

Simulación técnico-económica para la valorización de la almendra de mango usando SuperPro Designer.

Pablo Daniel Adarme Sarmiento y María Fernanda León Díaz

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Químico

Modalidad de Investigación

DIRECTOR

Luis Javier López Giraldo

Doctor en Ingeniería Química

CODIRECTORES

Johana Andrea Álvarez Tasco

Ingeniera Química

Andrés Fernando Ramírez Quintero

Magíster en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2023

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	9
1. Objetivos	11
1.1. Objetivo General	11
1.2. Objetivos Específicos.....	11
2. Estado del arte.....	12
3. Metodología	17
3.1. Simulación del caso base en el simulador SuperPro Designer	18
3.1.1.Diseño de proceso	18
3.2. Análisis económico	24
3.2.1.Costo de inversión de capital.	24
3.2.2.Costo de operación total.....	26
4. Resultados	29
4.1. Evaluación de los resultados del caso base.....	29
4.2. Evaluación del estudio de sensibilidad efectuado respecto a las variables iniciales seleccionadas.	30
4.3. Comparación del escenario 3 vs escenario base.	39
5. Conclusiones	43
6. Recomendaciones	44
Referencias bibliográficas.....	45
Apéndices.....	50

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Precios de las principales materias primas y productos obtenidos	25
Tabla 2 Valores de cada una de las cinco variables de entrada considerando un rango	28
Tabla 3 Valores de las cinco variables de entrada según el diseño de experimentos	28
Tabla 4 Resultados del caso base	29
Tabla 5 Costo de operación anual del caso base	29
Tabla 6 Variables de salida para todos los escenarios	31
Tabla 7 Resultados de los indicadores económicos del caso base vs el escenario 3	40
Tabla 8 Costo de operación anual del caso base vs el escenario 3	40
Tabla 9 Ingresos generados en cada sección de producción del caso base vs el escenario 3	41

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Diagrama metodológico del proyecto de investigación	18
Figura 2 Sección de preparación de la semilla de mango	20
Figura 3 Sección de producción de aceite de mango	20
Figura 4 Sección de producción de polifenoles	21
Figura 5 Sección de producción de proteínas	22
Figura 6 Sección de producción de almidón	23
Figura 7 Sección de producción de electricidad	23
Figura 8 Valor actual neto de todos los escenarios	31
Figura 9 Periodo de recuperación de la inversión para todos los escenarios	32
Figura 10 Tasa interna de retorno para todos los escenarios	32
Figura 11 Diagrama de Pareto para el VAN	35
Figura 12 Tabla ANOVA del VAN	35
Figura 13 Gráfica de efectos principales para el VAN	36
Figura 14 Diagrama de Pareto para el PBP	36
Figura 15 Tabla ANOVA del PBP	37
Figura 16 Gráfica de efectos principales para el PBP	37
Figura 17 Diagrama de Pareto para la TIR	38
Figura 18 Tabla ANOVA de la TIR	38
Figura 19 Gráfica de efectos principales para la TIR	39
Figura A1 Confirmación de pago por parte de Statgraphics	50
Figura A2 Envío de número de serie y código de registro por parte de Statgraphics	51

Glosario

Almidón: El almidón es un tipo de carbohidrato complejo que se encuentra en plantas y es una fuente importante de energía para los seres humanos y otros animales. Está compuesto por largas cadenas de glucosa que se unen para formar una estructura similar a un árbol ramificado. El almidón se encuentra en alimentos como el pan, las papas, el arroz y los cereales. También se utiliza como ingrediente en muchos alimentos procesados, como las salsas y los postres. El almidón es un importante ingrediente en la industria alimentaria, se utiliza como espesante y agente de gelificación en muchos productos. Además, también se utiliza en la industria textil, papelera y farmacéutica.

Análisis de sensibilidad: Es una herramienta a través de la cual se estudia los cambios que se producen en una variable cuando se introducen ciertas variaciones en el modelo financiero.

Análisis estadístico: Se refiere al proceso de recopilar, sistematizar e interpretar una determinada cantidad de datos para descubrir patrones y tendencias implícitos.

Biorrefinería: Es una instalación industrial que convierte materiales biológicos renovables, como biomasa, residuos orgánicos y cultivos energéticos, en una variedad de productos químicos, biocombustibles y otros productos útiles.

Estudio de Prefactibilidad Técnico-económico: El estudio de prefactibilidad técnico-económico es un análisis que se realiza para determinar la viabilidad de un proyecto. Este análisis considera tanto los aspectos técnicos como los económicos del proyecto y ayuda a los inversionistas y promotores a tomar una decisión informada sobre si continuar o no con el proyecto. En el estudio de prefactibilidad técnico-económico, se realizan evaluaciones técnicas, las cuales incluyen el análisis de la ingeniería del proyecto, la determinación de los requerimientos de materiales y equipo, y la identificación de los riesgos y desafíos técnicos.

Periodo de Retorno (PBP): O "Payback Period" (PBP) representa la cantidad de tiempo que se necesita para recuperar la inversión inicial realizada en un proyecto. Es decir, es el tiempo que tarda en recuperar la cantidad de dinero invertida en el proyecto a través de los flujos de caja generados por el mismo.

Proteínas de origen vegetal: Estas proteínas son diferentes de las proteínas de origen animal dado que no contienen todos los aminoácidos esenciales, que son aquellos que nuestro cuerpo no puede producir por sí mismo y deben ser obtenidos a través de la dieta.

Tasa Interna de Retorno (TIR): Es una medida financiera que se utiliza para evaluar la rentabilidad de un proyecto de inversión. La TIR es útil porque permite a los inversores comparar la rentabilidad de diferentes proyectos de inversión y tomar decisiones informadas sobre dónde invertir su dinero. Si la TIR de un proyecto es mayor que la tasa de descuento utilizada para calcularla, el proyecto es rentable y se espera que genere un rendimiento positivo.

Valor Actual Neto (VAN): Es una herramienta financiera utilizada para evaluar la rentabilidad de una inversión. Básicamente, el VAN calcula la diferencia entre el costo inicial de una inversión y el valor presente de los flujos de efectivo esperados de la inversión en el futuro. Si el VAN es positivo, significa que la inversión es rentable, mientras que, si es negativo, significa que la inversión no lo es. El VAN también ayuda a identificar el nivel de riesgo de una inversión, ya que cuanto mayor sea el VAN, menor será el riesgo asociado a la inversión.

Viabilidad económica: La capacidad del proyecto o negocio para generar ingresos y beneficios en el largo plazo. Se realiza un análisis económico para evaluar los costos y beneficios del proyecto, teniendo en cuenta los ingresos esperados y los costos de producción.

Resumen

Título: Simulación técnico-económica para la valorización de la almendra de mango usando SuperPro Designer.

Autores: Pablo Daniel Adarme Sarmiento, María Fernanda León Díaz.

Palabras Clave: Biorrefinería, SuperPro Designer, almendra de mango, aceites, fibra, compuestos fenólicos, almidones, proteínas.

El presente estudio se centró en la evaluación técnico-económica de un proceso de obtención de productos de valor agregado a partir de la semilla de mango a nivel industrial. A través de la simulación en SuperPro Designer v12,0 y el análisis de sensibilidad realizado con ayuda del programa de Statgraphics v19,0, se evaluaron diferentes escenarios que variaban factores clave del diseño de la planta, como la capacidad, los precios de compra de materias primas y los precios de venta de productos. Se observó que el escenario 3, que se caracterizaba por una mayor capacidad de la planta, un precio de venta más alto para el aceite de mango y los extractos polifenólicos resultó ser el que conduce a una mayor rentabilidad de los escenarios analizados. Los indicadores financieros como el VAN, el TIR y el PayBack Period (PBP) fueron favorables en este escenario, mostrando una mayor viabilidad económica. Concretamente, se encontró que el escenario 3 presentaba un VAN positivo de \$71.025 millones, lo que indica que el proyecto generaría una ganancia neta en valor presente. Adicionalmente, el TIR fue del 59,57%, lo que sugiere que el proyecto podría generar un retorno sobre la inversión. Además, el PayBack fue de 1,93 años, indicando que el tiempo de recuperación de la inversión inicial sería relativamente corto. Pese a los resultados positivos obtenidos hasta el momento, se evidenció la necesidad de realizar un análisis más detallado que incluya diseños y cotizaciones de equipos en tiempo real, dada la robustez de la biorrefinería y la variedad de equipos involucrados, por lo que es fundamental contar con información precisa y actualizada para determinar la viabilidad técnico – económica del proyecto.

Abstract

Title: Technical-Economic Simulation for the Valorization of Mango Seed using SuperPro Designer.

Authors: Pablo Daniel Adarme Sarmiento, María Fernanda León Díaz.

Keywords: Biorefinery, SuperPro Designer, mango seed, oils, fiber, phenolic compounds, starches, proteins.

This study focused on the technical and economic evaluation of a process for obtaining value-added products from mango seeds at an industrial level. Through simulation using SuperPro Designer v 12,0 and sensitivity analysis conducted with the assistance of the Statgraphics 19,0 program, different scenarios were evaluated, varying key factors in the plant's design, such as capacity, raw material purchase prices, and product selling prices. It was observed that scenario 3, characterized by higher plant capacity, a higher selling price for mango oil, and polyphenolic extract, turned out to be the most profitable among the analyzed scenarios. Financial indicators such as NPV (Net Present Value), IRR (Internal Rate of Return), and Payback Period (PBP) were favorable in this scenario, indicating greater economic viability. Specifically, scenario 3 showed a positive NPV of \$71.025 million, suggesting that the project would generate a net profit in present value terms. Additionally, the IRR was 59.57%, indicating that the project could generate a return on investment. Furthermore, the Payback Period was 1.93 years, indicating that the initial investment would be recovered quickly. Despite the positive results obtained so far, the need for a more detailed analysis that includes real-time equipment designs and quotations was evident, given the complexity of the biorefinery and the variety of equipment involved. Therefore, it is crucial to have precise and up-to-date information to determine the technical and economic feasibility of the project.

Introducción

En los últimos años, ha incrementado el mercado de subproductos o de residuos valorizables. El sector de la agroindustria es uno de los principales productores de residuos como resultado de sus actividades de cosecha, transformación y comercialización de los alimentos; de los cuales solamente algunos tienen un uso definido (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2019). Ante la necesidad valorizar los subproductos se han creado diferentes aproximaciones que buscan usos novedosos en cadenas ya existentes. Por ejemplo, los residuos de la almendra de mango pueden ser una fuente de aceite y extractos polifenólicos que podrían usarse en formulaciones cosméticas. También son fuente de almidón, fibra y proteína que podrían emplearse en aplicaciones alimenticias. El mango es la segunda fruta tropical más cosechada en el mundo, con una producción global de más de 55 millones de toneladas al año (FAO, 2019). A nivel nacional se producen alrededor de 370.000 toneladas/año, con una concentración de producción en los departamentos de Cundinamarca y Tolima (Agronet, 2021). Durante su procesamiento, se obtiene la pulpa como producto principal y al mismo tiempo, la cáscara y la semilla como subproductos, los cuales constituyen un 33% en peso del fruto (Banerjee et al., 2018).

En la búsqueda de valorizar la semilla de mango, fueron propuestas las biorrefinerías, las cuales ofrecen una de las principales soluciones para la obtención de productos de valor agregado a partir de desechos y subproductos orgánicos, constituyendo una alternativa económicamente ventajosa al incrementar la competitividad y sostenibilidad de una empresa (Ioannidou et al., 2020). En la actualidad, existen biorrefinerías que producen jarabes edulcorantes y concentrados proteicos a través del suero del queso, el cual es un subproducto del procesamiento de la leche (Gómez et al., 2020).

Con respecto a estrategias de usufructuar los subproductos del mango se tiene el desarrollo de alimentos y cosméticos (Ciriminna et al., 2015); en la búsqueda de aumentar en

ellos sus compuestos polifenólicos, contenido de fibra, carotenoides y actividad antioxidante, se destaca el núcleo del mango al contener importantes compuestos bioactivos (CB) con propiedades antimicrobianas, antidiabéticas, anticancerígenas y antiinflamatorias, así como un alto contenido proteico (Gupta et al., 2022a), de esta forma, van surgiendo alternativas de valorización de la almendra de mango que van desde la producción de aceites hasta el uso como un potencial biocombustible al tener un poder calorífico de 18 MJ/kg (Perea-Moreno et al., 2018).

Si bien el crear productos de valor agregado a partir de desechos orgánicos constituye una fuerte apuesta de valor, los estudios de la factibilidad económica que tendría el funcionamiento de una biorrefinería de residuos de mango en Colombia son limitados, por lo que es necesario que se vea respaldado por un análisis en el que se valoren diferentes escenarios para el aprovechamiento integral de la almendra de mango, analizando parámetros técnico-económicos de gran importancia para el proceso de producción, como lo son el Valor Presente Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y un Periodo de Retorno (PBP), brindando visibilidad a la viabilidad económica de este tipo de proyectos en el país.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Realizar una simulación técnico-económica para el aprovechamiento integral de la almendra de mango, Magdalena river, mediante diferentes escenarios usando el software SuperPro-Designer v12,0.

1.2. Objetivos Específicos

- Definir los equipos y las condiciones operacionales para el proceso de aprovechamiento integral.
- Proponer un diagrama de flujo de biorrefinería para el aprovechamiento de almendra de mango en el Software SuperPro-Designer v12,0.
- Evaluar distintos escenarios de simulación sobre variables económicas como el Valor Presente Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y un Periodo de Retorno (PBP).

2. Estado del arte

En el año 2020, Colombia experimentó un aumento significativo en la producción de mango, alcanzando un total de 370.508 toneladas. Las regiones de Cundinamarca, Tolima y Magdalena destacaron como los principales productores, abarcando aproximadamente el 68% del área cultivada en el país. Este crecimiento se debe a la creciente demanda nacional e internacional de mango fresco y procesado, aunque persisten desafíos climáticos, como el fenómeno del Niño (Ministerio de Agricultura, 2021). La producción de mango se ha centrado tradicionalmente en la venta de la pulpa de la fruta, y los subproductos, como la cáscara y la semilla, a menudo se desestiman o se utilizan de manera limitada, en su mayoría destinados al compostaje. Esta práctica limitada en el aprovechamiento de los subproductos del mango ha impedido la exploración de oportunidades valiosas en la industria agrícola y alimentaria. Frente a la gran cantidad de subproductos agrícolas que produce el cultivo del mango, (Serna-Cock et al., 2016), (Castro-Vargas et al., 2019), se han realizado numerosos estudios científicos sobre la valorización de estos residuos con el fin de reutilizarlos para la creación de nuevos productos de valor añadido al ser fuentes importantes de almidón, proteínas, aceite y fibras, como también de compuestos bioactivos, enzimas, biopolímeros, polisacáridos, polifenoles y biocombustibles (Caldeira et al., 2020). Respecto a la almendra del mango, la cual representa entre el 20% y el 60% del peso del fruto (Torres-León et al., 2016), cuenta con una fracción lipídica en la que los principales ácidos grasos son el oleico, el palmítico y el esteárico, los que representan aproximadamente el 15% del peso total de la semilla (Gupta et al., 2022b) y un porcentaje en grasa entre 6,73% y 11,8%, mucho mayor al porcentaje de grasa obtenido en cereales como el maíz, indicando que la obtención de grasa comestible a partir de la semilla constituye una alternativa viable al posibilitar su aplicación en la sustitución de grasas vegetales o posible generación de nuevos productos (Pereira da Silva et al., 2021). En cuanto al almidón de la semilla de mango, Pereira da Silva et al. proponen una ruta tecnológica para la extracción de

almidón, a su vez, Arora (Arora et al., 2018a), plantean una ruta para la extracción de polifenoles, grasas y almidón, obteniendo un almidón con un contenido de amilosa superior al 22%, y demostrando su potencial para la producción de bioplásticos. Adicionalmente, Manhongo (Manhongo et al., 2021), realizaron una evaluación técnico-económica y ambiental de biorrefinerías integradas de residuos de mango, que coproducen bioetanol, bioenergía, pectina y polifenoles mediante 3 escenarios, en los cuales se evaluó la producción de bioetanol, llevado a grado de combustible, de calor (vapor), el cual se exporta a la instalación anfitriona y la electricidad, la cual se consume dentro de la biorrefinería; adicionalmente se hace una recuperación secuencial de pectina y polifenoles junto con la producción de vapor y electricidad a partir de los residuos del procesamiento del mango. Por otra parte, Gómez-Maldonado (Gómez-Maldonado et al., 2020) han comprobado la actividad antifúngica de los polifenoles de semilla de mango en frutos de mango infectados por antracnosis, obteniendo un extracto de semilla de mango óptimo con un contenido de polifenoles total de 461,7 mg equivalentes de ácido gálico/g y una capacidad antirradicalaria, medida por el método de 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH), de $2919,0 \pm 4,8$ μmol equivalentes de Trolox/g; los mismos autores también identificaron que los principales polifenoles presentes fueron mangiferina, ácido clorogénico, miricetina, ácido ferúlico y ácido cafeico. Cabe destacar que la actividad antifúngica del extracto de semilla de mango fue mayor que la del fungicida tiabendazol luego de ser comparados entre sí.

Las tecnologías utilizadas en el procesamiento de biomasa residual comprenden una gama de métodos físicos, termoquímicos, químicos y biológicos que posibilitan la producción de distintos productos valiosos al ajustar la biomasa a las condiciones particulares de cada proceso. De esta manera, la biomasa residual presenta desafíos novedosos en su utilización sostenible para la humanidad (Gómez-Soto et al., 2019).

Las biorrefinerías representan una innovación clave en el panorama global, ofreciendo una solución sostenible y prometedora para una variedad de desafíos. Este concepto, aunque no es nuevo, se ha consolidado en diversos ámbitos, como la agricultura y la industria alimentaria, donde se observa cómo se pueden transformar los productos en una amplia gama de elementos con aplicaciones diversas. Lo distintivo de las biorrefinerías es su enfoque en la biomasa, en lugar de cultivos destinados a la alimentación, como materia prima. Estas instalaciones integran procesos para convertir la biomasa en combustibles, energía, productos químicos y alimentos, utilizando de manera eficiente la biomasa lignocelulósica. La biomasa utilizada puede ser desechos de industrias alimenticias, papeleras, forestales o agrícolas, lo que reduce los residuos y favorece la sostenibilidad ambiental (López & Peña, 2020).

En este contexto, las biorrefinerías se alinean perfectamente con las tendencias del mercado global hacia la sostenibilidad y la reducción de emisiones de carbono. A diferencia de las refinerías de petróleo tradicionales, que dependen de un recurso no renovable, las biorrefinerías aprovechan la biomasa renovable, lo que las convierte en una opción atractiva para abordar la crisis energética y el cambio climático. Además, ciertas biomásas utilizadas, como las algas o los cultivos de maíz, pueden absorber dióxido de carbono, cerrando así el ciclo de generación y consumo de este gas (Céspedes & Hernández, 2019).

A nivel global, las biorrefinerías suelen enfocarse principalmente en la producción de biocombustibles y tienden a utilizar principalmente materias primas como la caña de azúcar, el maíz, las grasas y los aceites, con una participación mínima de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). En México, por ejemplo, se han llevado a cabo proyectos relacionados con biorrefinerías, que incluyen una planta de biodiesel a partir de sebo animal, la producción de bioetanol a partir de algas verde azules y sistemas de calefacción basados en biomasa forestal, entre otros.

En contraste, en Colombia, aún no existen biorrefinerías a nivel industrial dedicadas a la transformación de biomasa residual. El país cuenta con complejos industriales que se asemejan a biorrefinerías de primera generación (que utilizan materias primas alimentarias procedentes de cultivos), produciendo alcohol carburante o biodiesel a partir de caña de azúcar o aceite de palma respectivamente. No obstante, se observa un creciente interés en este sector, como lo demuestran diversos estudios y proyectos en desarrollo (Sandoval, 2021).

La simulación de procesos desempeña un papel fundamental en el diseño de biorrefinerías para el aprovechamiento de residuos, permitiendo la creación de modelos operativos del sistema y la realización de "experimentos virtuales" para comprender su comportamiento. Además, esta herramienta proporciona información valiosa sobre indicadores tecno-económicos, ambientales y sociales, lo que facilita la evaluación de diversas alternativas de biorrefinerías en diferentes contextos. En particular, se utiliza el proceso de la jerarquía analítica (AHP) para estandarizar estos indicadores en un solo valor que refleje el mejor desempeño entre las múltiples opciones de la biorrefinería.

Entre los softwares de simulación disponibles, SuperPro Designer v12,0 se destaca por su versatilidad y eficacia en la simulación de procesos de biorrefinerías. Este programa cuenta con operaciones unitarias específicas para procesos biológicos, como fermentadores, lo que lo hace especialmente adecuado para este tipo de aplicaciones. Además, SuperPro Designer v12,0 considera la programación secuencial de operaciones en procesos por lotes, donde cada paso unitario involucra diversas actividades, lo que lo convierte en una herramienta completa y eficiente para el diseño y evaluación de proyectos en el contexto de biorrefinerías (Gómez-Soto et al., 2019).

Referente a estudios económicos realizados con SuperPro Designer v12,0, Arora et al, realizaron, a través del simulador un diseño de proceso y análisis técnico económico de una biorrefinería integrada de residuos del procesamiento de mango, en el que se evaluaron los

costos y la rentabilidad asociados a una planta que opera con 240 toneladas por día de subproductos del procesamiento de pulpa de mango, determinando como mejor alternativa para el uso estos residuos la extracción de pectina y aceite de semillas (Arora et al., 2018b), en donde el proceso de extracción obtuvo un Valor Presente Neto (VAN), una Tasa Interna de Retorno (TIR) y un Periodo de Retorno (PBP) de 41\$ millones, 34% y 2,4 años respectivamente, demostrando la rentabilidad económica que tendría una biorrefinería de residuos de mango y la gran versatilidad y utilidad del software para la simulación de procesos.

Por su parte, Campos-Ramírez (Campos-Ramírez Leonardo et al., 2020) efectuaron una evaluación técnico-económica de dos propuestas tecnológicas de producción de biodiesel, empleando aceite de soya como materia prima principal utilizando dicho simulador, una propuesta como Caso Base y otra como Variante Efectuaron un estudio de sensibilidad consistente en 12 corridas mediante el cual se evaluó la influencia de cinco variables de entrada sobre tres indicadores económicos: VAN, TIR y PBP, con resultados para el Caso Base de USD \$ 17 444 000, 33,83 % y 2,54 años respectivamente, mientras que los valores obtenidos de estos 3 indicadores de forma correspondiente para la Variante fueron de USD \$ 22 577 000, 38,05 % y 2,126 años Con lo anterior expuesto, se puede apreciar la importancia de los procesos de simulación y de estos indicadores económicos a la hora de analizar la rentabilidad de una planta de producción y tomar una decisión a la hora de construirla o reformarla.

Por lo tanto, una vez analizado y definidos los productos potenciales a sintetizar a partir de la almendra de mango, se espera modelar y plantear una alternativa en la que, a partir de una biorrefinería de la almendra del mango, se realice una simulación técnico-económica para el aprovechamiento integral de la almendra de mango, tomando en cuenta diferentes escenarios.

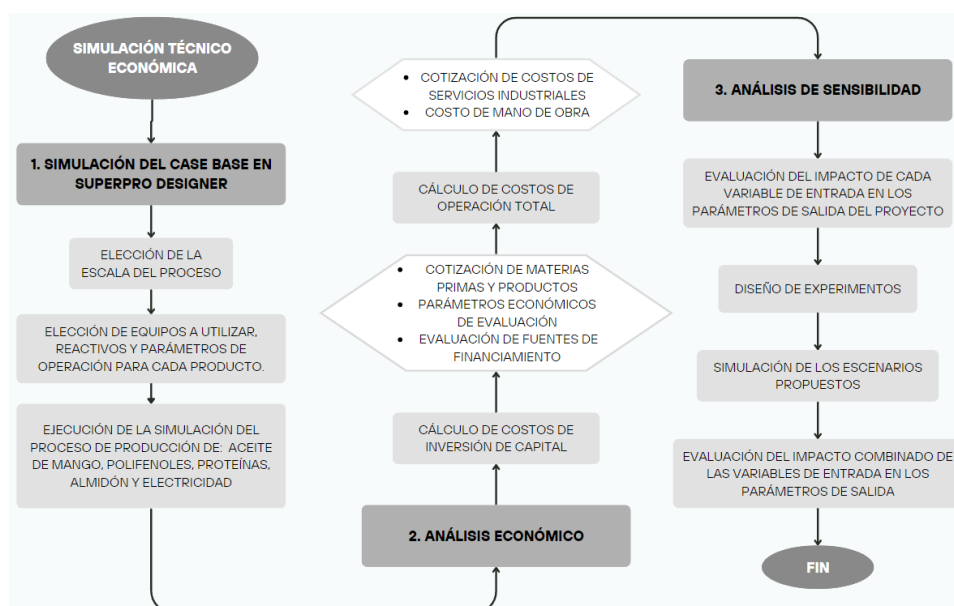
3. Metodología

Descripción de la metodología

La metodología de la simulación constó de 3 etapas como se muestra en la Figura 1. Primero se consultó la información disponible respecto a simulaciones de biorrefinerías en el programa de SuperPro Designer v12,0, para así dar comienzo a la simulación de la biorrefinería de la almendra de mango, en donde se estableció la producción de aceite, proteínas, almidón, polifenoles y una sección de producción de electricidad para abastecer parte del requerimiento energético interno. Luego se procedió a realizar un análisis económico en donde se evaluó el costo de inversión de capital y costo de operación total de la biorrefinería. Por último, se realizó un análisis de sensibilidad en el que mediante un diseño de experimentos se representó la influencia de 5 variables de entrada (Capacidad de la planta, precio de compra de 2 materias primas y precio de venta de 2 productos) sobre 3 de salida (VAN, TIR, PBP), estas variables de entrada fueron sometidas a un incremento y disminución del 20% y posteriormente tratadas por un modelo estadístico de tipo Superficie de Respuesta del software Statgraphics Centurion v19,0.

Figura 1

Diagrama metodológico del proyecto de investigación



3.1. Simulación del caso base en el simulador SuperPro Designer

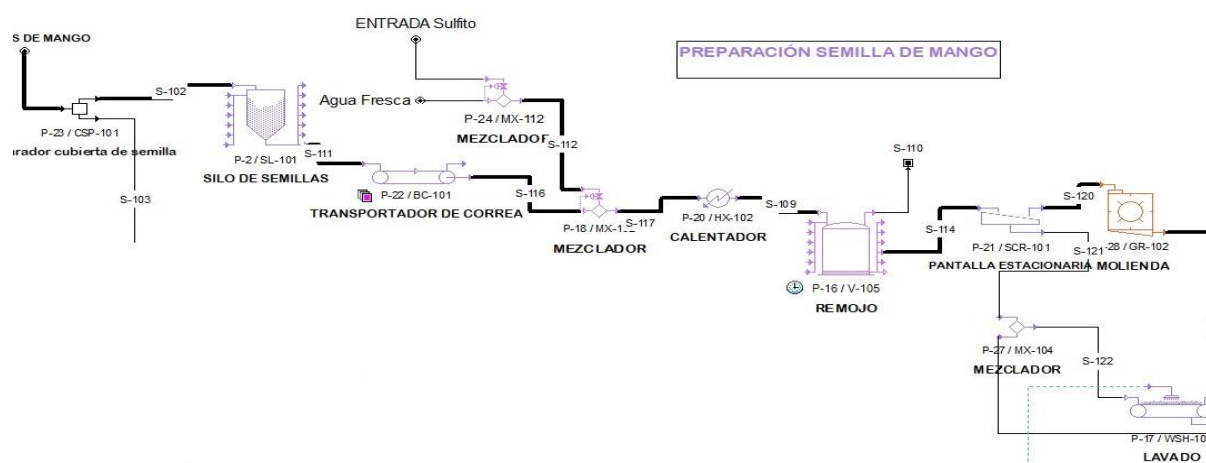
3.1.1. Diseño de proceso

Para el caso base se tiene una biorrefinería de semilla de mango que fue modelada y evaluada económicamente en SuperPro Designer v12,0. Allí, teniendo en cuenta el nivel de producción en Colombia a nivel municipal, se consideró la producción de los municipios de Espinal Tolima y del Guamo Tolima que se encuentran entre sí a 20km a la redonda, para la cual se tiene una producción total de 37.000 ton/año para el año 2021 (Agronet, 2021); considerando que la pepa de mango representa en promedio un 40% de la semilla (Torres-León et al., 2016) , también, que anualmente se tienen dos grandes cosechas en el sector (DANE, 2015) y está en crecimiento constante, se definió que la planta opera con 2 ton/h de semilla de mango. Para efectuar la simulación, se consideró un periodo de vida del proyecto de 15 años, un tiempo de construcción de la planta de 30 meses y un periodo de arranque de 4 meses. Adicionalmente, el VAN fue determinado con una tasa de descuento del 14%.

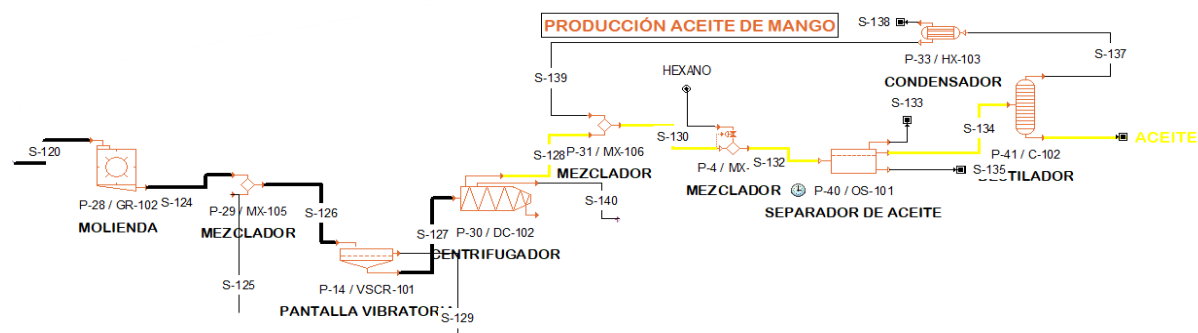
Posteriormente, se calcularon los caudales de todas las corrientes, los equipos del proceso, el consumo de servicios industriales y, por último, los costos de producción. En consecuencia, el proceso se dividió en 5 secciones: procesamiento de semillas de mango, producción de aceite de mango, producción de polifenoles, producción de proteínas, producción de almidón, producción de electricidad.

Preparación de la semilla de Mango: El proceso comenzó con la separación de la capa exterior de las semillas del mango. Dichas semillas fueron alimentadas a la sección de procesamiento, mientras que la capa de las semillas se empleó para la producción de electricidad.

Para la preparación de las semillas de mango que ilustra la Figura 2, estas se almacenaron en depósitos (P-2) con el fin de garantizar un alimento continuo a la planta. Se mantuvieron en remojo las semillas con agua y metabisulfito de potasio ($K_2S_2O_5$) (P-16) para ablandarlas y de ellas extraer en primera instancia almidón y aceites, los cuales son los componentes más abundantes del proceso. Las semillas remojadas previamente fueron separadas del agua en una pantalla estacionaria (P-21) para posteriormente ser llevadas a molienda (P-28). La fase acuosa de la separación fue llevada a un proceso de lavado (P-17) para eliminar la fracción fibrosa junto al $K_2S_2O_5$.

Figura 2*Sección de preparación de la semilla de mango*

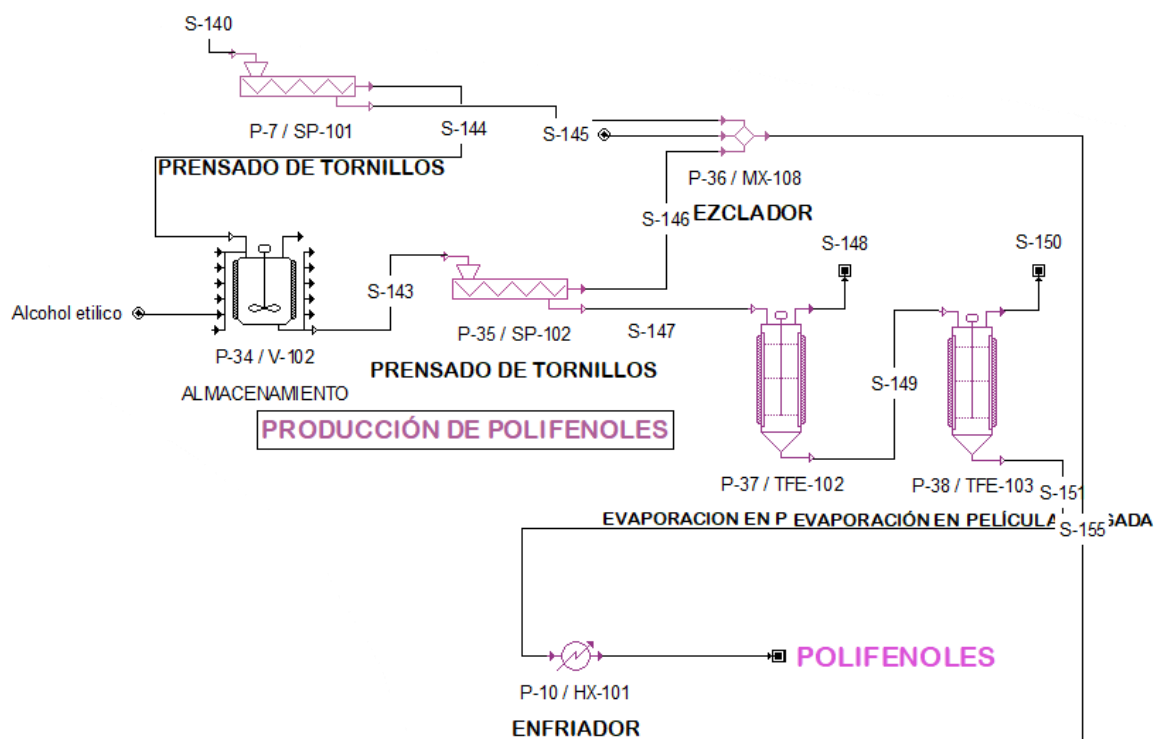
Producción de aceite de mango: En la Figura 3 se tiene que, la corriente inferior de la fase del lavado (S-125) se reintegró con las semillas molidas, luego se retiró el aceite de mango de la mezcla acuosa con un centrifugador (P-30). Este aceite (S-128) ingresó a un equipo separador de aceite (P-40) que empleó hexano como disolvente para separar el aceite de compuestos livianos. Finalmente, mediante una columna de destilación (P-41), se obtuvo una corriente rica en aceite de mango de alta pureza por la sección inferior de la columna, por otro lado, en la sección superior de la columna salió el hexano (S-137) que fue condensado (P-33) y reciclado de nuevo al proceso (S-139) para su máximo aprovechamiento.

Figura 3*Sección de producción de aceite de mango*

Producción de polifenoles: La corriente de salida acuosa del centrifugador de la mezcla del aceite de mango (S-140) fue separada con un prensador de tornillos (P-7), de allí se obtuvieron dos corrientes. Una de las corrientes fue incorporada con un flujo de alcohol etílico con una relación soluto:solvente de 1:30 de acuerdo a lo expuesto por Nova et al., para una óptima extracción de polifenoles (Nova et al., 2023), y fue llevada a otro sistema de prensado de tornillos (P-35), con el objetivo de obtener una corriente con mayor concentración de polifenoles. La corriente acuosa que salió del prensado (S-147) se llevó a un sistema de evaporación para separar el etanol y el agua, luego fue enfriada (P-10) como se observa en la Figura 4, y de esta forma, se consiguió una corriente rica en polifenoles como flavonoides, antocianinas, fitoesteroles, entre otros.

Figura 4

Sección de producción de polifenoles

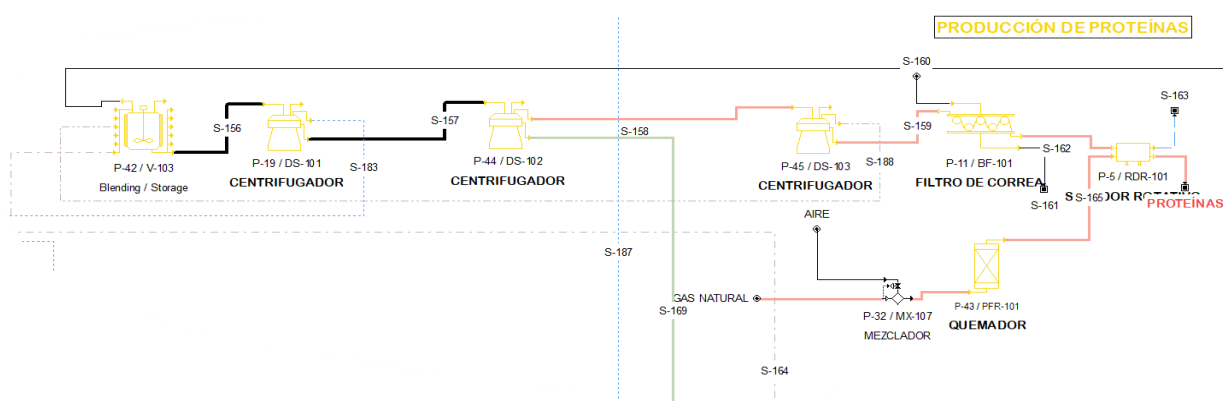


Producción de proteínas: Se puede apreciar en la Figura 4 como la corriente de sólidos a la salida de la prensa de tornillos (P-7) fue direccionada con otra corriente de agua (S-145) a

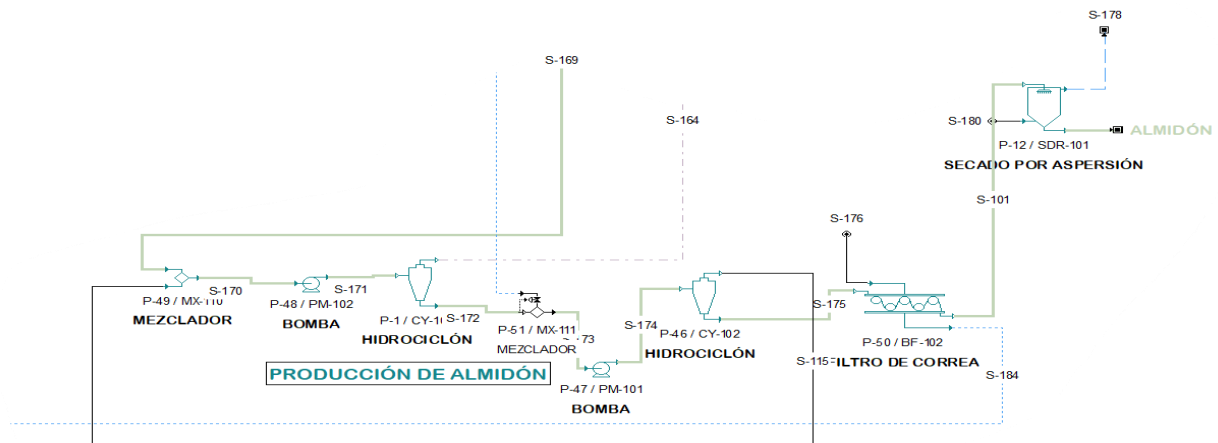
tres unidades de centrifugación (P-19, P-44, P-45) mostradas en la Figura 5. Después fue separada de compuestos disueltos en la fase acuosa mediante un filtro de correa (P-11). Por último, la corriente rica en proteínas fue llevada a un secador rotativo (P-5) alimentado con gas natural caliente para separar la corriente de las impurezas restantes y el agua, obteniendo así la corriente final.

Figura 5

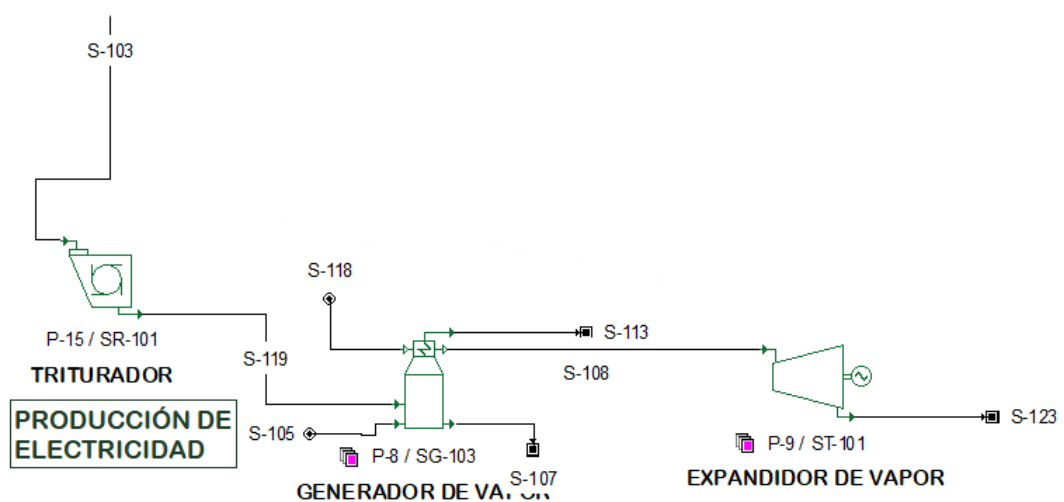
Sección de producción de proteínas



Producción de almidón: La corriente secundaria en fase líquida del segundo centrifugador (P-44) en la sección de recuperación de proteínas de la Figura 5 (S-169) fue conducida a la sección de producción de almidón que se expone en la Figura 6, en donde el almidón fue liberado de los componentes solubles y otras impurezas con dos hidrociclones en serie (P-1, P-45) y un filtro de correa (P-50) para obtener una mayor concentración de almidón. En el último paso, el almidón concentrado se secó por aspersión (P-12) para lograr un producto final con un contenido de humedad bajo y un contenido de almidón apreciable.

Figura 6*Sección de producción de almidón*

Producción de electricidad: La capa de semillas de mango que fueron separadas de los granos en la etapa inicial del proceso se trituraron (P-15) y quemaron (P-8) para producir calor y energía combinados de acuerdo con la Figura 7. Después, por medio de una turbina de vapor (P-9) se generó electricidad y vapor de baja presión (S-123) para que de esta forma fueran abastecidas parcialmente las necesidades energéticas de la biorrefinería.

Figura 7*Sección de producción de electricidad*

3.2. Análisis económico

En este estudio se realizó un análisis económico para estimar el VAN, TIR y el PayBack Period, los cuales se basan en primera instancia en la inversión de capital y los costos operativos de la refinería. Los parámetros base sobre los cuales se llevó a cabo dicho análisis son los siguientes:

3.2.1. Costo de inversión de capital.

En primer lugar, se llevó a cabo una exhaustiva investigación para obtener cotizaciones de materias primas y reactivos. Se realizaron consultas a proveedores tanto nacionales como internacionales y se compararon los precios ofrecidos por empresas como Indiamart, Merk, Hamsa, Biotienda y Biociencia para las materias primas de interés. Se seleccionó un promedio de los precios encontrados como base para el análisis económico, asegurando así una estimación apropiada de los costos operativos. En el caso de los polifenoles, se realizó un estudio de los precios promedio de exportación e importación a Colombia para los últimos años, así como de la literatura, para el cual se obtuvo un valor de 50 USD/kg (Trademap, 2022). En el caso del aceite de mango, se tomó un precio promedio representativo de la tienda de Nature In Bottle de un valor de 27,6 USD/kg (Nature In Bottle, 2023). Para materias primas como el alcohol etílico, hexano y metabisulfito de potasio, se tuvieron en cuenta los precios de empresas como Indiamart y Merck (Indiamart, 2022). En la Tabla 1 se muestran los precios de las principales materias primas consumidas y los productos obtenidos durante el proceso productivo los cuales fueron empleados en la simulación del caso base.

Tabla 1

Precios de las principales materias primas y productos obtenidos. (Nature In Bottle, 2023).

Compuesto	Unidad de medida	Precio USD
Alcohol etílico	L	0,73
Hexano	kg	2,05
Metabisulfito de Potasio ($K_2S_2O_5$)	kg	1,5
Polifenoles	kg	50
Proteínas	kg	1
Almidón	kg	0,3
Aceite de mango	kg	27,6

La financiación del proyecto se abordó considerando dos fuentes principales: inversores y préstamos/financiamientos bancarios. Se evaluaron diferentes opciones de préstamos a largo plazo ofrecidas por diversos bancos en la página del banco de la república (Banco de La República, 2022), y después de un análisis minucioso, se eligió una tasa de interés del 16%, siendo la más favorable para el proyecto. El financiamiento del banco equivale al 70% del valor total del financiamiento del proyecto, el 30% restante proviene de inversores. Esto garantiza una estructura financiera sólida y adecuada para respaldar la implementación y operación de la refinería.

Para estimar el crecimiento de la empresa, se realizaron investigaciones exhaustivas que involucraron el análisis de informes y estudios de mercado. Se prestó especial atención al mercado del producto principal, el aceite de mango. Con base en los datos recopilados, se determinó un porcentaje de crecimiento apropiado y realista del 9% (Mercado Latinoamericano de Aceites Esenciales, 2023), lo que permite proyectar los ingresos y los beneficios futuros de la empresa.

Además, se llevó a cabo un análisis de la inflación para evaluar su impacto en los costos y la rentabilidad del proyecto a lo largo del tiempo. Se recopiló información sobre la inflación anual de los últimos cinco años, lo que proporcionó una base sólida para estimar la inflación futura del 13,12% (DANE, 2022), y ajustar los cálculos financieros en consecuencia. Este enfoque garantiza una consideración adecuada de los cambios económicos y su efecto en la viabilidad económica del proyecto.

En vista del extenso tamaño y la complejidad del proceso, se optó por utilizar los precios preestablecidos de los equipos disponibles en el simulador SuperPro Designer v12,0, en lugar de realizar cotizaciones individuales. Esta decisión se tomó considerando las limitaciones de tiempo y la complejidad asociada con la obtención de diseños de equipos específicos para las cotizaciones. Aunque reconocemos la importancia de las cotizaciones precisas, se consideró que los precios predeterminados brindaban una aproximación razonable para la evaluación económica del proyecto, sin comprometer su viabilidad.

3.2.2. Costo de operación total

Los costos operativos de la biorrefinería basada en residuos de procesamiento de mango incluyen los costos de materias primas, servicios públicos, mano de obra, laboratorio, consumibles y disposición de residuos. La planta utiliza servicios auxiliares comunes en este tipo de procesos, como agua de enfriamiento, electricidad, vapor de agua, agua caliente (o condensada) y aire comprimido. Es importante destacar que para este estudio se seleccionó el municipio de Espinal en el departamento de Tolima. Los precios de los servicios industriales se obtuvieron mediante una investigación minuciosa y la solicitud de cotizaciones a las empresas proveedoras de servicios en dicho sector.

Se estableció un salario nominal promedio de USD \$1,50 por hora para los operarios que trabajan en la planta, de acuerdo con el salario mínimo en Colombia en el año 2022

(MinTrabajo, 2021). Ambos aspectos son considerados como factores clave para la evaluación del costo de operación de la planta.

3.3. Análisis de sensibilidad

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de la simulación en SuperPro Designer v12,0, se realizó un análisis de sensibilidad mediante un diseño de experimentos estadístico de tipo Superficie de Respuesta utilizando el software Statgraphics Centurion v19,0. El objetivo fue estimar la influencia de cinco variables de entrada: capacidad de la planta, precio de compra del alcohol etílico, precio de compra del hexano, precio de venta de los polifenoles y precio de venta del aceite de mango, sobre tres parámetros de salida del proceso: valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y período de recuperación de la inversión (PBP).

En el diseño de experimentos, se manipularon las cinco variables de entrada incrementándolas y disminuyéndolas en un 20% para evaluar su impacto en los resultados del VAN, TIR y PBP a lo largo del tiempo del proyecto. Este diseño se llevó a cabo utilizando la metodología de Superficie de Respuesta, con una configuración aleatorizada utilizando el enfoque "Draper-Lin small composite design", lo que generó un total de 24 ejecuciones. Posteriormente, se seleccionaron las 12 ejecuciones más relevantes utilizando la técnica de optimización "D-Optimality" disponible en el mismo software estadístico. La Tabla 2 muestra los valores que deben cumplir cada una de las cinco variables de entrada en el diseño de experimentos optimizado, considerando un rango de $\pm 20\%$ para un total de doce corridas.

Tabla 2

Valores de cada una de las cinco variables de entrada considerando un rango.

PARÁMETRO	V. BASE	V. MIN	V. MÁX
CAPACIDAD DE LA PLANTA [Ton/h]	2	1,6	2,4
PRECIO HEXANO [\$USD/kg]	2,05	1,64	2,46
PRECIO ALCOHOL ETILICO [\$USD/L]	0,73	0,584	0,876
PRECIO DE VENTA DEL ACEITE DE MANGO [\$USD/kg]	27,6	22,08	33,12
PRECIO DE VENTA DE LOS POLIFENOLES [\$kg]	50	40	60

Continuando con el análisis, en la Tabla 3 se muestran los 12 escenarios de entrada generados mediante el diseño de experimentos que fueron simulados. A partir de estos resultados, se realizó el análisis de sensibilidad para evaluar la influencia de las variables de entrada sobre las de salida.

Tabla 3.

Valores de las cinco variables de entrada según el diseño de experimentos

ESCENARIO	CAPACIDAD DE LA PLANTA [ton/h]	PRECIO DE COMPRA ALCOHOL ETILICO [\$/L]	PRECIO DE COMPRA HEXANO [\$/L]	PRECIO DE VENTA ACEITE DE MANGO [\$/kg]	PRECIO DE VENTA POLIFENOLES [\$/kg]
1	1,6	0,876	2,46	33,12	40
2	1,6	0,584	1,64	22,08	40
3	2,4	0,584	2,46	33,12	60
4	1,6	0,584	2,46	22,08	60
5	2,4	0,584	1,64	22,08	60
6	2,4	0,876	1,64	33,12	60
7	2,4	0,876	1,64	22,08	40
8	2,4	0,876	2,46	22,08	60
9	2,4	0,584	2,46	33,12	40
10	1,6	0,584	1,64	33,12	40
11	1,6	0,876	1,64	33,12	60
12	1,6	0,876	2,46	22,08	60

4. Resultados

4.1. Evaluación de los resultados del caso base

En la tabla 4 se muestran los resultados del estudio del caso base simulado en SuperPro Designer v12,0, en donde se tienen los valores para el VAN, PBP y TIR de 14,232 millones de dólares, 3,61 años y 26,12% respectivamente.

Tabla 4

Resultados del caso base

Parámetro	Valor
Inversión total de capital [\$USD]	42.260.000
Costo de operación total [\$USD/año]	24.195.000
Ganancias totales anuales [\$USD/año]	33.651.000
Margen bruto [%]	28,10
Retorno de la inversión [%]	27,71
VAN [\$]	14.232.000
TIR [%]	26,12
PBP [años]	3,61
Costo energético [\$USD/año]	182.323

Tabla 5

Costo de operación anual del caso base

Parámetro	Valor [\$USD/año]	%
Materias Primas	14.554.000	60,15
Mano de obra	753.000	3,11
Mantenimiento de los activos	8.239.000	34,05
Aseguramiento de la calidad	113.000	0,47
Servicios auxiliares	536.000	2,22

En la tabla 5 se aprecia que el costo de operación más representativo es la materia prima a pesar de que la almendra de mango es gratis. El segundo costo más relevante es el del mantenimiento de los activos, esto se debe a la variedad de secciones de procesamiento que maneja la biorrefinería, lo que se traduce en un importante número de equipos.

Según lo anteriormente expuesto, este caso base representa un escenario rentable; sin embargo, se evaluaron otros 12 casos tomando como referencia los valores iniciales de la capacidad de la planta, precio de compra de hexano y alcohol etílico, así como el precio de venta del aceite de mango y los polifenoles, y de esta forma constatar cuál de estas variables de entrada es la más influyente financieramente hablando, sobre las de salida.

Por parte de la sección de producción de electricidad se tiene que genera unos 79.982 USD\$/año, esto quiere decir que alcanza a satisfacer cerca del 44% del consumo energético de la planta. Teniendo en cuenta que el costo de los equipos empleados en esta sección suma un valor de 552.000 USD\$ según el costo base de los equipos proporcionado por SuperPro Designer v12,0, se puede decir que en los 15 años del proyecto la sección genera 1.199.730 USD\$, lo que es un poco más del doble del valor de los equipos, además a este valor se agregan los costos de mantenimiento, operación y personal para su correcto funcionamiento.

4.2. Evaluación del estudio de sensibilidad efectuado respecto a las variables iniciales seleccionadas.

Las Figuras 8, 9 y 10 ilustran los resultados del estudio de sensibilidad realizado para las 12 ejecuciones consideradas que se muestran en la Tabla 6. El análisis revela que el escenario 3 presenta los resultados económicos más favorables, con valores más altos de VAN y TIR, así como el menor valor de PBP: 71,025 millones de dólares, 59,57% y 1,93 años, respectivamente.

Tabla 6*Variables de salida para todos los escenarios*

ESCENARIO	VAN [millones \$]	PBP [años]	TIR [%]
1	-24,068	8,91	NA
2	-21,421	8,16	NA
3	71,025	1,93	59,57
4	-1,043	4,66	13,18
5	42,448	2,56	44,19
6	50,1	2,34	47,61
7	-8,935	5,47	6,84
8	-9,016	5,48	6,78
9	44,962	2,45	44,68
10	0,575	4,52	14,47
11	-3,407	4,92	11,41
12	-25,769	9,55	NA

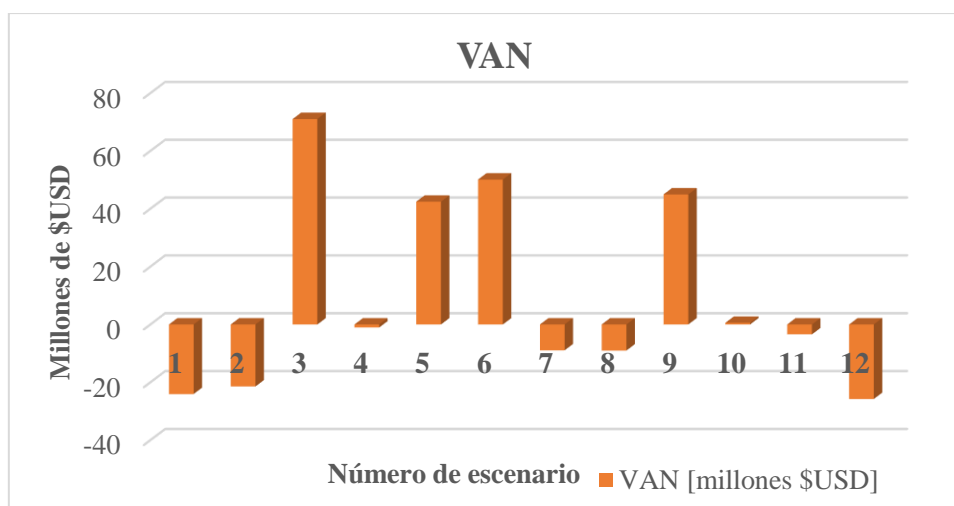
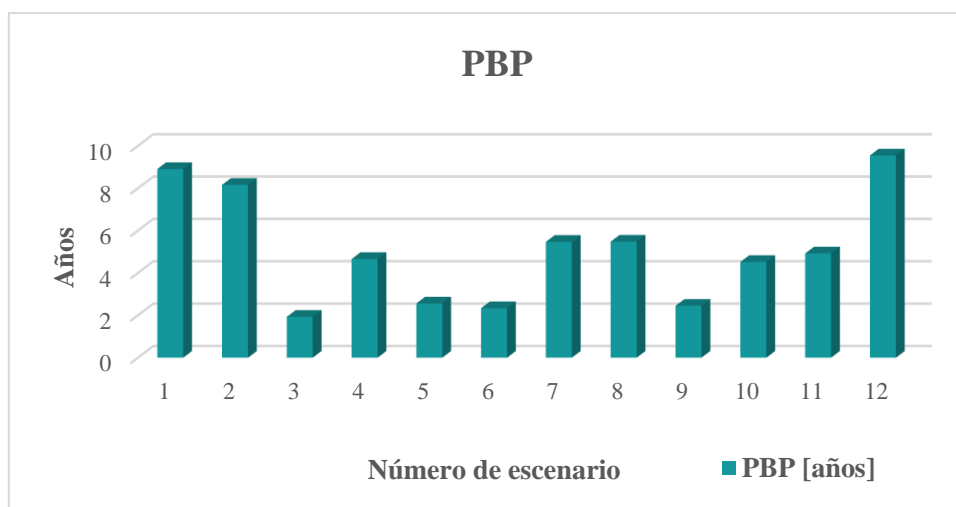
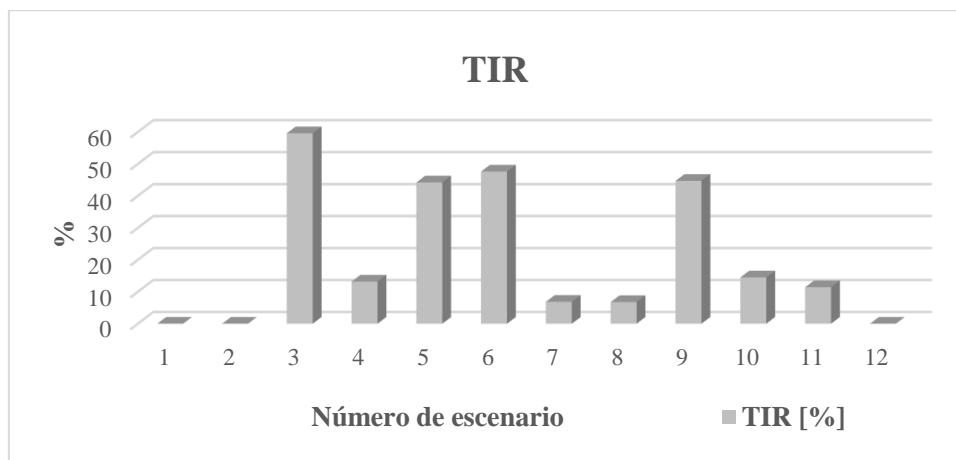
Figura 8*Valor actual neto de todos los escenarios*

Figura 9

Periodo de recuperación de la inversión para todos los escenarios

**Figura 10**

Tasa interna de retorno para todos los escenarios



Un factor primordial para los resultados del Escenario 3 es la ampliación de la capacidad de la planta a 2.4 toneladas por hora, la cifra más alta entre los escenarios estudiados. Este aumento en la capacidad puede originar eficiencias de escala, reduciendo costos unitarios y ampliando los ingresos generados. Esta escalabilidad tiene un impacto directo en el VAN al mejorar tanto los ingresos como la eficiencia operativa.

En este escenario, el precio de compra del alcohol etílico es el más bajo, fijado en 0,584 \$USD/L. Dado que se emplea una mayor cantidad de alcohol etílico en la operación en comparación con el hexano, la variabilidad en el precio del alcohol etílico ejerce una influencia más significativa en las variables económicas de salida. De esta manera, la elección de un precio de compra más bajo para el alcohol etílico podría haber contribuido de forma positiva al resultado del VAN.

En contraposición, el precio de compra del hexano en el escenario 3 es el más alto, alcanzando los 2,46 \$USD/L. Aunque el hexano se utiliza en menor cantidad que el alcohol etílico en la operación, su impacto en los costos totales puede haber sido atenuado por los mayores ingresos generados por la producción y venta de los productos finales.

Adicionalmente, los precios de venta de los productos clave, como el aceite de mango y los polifenoles, son los más altos en el escenario 3. El precio de venta del aceite de mango es de 33,12 \$USD/kg y el de los polifenoles es de 60 \$USD/kg. Estos valores superiores en ventas aumentan los ingresos generados por la producción y venta de estos productos, lo que contribuye positivamente al VAN.

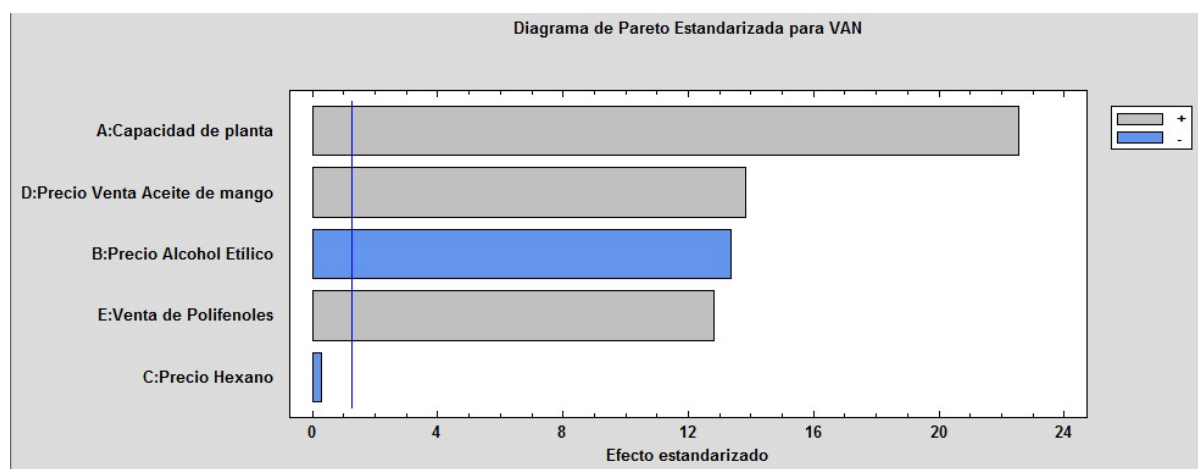
Teniendo en cuenta los resultados presentados en la Tabla 6, en términos de VAN, el escenario con el valor más alto es el más favorable como se muestra en la Figura 8.

En cuanto a la TIR, hay 3 escenarios en los que no se puede calcular debido al aumento de flujos de caja negativos que presentan a lo largo de la duración del proyecto de 15 años, así como en sus años posteriores. La TIR proporciona una medida de la rentabilidad del proyecto al calcular la tasa de descuento a la cual el VAN se vuelve cero. De acuerdo con la tasa de descuento que se escogió del 14%, se puede decir que los escenarios que presentaron un valor de TIR menor a ese 14% obtuvieron un VAN negativo. Lo anterior mencionado se puede observar mejor en los escenarios 4 y 10, en los cuales se tuvieron valores de TIR muy cercanos

a la tasa de descuento, estos valores se vieron reflejados en sus valores de VAN, los cuales fueron cercanos a 0. Dado que el PBP es un indicador del tiempo que se tarda en recuperar la inversión inicial del proyecto, un menor valor de PBP ofrecería una recuperación más rápida. En este caso, la Figura 9 muestra que, los escenarios 3 y 6 tienen los PBPs más bajos, con 1,93 años y 2,34 años respectivamente. Algo a considerar es el PBP de los escenarios 4 y 11, en los que, a pesar de tener un VAN negativo se obtiene un PBP menor a 5 años, esto se debe a que se tiene un valor de TIR positivo, esto quiere decir que estos escenarios presentan una recuperación de la inversión, pero no constituyen un escenario rentable al tener una TIR menor a la tasa de descuento. En resumen, considerando los resultados obtenidos, 4 de los 12 escenarios se presentan como favorables desde el punto de vista financiero. Sin embargo, teniendo las 3 variables financieras como factores determinantes, el escenario 3 podría ser considerado como la mejor opción ya que tiene el menor tiempo de recuperación de la inversión inicial, el mayor valor actual neto y la mayor tasa interna de retorno.

Con el propósito de cuantificar la influencia de cada una de las variables de entrada sobre las de salida, se realizó un análisis estadístico con los resultados anteriormente expuestos. El producto de este análisis fue representado en los Diagramas de Pareto, Gráficas de efectos principales y tablas ANOVA de las Figuras 11 a la 19 para el VAN, el PBP y la TIR.

En las Figuras 11 y 12 se tiene el diagrama de Pareto y la tabla ANOVA para el VAN, de las cuales se pueden evidenciar 4 variables influyentes en las que, el precio de venta de aceite de mango es la más sobresaliente entre todas, con un impacto positivo, a contraparte se tiene al precio de alcohol etílico como la variable más influyente de impacto negativo. Por otra parte, se puede considerar que la sección más conveniente en términos de VAN es la de producción de aceite de mango, al tener la variable con mayor influencia positiva, así como la variable con menor impacto negativo.

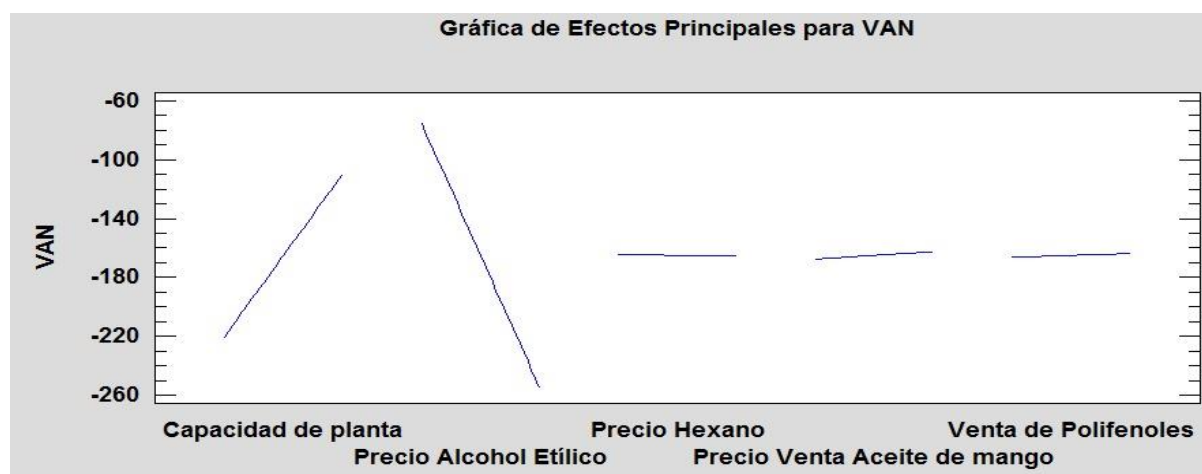
Figura 11*Diagrama de Pareto para el VAN***Figura 12***Tabla ANOVA del VAN*

Análisis de Varianza para VAN					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Capacidad de planta	5883,79	1	5883,79	508,50	0,0000
B:Precio Alcohol Etílico	2070,89	1	2070,89	178,98	0,0000
C:Precio Hexano	0,89053	1	0,89053	0,08	0,7908
D:Precio Venta Aceite de mango	2211,99	1	2211,99	191,17	0,0000
E:Venta de Polifenoles	1906,56	1	1906,56	164,77	0,0000
Error total	69,4249	6	11,5708		
Total (corr.)	12143,5	11			

De acuerdo con la gráfica de efectos principales que expone la Figura 13, se puede destacar al precio del alcohol etílico como la variable con mayor magnitud de efecto principal al tener la pendiente más pronunciada de las 4 variables.

Figura 13

Gráfica de efectos principales para el VAN



Por su lado, el PBP posee a la capacidad de la planta como su variable más influyente de acuerdo con las Figuras 14 y 15, esto tiene sentido al considerar que una mayor capacidad de planta representa mayores márgenes para retribuir a la deuda inicial de inversión en la puesta en marcha de la biorrefinería. Asimismo, las figuras exponen que los precios de venta del aceite de mango y de los polifenoles son apenas lo suficientemente cuantiosos para influir de forma importante. Por todo esto es que se registraron valores de PBP inversamente proporcionales de acuerdo con la capacidad de la planta, como en el escenario 3 por ejemplo.

Figura 14

Diagrama de Pareto para el PBP

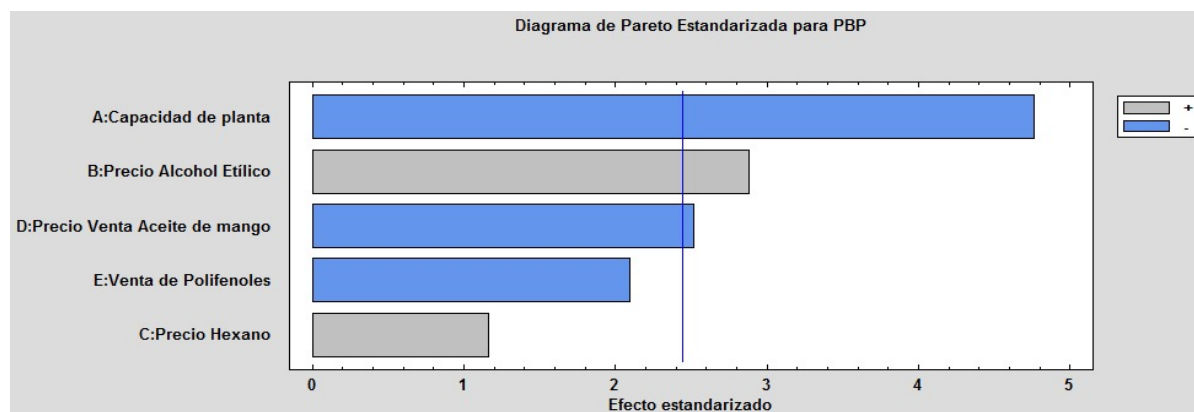
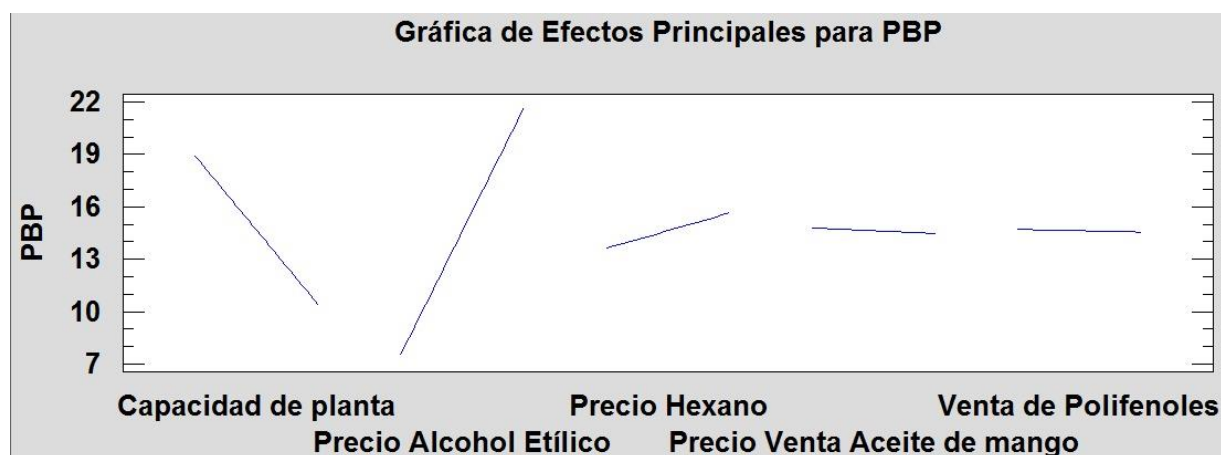


Figura 15*Tabla ANOVA del PBP*

Análisis de Varianza para PBP					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Capacidad de planta	34,9867	1	34,9867	22,68	0,0031
B:Precio Alcohol Etilico	12,7927	1	12,7927	8,29	0,0281
C:Precio Hexano	2,09168	1	2,09168	1,36	0,2885
D:Precio Venta Aceite de mango	9,73801	1	9,73801	6,31	0,0458
E:Venta de Polifenoles	6,79507	1	6,79507	4,40	0,0806
Error total	9,25718	6	1,54286		
Total (corr.)	75,6613	11			

Con base en la Figura 16, se puede mencionar que el alcohol etílico es la variable con mayor magnitud de efecto principal, así como en el caso anterior, también se destaca a la capacidad de la planta, en donde se podría asegurar que incrementando de forma considerable su valor, se tendría un PBP más tolerable. De igual forma cabe recordar que la capacidad de la planta seleccionada está vinculada con la producción de mango del área de estudio seleccionada, por lo que para aumentar la capacidad de la planta se requiere articular fuentes de producción de la almendra de mango que se encuentren por fuera del área de análisis de los 20km a la redonda.

Figura 16*Gráfica de efectos principales para el PBP*

De acuerdo con las Figuras 17 y 18, se tiene a la capacidad de planta como la única variable influyente de la TIR, esto se debe a que en los escenarios donde la TIR no se pudo calcular, estos tenían la menor capacidad de planta, a contraparte, los escenarios donde se obtuvieron los mayores valores de TIR se manejó la mayor capacidad de planta.

Figura 17

Diagrama de Pareto para la TIR

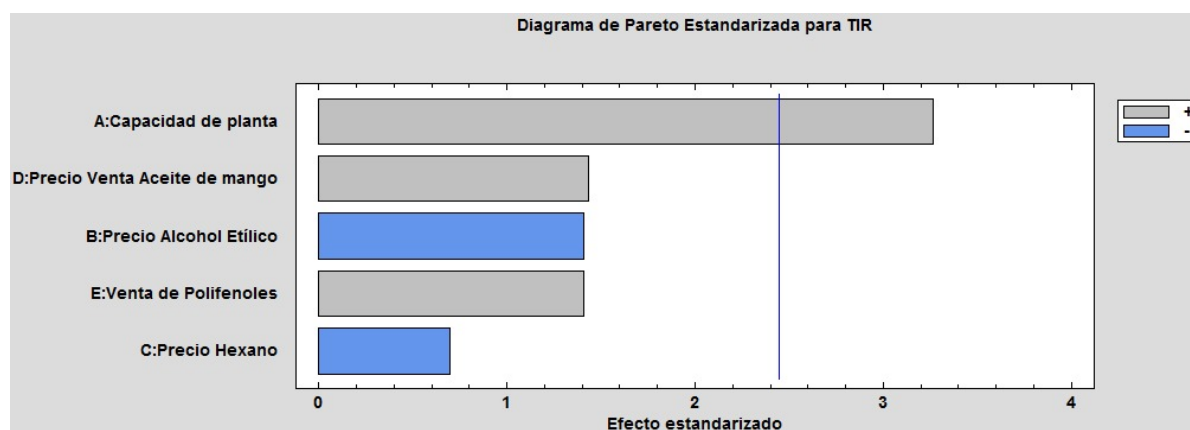


Figura 18

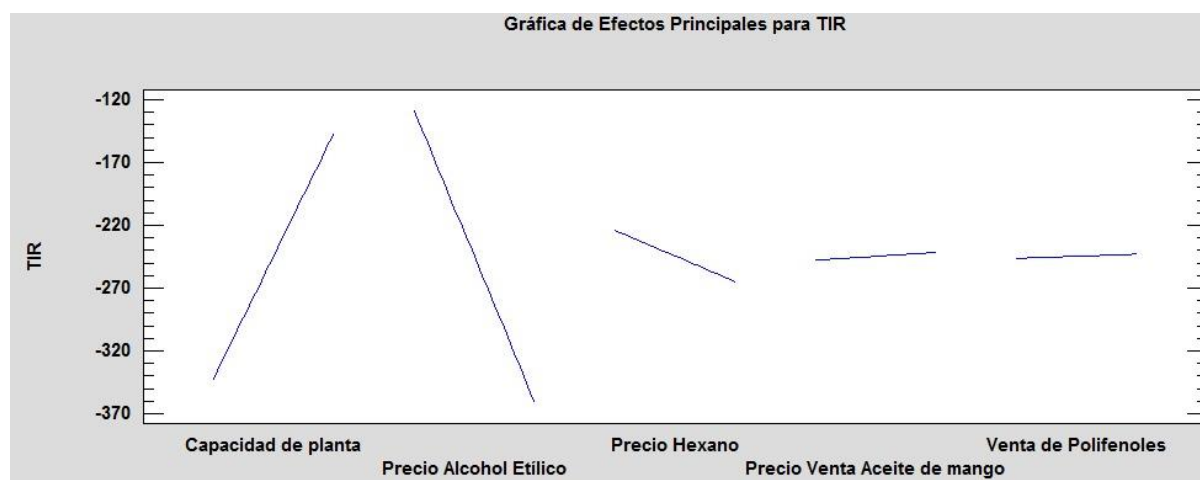
Tabla ANOVA de la TIR

Análisis de Varianza para TIR					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Capacidad de planta	18456,1	1	18456,1	10,64	0,0172
B:Precio Alcohol Etílico	3449,33	1	3449,33	1,99	0,2081
C:Precio Hexano	838,508	1	838,508	0,48	0,5128
D:Precio Venta Aceite de mango	3562,13	1	3562,13	2,05	0,2018
E:Venta de Polifenoles	3440,51	1	3440,51	1,98	0,2086
Error total	10404,7	6	1734,12		
Total (corr.)	40151,3	11			

En la Figura 19 se aprecia de mejor forma la influencia del alcohol etílico, así como la de la capacidad de la planta. Esto deja en claro que, para que este proyecto tenga un valor alto en la TIR debe manejar el mayor valor posible de la capacidad de la planta, así como el menor posible en el precio de compra de alcohol etílico.

Figura 19

Gráfica de efectos principales para la TIR



4.3. Comparación del escenario 3 vs escenario base.

En las tablas 7 y 8 se comparan los resultados del escenario base con los del mejor escenario de los 12, el cual fue el caso 3. Del escenario 3 respecto al base, se puede apreciar un incremento de la inversión del 12%, una disminución del costo de operación total del 7,4%, la cual se debe a una disminución en el valor de las materias primas como se observa en la tabla 8. También se observa un aumento importante del 44% en las ganancias totales, dado que se tuvo un aumento en la capacidad de la planta, así como un menor precio de compra del alcohol etílico, así como mayores precios de venta para el aceite de mango y los polifenoles. Todo esto se ve reflejado en aumentos sobre el margen bruto del 90% y en el retorno de la inversión del 88%. El valor del VAN es el que presenta el aumento más representativo con un 399%. La TIR aumentó un 105% y el PBP por su parte, disminuyó un 47%.

Tabla 7*Resultados de los indicadores económicos del caso base vs el escenario 3*

Parámetro	Escenario base	Escenario 3
Inversión total de capital [\$USD]	42.260.000	47.295.000
Costo de operación total [\$USD/año]	24.195.000	22.529.000
Ganancias totales anuales [\$USD/año]	33.651.000	48.482.000
Margen bruto [%]	28,10	53,53
Retorno de la inversión [%]	27,71	52,18
VAN [\$]	14.232.000	71.025.000
TIR [%]	26,12	53,53
PBP [años]	3,61	1,92
Costo energético [\$USD/año]	182.323	220.277

Tabla 8*Costo de operación anual del caso base vs el escenario 3*

Parámetro	Escenario Base [\$USD/año]	%	Escenario 3 [\$USD/año]	%
Materias Primas	14.554.000	60,15	11.736.000	52,09
Mano de obra	753.000	3,11	753.000	3,34
Mantenimiento de los activos	8.239.000	34,05	9.306.000	41,31
Aseguramiento de la calidad	113.000	0,47	113.000	0,50
Servicios auxiliares	536.000	2,22	622.000	2,76

En la Tabla 9 podemos comparar que respecto al escenario base, en el escenario 3 cada sección aumentó sus rendimientos en cada sección de producción, destacando el aumento del 47% en los ingresos por venta de aceite de mango, así como un valor del 42% mayor en los ingresos por venta de polifenoles. Por parte de la sección de generación de electricidad se tuvo un aumento de 13.305 \$USD/año, sin embargo, de acuerdo con la tabla 7, el consumo

energético también se incrementó a una tasa de 37.954 \$USD/año. Por lo que el escenario 3 es menos rentable en el consumo energético que el escenario base.

De acuerdo con los ingresos en la sección de producción de proteínas, se tiene como la de menor participación en ambos casos, el costo de los equipos empleados en esta sección es de 91.000 \$USD/año según SuperPro Designer v12,0, esto significa que en ninguno de los 2 casos la sección de producción de proteínas se representa como no rentable.

Tabla 9

Ingresos generados en cada sección de producción del caso base vs el escenario 3

Sección de producción	Escenario base [\$USD/año]	Escenario 3 [\$USD/año]
Aceite	16.992.763	25.000.045
Proteínas	278.149	345.971
Almidón	895.051	1.102.294
Polifenoles	15.159.579	21.638.577
Electricidad	79.982	93.287

Ingresos totales: El escenario 3 tiene una capacidad de planta mayor y precios de venta más altos tanto para el aceite de mango como para los polifenoles, por lo que genera mayores ingresos totales en comparación con el escenario base.

Costos: Aunque el escenario 3 tiene mayores costos de capital fijo y costos operativos netos, es importante considerar que también tiene una capacidad de planta mayor y precios de compra más bajos para el alcohol etílico, la cual es la materia prima de mayor influencia según el análisis estadístico. Estos factores podrían influir en el costo de los materiales y, en última instancia, en el costo operativo neto.

Rentabilidad: Dado que el escenario 3 tiene mayores ingresos potenciales, es posible que tenga una rentabilidad mayor que el escenario base. Sin embargo, es importante considerar

la influencia de los costos asociados y calcular el margen bruto y el retorno de la inversión específicos para cada escenario.

Tiempo de recuperación: Dado que el escenario 3 tiene una capacidad de planta mayor y precios de venta más altos, obtiene un mayor beneficio neto, y, por ende, un tiempo de recuperación más corto en comparación con el escenario base. A pesar de que el escenario 3 tiene mayores costos de capital fijo y costos operativos netos, estos son cubiertos plenamente por los ingresos generados.

En resumen, considerando las variables de entrada proporcionadas, el escenario 3 tiene el potencial de generar mayores ingresos totales debido a su mayor capacidad de planta, menor costo del alcohol etílico y precios de venta más altos para el aceite de mango y los polifenoles. Sin embargo, también tiene mayores costos asociados. Para determinar la viabilidad económica final de cada escenario, se debe realizar un análisis más detallado, considerando otros factores como los riesgos adicionales y las condiciones del mercado.

5. Conclusiones

1) Dadas las condiciones operativas actuales, se tiene un caso base y 4 escenarios favorables. Los indicadores económicos, como el VAN, la TIR y el PBP, muestran viabilidad financiera para el proyecto para los escenarios mencionados.

2) La implementación de biorrefinerías que utilicen subproductos como materia prima es una idea prometedora que se alinea con las necesidades del mercado actual y futuro. En un contexto en el que la economía circular y la valorización de los recursos son cada vez más importantes, las biorrefinerías ofrecen una solución sostenible y eficiente. Aprovechar los subproductos de otros procesos como materias primas no solo ayuda a reducir la generación de residuos, sino que también abre nuevas oportunidades de negocio y contribuye a la creación de un mercado más circular.

3) El modelamiento de biorrefinerías con SuperPro Designer v12,0 es una excelente opción ya que permitió simular una planta que cumple con los requerimientos operacionales para el procesamiento de la almendra de mango y la producción de sus diferentes subproductos, obteniendo resultados coherentes en cada una de las corrientes de salida del proceso.

6. Recomendaciones

El mercado de los aceites y los polifenoles muestra un crecimiento significativo, por lo que se recomienda evaluar la viabilidad y rentabilidad de una biorrefinería enfocada en la producción de estos dos productos.

Considerando que los resultados actuales del simulador pueden no ser del todo favorables, se recomienda no descartar completamente la idea de negocio relacionada con estos productos. En lugar de ello, es aconsejable tenerla en cuenta para futuras evaluaciones cuando el mercado ofrezca un escenario más propicio y positivo para su comercialización. Mantenerse informado sobre las tendencias del mercado y las oportunidades emergentes es crucial para tomar decisiones estratégicas en el momento oportuno.

Referencias bibliográficas

- Agronet. (2021). *Comparativo de Área, Producción, y Rendimiento Departamental por Cultivo*.
<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=3>
- Arora, A., Banerjee, J., Vijayaraghavan, R., MacFarlane, D., & Patti, A. F. (2018a). Process design and techno-economic analysis of an integrated mango processing waste biorefinery. *Industrial Crops and Products*, *116*, 24–34. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2018.02.061>
- Arora, A., Banerjee, J., Vijayaraghavan, R., MacFarlane, D., & Patti, A. F. (2018b). Process design and techno-economic analysis of an integrated mango processing waste biorefinery. *Industrial Crops and Products*, *116*, 24–34. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2018.02.061>
- Banco de la República (2022). Tasas de colocación <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/tasas-colocacion>
- Banerjee, J., Singh, R., Vijayaraghavan, R., MacFarlane, D., Patti, A. F., & Arora, A. (2018). A hydrocolloid based biorefinery approach to the valorisation of mango peel waste. *Food Hydrocolloids*, *77*, 142–151. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2017.09.029>
- Caldeira, C., Vlysidis, A., Fiore, G., De Laurentiis, V., Vignali, G., & Sala, S. (2020). Sustainability of food waste biorefinery: A review on valorisation pathways, techno-economic constraints, and environmental assessment. *Bioresource Technology*, *312*, 123575. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2020.123575>
- Campos-Ramírez Leonardo, Pérez-Sánchez Amaury, Benítez-Legrá Aylín, & Benítez Isnel. (2020, March 31). *Estudio técnico-económico de dos tecnologías de producción de biodiesel a partir de aceite de soya empleando el simulador superpro designer*.
<http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v23n48/2256-5337-teclo-23-48-117.pdf>
- Castro-Vargas, H. I., Vivas, D. B., Barbosa, J. O., Medina, S. J. M., Gutiérrez, F. A., & Parada-Alfonso, F. (2019). Bioactive Phenolic Compounds from the Agroindustrial Waste of

Colombian Mango Cultivars ‘Sugar Mango’ and ‘Tommy Atkins’—An Alternative for Their Use and Valorization. *Antioxidants* 2019, Vol. 8, Page 41, 8(2), 41. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX8020041>

Céspedes, J., & Hernández, R. (2019). *Biorrefinería: Una oportunidad energética para el desarrollo bioeconómico de La Guajira*. <https://revistas.sena.edu.co/index.php/rnt/article/view/3471>

Ciriminna, R., Chavarría-Hernández, N., Inés Rodríguez Hernández, A., & Pagliaro, M. (2015). Pectin: A new perspective from the biorefinery standpoint. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 9(4), 368–377. <https://doi.org/10.1002/BBB.1551>

DANE. (2023). *Comunicado de Prensa. Índice de Precios al Consumidor (IPC)*. <https://www.dane.gov.co>

DANE. (2015). *INSUMOS Y FACTORES ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN AGROPECUARIA*. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos31_ene_2015.pdf

Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO. (2019). *FAOSTAT*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>

Gómez, J. A., Óscar, ·, Sánchez, J., & Correa, L. F. (2020). Techno-economic and Environmental Evaluation of Cheesemaking Waste Valorization Through Process Simulation Using SuperPro Designer Statement of Novelty. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 6025–6045. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00833-4>

Gómez-Maldonado, D., Lobato-Calleros, C., Aguirre-Mandujano, E., Leyva-Mir, S. G., Robles-Yerena, L., & Vernon-Carter, E. J. (2020). Antifungal activity of mango kernel polyphenols on mango fruit infected by anthracnose. *LWT*, 126, 109337. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.109337>

- Gómez-Soto, J., Julián Sánchez-Toro, Ó., & Gerónimo Matallana-Pérez, L. (2019). *Residuos urbanos, agrícolas y pecuarios en el contexto de las biorrefinerías*. *Revista Facultad de Ingeniería (Rev. Fac. Ing, 28(53), 7–32*.
<https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n53.2019.9705>
- Gupta, A. K., Gurjar, P. S., Beer, K., Pongener, A., Ravi, S. C., Singh, S., Verma, A., Singh, A., Thakur, M., Tripathy, S., & Verma, D. K. (2022a). A review on valorization of different byproducts of mango (*Mangifera indica* L.) for functional food and human health. *Food Bioscience, 48*, 101783. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2022.101783>
- Gupta, A. K., Gurjar, P. S., Beer, K., Pongener, A., Ravi, S. C., Singh, S., Verma, A., Singh, A., Thakur, M., Tripathy, S., & Verma, D. K. (2022b). A review on valorization of different byproducts of mango (*Mangifera indica* L.) for functional food and human health. *Food Bioscience, 48*, 101783. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2022.101783>
- Ioannidou, S. M., Pateraki, C., Ladakis, D., Papapostolou, H., Tsakona, M., Vlysidis, A., Kookos, I. K., & Koutinas, A. (2020). Sustainable production of bio-based chemicals and polymers via integrated biomass refining and bioprocessing in a circular bioeconomy context. *Bioresource Technology, 307*, 123093. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2020.123093>
- Indiamart. (2022). *Precios alcohol etílico industrial*.
[https://dir.indiamart.com/search.mp?ss=Ethyl+Alcohol+industrial&cq=font&prdsr=1&stpe=attr=1|attrS&res=RC3%20Y%20https://www.indiamart.com/proddetail/hexane-industrial-solvent-%20\).&res=RC3&qu-comp=to](https://dir.indiamart.com/search.mp?ss=Ethyl+Alcohol+industrial&cq=font&prdsr=1&stpe=attr=1|attrS&res=RC3%20Y%20https://www.indiamart.com/proddetail/hexane-industrial-solvent-%20).&res=RC3&qu-comp=to)
- López, J., & Peña, S. (2020). *Desarrollo sostenible y oportunidad de aprendizaje de las biorrefinerías: Una alternativa de la biomasa*.
<https://www.redalyc.org/journal/280/28064146026/html/>

- Manhongo, T. T., Chiphango, A., Thornley, P., & Röder, M. (2021). Techno-economic and environmental evaluation of integrated mango waste biorefineries. *Journal of Cleaner Production*, 325, 129335. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129335>
- Mercado Latinoamericano de Aceites Esenciales. (2023). *Informe 2023-2028*. <https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-latinoamericano-de-aceites-esenciales>
- Ministerio de Agricultura. (2021). *CADENA DEL MANGO Indicadores e instrumentos*. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Mango/Documentos/2021-06-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- Ministerio del trabajo. (2022). *Acuerdo salario mínimo y auxilio de transporte para el 2022*. <https://www.mintrabajo.gov.co/prensa/comunicados/2021/diciembre/acuerdo-historico-en-colombia-se-fijo-en-un-millon-de-pesos-el-salario-minimo-para-el-2022-y-auxilio-de-transporte-por-117.172>
- Nature In Bottle. (2023). *Mango Kernel Oil Organic - Mangifera Indica Seed Oil*. https://www.natureinbottle.com/product/mango_kernel_oil
- Nova, C. J. M., Giraldo, L. J. L., & Cáceres-Roa, S. A. (2023). *Extracción de polifenoles: una comparación a partir de cáscara de cacao húmeda vs cáscara de cacao secada*. *Ingeniería y Competitividad*, 25(2), e-20612223. <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i2.12223>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2019). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2019 [Recurso electrónico]: progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos*. <https://www.fao.org/3/ca6030es/ca6030es.pdf>
- Perea-Moreno, A. J., Perea-Moreno, M. Á., Dorado, M. P., & Manzano-Agugliaro, F. (2018). Mango stone properties as biofuel and its potential for reducing CO2 emissions. *Journal of Cleaner Production*, 190, 53–62. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.04.147>

- Pereira da Silva, A. K., Cardoso, A., Benício de Sá Filho, E., Monteiro Cordeiro de Azeredo, H., Freire, F., Casimiro Filho, F., & Brito de Figueirêdo, M. C. (2021). Integrating life cycle assessment in early process development stage: The case of extracting starch from mango kernel. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128981. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128981>
- Sandoval, J. (2021). *Avances en Biorrefinerías de residuos agroindustriales en Colombia. Una perspectiva para América Latina*. https://www.researchgate.net/publication/354474062_Avances_en_Biorrefinerias_de_residuos_agroindustriales_en_Colombia_Una_perspectiva_para_America_Latina
- Serna-Cock, L., García-Gonzales, E., & Torres-León, C. (2016). *Agro-industrial potential of the mango peel based on its nutritional and functional properties*. *Https://Doi.Org/10.1080/87559129.2015.1094815*, 32(4), 364–376. <https://doi.org/10.1080/87559129.2015.1094815>
- Torres-León, C., Rojas, R., Contreras-Esquivel, J. C., Serna-Cock, L., Belmares-Cerda, R. E., & Aguilar, C. N. (2016). Mango seed: Functional and nutritional properties. *Trends in Food Science & Technology*, 55, 109–117. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2016.06.009>
- Trade Map. (2022). *List of exporters for the selected product in 2022 (Phenols; phenol-alcohols)*. https://www.trademap.org/Country_SelProduct.aspx?nvpm=1%7c%7c%7c%7c%7c2907%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c1

Apéndices

Apéndice A. Comprobantes de pago de la licencia de Statgraphics Centurion v19,0

El programa Statgraphics Centurion es un software que está diseñado para optimizar el análisis estadístico de un conjunto de valores. Mediante su aplicación se pueden llevar a cabo análisis descriptivos de una o varias variables, empleando gráficos y tablas que expliquen su distribución como el diagrama de Pareto, la tabla ANOVA o los gráficos de efectos principales.

Para hacer uso completo de su paquete estadístico, se efectuó la compra de su versión 19 tal como se muestra en las Figuras A1 y A2.

Figura A20

Envío de número de serie y código de registro por parte de Statgraphics

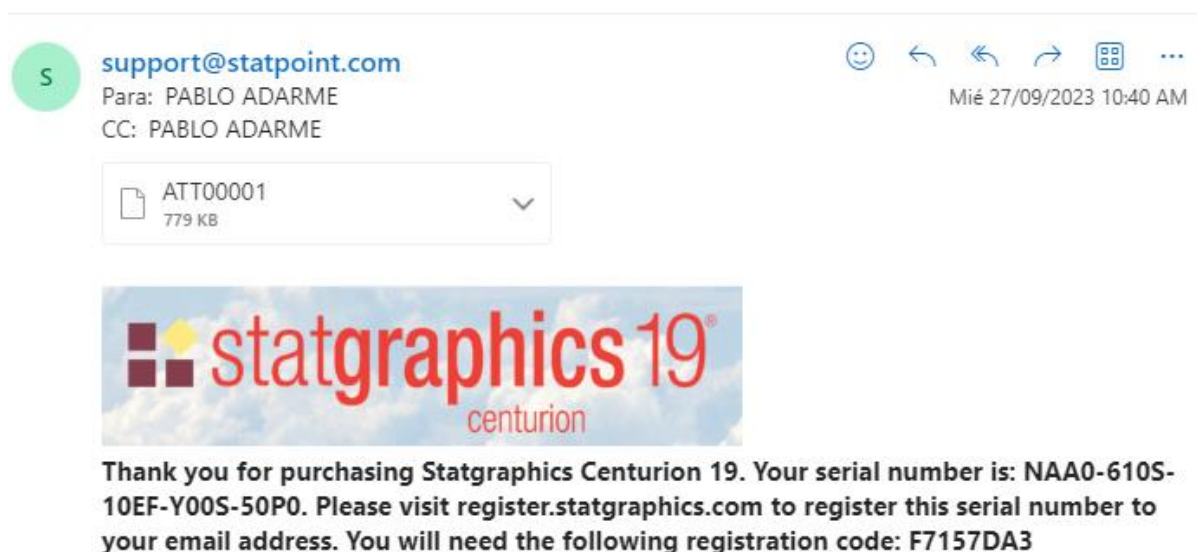


Figura A21

Confirmación de pago por parte de Statgraphics

Statgraphics Technologies Inc.



P.O. Box 134
The Plains, VA 20198

Invoice

Date	Invoice #
9/27/2023	15253

PAID
09/27/2023

Bill To	Ship To
PABLO ADARME Industrial University of Santander Colombia	

P.O. No.	Terms	Due Date	Rep	Ship	Via
	Credit Card	9/27/2023	MHT	9/27/2023	Download

Quantity	Item	Description	New Serial Number	Upgrade Serial Number	Price Each	Amount
1	6 mo	STATGRAPHICS CENTURION XIX STUDENT 6 MONTH English September 27, 2023 to March 27, 2024 PABLO ADARME pablo2181129@correo.uis.edu. co Industrial University of Santander Colombia Thank you for purchasing Statgraphics Centurion 19. Your serial number is: NAA0-610S-10EF-Y00S-50P0 . Please visit register.statgraphics.com to register this serial number to your email address. You will need the following registration code: F7157DA3 Virginia Sales Tax	NAA0-610S-10EF-Y00S-50P0		36.00	36.00
					5.30%	0.00

<p>*PLEASE NOTE: All payments received via wire must include all applicable wire fees including but not limited to those charged by the sending and receiving bank and must be paid by sender at time payment is made.</p>	Total	\$36.00
	Payments/Credits	-\$36.00
	Balance Due	\$0.00

Phone #	Fax #	E-mail	Web Site
+800-232-7828 x355	+540-428-0089	accounting@statpoint.com	www.statgraphics.com