durante el período analizado, consolidándose como el principal proveedor del mercado peruano. Esta tendencia se explica por la alta capacidad exportadora del complejo sojero argentino y su proximidad logística al Perú.

En segundo lugar, se ubica Bolivia, con una participación promedio de 25 %, que ha incrementado su volumen exportado de 16,000 toneladas en 2019 a 104,000 toneladas en que va del 2025 (YTD), fortaleciendo su rol como fuente regional complementaria. En menor proporción participan Paraguay (6 %), Brasil (5 %), Estados Unidos (2 %), que reflejan envíos esporádicos o estrategias de diversificación de origen ante variaciones de precios internacionales.

En conjunto, la evolución observada evidencia una disponibilidad estable y creciente de aceite de soya en el mercado peruano, sustentada por una red consolidada de importadores con capacidad logística y financiera, lo que convierte a esta materia prima en una alternativa viable para el abastecimiento de una planta de biodiésel en Lima.

4.2.2 Análisis del suministro local

Además del suministro internacional, es fundamental evaluar la disponibilidad de materias primas producidas localmente, a fin de determinar el potencial del país para abastecer de manera interna una planta nacional de biodiésel. En particular, el análisis del aceite de palma peruano permite identificar la capacidad productiva del sector, su dinámica exportadora y el grado de excedente disponible frente al consumo interno.

En la Figura 19 se presenta la evolución de las exportaciones peruanas de aceite de palma durante el periodo 2019–2025 (YTD), expresadas en miles de toneladas. Se observa un crecimiento sostenido hasta 2023, año en que las exportaciones alcanzaron aproximadamente 140,000 toneladas, evidenciando la consolidación del Perú como exportador de aceite de palma crudo.

Los principales actores del comercio exterior son Sol de Palmas S.A., Industrias del Espino S.A., Exportadora Romex S.A. y ADM Andina Perú S.R.L., que en conjunto concentran más del 90 % del volumen exportado. Entre ellos, Sol de Palmas destaca como el principal exportador, con envíos anuales que superan las 60,000 toneladas en promedio entre 2022 y 2024, seguido de Industrias del Espino, que mantiene una participación estable alrededor del 40 %.

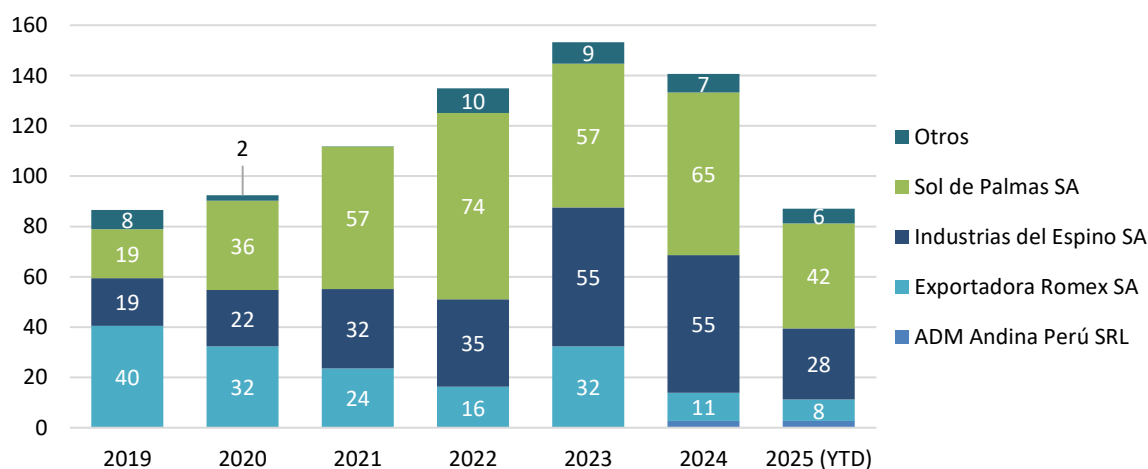
El volumen total exportado refleja la existencia de un excedente estructural de producción respecto al consumo interno. Este excedente se explica por el rápido crecimiento de la industria palmicultora en regiones como Ucayali y San Martín, donde la capacidad productiva supera la demanda local de aceites vegetales para consumo alimentario.

En este contexto, el aceite de palma producido en el Perú representa una fuente potencial para el abastecimiento de una planta nacional de biodiésel, reduciendo la dependencia de importaciones de aceites vegetales y fortaleciendo la seguridad energética. Además, el hecho de que buena parte de las exportaciones actuales se destine a mercados como México, Colombia y Chile (Nota: Datos del 2025 octubre)

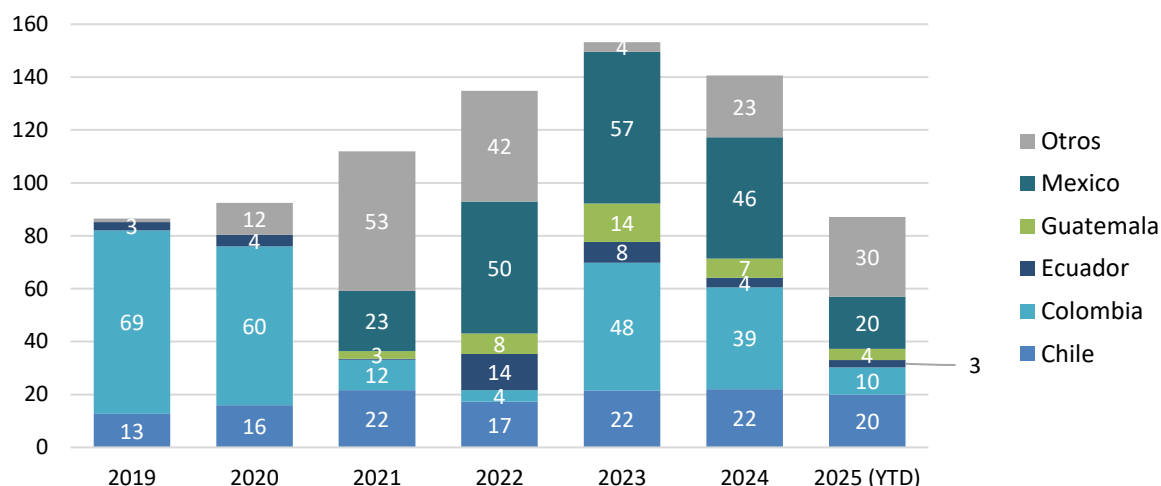
Figura 20) demuestra que el producto cumple con estándares de calidad internacional, lo cual respalda su idoneidad para aplicaciones energéticas bajo esquemas de sostenibilidad certificada.

Figura 19

Exportaciones de aceite de palma por exportador [KTM/Año]



Nota: Datos del 2025 octubre

Figura 20*Exportaciones de aceite de palma por destino [KTM/Año]*

Nota: Datos del 2025 octubre

4.2.3 Análisis de precios

Para complementar el análisis del suministro y contar con una referencia clara de los costos asociados a la materia prima, se evaluaron los precios de importación por vía marítima desde los principales países de origen: Argentina, Paraguay y Brasil. Estos países, como se puede apreciar en la Tabla 7 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** representan el 77% del abastecimiento. Esta revisión permite establecer una base comparativa de precios CIF Callao, útil para estimar el costo de la materia prima puesta en planta.

Tabla 7*Importaciones de aceite de soya por país de origen y vía de importación [KTM]*

Vía de importación	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025 (YTD)	Total
Carretera	15	43	98	122	107	96	99	581
Argentina	0	0	0	1	0	0	0	1
Bolivia	13	40	92	109	96	87	87	525
Brasil	2	3	6	13	11	8	12	54
Canadá	0	0	0	0	0	0	0	0
Chile	0	0	0	0	0	0	0	0
Marítimo	519	476	492	346	425	460	422	3141
Argentina	457	381	370	278	305	348	370	2509
Bolivia	1	15	30	50	48	9	17	171
Brasil	20	21	21	4	34	18	18	136
Estados Unidos	14	26	41	0	2	0	0	84
Paraguay	26	33	30	14	36	84	17	241
Otros	5	2	1	3	3	3	1	18

Vía de importación	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025 (YTD)	Total
Total	539	521	592	471	535	559	522	3739

En la Tabla 8 se presentan los precios CIF de importación de aceite de soya hacia el Perú durante el periodo 2019–2025, expresados en USD por tonelada métrica. Para este análisis se consideraron únicamente las empresas que destinan el producto al procesamiento de aceites para la producción de biodiésel, como ADM Andina Perú S.R.L., Bunge Perú S.A.C. y Heaven Petroleum Operators S.A. Estas compañías mantienen flujos de importación regulares de aceite crudo o semirrefinado, materia prima que puede ser directamente incorporada en la cadena de transformación de biocombustibles.

Los resultados muestran una evolución coherente con la tendencia internacional del complejo sojero. Entre 2019 y 2021, los precios CIF promedio se incrementaron de 697 USD/TM a 1,312 USD/TM, impulsados por la recuperación de la demanda global y el alza de los commodities agrícolas. El máximo se alcanzó en 2022, con un promedio ponderado de 1,590 USD/TM, asociado al impacto del conflicto Rusia–Ucrania sobre el mercado mundial de aceites vegetales. A partir de 2023, los precios muestran una corrección progresiva, estabilizándose entre 1,000 y 1,100 USD/TM, nivel que se mantiene durante el 2025 (YTD).

En cuanto a diferencias por país, se observa que las importaciones provenientes de Argentina y Paraguay presentan valores similares, con un promedio ponderado de 1,034 USD/TM y 1,048 USD/TM, respectivamente, mientras que los embarques desde Brasil registran un precio medio ligeramente superior (1,247 USD/TM), atribuible a mayores costos logísticos.

Tabla 8 Precios CIF de importación [USD/TM]

País de origen	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025 (YTD)	Promedio ponderado
Argentina	697	726	1,307	1,535	1,069	978	1,144	1,034
ADM Andina Peru SRL	696	726	1,336	1,498	1,132	982	1,148	1,008
Bunge Perú SAC	717		1,356	1,766	991	969	1,139	1,085
Heaven Petroleum Operators			1,207					1,207
Brasil					1,247			1,247
ADM Andina Peru					1,247			1,247
Paraguay		719	1,364	1,842	1,108	945	1,223	1,048
ADM Andina Peru				1,669	1,132	943		991
Bunge Perú SAC		804	1,367	1,947	1,098	956	1,223	1,193
Heaven Petroleum Operators		711	1,296					723
Promedio ponderado	697	725	1,312	1,590	1,097	963	1,154	1,042

Continuando con la evaluación de precios de las materias primas, se realiza el mismo ejercicio para el aceite de palma. En la Tabla 9 se presentan los precios FOB de exportación registrados entre 2019 y 2025. Estos reflejan la evolución del valor del aceite de palma producido en el país y su posicionamiento en el mercado internacional. Se observa una tendencia descendente respecto a los niveles de 2019, con una corrección significativa tras los máximos alcanzados en 2020–2022, periodo marcado por la volatilidad de los precios internacionales de aceites vegetales. El promedio ponderado de exportación se sitúa en 994 USD/TM, evidenciando una estabilización de los precios en los últimos años.

Entre las principales empresas exportadoras destacan Exportadora Romex S.A. e Industrias del Espino S.A., que mantienen valores relativamente consistentes y concentran la mayor participación en el volumen exportado. Este comportamiento confirma la existencia de un excedente de producción nacional competitivo, que podría ser aprovechado para el abastecimiento de materia prima destinada a la producción local de biodiésel.

Tabla 9

Precios FOB de exportación de aceite de palma [USD/TM]

Exportador	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025 (YTD)	Promedio ponderado
ADM Andina Perú SRL	-	-	-	-	-	951	837	891
Alicorp SAA	733	1,867	854	513	-	565	559	1,031
Exportadora Romex SA	1,778	1,476	916	899	1,085	1,137	1,099	1,212
Industrias del Espino SA	1,329	1,139	845	696	959	923	802	900
Sol de Palmas SA	1,737	1,512	926	795	1,088	1,006	918	994
Promedio ponderado	1,651	1,395	900	770	1,036	964	874	994

El análisis comparativo de los precios del aceite de soya y del aceite de palma muestra que, tras la fuerte volatilidad de entre el 2020 y 2022, ambos mercados han ingresado en una etapa de estabilización, con valores promedio que oscilan entre 900 y 1,100 USD/TM durante el periodo entre el 2023 y 2025. Esta tendencia resulta favorable para la planificación del suministro de materia prima, al reducir la incertidumbre de costos en la etapa de producción.

Desde una perspectiva de competitividad, el aceite de soya mantiene una mayor disponibilidad en el mercado internacional y una estructura de precios CIF más estable, lo que lo posiciona como el insumo base más adecuado para el proyecto. No obstante, la existencia de una oferta exportable de aceite de palma nacional con precios FOB comparables abre la posibilidad de incorporar este producto de manera complementaria.

Capítulo 5 Diseño del Proceso

5.1 Determinación de la capacidad

Para dimensionar la capacidad de la planta, se analiza la demanda nacional y la oferta local disponible con el fin de estimar el mercado capturable. La demanda actual de biodiésel asciende a 6.6 KBPD, mientras que las dos productoras que operan en el país poseen una capacidad nominal conjunta de 3.3 KBPD. En consecuencia, el déficit de abastecimiento y, por tanto, el mercado potencial para nueva capacidad se estima en 3.3 KBPD, equivalente al 50 % de la demanda nacional.

Tabla 10

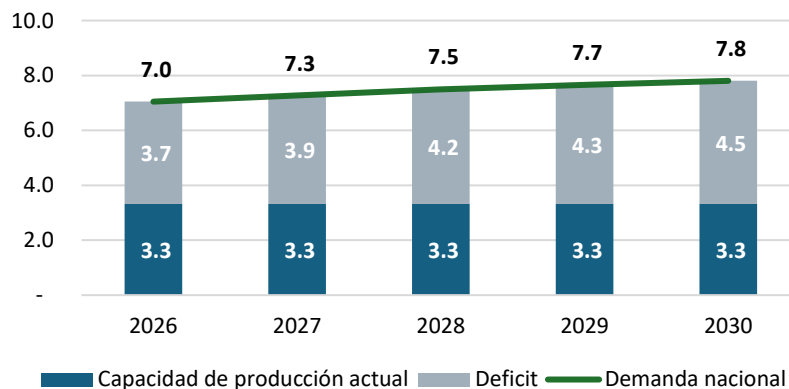
Producción nacional de Biodiesel

Productoras de Biodiesel	TMD	BPD
Bienergy Perú SAC	66	470
Heaven Petroleum Company	400	2,856
Total	466	3,326

De acuerdo con los resultados de proyección de demanda obtenidos en el numeral 4.1.2, se estima que el déficit de la demanda nacional ascienda a 4.5 KBPD hacia el año 2030, como se aprecia en la Figura 21.

Figura 21

Demanda nacional de biodiesel vs capacidad de producción nominal



En ese sentido, se propone que la nueva planta cuente con una capacidad nominal de 1.0 KBPD. Esta capacidad se considera adecuada y realista por las siguientes razones:

- Cobertura del déficit nacional: permitiría cubrir aproximadamente el 30 % del déficit actual y cerca del 22 % del déficit proyectado al 2030, contribuyendo significativamente al abastecimiento local sin generar riesgos de sobreoferta.

- Escalabilidad modular: el tamaño propuesto permite iniciar con una inversión controlada y, a la vez, posibilita ampliaciones futuras en función de la evolución de la demanda y de los mandatos de mezcla.
- Adecuación al suministro disponible: la capacidad propuesta requiere cerca de 140 toneladas métricas diarias de aceite vegetal, volumen que puede ser cubierto con la oferta nacional de aceite de palma y soya, incluyendo excedentes actualmente destinados a exportación.

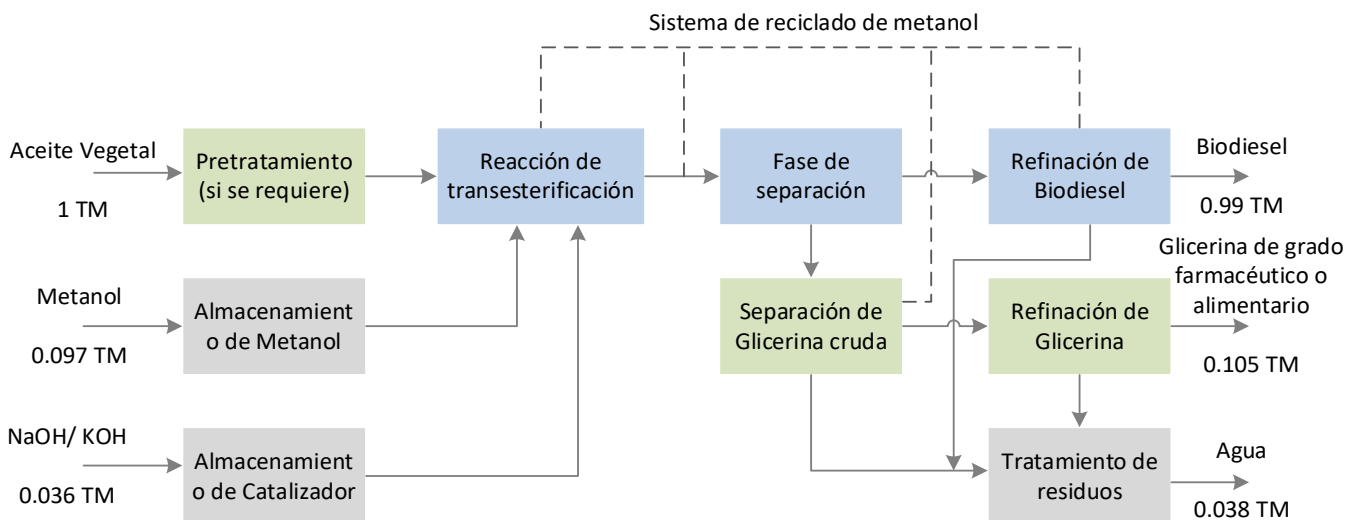
5.2 Balance de materiales

El balance de materiales se ha establecido considerando un rendimiento industrial promedio para un proceso convencional FAME (Fatty Acid Methyl Esters). En este escenario, se requieren aproximadamente 1.0 TM de aceite vegetal y 0.097 TM de metanol para obtener 0.99 TM de biodiésel y 0.105 TM de glicerina, además de 0.038 TM de efluentes líquidos.

El sistema contempla la recuperación de metanol, el pretratamiento opcional del aceite vegetal y la refinación final de biodiésel y glicerina. Este balance representa las proporciones más comunes reportadas en operaciones industriales (IHS Markit, 2021) y servirá como base para el dimensionamiento de equipos y recursos operativos presentados en los numerales siguientes.

Figura 22

Diagrama de flujo del proceso de producción de biodiésel y balance de materiales por tonelada de aceite vegetal



5.3 Identificación de maquinaria y equipos

Dado que el aceite vegetal adquirido se encuentra refinado y listo para la reacción, en este proceso no se requiere una etapa de pretratamiento fisicoquímico. Por tanto, el esquema

de planta parte directamente desde el almacenamiento del aceite refinado y abarca las fases de reacción, separación, purificación y almacenamiento final del biodiésel y sus subproductos.

El proceso se basa en la transesterificación, utilizando metanol y un catalizador básico (NaOH o KOH). Según Elgharbawy (2021), este proceso tiene un rendimiento del 98 % bajo las condiciones adecuadas, lo cual conversa con el balance de materiales propuesto en el numeral anterior. A partir de la reacción, se obtienen dos corrientes principales: biodiésel (éster metílico) y glicerina cruda. Posteriormente, ambas se refinan hasta alcanzar especificaciones comerciales.

5.3.1 Etapas del proceso

- Almacenamiento y dosificación de insumos: En el proceso de transesterificación alcalina, el aceite vegetal refinado reacciona con un alcohol (usualmente metanol) en presencia de un catalizador básico (Elgharbawy et al., 2021). En la práctica industrial, estos reactivos se almacenan por separado y el metanol se mezcla con el catalizador para formar la solución metóxida que se alimenta al reactor.
- Reacción de transesterificación: El aceite y la solución metóxida reaccionan en un reactor agitado y calefaccionado a 55 °C – 65 °C (Huthaifa Naseef & Hani Tulaimat, 2024). En esta etapa los triglicéridos se convierten en ésteres metílicos (biodiésel) y glicerol.
- Separación de fases: Tras la reacción, la mezcla contiene ésteres metílicos, glicerina, metanol y residuos del catalizador, los cuales deben separarse y purificarse en etapas posteriores. La separación entre biodiésel y glicerina se produce principalmente por la diferencia de solubilidad entre ambos componentes, que origina la formación de capas distintas en las que la glicerina tiende a sedimentar (Osman et al., 2024). En la práctica industrial, esta separación puede realizarse por decantación o mediante centrifugación, seguida de la recuperación del metanol no reaccionado por destilación para su reutilización.
- Lavado y secado de biodiésel: La purificación del biodiésel constituye una etapa esencial del proceso, pues determina la calidad final del producto y su conformidad con las normas internacionales (EN 14214 y ASTM D6751) (Osman et al., 2024). De acuerdo con Elgharbawy et al. (2021), la primera fase de purificación corresponde al lavado con agua destilada a temperatura ambiente, cuyo propósito es eliminar las sales y jabones formados durante la transesterificación. Posteriormente, y tal como señalan Chozhavendhan et al. (2020) el lavado permite además remover glicerina libre, alcohol en exceso y catalizador residual. El biodiésel debe secarse para reducir la humedad y

cumplir los límites establecidos por la NTP 321.125:2019, garantizando así su estabilidad y desempeño como combustible.

- Refinación y almacenamiento de glicerina: Según Elgharbawy et al. (2021), la glicerina es el principal subproducto del proceso de transesterificación y suele contener impurezas como agua, metanol, catalizador y trazas de ácidos grasos. Por ello, la glicerina cruda debe someterse a neutralización, deshidratación y purificación antes de su uso o comercialización. En plantas industriales, estos tratamientos permiten obtener glicerina de grado técnico o farmacéutico, que se almacena en tanques específicos hasta su venta o disposición final (Osman et al., 2024).
- Tratamiento de efluentes y almacenamiento final: Durante el proceso de lavado y neutralización se generan efluentes líquidos con contenido de jabones, sales y restos de catalizador, los cuales requieren un tratamiento previo a su disposición. De acuerdo con Osman et al. (2024), estos residuos se tratan mediante decantación o neutralización, garantizando el cumplimiento de los estándares ambientales y la recuperación parcial de agua o metanol. Finalmente, el biodiésel purificado se almacena en tanques atmosféricos equipados con sistemas de venteo y control de humedad, quedando listo para su despacho o mezcla con diésel fósil.

5.3.2 Equipos principales del proceso

A partir del balance de materia y las condiciones operativas definidas para una producción de 1,000 barriles diarios de biodiésel, se estimaron las capacidades de los equipos principales mediante relaciones directas entre caudal, tiempo de ciclo y coberturas de almacenamiento. En la Tabla 11 se presentan los equipos considerados dentro del alcance de la prefactibilidad, sus funciones y capacidades nominales.

Para el dimensionamiento de los reactores se adoptó un esquema por lotes (batch), considerando un volumen útil de 25 m³ por reactor y un tiempo de ciclo total de 2 horas. Las etapas de separación y purificación fueron definidas en función de los caudales máxicos horarios y factores de margen de diseño establecidos en el modelo de cálculo.

Los tanques de almacenamiento se dimensionaron de acuerdo con las coberturas operativas requeridas (30 días considerando que los insumos se importan una vez al mes), mientras que los equipos secundarios (filtros, clarificadores y tratamiento de efluentes) no se incluyen dentro del alcance al tratarse de unidades auxiliares de bajo impacto económico.

Tabla 11*Equipos principales del proceso de producción de biodiésel y sus capacidades nominales*

Etapa	Equipo principal	Función	Capacidad	Unidad
Almacenamiento de insumos	Tanque de aceite vegetal refinado	Acopio y homogenización del aceite	4,817	m ³
	Tanque de metanol	Suministro de metanol al proceso	47	m ³
	Tanque de catalizador	Suministro de catalizador al proceso	172	m ³
Reacción	Tanque de solución metóxida	Mezcla de metanol y catalizador	6.5	m ³
	Reactor agitado con camisa calefactora	Transesterificación aceite + metanol + catalizador	25.0	m ³ por reactor
Separación de fases	Centrífuga	Separación biodiésel / glicerina	10.0	m ³ /h
	Columna de recuperación de metanol	Destilación y retorno de metanol	1.3	m ³ /h
Purificación de biodiésel	Lavador o sistema de resinas secas	Eliminación de impurezas y trazas de glicerina	7.9	m ³ /h
Tratamiento y almacenamiento	Tanque de biodiésel terminado	Almacenamiento y despacho	2,385	m ³
	Tanque de glicerina cruda	Acopio de subproducto	250	m ³

5.4 Personal directo e indirecto

El personal requerido para la operación de una planta de biodiésel con capacidad de 50,000 toneladas anuales ($\approx 1,000$ barriles diarios) se clasifica en dos grupos: personal directo, vinculado a las operaciones productivas, y personal indirecto, orientado a funciones administrativas, logísticas y de soporte.

Para determinar el personal se consideran los siguientes supuestos operativos.

- Capacidad: 50,000 TM/año ($\approx 1,000$ bbl/día).
- Operación: 24/7, 330 días/año (paradas programadas: 35 días).
- Factor de cobertura por puesto 24/7: para 330 días, ≈ 4.0 personas por puesto continuo. ($7,920$ horas/año $\div 2,000$ h/FTE $\approx 3.96 \rightarrow$ se redondea a 4.0 para cubrir descansos, vacaciones y licencias).

Para determinar el personal directo se considera las siguientes áreas transesterificación, separación/purificación, utilidades (vapor/aire/agua), almacenamiento y despacho.

Los puestos operativos continuos 24/7 incluyen:

- Operador de Sala de Control
- Operador de Campo/Proceso
- Operador de Tanques y Despacho
- Operador de Utilidades/Caldera
- Supervisor de Turno

Adicionalmente, se requieren puestos diurnos en laboratorio/control de calidad y mantenimiento.

La Tabla 12 resume el total de personal directo requerido.

Tabla 12

Personal directo requerido para operación 24/7

Categoría / Puesto	Modalidad	Nº puestos por turno	Factor de cobertura	Total personas
Operador de Sala de Control	24/7	1	4.0	4
Operador de Campo / Proceso	24/7	1	4.0	4
Operador de Tanques y Despacho	24/7	1	4.0	4
Operador de Utilidades / Caldera	24/7	1	4.0	4
Supervisor de Turno	24/7	1	4.0	4
Subtotal 24/7	—	—	—	20
Laboratorio / Control de Calidad	Diurno	2	—	2
Mantenimiento	Diurno	2	—	2
Subtotal diurno	—	—	—	4
Total personal directo	—	—	—	24

Por su parte, el personal indirecto comprende al jefe de planta, ingenieros de proceso, personal administrativo, de seguridad, medio ambiente y servicios generales. Este personal es responsable de garantizar la continuidad operativa, el cumplimiento normativo y la gestión integral de la planta.

Tabla 13

Personal indirecto requerido

Cargo / Área	Nº de personas
Jefe(a) de Planta	1
Ingeniero(a) de Proceso / Producción	2
Planificador(a) / Logística interna – Almacén	2
Aseguramiento de la Calidad (QA)	2
HSE / Medio Ambiente	1
Mantenimiento	2
Servicios Generales / Compras técnicas	1
Administración / Recursos Humanos	1

Cargo / Área	Nº de personas
Total personal indirecto	12

En conjunto, la planta operará con 36 trabajadores, cifra coherente con el rango observado en plantas de biodiésel europeas de capacidad similar (45,000–60,000 TM/año), las cuales emplean entre 25 y 45 personas según reportes de EIA Bioenergy (2004).

5.5 Costo del terreno

El terreno constituye un componente relevante de la inversión fija, dado que debe ofrecer condiciones seguras y accesibles para el manejo de sustancias inflamables, así como cercanía a vías logísticas y servicios industriales básicos.

Para estimar el área requerida, se tomó como referencia el estudio técnico de El-Gharbawy (2017) en el cual se detalla el diseño de una planta de biodiésel con capacidad de 100,000 TM/año, que requiere una superficie de 42,000 m². Dado el presente estudio no desarrolla el detalle de distribución en planta, se aplicó una regla de tres proporcional en función de la capacidad de procesamiento, considerando que las necesidades de espacio se escalan aproximadamente de forma lineal con la producción.

$$\text{Área estimada} = 42,000 \text{ m}^2 \times \frac{100,000 \text{ TM}}{50,000 \text{ TM}} = 21,000 \text{ m}^2$$

Posteriormente, se adoptó un valor conservador de 20,000 m², asumiendo un nivel de integración y automatización mayor, que permite reducir el espacio destinado a tanques y servicios auxiliares, manteniendo holgura para futuras ampliaciones. Esta superficie incluye la planta de proceso, tanques de almacenamiento, áreas de carga y descarga, oficinas y zona de seguridad perimetral.

De acuerdo con cotizaciones recientes en parques industriales de Lurín, Ventanilla y Callao, los precios de terrenos habilitados para uso industrial varían entre 80 USD/ m² y 250 USD/ m², dependiendo de la ubicación y nivel de habilitación. Para efectos del presente estudio, se adopta un valor promedio de 200 USD/ m², resultando en un costo estimado del terreno de 4 MMUSD.

Capítulo 6

Análisis económico y financiero

6.1 Cálculo preliminar del Capex y Opex

Los parámetros de costo de una planta de producción de biodiésel pueden dividirse en dos categorías principales: costos de inversión y costos anuales de producción. En el presente estudio, ambos componentes de costo se estiman a nivel de prefactibilidad. El CAPEX incluye los costos del terreno, obras civiles, equipos de proceso y servicios auxiliares; mientras que el OPEX abarca el consumo de materia prima, metanol, catalizador, energía y demás gastos recurrentes.

6.1.1 Inversión del capital (CAPEX)

Para la determinación del costo de inversión (CAPEX) se siguió la metodología planteada por El-Gharbawy (2017) aplicada originalmente al diseño de una planta de biodiésel a partir de aceite de cocina usado en Egipto. El enfoque se basa en la estimación del costo de equipos principales y su ampliación mediante factores multiplicativos que representan los demás componentes de la inversión.

El proceso incluye las siguientes etapas:

- Cálculo del costo de equipos de proceso (Purchased Equipment Cost – PEC):

Los costos se obtienen de la referencia del proyecto análogo “Cost Analysis for Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Plant in Egypt” (El-Gharbawy, 2017), ajustados mediante el exponente de escalamiento:

Ecuación 1

Fórmula de cálculo del PEC

$$C_2 = C_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{0.6}$$

El exponente de escalamiento $n = 0.6$ corresponde a la regla de los seis décimos, comúnmente utilizada en ingeniería de procesos para estimaciones a nivel de prefactibilidad. Este valor refleja las economías de escala en equipos de diseño similar y se encuentra dentro del rango recomendado (0.5–0.8) cuando no se dispone de correlaciones específicas por tipo de equipo.

Tabla 14

Terminología de cálculo del PEC

Término	Significado
Q_1	Tamaño o capacidad del equipo de referencia, para el cual se conoce su costo C_1
C_1	Costo base conocido del equipo de tamaño Q_1
Q_2	Tamaño o capacidad requerida en el proyecto
$n = 0.6$	Exponente de escalamiento, que determina cómo varía el costo con el tamaño
C_2	Costo estimado del equipo a la capacidad Q_2

- Determinación del costo instalado (Total Installed Cost – TIC):

La estimación del TIC se desarrolló bajo el enfoque de la taxonomía de AACE Internacional (2011), correspondiente a estimados de Clase V–IV, característicos de estudios de prefactibilidad, en los cuales el nivel de definición del proyecto se encuentra entre 1 % y 15 %. En este rango, la literatura recomienda emplear factores globales de instalación, debido a la limitada disponibilidad de ingeniería de detalle. En el caso de plantas clasificadas como plantas de procesamiento de fluidos, categoría en la que se encuentran las plantas de biodiésel, los Factores de Lang tradicionales sitúan el costo total instalado en 4.74 veces el costo del equipo adquirido (PEC). No obstante, estudios más recientes señalan que la mayor complejidad de las plantas modernas, especialmente en tuberías, instrumentación, control y servicios auxiliares, conduce a factores más elevados. En particular, Wijoseno (2023) revisa y actualiza los Factores de Lang, indicando que en proyectos actuales este valor suele ubicarse en el rango 3 a $5.33 \times \text{PEC}$.

Ecuación 2

Fórmula de cálculo de la TIC

$$TIC = 4.74 \times PEC$$

Considerando lo anterior y las características del proyecto evaluado, se adopta un factor global de instalación de $4.74 \times \text{PEC}$, ya que concluye de Wijoseno (2023) que se mantiene dentro de los rangos vigentes. Este factor incorpora obras civiles, instalación mecánica, electricidad, instrumentación, tuberías, estructuras y servicios auxiliares, alineándose con la práctica contemporánea de estimación preliminar de CAPEX.

- Adición de costos indirectos y contingencias:

Incluyen ingeniería y administración del proyecto (10 % del TIC), permisos y licencias y una contingencia del 5 %.

Ecuación 3

Fórmula de cálculo del CAPEX base

$$CAPEX_{\text{base}} = TIC + (0.10 \times TIC) + (0.05 \times TIC)$$

- Incorporación de costos del terreno e infraestructura:

De acuerdo con el numeral 5.5, la superficie requerida del terreno es de 20,000 m². El costo total del terreno se obtuvo multiplicando el área proyectada por el valor promedio del metro cuadrado en zonas industriales de Lima.

- Suma total de inversión:

Ecuación 4*Fórmula de cálculo del CAPEX total*

$$CAPEX_{total} = CAPEX_{base} + C_{terreno}$$

Tabla 15*Resultados del CAPEX*

Concepto	Cálculo	Valor (USD)
PEC (Purchased Equipment Cost)	$(C_2 = 1.3 \text{ MM} \times (50,000 / 100,000)^{0.6})$	857,680
TIC (Total Installed Cost)	$(4.74 \times \text{PEC})$	4,065,403
CAPEX base	$(\text{TIC} \times (1 + 0.10 + 0.05))$	4,675,214
Terreno	$(20,000 \text{ m}^2 \times 200 \text{ USD/m}^2)$	4,000,000
CAPEX total	CAPEX_base + Terreno	8,675,214

6.1.2 Costos operativos (OPEX)

La estimación de los costos operativos de la planta se desarrolló con un enfoque de prefactibilidad de nivel intermedio, que permite representar adecuadamente los principales componentes de gasto asociados a la operación anual de la planta de biodiésel. Los costos se clasifican en variables y fijos, los cuales fueron calculados a partir del balance de materia y energía definido para una capacidad de producción de 50,000 toneladas por año de biodiésel a partir de aceite de soya como materia prima principal.

- Costos variables:

Incluyen los gastos directamente proporcionales al volumen de producción, tales como las materias primas (aceite de soya, metanol y catalizador), así como los servicios auxiliares requeridos para el funcionamiento continuo del proceso (vapor, electricidad y agua de proceso).

Los consumos específicos de cada servicio se estimaron a partir de factores empíricos obtenidos de la literatura, expresados en función de la producción anual de biodiésel. El costo total de servicios se calculó conforme a la Ecuación 5:

Ecuación 5*Cálculo del costo total de servicios auxiliares*

$$C_{serv} = (Q_{vap} \times P_{vap}) + (Q_{elec} \times P_{elec}) + (Q_{agua} \times P_{agua})$$

Donde:

Qi representa el consumo anual de cada servicio (TM de vapor, kWh de electricidad o m³ de agua) y Pi su costo unitario correspondiente.

Los valores de consumo típicos adoptados para plantas de biodiésel a escala industrial se presentan en la Tabla 16:

Tabla 16

Valores de consumo típicos

Servicio	Unidad de consumo	Valor típico	Fuente
Vapor	TM vapor / TM biodiesel	3	El-Gharbawy (2017)
Electricidad	kWh / TM biodiesel	150	El-Gharbawy (2017)
Agua de proceso	m ³ / TM biodiesel	10	El-Gharbawy (2017)

Tabla 17

Precios estimados de cada servicio

Servicio	Costo unitario (USD)	Fuente
Vapor	21 / TM	U.S. Department of Energy (2012)
Electricidad	0.18 / kWh	GlobalPetrolPrices.com (2025)
Agua de proceso	1.40 / m ³	Universidad del Pacífico (2024)

- Costos fijos:

Corresponden a los gastos que permanecen constantes independientemente del nivel de producción, e incluyen personal operativo y administrativo, mantenimiento, seguros, servicios generales e impuestos locales.

Para la estimación del costo de personal, se emplea el Ingreso promedio del sector formal privado – nominal (S/) correspondiente al año 2025, publicado por el Banco Central de Reserva del Perú (BCRP). Entre los meses de enero y setiembre de dicho año, este indicador registró un promedio mensual de S/ 3,292, valor que se adopta como referencia para el cálculo de las remuneraciones del personal operativo y administrativo considerado en el estudio.

Continuando con el costo anual de mantenimiento se estimó como un porcentaje de la inversión fija instalada (Fixed-Capital Investment, FCI). De acuerdo con la Tabla 25 del libro *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (Peters & Timmerhaus, 2003, pág. 203), los procesos químicos con condiciones de operación promedio presentan costos de mantenimiento y reparaciones del orden de 5 % a 9 % del FCI, considerando tanto materiales como mano de obra. Para este estudio se adopta un valor conservador dentro del rango superior reportado, equivalente a 9 % del CAPEX base, el cual es consistente con la clasificación de un proceso químico industrial con requerimientos moderados de instrumentación y servicios:

Ecuación 6

Estimación del costo anual de mantenimiento

$$C_{mant} = 0.09 \times CAPEX_{base}$$

Tabla 18*Estimación de costos de mantenimiento y reparaciones*

Costos de mantenimiento como porcentaje de la inversión fija de capital (en base anual)			
Tipo de operación	Mano de obra	Materiales	Total
Procesos químicos simples	1–3	1–3	2–6
Procesos promedio con condiciones normales de operación	2–4	3–5	5–9
Procesos complicados, condiciones severas de corrosión o alta instrumentación	3–5	4–6	7–11

Fuente: Peters y Timmerhaus (2003)

Considerando este marco metodológico, en el presente estudio los seguros industriales y los tributos municipales se estiman como 2 % del CAPEX base, valor que se encuentra en el límite superior del rango sugerido por Peters y Timmerhaus (2003) y que permite incorporar un enfoque conservador en la evaluación económica de la planta durante la etapa de prefactibilidad.

Ecuación 7*Estimación del costo anual de seguros e impuestos*

$$C_{seg e imp} = 0.02 \times CAPEX_{base}$$

Tabla 19*Variación típica en porcentaje de la inversión fija de capital para gastos de construcción*

Componente	Rango (%)	Valor típico (%)
Construcción temporal y operaciones	1.0–3.0	1.7
Herramientas y alquiler de equipos de construcción	1.0–3.0	1.5
Personal de oficina central en campo	0.2–2.0	0.4
Mano de obra en campo	0.4–4.0	1.0
Gastos de viaje y alojamiento	0.1–0.8	0.3
Impuestos y seguros	1.0–2.0	1.2
Materiales y mano de obra para puesta en marcha	0.2–1.0	0.4
Gastos generales (overhead)	0.3–0.8	0.5
Total de gastos de construcción	4.2–16.6	7.0

Fuente: Peters y Timmerhaus (2003)

- Costo operativo total:

El costo operativo total resulta de la suma de los costos variables y fijos, según la Ecuación 8:

Ecuación 8*Cálculo del costo operativo total anual*

$$OPEX_{total} = C_{var} + C_{fix}$$

El valor obtenido se expresa tanto en dólares por año (USD/año) como en dólares por tonelada de biodiésel producido (USD/TM), lo que permite evaluar la competitividad del proceso frente a referencias internacionales de costos de producción.

De acuerdo con las fórmulas previamente desarrolladas, a continuación, se procede al cálculo de los costos variables y costos fijos que conforman el OPEX total de la planta.

En la Tabla 20 se resumen los principales flujos masicos anuales de acuerdo con el balance de materiales elaborado en la sección 5.2. Estos valores permiten definir con precisión los requerimientos de insumos y las cantidades proyectadas de productos y subproductos asociados al proceso de transesterificación y se utilizaran para el cálculo de los costos operativos variables.

Tabla 20

Balance de materiales anual

Categoría	Insumo	Cantidad anual
Insumo	Aceite vegetal	50,505
Insumo	Metanol	4,850
Insumo	Catalizador	1,800
Producto	Biodiésel	50,000
Subproducto	Glicerina cruda	5,250
Subproducto	Agua (generada)	1,900

En la Tabla 21 se presentan los costos variables estimados para la operación anual de la planta, desagregados por tipo de insumo y servicio. Se distinguen los costos asociados al consumo de materias primas principales (aceite de soya, metanol y catalizador) y aquellos correspondientes a los servicios auxiliares requeridos para el proceso (vapor, electricidad y agua de proceso).

Los valores se expresan tanto en términos totales anuales como en costos unitarios, de acuerdo con la base de referencia aplicable a cada componente. Las fuentes empleadas incluyen análisis propios elaborados en capítulos previos (para materias primas), datos de mercado y referencias técnicas para los servicios industriales.

Tabla 21

Desglose de costos variables por tipo de insumo y servicio

Componente	Base de cálculo	Costo total (USD/año)	Costo unitario (USD/t base)	Fuente
Aceite de soya	50,505 TM	52,626,263	1,042 USD/ TM aceite	4.2.3 Análisis de precios Extraído de la aduana peruana
Metanol	4,850 TM	2,182,500	450 USD/ TM metanol	
Catalizador (NaOH)	1,800 TM	810,000	450 USD/ TM catalizador	Coherent Market Insights (2024)

Vapor	150,000 TM	3,150,000	63 USD/ TM biodiésel	Tabla 17 Precios estimados de cada servicio
Electricidad	7,500,000 kWh	1,350,000	27 USD/ TM biodiésel	Tabla 17 Precios estimados de cada servicio
Agua de proceso	500,000 m3	700,000	14 USD/ TM biodiésel	Tabla 17 Precios estimados de cada servicio
Costos variables	—	60,818,762	1,216 USD/ TM biodiésel	

En la Tabla 22 se resume el costo operativo anual (OPEX) estimado para la planta, integrando los costos fijos y variables determinados en los apartados previos. Se observa que los costos variables, dominados por la adquisición de materias primas, representan la mayor proporción del gasto operativo total, mientras que los costos fijos (personal, mantenimiento, seguros y servicios generales) tienen una incidencia menor. En particular, el costo de adquisición del aceite de soya concentra aproximadamente el 85 % del OPEX total, lo que coincide con los valores reportados en la literatura para plantas de biodiésel a escala industrial. El OPEX total asciende a 61.58 MMUSD por año, equivalente a 1,232 USD por tonelada de biodiésel producido.

Tabla 22

Resumen del costo operativo anual (OPEX)

Componente	Resultado
Personal	256,225
Mantenimiento (9% CAPEX Base)	420,769
Seguros e impuestos (2 % CAPEX Base)	93,504
Total costos fijos	770,498
Total costos variables	60,818,762
Total OPEX Anual	61,589,261
Costo OPEX por tonelada de biodiesel	1,232 USD/ TM biodiésel

6.2 Cálculo preliminar del VAN y TIR

El análisis económico del proyecto se realizó a partir de la proyección de flujos de caja anuales, considerando la inversión inicial (CAPEX), los costos operativos (OPEX) y los ingresos por la venta de biodiésel y glicerina cruda. Este enfoque permite determinar los indicadores financieros de rentabilidad: el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

- Ecuaciones de evaluación:

Ingresos anuales:

Ecuación 9*Cálculo de los ingresos anuales del proyecto*

$$I_t = (Q_{bio} \times P_{bio}) + (Q_{glic} \times P_{glic})$$

Flujo neto anual:

Ecuación 10*Flujo neto de efectivo después de impuestos*

$$F_t = (I_t - OPEX) \times (1 - \text{tasa de impuesto})$$

Valor Actual Neto (VAN):

Ecuación 11*Valor actual neto del proyecto*

$$VAN = -CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t}$$

Tasa Interna de Retorno (TIR):

Ecuación 12*Tasa de descuento que anula el VAN*

$$0 = -CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t}$$

En la Tabla 24 se presenta el flujo de caja proyectado para la planta de biodiésel, elaborado a partir de los supuestos y parámetros definidos en la Tabla 23. El flujo incorpora la inversión inicial requerida en el año cero, compuesta por el CAPEX y el capital de trabajo, así como los ingresos netos generados durante los veinte años considerados en el horizonte de evaluación.

Los ingresos anuales provienen de la venta de biodiésel y de la valorización de la glicerina cruda como subproducto del proceso. De estos ingresos se deducen los costos operativos totales (OPEX), estimados en la Sección 6.1.2, y el impuesto a la renta calculado únicamente sobre la utilidad bruta positiva de cada año. Al no emplearse depreciación ni gastos de reposición de activos en esta etapa preliminar, el flujo operativo refleja exclusivamente movimientos reales de caja.

Tabla 23*Supuestos y parámetros utilizados para la evaluación económica del proyecto*

Concepto	Valor	Unidad	Fuente / Supuesto
Producción anual de biodiésel	50,000	TM/año	Balance de materiales
Precio de venta biodiésel	1,300	USD/TM	Precio de referencia nacional (2021-2025)
Ingreso por glicerina cruda	300	USD/TM	Valor promedio de exportaciones
Costo operativo anual (OPEX)	61,589,261	USD/año	Cálculo Sección 6.1.2
Inversión inicial (CAPEX)	8,675,214	USD	Cálculo Sección 6.1.1
Horizonte de evaluación	20	Años	Vida útil del proyecto
Periodo de construcción	1	Año	Adaptado de El-Gharbawy (2017)
Producción efectiva Año 1	40,000	TM/año	80 % de la capacidad nominal
Producción efectiva Año 2	45,000	TM/año	90 % de la capacidad nominal
Producción efectiva Año 3+	49,000	TM/año	98 % de la capacidad nominal
Tasa de descuento	10 %	—	Costo de oportunidad del capital
Impuestos sobre la renta	29,5 %	—	Tasa vigente Perú (SUNAT)
Working Capital (15% OPEX)	9,238,389	USD	Peters y Timmerhaus (2003)

Tabla 24*Flujo de caja del proyecto*

Año	Prod. (TM)	Inversión	Biodiésel	Glicerina	OPEX	Impuesto	Flujo neto	Flujo descontado	Flujo acumulado
0	—	17.9	—	—	—	—	-17.9	-17.9	-17.9
1	40,000	—	52.0	1.2	49.4	1.1	2.7	2.4	-15.2
2	45,000	—	58.5	1.4	55.5	1.3	3.1	2.5	-12.1
3	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	3.4	2.5	-8.6
4	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	3.4	2.3	-5.2
5	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	3.4	2.1	-1.8
6	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	3.4	1.9	1.6
7	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	3.4	1.7	5.0
8	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	3.4	1.6	8.5
9	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	3.4	1.4	11.9
10	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	3.4	1.3	15.3
11	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	3.4	1.2	18.8
12	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	3.4	1.0	22.2
13	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	3.4	0.9	25.6
14	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	3.4	0.9	29.1
15	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	3.4	0.8	32.5
16	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	3.4	0.7	35.9
17	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	3.4	0.6	39.4
18	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	3.4	0.6	42.8
19	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	3.4	0.5	46.2
20	49,000	—	63.7	1.5	60.3	1.4	12.6	1.8	58.9

A partir de los flujos descontados se calcularon los indicadores de rentabilidad, resumidos en la Tabla 25. El Valor Actual Neto (VAN) se obtuvo aplicando la tasa de descuento del 10 %, conforme se presenta en la Ecuación 12, mientras que la Tasa Interna de Retorno (TIR) corresponde a la tasa que hace que el VAN sea igual a cero (Ecuación 13). Estos indicadores permiten evaluar la conveniencia financiera del proyecto bajo los supuestos definidos:

- Un VAN positivo indica que el proyecto genera valor adicional por encima del costo de oportunidad del capital invertido.
- Una TIR superior al 10 % confirma que la inversión resulta atractiva desde una perspectiva financiera.

Tabla 25

Resultados del proyecto

Indicador	Valor
VAN (USD)	11,760,993.5
TIR	18%

En conjunto, los resultados de las Tabla 24 y Tabla 25 permiten concluir que el proyecto presenta un potencial económico favorable en esta fase de prefactibilidad, proporcionando una estimación preliminar de la rentabilidad esperada antes de avanzar hacia etapas posteriores de diseño y evaluación detallada.

Capítulo 7

Análisis y discusión de resultados

El presente capítulo integra y contrasta los hallazgos obtenidos en el estudio con investigaciones previas y con la realidad actual del sector de biocombustibles en el Perú. Asimismo, se identifican las oportunidades que el proyecto ofrece y las principales limitaciones que deberán considerarse en etapas posteriores de evaluación de factibilidad.

7.1 Comparación con estudios y experiencias previas

Los resultados alcanzados en este estudio muestran una viabilidad técnica y económica preliminar para la instalación de una planta de biodiésel de 50,000 TM/año en Lima. Este hallazgo es consistente, pero también distinto en ciertos aspectos, respecto de investigaciones anteriores realizadas en el ámbito nacional e internacional.

7.1.1 Coincidencias con estudios previos

- Demanda insatisfecha de biodiésel en el mercado nacional

En línea con los estudios de Godínez (2013) y Migliori (2022) los resultados obtenidos confirman que en el Perú existe una demanda insatisfecha de biodiésel. Ambos autores señalan que la producción nacional es limitada y que no cubre los requerimientos derivados del mandato de mezcla, situación que obliga a depender de importaciones para atender el mercado interno. Los hallazgos de la presente tesis coinciden con esta conclusión, evidenciando que el déficit persiste e incluso se amplía hacia los próximos años, según las proyecciones de demanda realizadas.

- Predominio del costo de materia prima en el OPEX

Diversos estudios confirman que la materia prima constituye el componente más significativo del costo de producción de biodiésel. Chozhavendhan et al. (2020) señalan que el costo de la materia prima es un factor crítico para la viabilidad económica, dado que representa alrededor del 70% y el 80 % del costo total del biodiésel. En el presente estudio, el aceite vegetal concentra ligeramente por encima de ese porcentaje dentro del OPEX, lo que evidencia la consistencia de los resultados con las referencias reportadas para plantas industriales a escala internacional.

- Rentabilidad moderada pero positiva en escenarios base

Los estudios de prefactibilidad disponibles en el ámbito nacional muestran que los proyectos de biodiésel pueden alcanzar niveles de rentabilidad elevados cuando utilizan materias primas de bajo costo. Migliori (2022), en un estudio basado en grasa animal, reporta una Tasa Interna de Retorno de 56 % en el escenario base y 43 % en el escenario pesimista, reflejando la ventaja económica de emplear residuos como insumo principal. Por su parte, Cabrera Deceno et al. (2023), en un diseño de planta a partir de aceite vegetal residual,

obtienen una TIR de 29 %, valor que se encuentra dentro del rango esperado para tecnologías consolidadas de transesterificación.

En comparación, la TIR estimada en el presente estudio (18 %), considerando aceite vegetal refinado como materia prima, es menor a la reportada por propuestas basadas en residuos, pero se mantiene dentro de un rango coherente para proyectos dependientes de insumos de mayor costo. Esto confirma que los resultados obtenidos son consistentes con referencias previas y reflejan adecuadamente el impacto económico del tipo de materia prima seleccionada.

7.1.2 Diferencias respecto a investigaciones anteriores

- Escala significativamente mayor

Los estudios nacionales disponibles analizan proyectos de escala reducida o en etapa piloto. Migliori (2022) propone una planta de 117 bbl/día ($\approx 5,983$ TM/año) a partir de grasa animal, mientras que Godínez (2013) plantea capacidades entre 157 y 201 bbl/día utilizando aceite usado. Por su parte, el estudio de Cabrera Deceno et al. (2023) desarrolla un diseño conceptual basado en aceite vegetal residual sin definir una capacidad industrial, pero enfocado en una escala de laboratorio o piloto. En contraste, el presente estudio evalúa una planta de 1,000 bbl/día ($\approx 50,000$ TM/año), una capacidad muy superior y dimensionada en función del déficit real de biodiésel en el mercado nacional, lo que implica un impacto potencial considerablemente mayor en el abastecimiento interno.

- Mayor impacto potencial en el abastecimiento del mercado nacional

Los estudios previos no cuantifican el porcentaje del déficit nacional que sus plantas podrían cubrir, debido a que operan en escalas menores. En cambio, la planta industrial evaluada en esta tesis podría cubrir entre el 20 % y 30 % del déficit nacional proyectado, lo que constituye una diferencia sustantiva en términos de impacto sobre la seguridad de suministro.

- Incorporación de análisis de demanda y costos con datos recientes del mercado peruano

Mientras que los estudios anteriores se basan en referencias históricas o costos estimados, el presente análisis integra datos actualizados de importaciones (SUNAT), precios CIF reales, información tarifaria de Osinergmin y series recientes de consumo energético. Esta diferencia se traduce en variaciones importantes en los resultados económicos, ofreciendo una interpretación más ajustada al contexto actual del país.

7.2 Identificación de oportunidades y limitaciones del proyecto

A partir del análisis técnico, normativo y económico desarrollado, se identifican las oportunidades estratégicas que el proyecto presenta, así como sus principales limitaciones y riesgos.

7.2.1 Oportunidades

El análisis realizado permite identificar un conjunto de oportunidades asociadas a la implementación de una planta de biodiésel en el Perú. Estas oportunidades surgen tanto de las condiciones actuales del mercado energético como de la disponibilidad de materias primas y la existencia de infraestructura adecuada, factores que en conjunto pueden favorecer la viabilidad y el posicionamiento estratégico del proyecto. A continuación, se presentan los elementos más relevantes identificados en esta etapa de prefactibilidad.

- Reducción del déficit nacional de biodiésel

La planta propuesta cubriría entre 20 % y 30 % del déficit actual y proyectado, contribuyendo a la seguridad energética y al cumplimiento de los mandatos de mezcla.

- Aprovechamiento de la disponibilidad local de aceite de palma

La existencia de un excedente exportable constante crea una oportunidad para internalizar valor en la cadena productiva, impulsando el desarrollo de la agroindustria y reduciendo dependencia de importaciones.

- Potencial para integrarse a una refinería o terminal existente

El proyecto puede beneficiarse de infraestructura logística preexistente (tanques, muelles, utilidades), reduciendo CAPEX o facilitando ampliaciones modulares.

- Desarrollo de mercado para la glicerina cruda

Aunque su precio es bajo, mercados como jabonería, química ligera y exportación representan ingresos adicionales que fortalecen el flujo de caja del proyecto.

7.2.2 Limitaciones y riesgos

El proyecto evaluado presenta una serie de limitaciones y riesgos que deben ser considerados antes de avanzar hacia etapas posteriores de desarrollo. Estas limitaciones se relacionan tanto con el alcance metodológico del estudio como con factores técnicos, económicos y de mercado que podrían afectar la viabilidad de la planta propuesta.

- Limitaciones propias del estudio de prefactibilidad

El análisis desarrollado emplea metodologías de estimación basadas en factores de costo, correlaciones de escalamiento y promedios industriales, lo que resulta adecuado para una etapa preliminar. Sin embargo, la estimación del CAPEX y del OPEX no incorpora cotizaciones reales de equipos, servicios, ingeniería, transporte o montaje, ni un diseño de

ingeniería de detalle. Por ello, los resultados obtenidos deben considerarse aproximaciones iniciales que requieren ser validados mediante un estudio de factibilidad completo, basado en precios reales de mercado y en una especificación técnica más precisa del proceso y del equipamiento.

- Dependencia del costo de la materia prima

Como se evidenció en el análisis económico, el costo del aceite vegetal representa más del 80 % del OPEX, por lo que variaciones internacionales del precio de los aceites impactan directamente en la rentabilidad del proyecto.

- Competencia por materias primas en el mercado regional

El aceite de soya y el aceite de palma compiten con la industria alimentaria y agrícola. Eventos climáticos, restricciones comerciales o variaciones en la oferta regional podrían disminuir la disponibilidad o aumentar el costo de estos insumos.

- Requerimientos logísticos y de infraestructura

La instalación de una planta de 50,000 t/año requiere infraestructura de recepción de aceites, almacenamiento y despacho que puede depender de condiciones externas (terreno disponible, permisos, conexiones eléctricas, acceso vial y portuario). Cualquier restricción en la disponibilidad de esta infraestructura podría incrementar el CAPEX o retrasar la implementación.

En conjunto, estas limitaciones y riesgos resaltan la necesidad de avanzar hacia un estudio de factibilidad que incorpore ingeniería de detalle, cotizaciones reales de equipos y un análisis más profundo de mercado, de modo que se reduzca la incertidumbre asociada a la inversión y se valide la viabilidad integral del proyecto.

Conclusiones

El análisis desarrollado en esta tesis permite concluir que la implementación de una planta de biodiésel en Lima, con capacidad aproximada de 50,000 toneladas anuales, constituye una alternativa técnica y económicamente viable bajo los supuestos evaluados. A partir del marco contextual estudiado, se confirma que la demanda nacional de biodiésel continúa en crecimiento, impulsada principalmente por la obligatoriedad normativa de mezcla y por el aumento sostenido del consumo de diésel en el país. Las proyecciones realizadas muestran que, de mantenerse las tendencias actuales, el déficit entre producción local y requerimiento nacional seguirá ampliándose en los próximos años, lo cual refuerza la necesidad de incorporar nueva capacidad instalada.

Asimismo, el análisis de materias primas evidencia que tanto el aceite de soya importado como el aceite de palma producido localmente presentan disponibilidad suficiente y precios competitivos para sostener la operación de una planta industrial. La estructura del mercado peruano, caracterizada por importadores consolidados y una creciente producción nacional de palma, ofrece condiciones favorables para garantizar el abastecimiento estable del insumo principal. De igual manera, las características fisicoquímicas de estos aceites permiten su empleo eficiente en procesos industriales basados en transesterificación alcalina.

Desde el punto de vista técnico, el diseño conceptual elaborado demuestra que es posible implementar un esquema de proceso confiable, basado en tecnologías consolidadas y ampliamente utilizadas a nivel internacional. Los balances de materia y el dimensionamiento preliminar de equipos indican que la capacidad propuesta de 1,000 barriles diarios es adecuada para atender una parte significativa del déficit nacional sin generar riesgos de sobreoferta. Además, el número de trabajadores requeridos, la infraestructura de almacenamiento y los servicios auxiliares identificados se alinean con plantas de referencia en el sector.

En términos económicos, la evaluación financiera realizada muestra resultados favorables: el proyecto presenta un Valor Actual Neto (VAN) positivo y una Tasa Interna de Retorno (TIR) superior a la tasa de descuento empleada. Estos indicadores sugieren que la inversión es rentable en una etapa de prefactibilidad, incluso bajo supuestos conservadores sobre precios, costos operativos y horizonte de evaluación. Se confirma además que el costo de la materia prima es el componente más determinante del OPEX, representando más del 80 % del costo operativo total, por lo que la competitividad del proyecto dependerá fuertemente de una adecuada estrategia de aprovisionamiento.

Finalmente, se concluye que la instalación de una nueva planta de biodiésel en Lima no solo contribuiría a reducir la dependencia de importaciones y fortalecer la seguridad energética, sino que también impulsaría el desarrollo de la cadena de biocombustibles en el país, fomentando la diversificación de la matriz energética y el cumplimiento de los objetivos ambientales nacionales. No obstante, se recomienda que estudios futuros avancen hacia

etapas de factibilidad detallada, incorporen análisis de sensibilidad, evaluación ambiental, ingeniería de detalle y esquemas de financiamiento que permitan afinar la toma de decisiones y garantizar la sostenibilidad integral del proyecto.



Lista de abreviaturas

bbl: Barriles

KBPD: Miles de barriles por día

KTMD: Miles de toneladas métricas por día

KTM: Miles de toneladas métricas

L: Litros

TM: Toneladas métricas



Referencias

- AACE International. (2011). *Cost Estimate Classification System – As Applied in Engineering, Procurement, and Construction for the Process Industries (RP 18R-97)*. Morgantown. https://web.aacei.org/docs/default-source/toc/toc_18r-97.pdf
- Advancing Standards Transforming Markets [ASTM]. (2023). *Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels*. <https://store.astm.org/d6751-20a.html>
- Banco Central de Reserva del Perú. (2024). *Marco Macroeconómico Multianual 2025-2028*. <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Programa-Economico/mmm-2025-2028.pdf>
- Banco Mundial. (2024). *Perú – LAC Green Growth: Leading the Change We Need*. <https://www.bancomundial.org/es/programs/lac-green-growth-leading-the-change-we-need/peru>
- Cabrera Deceno, V., Guerrero López, F., Jo Castañeda, S., Pérez Barrientos, C., & Velásquez Sánchez, B. (2023). *Diseño de planta de producción de biodiésel y glicerina a partir de aceite vegetal residual*. Piura: Universidad de Piura. <https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/bed218a5-ffe7-4fe1-ba00-f3df557ea9eb/content>
- Cerón Ferrusca, M., Romero, R., Martínez, S., Ramírez-Serrano, A., & Natividad, R. (2023). *Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: A Perspective on Catalytic Processes*. Petroleum Characterization and Bioprocesses: Numerical and Experimental Investigation. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr11071952>
- Chozhavendhan, S., Vijay Pradhap Singh, M., Fransila, B., Praveen Kumar, R., & Karthiga Devi, G. (2020). *A review on influencing parameters of biodiesel production and purification processes*. Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2020.04.002>
- Coherent Market Insights. (2024). *Sodium Hydroxide Market, by Form (Solid, Liquid), by Grade (Industrial, Pharmaceutical, Others), by Application, and Region – Trends, Analysis and Forecast 2024–2031*. <https://www.coherentmarketinsights.com/industry-reports/sodium-hydroxide-market>
- Congreso de la República del Perú. (2003). *Ley N.º 28054, Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles*. Lima: Diario Oficial El Peruano. [https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/9E95620CC059138105257C9E005AB2F9/\\$FILE/28054.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/9E95620CC059138105257C9E005AB2F9/$FILE/28054.pdf)
- Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). (2023). *Resolução CNPE nº 3 de – Dispõe sobre a evolução do teor obrigatório de biodiesel adicionado ao óleo diesel comercializado no território nacional*. Ministério de Minas e Energia (MME). <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2023/ResolucaoCNPE32023.pdf>
- El-Gharbawy, A. (2017). *Cost Analysis for Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Plant in Egypt*. Smard Grid. <https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/343166924>

- Elgharbawy, A. S., Sadik, W. A., Sadek, O. M., & Kasaby, M. A. (2021). *A REVIEW ON BIODIESEL FEEDSTOCKS AND PRODUCTION TECHNOLOGIES*. Journal of the Chilean Chemical Society. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0717-97072021000105098>
- European Academies Science Advisory Council. (2012). *The current status of biofuels in the European Union, their environmental impacts and future prospects*. https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2012_Easac_Statement_Biofuels_Complete_01.pdf
- European Biodiesel Board. (2023). *Statistical Report 2023*. https://ebb-eu.org/wp-content/uploads/2024/03/EBB_Statistical_Report2023-Final.pdf
- European Parliament & Council of the European Union. (2018). *Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources*. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>
- European Parliament & Council of the European Union. (2023). *Directive (EU) 2023/2413 of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (RED III)*. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>
- Farouk, S., Tayeb, A., Abdel-Hamid, S., & Osman, R. (2024). *Recent advances in transesterification for sustainable biodiesel production, challenges, and prospects: a comprehensive review*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-024-32027-4>
- Gebremariam, S., & Marchetti, J. (2017). *Biodiesel production technologies: Review*. AIMS Energy. <https://doi.org/10.3934/energy.2017.3.425>
- GlobalPetrolPrices.com. (2025). *Peru electricity prices*. https://doi.org/https://www.globalpetrolprices.com/Peru/electricity_prices/
- Godinez Viacava, J. (2013). *Estudio de prefactibilidad para la implementación de una planta de biodiésel a base de aceites usados en Lim*. Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/62e66aa9-bb6b-4f36-9b71-683c279e9683/content>
- Huthaifa Naseef, H., & Hani Tulaimat, R. (2024). *Transesterification and esterification for biodiesel production: A comprehensive review of catalysts and palm oil feedstocks*. ELSEVIER. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100931>
- IEA Bioenergy. (2004). *BEST CASE STUDIES ON BIODIESEL PRODUCTION PLANTS IN EUROPE*. <https://task39.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/37/2013/05/Best-case-studies-on-biodiesel-production-plants-in-Europe.pdf>
- IHS Markit. (2021). *Bio-feedstocks. Material de curso sobre producción de biodiésel FAME*. [Fuente privada; material de curso, acceso no público.](#)
- INDECOPI. (2016). *Resolución N.º 189-2016/CDB-INDECOPI*. Lima: Diario Oficial El Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/indecopi/normas-legales/3463198-resolucion-n-189-2016-cdb-indecopi>

- INDECOPI. (2016). *Resolución N.º 218-2016/CDB-INDECOPI*. Lima: Diario Oficial El Peruano. <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/2367176-1>
- Instituto Nacional de Calidad. (2019). *Norma Técnica Peruana NTP 321.125:2019 – Biocombustibles. Biodiésel. Especificaciones*. Lima. [Documento disponible previa solicitud al INACAL](#)
- Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI). (2010). *Resolución N.º 116-2010/CFD-INDECOPI*. Lima: Diario Oficial El Peruano. <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1914236-1>
- International Energy Agency [IEA]. (2024). *CO2 Emissions in 2023, A new record high, but is there light at the end of the tunnel?* <https://iea.blob.core.windows.net/assets/33e2badc-b839-4c18-84ce-f6387b3c008f/CO2Emissionsin2023.pdf>
- Jeryraj Kumar, L., & Elangovan, T. (2015). *Biodiesel and its Properties from Various Feedstocks*. INTERNATIONAL JOURNAL FOR TRENDS IN ENGINEERING & TECHNOLOGY. [https://www.researchgate.net/publication/313106496 Biodiesel and its Properties from Various Feedstocks](https://www.researchgate.net/publication/313106496_Biodiesel_and_its_Properties_from_Various_Feedstocks)
- Jeryraj Kumar, L., & Thangapandian, E. (2015). *Biodiesel and its Properties from Various Feedstocks*. Sri Ramakrishna Engineering College, Thermal Engineering. [https://www.researchgate.net/publication/313106496 Biodiesel and its Properties from Various Feedstocks](https://www.researchgate.net/publication/313106496_Biodiesel_and_its_Properties_from_Various_Feedstocks)
- Knothe, G., Gerpen, J., & Krahl, J. (2005). *The Biodiesel Handbook*. https://books.google.com.pe/books?id=8MxcCgAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_g_e_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Migliori Ruiz, S. (2022). *Estudio de prefactibilidad para la producción y comercialización de biodiésel a base de grasa animal*. Lima: Universidad de Lima. https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/16450/Migliori_Estudio-biodiesel-grasa-animal.pdf;jsessionid=5205B6E76A0F450B0CB1CD24B176BDAA?sequence=1
- Ministerio de Energía y Minas [MINEM]. (2007). *Decreto Supremo N.º 021-2007-EM, Reglamento para la Comercialización de Biocombustibles*. Lima: Diario Oficial El Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/minem/normas-legales/5137341-021-2007-em>
- Ministério de Minas e Energia (MME). (n.d.). *Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB)*. Governo Federal do Brasil. <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/biodiesel/pnpb>
- Naseef, H., & Tulimat, R. (2025). *Transesterification and esterification for biodiesel production: A comprehensive review of catalysts and palm oil feedstocks*. Energy Conversion and Management: X. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100931>
- Osinermin. (2016). *Los Biocombustibles: Desarrollos recientes y tendencias internacionales*. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. [https://www.osinermin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios Economicos/Documentos de Trabajo/Documento-Trabajo-36.pdf](https://www.osinermin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Documentos_de_Trabajo/Documento-Trabajo-36.pdf)

- Osman, W., Rosli, M., Mazli, W., & Samsuri, S. (2024). *Comparative review of biodiesel production and purification*. Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100264>
- Peters, M., & Timmerhaus, K. (2003). *Plant design and economics for chemical engineers (Fourth Edition)*. <https://davuniversity.org/images/files/study-material/PLANT%20DESIGN%20AND%20ECONOMICS%20FOR%20CHEMICAL%20ENGINEERS.pdf>
- RPP Noticias. (2025). *BCR eleva su proyección de crecimiento económico para 2025 del 3,1 % al 3,2 % impulsado por la demanda interna*. RPP Noticias. <https://rpp.pe/economia/economia/bcr-eleva-su-proyeccion-de-crecimiento-para-2025-al-32-impulsado-por-la-demanda-interna-julio-velarde-noticia-1655919#:~:text=BCR%20eleva%20su%20proyecci%C3%B3n%20de,impulsado%20por%20la%20demanda%20interna>
- Thomas, D. (2018). *Advanced Maintenance in Manufacturing: Costs and Benefits*. PHM Society Conference. <https://doi.org/https://doi.org/10.36001/phmconf.2018.v10i1.536>
- U.S Energy Information Administration [EIA]. (2024). *Glossary*. U.S EIA. <https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php?id=B>
- U.S. Department of Energy. (2012). *Steam Tip Sheet #15: Benchmark the fuel cost of steam generation*. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/steam15_benchmark.pdf
- United States Environmental Protection Agency. (n.d.). *Renewable Fuel Standard (RFS) Program Overview*. <https://doi.org/https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard>
- Universidad del Pacifico. (2024). *Tarifas de agua subterránea: ¿Cuáles aplican a las EPS?* El Comercio . <https://www.up.edu.pe/egp/noticias/tarifas-agua-subterranea-eps/>
- Vignesh, P., Pradeep Kumar, A., Shankar Ganesh, N., Jayaseelan, V., & Sudhakar, K. (2021). *Biodiesel and green diesel generation: an overview*. IFP Energies nouvelles,. <https://doi.org/https://doi.org/10.2516/ogst/2020088>
- Wijoseno, T. (2023). *Modifying The Lang Factor using Process Plant Project Data Cost in PERTAMINA for more Precision, Valid, & Reliable AACE Class 4 Estimation Purpose in Indonesia*. PM World Journal. <https://pmworldlibrary.net/wp-content/uploads/2023/05/pmwj130-Jun2023-Wijoseno-modifying-the-lang-factor-for-better-cost-estimates.pdf>
- Zhang, Y., Yunhao, Z., Shengsen, L., Zhiqing, Z., & Dongli, T. (2022). *A Comprehensive Review of the Properties, Performance, Combustion, and Emissions of the Diesel Engine Fueled with Different Generations of Biodiesel*. Processes. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr10061178>