

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE AGROINDUSTRIA



INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR, MODALIDAD PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA:

“EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONCENTRACIÓN POR EVAPORACIÓN DE SOLUCIONES DE FRUCTOSA NATURAL CON FINES DE COMERCIALIZACIÓN”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Agroindustrial

Línea de investigación: Gestión, producción, productividad, innovación y desarrollo socioeconómico.

Autor: Cristian Honorio Lanchimba Farinango

Director: Ing. Marco Vinicio Lara Fiallos, PhD.

Ibarra, 2024



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1726861253		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Lanchimba Farinango Cristian Honorio		
DIRECCIÓN:	Cayambe		
EMAIL:	chlanchimbaf@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	*****	TELF. MOVIL	0988 379 869

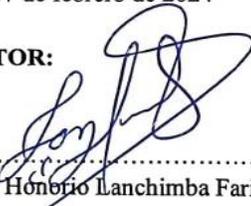
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Evaluación de los parámetros de concentración por evaporación de soluciones de fructosa natural con fines de comercialización
AUTOR:	Lanchimba Farinango Cristian Honorio
FECHA: AAAA/MM/DD	2024/02/01
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
CARRERA/PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Agroindustrial
DIRECTOR:	Ing. Marco Vinicio Lara Fiallos, PhD.

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 07 de febrero de 2024

EL AUTOR:

(Firma) 
Cristian Honorio Lanchimba Farinango

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTERGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 01 de febrero de 2024

Ing. Marco Vinicio Lara Fiallos, PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

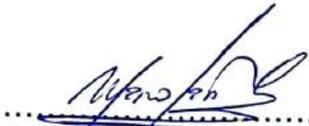
CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

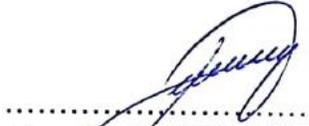

.....
Ing. Marco Vinicio Lara Fiallos, PhD.
C.C.:1717227761

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONCENTRACIÓN POR EVAPORACIÓN DE SOLUCIONES DE FRUCTOSA NATURAL CON FINES DE COMERCIALIZACIÓN” elaborado por Lanchimba Farinango Cristian Honorio, previo a la obtención del título del Ingeniero Agroindustrial, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:



.....
Ing. Marco V. Lara Fiallos, PhD.
C.C.: 1717227761



.....
Ing. Jimmy Núñez Pérez, MSc.
C.C.: 1756606339

DEDICATORIA

A Dios, fuente de mi fe y fortaleza, en quien encuentro fuerza, dirección e inspiración en cada paso de mi camino.

A mi madre Mercedes, por su amor incondicional, dedicación incansable y renuncias que han permitido moldear la persona que soy hoy. Su constante presencia, apoyo moral y aliento han sido fundamentales para alcanzar con éxito esta etapa de mi vida.

A mi hermano Kléver, por su absoluto apoyo, por compartir momentos de seriedad y risas, quien ha sabido estar en el momento adecuado.

A mi familia y amigos, quienes nunca dejaron de creer en mí y me brindaron su generosidad en todo momento.

Cris

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme alcanzar esta meta, brindarme seguridad y ser mi fortaleza en cada etapa de mi vida.

A mi madre Mercedes, por su amor y paciencia, ya que ha sido fundamental en el logro de esta meta.

A mi director PhD. Marco Lara, cuya valiosa guía, enseñanzas y paciencia han sido fundamentales durante todo el desarrollo de esta investigación. Su compromiso y apoyo han sido invaluable para alcanzar este objetivo. A mi asesor MSc. Jimmy Nuñez, su contribución ha sido de gran importancia para el éxito de este trabajo. Un profundo agradecimiento a todos los docentes.

A mis compañeros, amigos y familia con quienes compartí momentos de alegría durante esta etapa. Su cariño y apoyo incondicional han sido de gran valor para mí.

CLF

RESUMEN EJECUTIVO

La fructosa es un monosacárido considerado como un azúcar simple que es aproximadamente 1.2 veces más dulce que la sacarosa. El consumo moderado de este carbohidrato proporciona una fuente de energía rápida para el cuerpo debido a que se descompone y se absorbe rápidamente en comparación con otros azúcares más complejos. En este trabajo se evaluó los parámetros que intervienen en la evaporación de soluciones de fructosa con una concentración inicial de 1.2 °Bx aplicando la metodología de superficie respuesta en un diseño central compuesto (DCC), en el que se evaluaron las diferentes relaciones entre la presión de vacío (0.2 a 0.6 bar) y el flujo de alimentación (8 a 12 L/h) del evaporador de película ascendente (Armfield - FT22-A), simultáneamente, se mantuvo constante la alimentación de vapor a 1 bar la presión. El mejor tratamiento fue con una relación de 0.6 bar y 8 L/h, bajo esta condición se obtuvo 9.2 °Bx en la solución final de acuerdo con la lectura del refractómetro ABBE WYA-2S. El tiempo de residencia en el equipo fue de 31 minutos con 51 segundos. El ANOVA indica que la presión de vacío y el flujo son significativos, debido a esto se acepta la hipótesis alternativa, es decir, es posible obtener jarabe de fructosa de grado comercial a partir de soluciones de inulina hidrolizada en el evaporador de película ascendente. Se optimizó el proceso y se replicó a partir de una solución inicial con 9.2 °Bx y se alcanza 45 °Bx, el cual tuvo un costo de \$ 7.99 para 0.521 kg de jarabe de fructosa. Los resultados sugieren ingresar la solución final concentrada a la torre secadora spray para la obtención de fructosa en polvo.

Palabras clave: jarabe de fructosa, evaporador de película ascendente, diseño central compuesto.

ABSTRACT

Fructose is a monosaccharide considered a simple sugar that is approximately 1.2 times sweeter than sucrose. Moderate consumption of this carbohydrate provides a quick source of energy for the body because it is rapidly broken down and absorbed compared to other more complex sugars. In this work we evaluated the parameters involved in the evaporation of fructose solutions with an initial concentration of 1.2 °Bx applying the response surface methodology in a central composite design (CCD), in which different ratios between vacuum pressure (0.2 to 0.6 bar) and feed flow (8 to 12 L/h) of the rising film evaporator (Armfield - FT22-A) were evaluated, simultaneously, the steam feed was kept constant at 1 bar pressure. The best treatment was with a ratio of 0.6 bar and 8 L/h, under this condition 9.2 °Bx was obtained in the final solution according to the reading of the ABBE WYA-2S refractometer. The residence time in the equipment was 31 minutes and 51 seconds. The ANOVA indicates that vacuum pressure and flow rate are significant, due to this the alternative hypothesis is accepted, i.e., it is possible to obtain commercial grade fructose syrup from hydrolyzed inulin solutions in the rising film evaporator. The process was optimized and replicated from an initial solution with 9.2 °Bx and reaches 45 °Bx, which had a cost of \$7.99 for 0.521 kg of fructose syrup. The results suggest entering the final concentrated solution to the spray dryer tower to obtain fructose powder.

Keywords: fructose syrup, rising film evaporator, central composite design.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO.....	17
1.1 Evaporación	17
1.2 Evaporador	17
1.3 Componentes Básicos de un Evaporador.....	17
1.3.1 Intercambiador de Calor	17
1.3.2 Separador de Corrientes	18
1.3.3 Bomba de Vacío	18
1.4 Tipos de Evaporadores.....	19
1.5 Evaporador de Película Ascendente.....	19
1.5.1 Operación del Evaporador de Película Ascendente FT22.....	20
1.5.2 Especificaciones del Evaporador de Película Ascendente Armfield - FT22-A	22
1.5.3 Aplicaciones de Evaporadores de Película	23
1.6 Jarabe de Fructosa.....	24
1.6.1 Jarabes de Alta Fructosa al 42%	25
1.6.2 Jarabes de Alta Fructosa al 55%	26
1.6.3 Aplicaciones del Jarabe de Fructosa	26
1.7 Método (AOAC 997.08) Determinación de Fructanos en Productos Alimenticios.....	27

CAPÍTULO II

2	MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
2.1	Caracterización del Área de Estudio.....	28
2.2	Materiales y Equipos.....	28
2.2.1	Instrumentos.....	29
2.2.2	Equipos	29
2.2.3	Reactivos e Insumos	29
2.3	Métodos.....	30
2.3.1	Estandarización de diferentes soluciones de fructosa a partir de un blanco comercial para el ingreso al evaporador de película ascendente	30
2.3.2	Análisis de variables que intervienen en la concentración de jarabe de fructosa .	32
2.3.3	Estimación económica del proceso diseñado a diferentes escalas.....	36

CAPÍTULO III

3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
3.1	Estandarización de soluciones de fructosa a partir de un blanco comercial para el ingreso al evaporador de película ascendente.....	37
3.2	Análisis de variables que intervienen en la concentración de jarabe de fructosa	39
3.2.1	Propiedades del Fluido.....	41
3.2.2	Análisis de varianza del tiempo	42
3.2.3	Análisis de varianza de solidos solubles.....	45

3.2.4	Optimización Numérica y Gráfica de las Variables de Concentración.....	48
3.2.5	Comportamiento del Jarabe de Fructosa.....	50
3.3	Estimación Económica del Proceso Diseñado.....	51
3.3.1	Costos Directos.....	51
3.3.2	Costos Indirectos.....	52
3.3.3	Costo Total de Producción.....	52
 CAPÍTULO IV		
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
4.1	CONCLUSIONES.....	54
4.2	RECOMENDACIONES.....	55
5	BIBLIOGRAFÍA.....	56
6	ANEXOS.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Especificaciones técnicas del evaporador</i>	23
Tabla 2 <i>Productos que requieren evaporación para su fabricación</i>	23
Tabla 3 <i>Dulzura del jarabe de maíz con respecto a la sacarosa</i>	27
Tabla 4 <i>Detalles sobre la ubicación y condiciones meteorológicas del lugar experimental</i>	28
Tabla 5 <i>Puntos para la curva patrón de fructosa</i>	31
Tabla 6 <i>Factor A Presión de vacío (bar)</i>	32
Tabla 7 <i>Factor B Caudal (L/h)</i>	33
Tabla 8 <i>Descripción de tratamientos para la obtención de jarabe de fructosa</i>	33
Tabla 9 <i>Costos de operación de equipos</i>	36
Tabla 10 <i>Viscosidad dinámica de la solución con respecto al agua</i>	39
Tabla 11 <i>Resultados del diseño de superficie respuesta</i>	40
Tabla 12 <i>Propiedades del sirope de fructosa con 9.2 °Bx</i>	41
Tabla 13 <i>ANOVA para el tiempo</i>	42
Tabla 14 <i>Análisis de varianza ANOVA para el modelo lineal</i>	43
Tabla 15 <i>ANOVA para los sólidos solubles</i>	45
Tabla 16 <i>ANOVA para el modelo cuadrático</i>	46
Tabla 17 <i>Propiedades reológicas de la optimización</i>	50
Tabla 18 <i>Costos directos en la concentración de fructosa</i>	52
Tabla 19 <i>Costos indirectos en la concentración de fructosa</i>	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Principales componentes de los evaporadores de recompresión de vapor</i>	18
Figura 2 <i>Clasificación de evaporadores</i>	19
Figura 3 <i>Evaporador de película ascendente</i>	20
Figura 4 <i>Diagrama del evaporador de película ascendente</i>	22
Figura 5 <i>Composición del jarabe de fructosa</i>	25
Figura 6 <i>Equipo F1-30 para la determinación de densidad y viscosidad</i>	32
Figura 7 <i>Procedimiento para la lectura de absorbancia de los resultados</i>	34
Figura 8 <i>Diagrama del proceso</i>	35
Figura 9 <i>Lectura de °Bx de la solución</i>	37
Figura 10 <i>Curva patrón de fructosa</i>	38
Figura 11 <i>Valores predichos vs reales para el tiempo</i>	44
Figura 12 <i>Grafica de distribución normal de los residuos</i>	44
Figura 13 <i>Valores predichos vs reales para los sólidos solubles</i>	47
Figura 14 <i>Grafica de distribución normal de los residuos para los SS</i>	47
Figura 15 <i>Análisis de superficie de respuesta relacionado con la concentración</i>	48
Figura 16 <i>Optimización gráfica de los parámetros</i>	49
Figura 17 <i>Curva de concentración de la solución de fructosa</i>	50
Figura 18 <i>Comportamiento de las propiedades reológicas en función de °Bx</i>	51
Figura 19. <i>Estandarización de solución de fructosa</i>	68
Figura 20. <i>Elaboración curva patrón de fructosa</i>	68
Figura 21. <i>Concentración de sirope de fructosa</i>	69
Figura 22. <i>Cuantificación jarabe de fructosa concentrado</i>	70
Figura 23. <i>Lectura °Bx de jarabe de fructosa</i>	70

Problema de investigación.

La mayor parte de producción de fructosa utilizada por la industria de alimentos a nivel mundial se consigue a través de la conversión enzimática del almidón de maíz (Quesada & Hernández, 2012). No obstante, según (Lara et al., 2021), es posible obtener este edulcorante a partir de fuentes no habituales de almidón como a partir de residuos orgánicos agroindustriales, sin embargo, existe la ausencia de mecanismos que concentre fructuosa a nivel industrial.

En el Ecuador se han realizado números estudios con el fin de obtener jarabe concentrado en fructosa a partir de desechos orgánicos. Investigaciones realizadas por (Chiluisa, 2015), manifiesta que se concentra glucosa y fructosa como efecto de la hidrólisis enzimática, pero de manera artesanal a partir de residuos de plátano maduro, si embargo, no se evalúa los parámetros que intervienen en la evaporación que simule una industrialización de esta operación que permita obtener un producto comercial.

La fructosa es un carbohidrato que se encuentra en una gran variedad de frutas, verduras e incluso en los residuos de estas, una vez que hayan sido procesadas. Este monosacárido tiene importantes aplicaciones en la industria alimentaria, sin embargo, actualmente solo unas pocas plantas se utilizan como fuente de obtención de fructosa (Sosa & Delgado, 2016). En la provincia de Imbabura se han realizado diversos estudios para la obtención de sirope de fructuosa como se menciona en (Lara Fiallos et al., 2021) sin embargo, no se ha estudiado los parámetros de concentración de este edulcorante con fines comerciales.

Justificación

La fructosa es posiblemente el tipo de azúcar más influyente en la actualidad y es un 40% más dulce que la sacarosa. Al menos 40.000 especies de plantas almacenan fructanos en hojas, raíces, tubérculos o bulbos. El principal beneficio es que la síntesis de fructanos puede tener lugar a temperaturas menores a de los 12°C, donde el metabolismo del almidón se inhibe gravemente (Olvera et al., 2007). Debido al potencial económico que representa la fructuosa, el presente trabajo estará enfocado a la valoración de los diferentes parámetros de operación del evaporador de película ascendente en la obtención de fructosa concentrada, con el ánimo de conseguir un producto con estándares de comercialización.

En la actualidad, se utiliza el jarabe de fructosa en la elaboración de: bebidas gaseosas, energizantes deportivos, mermeladas, confitería, incluso en productos de panadería; como sustituto de la sacarosa debido al poder edulcorante y su solubilidad, lo que permite que este elemento pueda incorporarse fácilmente a los productos (Alonso, 2010), por ello la importancia de realizar un estudio acerca de los parámetros favorables de concentración, ya que esto permitirá a posterior desarrollar estudios de factibilidad, viabilidad de una planta industrial.

Según (SNAE, 2015), la fructosa y los jarabes de fructosa tienen una sobretasa arancelaria del 5%. En la agroindustria, una gran diversidad de productos elaborados requiere de fructosa como jarabe o cristalizada, es así como, la obtención de este monosacárido concentrado plantea una alternativa en la industria alimentaria, además, el estudio aportará con información a la comunidad científica para la industrialización de este producto.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar los parámetros de concentración por evaporación de soluciones de fructosa natural con estándares de comercialización.

Objetivos Específicos

- Estandarizar soluciones de fructosa para el ingreso al evaporador de película ascendente.
- Analizar las variables (presión y caudal de operación) que intervienen en la concentración de jarabe de fructosa.
- Realizar una estimación económica del proceso diseñado.

Hipótesis o preguntas de investigación.

Alternativa

Ha: Es posible obtener jarabe de fructosa de grado comercial a partir de soluciones de inulina hidrolizada en el evaporador de película ascendente.

Nula

Ho: No es posible obtener jarabe de fructosa de grado comercial a partir de soluciones de inulina hidrolizada en el evaporador de película ascendente.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Evaporación

La evaporación es un proceso fundamental que tiene como objetivo concentrar un producto y preservar la durabilidad del mismo. Dentro de la industria alimentaria dicho procedimiento se lleva a cabo eliminando cierta cantidad de agua o solvente de la solución en diferentes equipos. (Ortolá Ortolá et al., 2018).

1.2 Evaporador

El evaporador es un equipo que facilita el intercambio de calor entre el vapor de agua u otro fluido, y un líquido con menor temperatura. Durante el proceso, el fluido gaseoso se enfría y condensa, mientras que el líquido se calienta. El nombre "evaporador" proviene del cambio de estado que ocurre en el líquido, ya que una parte de este se evapora al recibir el calor del otro fluido (Sokolowski, 2016).

1.3 Componentes Básicos de un Evaporador

De manera general, los evaporadores industriales están compuestos por los siguientes elementos fundamentales:

1.3.1 Intercambiador de Calor

Contribuye al proceso de disolución suministrando tanto el calor sensible necesario para llegar a la temperatura de ebullición como el calor latente de vaporización. La superficie de intercambio térmico puede tener una disposición plana, como en el caso de un intercambiador de calor de

placas, o tubular. Aunque la disposición tubular es común, la configuración más prevalente es la de tubos múltiples.

1.3.2 Separador de Corrientes

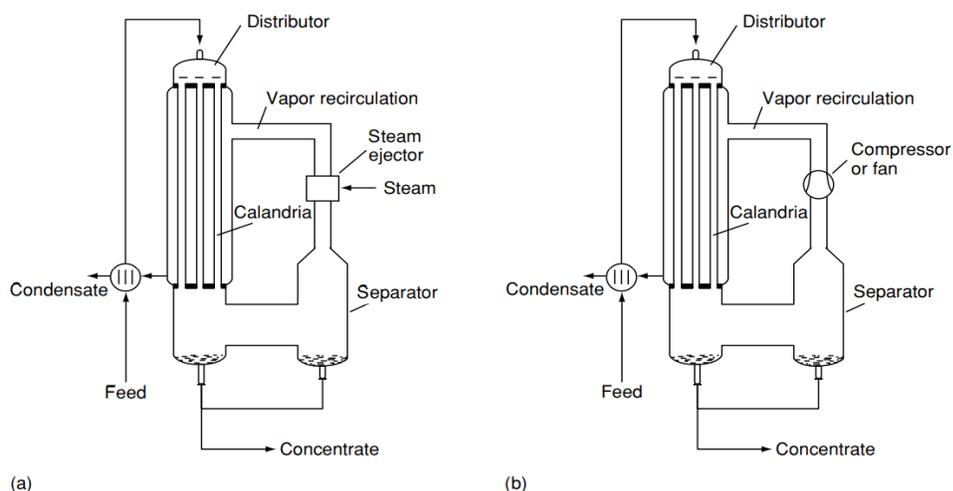
En esta etapa, es donde tiene lugar la separación entre el vapor de disolvente generado y la fase líquida.

1.3.3 Bomba de Vacío

La bomba de vacío aplica presión reducida al separador; en consecuencia, el punto de ebullición del disolvente presente en la solución variará según el nivel de presión. Por ende, es esencial diferenciar entre un evaporador abierto que opera en condición de presión ambiental y un evaporador cerrado que trabaja con presión inferior a la atmosférica. Este último se recomienda para el uso porque los alimentos están expuestos a temperaturas más bajas, por lo que se mantienen las propiedades organolépticas en el producto final.

Figura 1

Principales componentes de los evaporadores de recompresión de vapor



(a) Evaporador de recompresión térmica y (b) Evaporador de recompresión mecánica

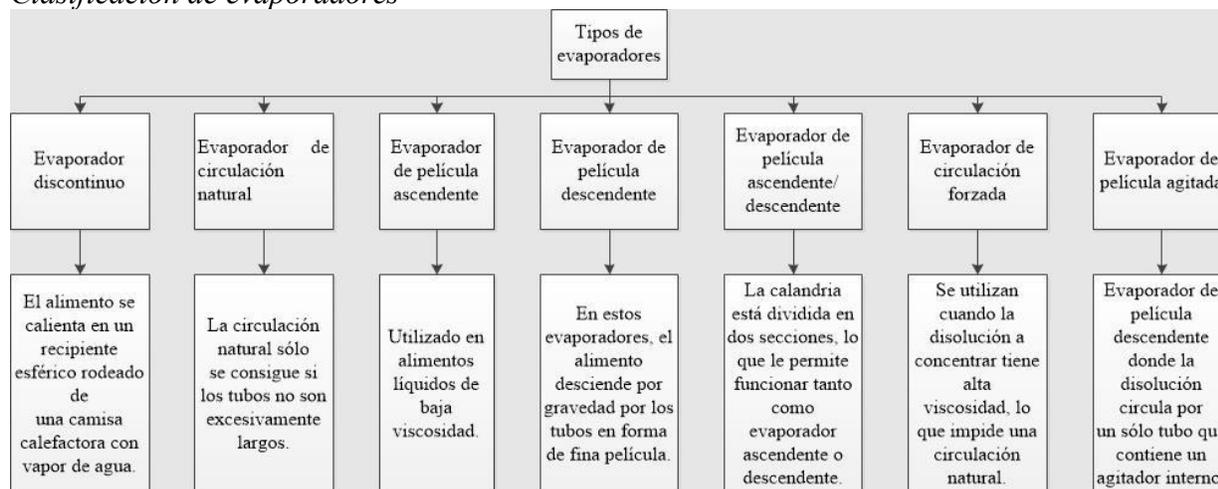
Tomado de: (Ferguson, 2003).

1.4 Tipos de Evaporadores

Existe una gran variedad de evaporadores que se utiliza en la industria a alimentaria que se caracterizan según la forma en la que circula la fase líquida, la figura 2 ilustra los predominantes.

Figura 2

Clasificación de evaporadores

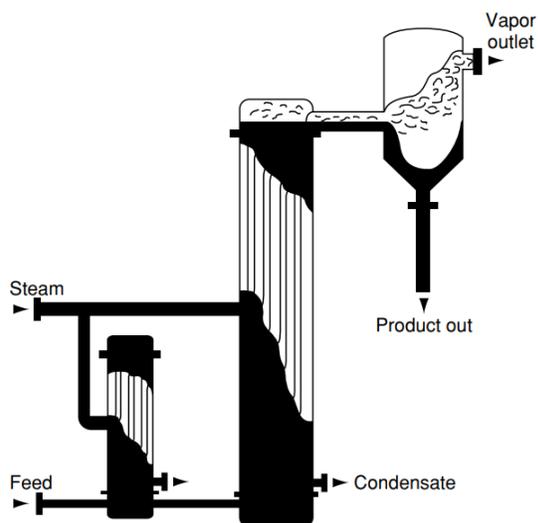


Tomado de: (Capuñay, 2019).

1.5 Evaporador de Película Ascendente

Se trata de un diseño clásico de evaporador de tubo vertical, en el que el líquido a evaporar se introduce por la parte inferior (figura 3), con una temperatura menor a su punto de ebullición. A medida que el vapor envuelve el exterior del tubo, el líquido aumenta su temperatura y disminuye su densidad, esto provoca el ascenso. A lo largo del ascenso por el tubo, alcanza la temperatura de ebullición y aparecen pequeñas burbujas de vapor en el líquido. Esto provoca un mayor descenso de la densidad total, haciendo que la mezcla líquido-vapor suba aún más, y a medida que el líquido sigue acumulando calor, se produce más vapor y se forman más burbujas, hasta que el volumen de vapor es mayor que el de líquido. Finalmente, en la parte superior, sólo hay vapor y líquido (Ferguson, 2003).

Figura 3
Evaporador de película ascendente



Tomado de: (Ferguson, 2003).

1.5.1 Operación del Evaporador de Película Ascendente FT22

Todas las menciones hacen referencia a la figura 4 en el que se indica el diagrama del equipo. Antes de operar el equipo es necesario contar con un banco de agua fría y un caldero para el vapor de agua. Para la puesta en servicio se debe asegurar que todas las válvulas están cerradas, seguido abrir las válvulas (V1), (V8) y (V13). Llenar el depósito de alimentación (1) (tapa retirada) con agua fría hasta unos 50 mm de la parte superior, luego abrir la válvula (V12) para que el condensador reciba un caudal de agua de refrigeración de unos 6 litros/min que se indica en el caudalímetro (F2).

Posteriormente, encender la bomba de vacío de la consola. Para ello, el interruptor RCCB y el interruptor POWER ON de la consola. A continuación, se debe asegurar que la válvula del control de vacío (11) esté cerrada y prestar atención al movimiento del indicador del vacuómetro. El

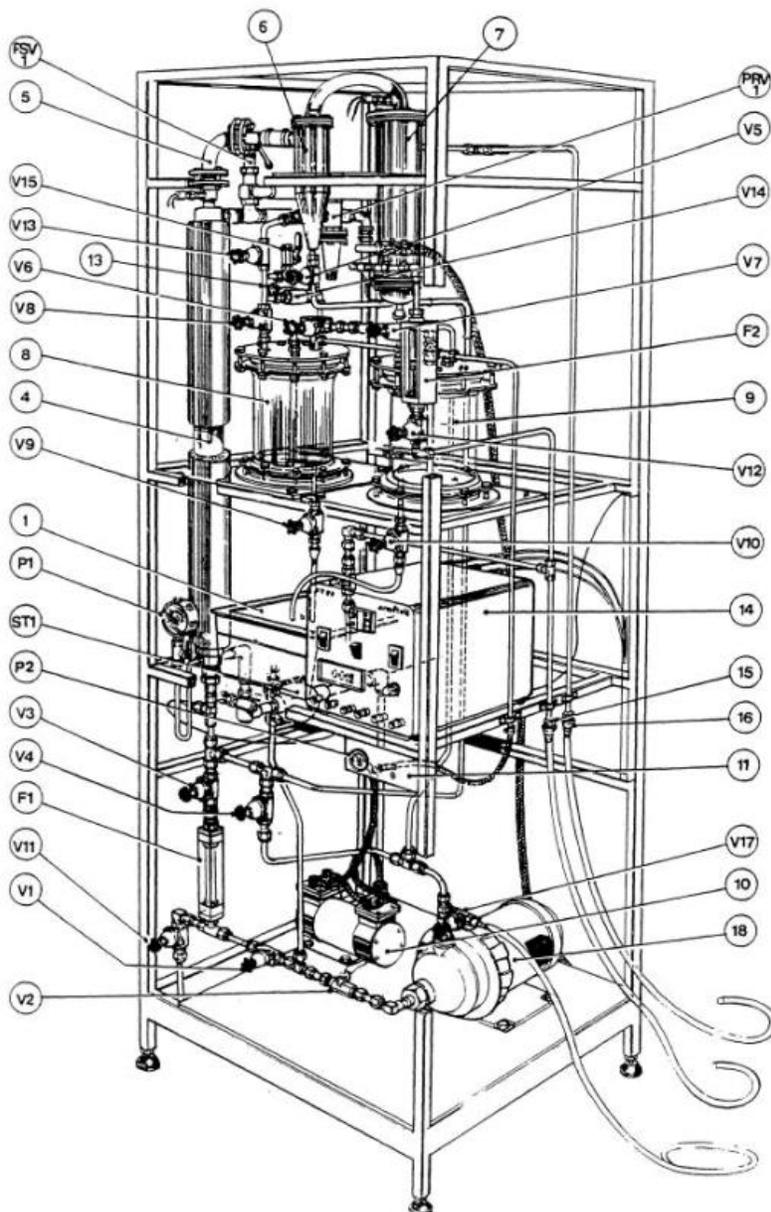
vacuómetro debe alcanzar un vacío de al menos 0,76 Bar (22,5 ins Hg), luego abrir lentamente la válvula (V3). El agua comenzará a fluir a través del caudalímetro (F1) y entrará en el evaporador.

Seguidamente ajustar el caudal en (F1) para que indique 10 litros/hora. El agua hervirá en el tubo del evaporador y el vapor ascenderá por el tubo y pasará a través del codo (5) al separador ciclónico y luego al condensador donde se condensará. Comprobar que se indican las temperaturas adecuadas en la lectura de la consola para las seis posiciones del selector, se debe considerar que a 0,76 Bar (22,5 ins Hg), la temperatura de cambio de fase del agua es de 65°C.

se debe tomar en cuenta que el punto de ebullición del agua a 0,76 Bar (22,5 ins Hg) es de 65°C.

Para comprobar el sistema de muestreo se debe cerrar (V8), esperar, cerrar (V13), abrir (V15). Colocar un recipiente adecuado bajo la salida de (V14) y recoger la muestra, luego cerrar (V14), (V15) y después abrir (V13) y (V8). Cerrar la fuente de vapor, detener el funcionamiento de la bomba de vacío y permitir la entrada de aire al abrir la válvula de vacío. Cerrar la válvula (V1), abrir las válvulas (V2), (V9) y (V10) y encender la bomba de limpieza in situ de la consola, posteriormente abrir lentamente (V4) un poco, el agua pasará por el tubo del evaporador, rebosará por el codo de cristal (5), entrará en el ciclón separador. Abrir (V9) y (V10) y el agua drenará desde los dos recipientes de vidrio de vuelta al depósito de alimentación. Seguidamente abrir con prudencia las válvulas (V6) y (V7) y observar que el agua ingresa en las bolas de pulverización. Finalmente, desconectar la bomba de limpieza in situ (Armfield, 2015).

Figura 4
Diagrama del evaporador de película ascendente



1.5.2 Especificaciones del Evaporador de Película Ascendente Armfield - FT22-A

En la tabla 1 se indican los detalles y condiciones técnicos del equipo Armfield - FT22-A, se especifica características como dimensiones, capacidades, tolerancias, rangos de temperatura y presión, entre otros aspectos.

Tabla 1*Especificaciones técnicas del evaporador*

Especificación	Descripción
Distancia del tubo evaporador	1,36 m
Superficie de transmisión térmica	0,08 m ²
Capacidad máx. de evaporación	10 L/h
Agotamiento máx. de vapor	15 kg/h
Nivel máx. de presión de vapor	1,7 bar
Superficie del condensador	0,17 m ²
Capacidad tanque de alimentación	0,17 m ²
Volumen de recogida de concentrado	5 L
Volumen de recogida de condensado	5 L
Bomba CIP	8 lpm a 6 m H ₂ O
Nivel de vacío del sistema	225mm Hg abs
Alimentación de corriente monofásica	220V, 50Hz, 3 kW
Sistema de enfriamiento	10 L/min de agua de red
Vapor	25 kg/hora a 2 bar

Tomado de: (Armfield, 2015)

1.5.3 Aplicaciones de Evaporadores de Película

Los evaporadores de película se utilizan en las industrias alimentaria, química, farmacéutica, biotecnológica. La tabla 2 exhibe una amplia gama de productos cuya elaboración implica el proceso de evaporación.

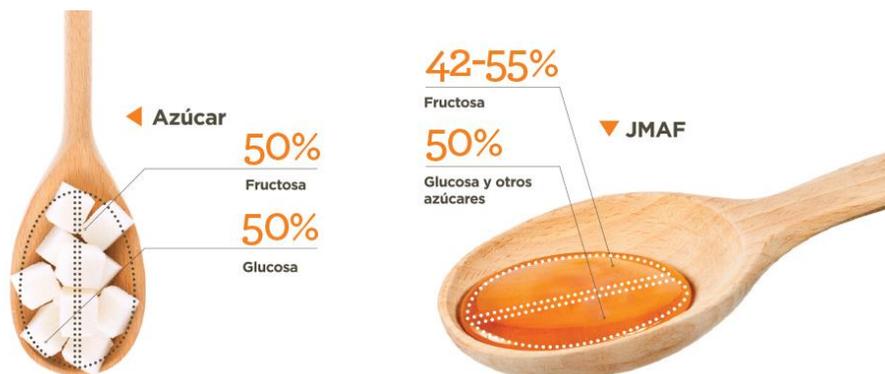
Tabla 2*Productos que requieren evaporación para su fabricación*

Productos lácteos	Zumos de fruta	Productos alimentarios	Otros líquidos biológicos
Alimentos infantiles	Manzana	Levadura de cerveza	Aminoácidos
Suero de mantequilla	Albaricoque	Extracto de castaña	Formiato de calcio
Leche enriquecida con grasa	Grosella negra	Mosto lupulado	Glutamato monosódico
Mezcla para helado	Pomelo	Dextrosa	Ácido fórmico
Leche reconstituida	Naranja	Azúcar invertido	Ácido glucónico
Leche desnatada	Limón	Ácido láctico	Proteína hidrolizada
Suero de leche	Mandarina	Salsa de soja	Jarabe de maíz

1.6 Jarabe de Fructosa

El jarabe de maíz de alta fructosa (JMAF) constituye un edulcorante derivado del almidón de maíz, fabricado a gran escala en la industria mediante el proceso de isomerización de glucosa a fructosa. Esta transformación se realiza mediante el uso de enzimas inmovilizadas. El JMAF ha ganado una amplia aceptación en la industria alimentaria y de bebidas como una alternativa líquida al azúcar común (sacarosa) como edulcorante (Souzanchi et al., 2023). (Rubio et al., 2011) mencionan que en el mercado, el jarabe de maíz alto en fructosa se categoriza según el contenido de fructosa en la mezcla, representado en la figura 5, con opciones que incluyen el 42%, 55% o 90%.

Figura 5
Composición del jarabe de fructosa



Tomado de: (COMYCE & Clinicas, 2023)

1.6.1 Jarabes de Alta Fructosa al 42%

La secuencia inicia con la licuefacción del almidón a elevadas temperaturas mediante la acción de una enzima α -amilasa, dando como resultado equivalente de dextrosa. Posteriormente, en una segunda fase, se convierte hasta un 94-96% del almidón mediante la glucoamilasa. El producto resultante en esta etapa se somete a un proceso de refinamiento y filtrado que incorpora el uso de carbono y un tratamiento de intercambio iónico.

El hidrolizado de dextrosa refinado experimenta una reacción con una glucosa isomerasa, donde aproximadamente un 45% de la glucosa se transforma en fructosa. Posteriormente, el jarabe se somete a un segundo proceso de refinamiento mediante el uso de carbono y a otra fase de tratamiento de intercambio iónico. Después de estas etapas, se procede a llevar a cabo un proceso de evaporación para obtener el jarabe de maíz de alta fructosa (JMAF) comercial, con un contenido de fructosa del 42%.

1.6.2 Jarabes de Alta Fructosa al 55%

El jarabe, obtenido con una concentración del 42%, es dirigido a la unidad de fraccionamiento, donde la fructosa es retenida por los sitios del calcio, mientras que la glucosa y otros hidratos de carbono de elevado volumen atraviesan la unidad. Los demás glúcidos como la dextrosa recirculan para ser utilizados en la obtención al 42% de jarabe. Se hidrata la unidad de fraccionamiento para liberar la fructosa, resultando en un jarabe generalmente con un contenido de fructosa del 80-95%. Posteriormente, este jarabe es refinado y se mezcla con una parte del HFCS (High Fructose Corn Syrup) al 42%, con el fin de obtener un producto final con una concentración del 55% (Rubio et al., 2011).

1.6.3 Aplicaciones del Jarabe de Fructosa

Los diversos siropes de fructosa son utilizados en la industria alimentaria para fabricar una variedad de productos., tales como bebidas sin gas y carbonatadas, en la panificación para la elaboración de: panqués, galletas, pan de caja, entre otros; para la fabricación de néctares, mermeladas, bebidas saborizadas, helados y entre otros productos alimenticios. La diversidad del uso se le atribuye a la dulzura en comparación con otros azúcares como se indica en la tabla 3.

No obstante,(Souzanchi et al., 2023) estudiaron la producción de 5-HMF a partir de jarabes de maíz de distintas concentraciones. Una opción en la fabricación furanoato de polietileno (PEF), que representa una opción completamente renovable y sostenible es utilizar 5-HMF como materia prima

Tabla 3*Dulzura del jarabe de maíz con respecto a la sacarosa*

Endulzante	Índice de dulzor en comparación con la sacarosa
Sacarosa	1.0
Fructosa cristalina	1.2 – 1.8
JMAF (HFCS) 90%	1.2 – 1.6
JMAF (HFCS) 55%	1.0 +
JMAF (HFCS) 42%	1.0
Glucosa	0.7

Tomado de: (Rubio et al., 2011).

1.7 Método (AOAC 997.08) Determinación de Fructanos en Productos Alimenticios

El procedimiento es adecuado para identificar fructanos, es decir, todos los carbohidratos, polisacáridos y oligosacáridos compuestos exclusivamente por unidades de fructosa presentes en un producto o alimento. La técnica AOAC 997.08 integra procesos como: sustracción, conversión a través de un catalizador y posteriormente por medio de cromatografía encontrar los tipos de azúcares libres.

Se toma una muestra para el análisis cromatográfico de los hidratos de carbono. Mediante procedimientos matemáticos, se identifica el volumen al inicio de fructosa libre y sacarosa. Así mismo, la glucosa y fructosa es determinada por la cromatografía. (Massón, 2016).

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Caracterización del Área de Estudio

La parte experimental del presente trabajo se desarrolló en la ciudad de Ibarra, en los distintos laboratorios que tiene a disposición la Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales (FICAYA) de la Universidad Técnica del Norte, en la tabla 4 se especifica la ubicación del experimento y los laboratorios.

Tabla 4

Detalles sobre la ubicación y condiciones meteorológicas del lugar experimental

Condiciones climatológicas	Laboratorio de Bioprocesos, Análisis Físicoquímicos
Altitud	2250 m.s.n.m
Media de humedad ambiental	73%
Promedio térmico	17.7 °C
Precipitación	541.6 mm
Latitud	00°19'47" Sur
Longitud	78°07'56" Oeste

Nota. Obtenido de IMAMHI (2020).

2.2 Materiales y Equipos

La ejecución de esta investigación implicó el uso de diversos materiales, instrumentos, equipos e insumos, los cuales fueron empleados en los distintos procesos ejecutados para alcanzar los objetivos establecidos.

2.2.1 Instrumentos

- Micropipeta (Vol. 100-1000 μ l); (Ap.= \pm 0.5 μ l)
- Vasos de precipitación (Vol. 500ml); (Ap.= \pm 100ml)
- Probeta (Vol. 50ml); (Ap.= \pm 1ml)
- Erlenmeyer (Vol. 500ml); (Ap.= \pm 50ml)
- Pipeta (Vol. 5ml); (Ap.= \pm 0.05ml)
- Tubos de ensayo (Vol. 20ml); (Ap.= no calibrado)
- Frascos de vidrio (Vol. 500ml); (Ap.= \pm 50ml)
- Celdas para espectrofotómetro

2.2.2 Equipos

- Balanza analítica (Ap.= \pm 0.01g)
- Termómetro de mercurio (Ap.= \pm °C); Ran=[-20 a +100]°C
- Espectrofotómetro (Marca: Jenway)
- Agitador magnético (Rango: [100rpm-2200rpm])
- Evaporador película ascendente (Marca: Armfield - FT22-A)
- Refractómetro digital
- Baño ultrasonido
- Vortex
- Estufa

2.2.3 Reactivos e Insumos

- Fructosa comercial (C₆H₁₂O₆)
- Agua destilada (H₂O)
- Reactivo DNS (C₇H₄N₂O₇)

- Sosa cáustica (NaOH)
- Bitartrato de sodio y potasio tetrahidratado (KNaC₄H₄O₆·4H₂O)

2.3 Métodos

A continuación, se describe los distintos métodos para cumplir los objetivos planteados en esta investigación.

2.3.1 Estandarización de diferentes soluciones de fructosa a partir de un blanco comercial para el ingreso al evaporador de película ascendente

Para la estandarización de las soluciones, se utilizó la investigación de Montalvo, (2020), donde obtiene sirope de fructosa con una concentración de 1,2 °Bx. Estas estandarizaciones se trabajó en %p/p ya que es independiente de la expansión y concentración térmica (Trujillo, 2011).

Considerando que la cantidad mínima de solución requerida para emplear el evaporador de película ascendente es de 2 litros y tomando en cuenta que según (Del Amo, 2021), un litro de agua destilada corresponde a una masa de un kilogramo. A continuación, se proporciona el proceso para la preparación de la solución.

Se calculó la masa que corresponde para un balón aforado de 25 ml mediante la ecuación (1) y (2):

$$\% \frac{p}{p} = \frac{W(STO)}{W(SLN)} * 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

$$W(SLN) = W(STO) + W(STE) \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

W(SLN): masa de la solución

W(STE): masa del solvente

W(STO): masa del soluto

Una vez calculada la masa requerida para 25 ml, se procedió a disolverla y homogenizarla, posteriormente se determinó los sólidos solubles según el Método Oficial AOAC 932.12/1990 como lo indican (Corzo-Barragán et al., 2019). Este procedimiento se repitió hasta obtener la concentración de 1.2 °Bx (Anexo IV).

Se determinó la concentración de fructosa utilizando la técnica DNS, para lo cual previamente se construyó una curva estándar de fructosa (Anexo V) como lo describe (Ávila Núñez et al., 2012), de acuerdo con los datos de la tabla 5.

Tabla 5

Puntos para la curva patrón de fructosa

N°	Concentración (g/L)
1	0,05
2	0,10
3	0,15
4	0,20
5	0,25
6	0,30
7	0,35
8	0,40
9	0,45
10	0,50

2.3.1.1 Determinación de las Propiedades del Fluido.

Se evaluó la densidad y viscosidad como propiedades reológicas. Se llevó a cabo los pasos del método del picnómetro de la AOAC 962.37 para la densidad descrito por (Ramírez et al., 2016).

La viscosidad se evaluó por el método de caída de esfera que sigue los principios de la Ley de Stokes, el cual se conoce como método del Tipo I o AOAC 1984 (viscosidad aparente). Se realizó

de acuerdo con las indicaciones descritos por el manual del equipo F1-30 Armfield (Anexo 1) que se indica en la figura 6.

Figura 6

Equipo F1-30 para la determinación de densidad y viscosidad



2.3.2 *Análisis de variables que intervienen en la concentración de jarabe de fructosa*

En el marco de este estudio, se llevó a cabo el análisis de las variables mediante la metodología de superficie de respuesta.

2.3.2.1 Factores de Estudio.

Los factores de estudio propuestos para la investigación se presentan en la tabla 6 y tabla 7 correspondiente a presión de vacío y caudal, respectivamente.

Tabla 6

Factor A Presión de vacío (bar)

Nivel	Presión de vacío
A1	0.1
A2	0.4
A3	0.6

Tabla 7
Factor B Caudal (L/h)

Nivel	Caudal
B1	8
B2	10
B3	12

2.3.2.2 Tratamientos.

En la tabla 8 se presenta los tratamientos determinados a través del paquete estadístico Design-Expert 13, donde se obtuvo 13 combinaciones con cinco repeticiones al punto central y puntos aleatorios para todos los lados axiales, en cada tratamiento se utilizó 3.5 L de solución de fructosa a una concentración de 1.2 °Bx.

Tabla 8
Descripción de tratamientos para la obtención de jarabe de fructosa

Tratamiento	Factor A (presión bar)	Factor B (caudal L/h)
1	0,4	10
2	0,2	12
3	0,6	8
4	0,4	12,83
5	0,4	10
6	0,4	10
7	0,6	12
8	0,68	10
9	0,4	10
10	0,4	10
11	0,4	7,17
12	0,2	8
13	0,11	10

2.3.2.3 Concentración de la Solución

Para la obtención del jarabe de fructosa se realizó siguiendo las directrices de la sección 1.5.1 de este documento sobre la operación del evaporador de película ascendente FT-22 (Anexo VI).

2.3.2.4 Cuantificación Espectrofotométrica de Fructuosa

Se tomó una muestra de producto alcanzado después de la concentración, a continuación se efectuó la medición de absorbancia, de acuerdo con el procedimiento descrito por Ávila Núñez et al. (2012) para el método DNS referente a lo presentado en la figura 7 (Anexo VII).

Figura 7

Procedimiento para la lectura de absorbancia de los resultados

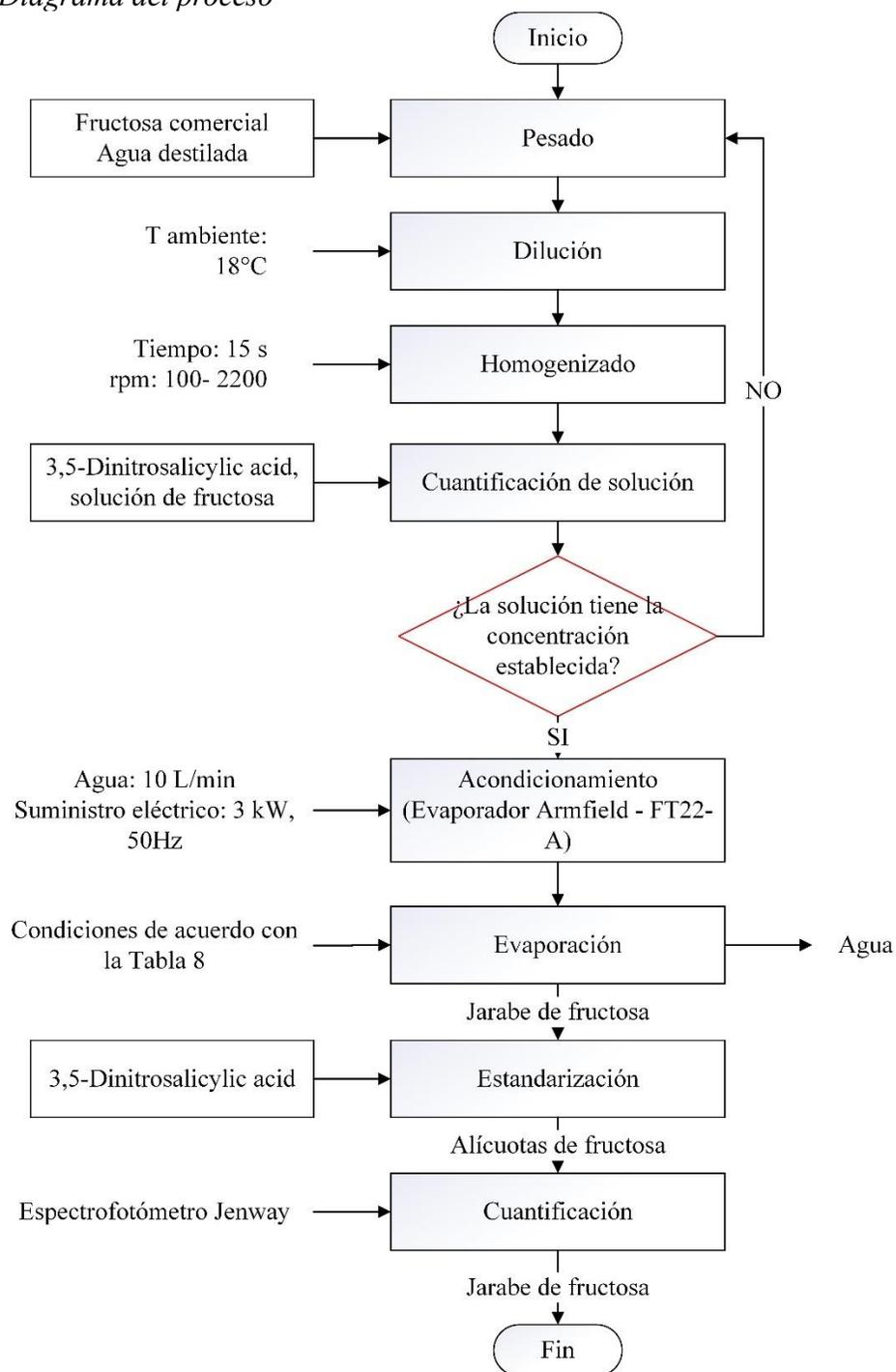


2.3.2.5 Diagrama del proceso realizado

La representación gráfica del procedimiento llevado a cabo se muestra en la figura 8, donde se exhibe el algoritmo detallado del procedimiento.

Figura 8

Diagrama del proceso



2.3.3 Estimación económica del proceso diseñado a diferentes escalas

En la estimación económica del proceso se tomó en cuenta el costo de operación del evaporador, caldero eléctrico, bomba de vacío y bomba centrífuga, es decir, los costos que implica la manipulación de los equipos, además el precio de: insumos, materiales y reactivos que se empleen en el proceso del mejor tratamiento obtenido de acuerdo con lo que se observa en la tabla 9 siguiente:

Tabla 9
Costos de operación de equipos

Equipo / Insumo	Unidad	Precio unitario (\$)	Consumo energético del equipo (kW)	Tiempo de uso (h) / Cantidad utilizada	Total
Bomba centrífuga 1.5 HP	kWh	0,073	1,10		\$
Bomba de vacío	kWh	0,073	0,75		\$
Bomba CIP	kWh	0,073	0,40		\$
Evaporador					\$
Armfield - FT22- A	kWh	0,073	3,00		
Caldero eléctrico	kWh	0,073	30,00		\$
Banco de agua fría	kWh	0,073	5,32		\$
Fructosa	kg	9,80	***		\$
Agua	m ³	0,905	***		\$
Envase	u	0,20	***		\$
Mano de obra	h	2,81	***		\$
				Total	\$

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta en detalle los resultados logrados en la investigación, destacando el cumplimiento de cada objetivo establecido. Además, la descripción de los datos obtenidos mediante el uso de Desing Expert, versión 11.

3.1 Estandarización de soluciones de fructosa a partir de un blanco comercial para el ingreso al evaporador de película ascendente

La estandarización de la solución de fructosa se realizó en el Laboratorio de Análisis Físicos, Químicos y Microbiológicos de la Universidad Técnica del Norte. Se obtuvo una solución de 1,2 °Bx como se muestra en la figura 9, la misma que se preparó a partir de fructosa en polvo con una pureza de 99.5% (Anexo II).

Figura 9
Lectura de °Bx de la solución

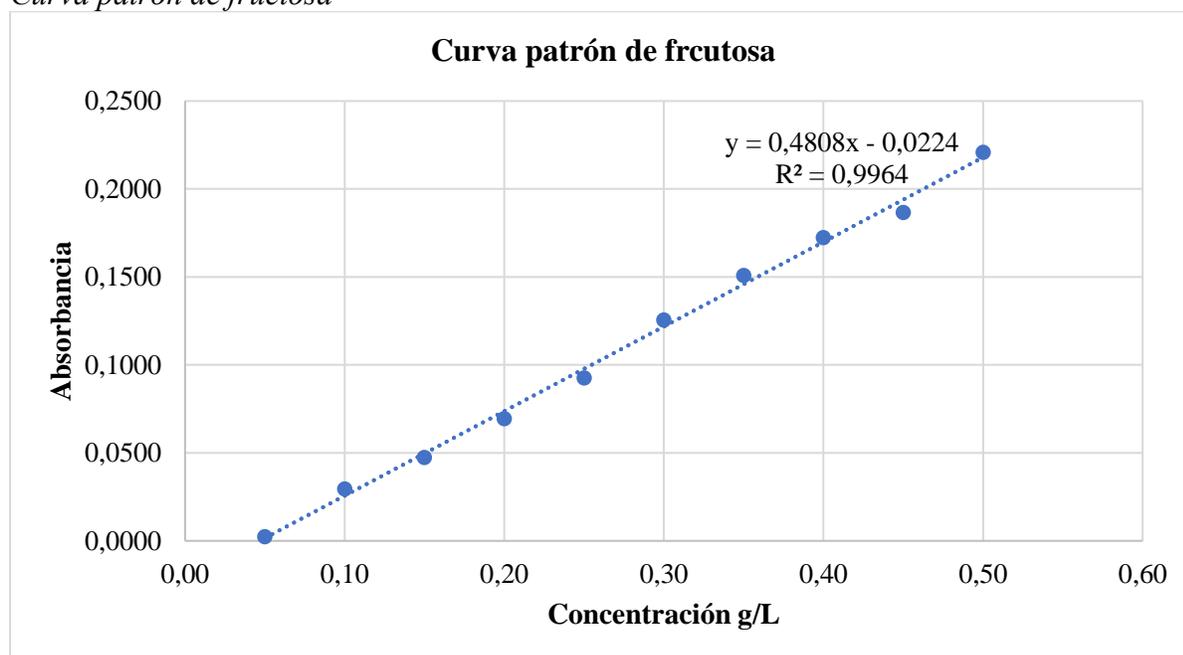


En la investigación de (Montalvo, 2020), sobre la conversión de sustratos de inulina a sirope de fructosa a partir de tuna blanca no se indica la pureza del sirope de fructosa, no obstante, (Mohammadi et al., 2019) en una investigación similar comprobó mediante HPLC que los

hidrolizados de inulina solo contenían dos compuestos, 98 % de fructosa y hasta un 2 % de glucosa, debido a esto se utilizó la fructosa con dicho porcentaje de pureza.

La lectura de la absorbancia se efectuó a 540 nm en el espectrofotómetro de los puntos establecidos en la tabla 5, con los datos obtenidos se construyó la curva patrón de fructosa que se indica en la figura 10.

Figura 10
Curva patrón de fructosa



A partir de la gráfica de la curva patrón de fructosa se obtuvo la ecuación (3) de regresión lineal, con dicha ecuación se determinó que 1.2 °Bx es equivalente a la concentración de 3.80 g/L, sin embargo, experimentalmente se estableció que para alcanzar 1.2 °Bx se necesita una concentración de 1.58% p/v de fructosa cristalizada.

$$y = 0,4808x - 0,0224 \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

y = absorbancia

x = concentración (g/L)

La solución alcanzada tiene una densidad de 988.95 kg/m^3 a una temperatura de $23.8 \text{ }^\circ\text{C}$. La densidad del agua calculada mediante interpolación lineal a dicha temperatura es de 997.43 kg/m^3 como se indica en las tablas termodinámicas descrita por Hernández (2020) . La solución final es incolora y transparente similar al agua además, Alavi et al (2014), afirma que la solubilidad de la fructosa aumenta con el incremento de la concentración de agua y temperatura.

En la tabla 10, se presenta la viscosidad con respecto al agua, a una temperatura de $23.8 \text{ }^\circ\text{C}$, a esta temperatura la viscosidad del agua es baja, no obstante, se puede apreciar que la viscosidad de la solución de fructosa estandarizada es superior en 0.53 uPa*s con respecto al agua. Esta leve diferencia se atribuye a la presencia de cierta cantidad de fructosa presente en la solución.

Tabla 10

Viscosidad dinámica de la solución con respecto al agua

Fluido	Densidad (kg/m^3)	Viscosidad dinámica (uPa*s)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)
Agua	988.95	910.68	23.8
Solución de fructosa 1.2 °Bx	997.43	911.21	23.8

3.2 Análisis de variables que intervienen en la concentración de jarabe de fructosa

La presión y el caudal de operación son dos variables clave que afectan directamente la eficiencia y calidad del proceso de concentración, por ello para el análisis de las variables se realizó un diseño de superficie respuesta. En este sentido, comprender el efecto de la presión y el caudal en la concentración de jarabe de fructosa es fundamental para garantizar un proceso eficiente y rentable en la industria alimentaria.

En la Tabla 11 se muestran los resultados del diseño propuesto, donde se detallan los tiempos totales de proceso para cada tratamiento y los sólidos totales (Anexo VIII) obtenidos específicamente de fructosa, en el Anexo III se muestra la tabla completa de resultados. Se obtuvo un máximo de 9.2 °Bx correspondientes a una presión de vacío y flujo de 0.6 bar y 8 L/h respectivamente. La concentración de la solución aumentó aproximadamente 7.7 veces con respecto a su valor inicial (1.2 °Bx).

Tabla 11

Resultados del diseño de superficie respuesta

Run	Factor A (Presión bar)	Factor B (Flujo L/h)	Tiempo total (s)	Sólidos Totales (°Bx)	# de veces concentrado
1	0,4	10	1588	3,9	3,3
2	0,2	12	1430	2,7	2,3
3	0,6	8	1910	9,2	7,7
4	0,4	12,83	1351	2,6	2,2
5	0,4	10	1757	4,2	3,5
6	0,4	10	1653	4,8	4,0
7	0,6	12	1272	4,1	3,4
8	0,68	10	1740	8,1	6,8
9	0,4	10	1650	4,7	3,9
10	0,4	10	1649	4,5	3,8
11	0,4	7,17	2309	8,5	7,1
12	0,2	8	2053	4,3	3,6
13	0,11	10	1568	2,2	1,8

Nota. El autor

El valor del número de veces concentrado en esta investigación es superior a los reportados por (Guachamín et al., 2023), en la evaluación del proceso de evaporación de la mandarina quien concentra 4.1 veces con respecto a los sólidos totales en el evaporador de película ascendente. Algo similar señala (López et al., 2021), quien concentra 4.1 veces con respecto al valor inicial de sólidos solubles contenidos en el jugo de babaco.

(Sabanci & Icier, 2022), manifiesta que concentra zumo de naranja de 11,4 % a 42 % de sólidos solubles totales (TSSC) mediante evaporación al vacío con asistencia óhmica, es decir, incrementa en 3.7 veces la TSSC, un valor inferior al conseguido en la presente investigación. La diferencia se atribuye al hecho de que el sirope de fructosa no contiene otros compuestos y se emplearon procesos de concentración distintos, sin embargo, en ambos estudios, se muestran similitudes en cuanto a la duración del proceso en términos del tiempo de alrededor de 30 min, por el contrario (Tavares et al., 2022), en la concentración de jugo de uva por ósmosis directa combinada/evaporación alcanza 41.5 °Bx en aproximadamente 5 horas.

3.2.1 *Propiedades del Fluido*

En la tabla 12 se presenta las propiedades del fluido que alcanzó la mayor concentración de °Bx, para el caso, fue el tratamiento 3 a una presión de vacío y flujo de: 0.6 bar y 8 L/h, respectivamente. El resultado de la viscosidad dinámica es de 0.00995, valor que supera la viscosidad de agua a 24 °C (0.000911) reportado por (VAXA, 2023). De la misma manera, la viscosidad y densidad aumentan con respecto a la solución inicial, debido a la concentración de sólidos solubles, no obstante, (Dahdouh et al., 2016), llevaron a cabo un estudio reológico en zumos de naranja que contiene alrededor de 10 °Bx y consideraron que son líquidos viscosos para mayor amplitud de deformación, es decir, líquidos de baja viscosidad.

Tabla 12

Propiedades del sirope de fructosa con 9.2 °Bx

Densidad (kg/m ³)	Viscosidad dinámica (μ=kg/m*s)	Viscosidad dinámica (cP)	Viscosidad dinámica (μ=kg/m*s)	Viscosidad cinemática (cSt)
1021,52	0,00995	0,9951	0,00000974	9,74

3.2.2 *Análisis de varianza del tiempo*

Modelo lineal por ANOVA

La ecuación 4 muestra el modelo lineal derivado mediante ANOVA, el cual posibilita explorar la incidencia del flujo de alimentación con respecto al tiempo, además, sugiere que la presión de vacío no influye sobre el tiempo dentro de los intervalos definidos en el diseño experimental propuesto.

$$\mathbf{T}i\mathbf{e}m\mathbf{p}o = -509.22 * \mathbf{B} + 17.29 * \mathbf{B}^2 + 5007.65 \quad \text{Ec. 4}$$

Donde: \mathbf{B} = Flujo (L/h)

La tabla 13 contiene el ANOVA del modelo propuesto, así como el análisis estadístico de la variable de respuesta obtenida a través de la experimentación. Se determina la utilidad de la ecuación estadística sugerida para lograr un mínimo tiempo del equipo en funcionamiento en la obtención de jarabe de fructosa, a través del análisis de varianza. Además, revela que el valor-p del modelo es significativo, ya que es menor a 0.05, esto propone que la Ec. 4 es estadísticamente relevante.

Tabla 13

ANOVA para el tiempo

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor-F	Valor-p
Modelo	8.89E+05	2	4.45 E+05	65.24	< 0.0001
B-Flujo	8.55 E+05	1	8.55 E+05	125.51	< 0.0001
B ²	33903.01	1	33903.01	4.97	0.0498
Residual	68146.86	10	6814.69		
Ajustado	53285,66	6	53285,66	53285,66	53285,66
Error Puro	14861,20	4	3715,30		
Total	9,57E+05	12			

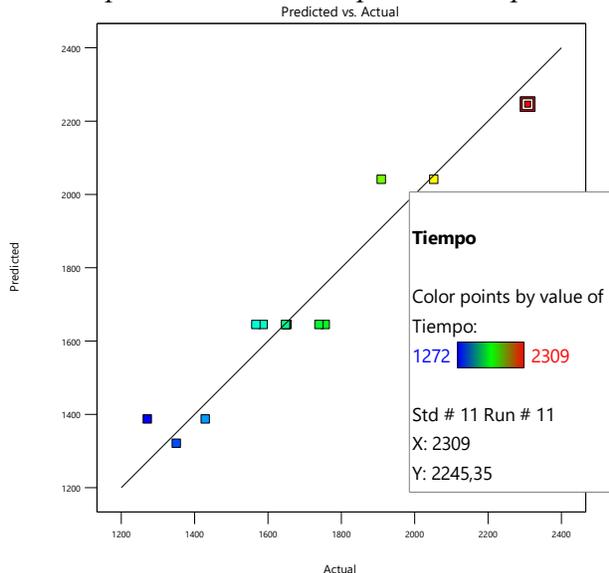
En el análisis del ANOVA de la expresión matemático del tiempo en la concentración de fructosa indica que los términos B y B² son términos significativos para la ecuación ya que presenta valores inferiores a 0.0500. De la misma manera, el Valor-F fue de 65.24 lo que implica que el modelo es relevante, es decir, solo hay un 0.01% de posibilidad de que un valor F tan grande se deba a la irregularidad aleatoria.

La tabla 14 exhibe el coeficiente de determinación (R^2) de 0.9288, lo que sugiere que la expresión matemática utilizada es confiable y la R^2 prevista de 0,8393 concuerda razonablemente con el coeficiente de determinación ajustado de 0,9146; debido a que la diferencia entre ambas es menor a 0,2. En relación con el coeficiente de variación ($CV=4.89$) se obtuvo un valor inferior al 10%, lo que indica que el modelo es adecuado para explorar el espacio de diseño.

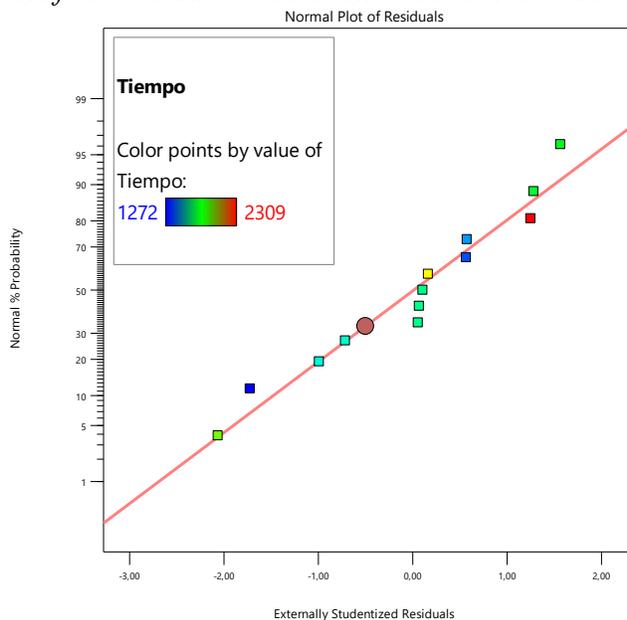
Tabla 14
Análisis de varianza ANOVA para el modelo lineal

Término	Respuesta
Desviación estándar	82.55
Media	1686.92
C.V. %	4.89
R^2	0.9288
R^2 Ajustada	0.9146
R^2 Predicha	0.8393

La figura 11 muestra la comparación entre los valores predichos por el modelo generado en el paquete estadístico y los valores reales obtenidos en la investigación. Se puede observar un escenario ideal, ya que todos los puntos se encuentran cercanos a una línea diagonal de regresión. Específicamente, para el tratamiento 11, se predijo un valor de 2245 s, el cual se aproxima al valor real de 2309 s. Esto indica que el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.9288$) es adecuado, demostrando que la dispersión de los datos es mínima.

Figura 11*Valores predichos vs reales para el tiempo*

En la figura 12, se muestra la representación gráfica de la distribución normal de los residuos con relación a los valores predichos por el modelo para el tiempo. Los valores se encuentran cercanos entre sí y siguen una tendencia lineal, lo cual cumple con el postulado de que los datos están distribuidos normalmente y que la discrepancia entre los valores es mínima.

Figura 12*Grafica de distribución normal de los residuos*

3.2.3 Análisis de varianza de sólidos solubles

Modelo cuadrático por ANOVA

La ecuación 5 muestra el modelo cuadrático derivado mediante ANOVA, el cual posibilita explorar la interacción de la presión de vacío y el flujo de alimentación con respecto a los sólidos solubles. El modelo matemático es validado dentro de los intervalos definidos por el diseño experimental propuesto.

$$SS = 2.60 * A - 2.63 * B - 1.76 * A * B + 0.7953 * B * A^2 + 4.67 \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

SS: sólidos totales (°Bx)

A: Presión de vacío (bar)

B: Flujo (L/h)

La tabla 15 contiene el ANOVA, el cual permite determinar la utilidad de la ecuación estadística sugerida para lograr la máxima concentración de sólidos en la obtención de jarabe de fructosa. El análisis de varianza de los sólidos solubles indica que el modelo es significativo, esto plantea que la Ec. 5 es estadísticamente sustancial.

Tabla 15

ANOVA para los sólidos solubles

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor-F	Valor-p
Modelo	59,27	4	14,82	71,15	< 0.0001
A-Presión de vacío	26,75	1	26,75	128,46	< 0.0001
B-Flujo	27,60	1	27,60	132,55	< 0.0001
AB	3,06	1	3,06	14,71	0,0050
BA ²	1,12	1	1,12	5,37	0,0491
Residual	1,67	8	0,2082		
Ajustado	1,45	4	0,3635	6,86	0,0445

Error Puro	0,2120	4	0,0530
Total	60,93	12	

En el análisis del ANOVA del modelo matemático de los sólidos solubles en la concentración de fructosa indica que los términos A, B, AB y BA^2 son términos significativos del modelo ya que presenta valores inferiores a 0.0500. De la misma manera, el Valor F del modelo fue de 71.15 lo que implica que el modelo es significativo, es decir, solo hay un 0.01% de posibilidad de que un valor F tan grande se deba a la irregularidad aleatoria.

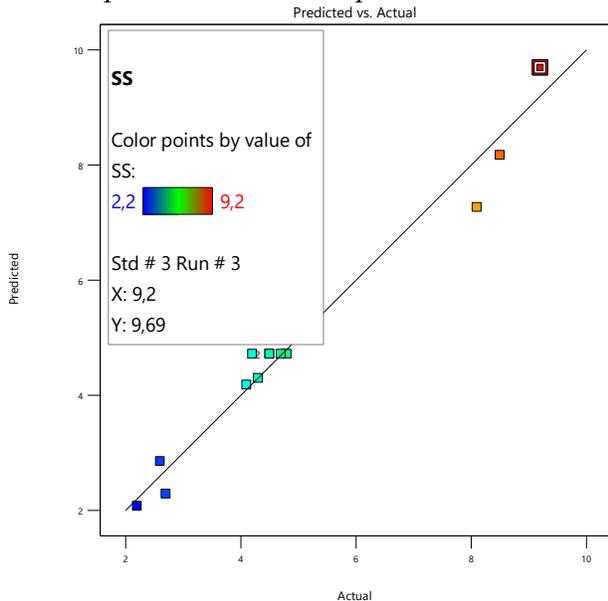
La tabla 16 exhibe el coeficiente de determinación (R^2) de 0.9797, lo que sugiere que el modelo utilizado es altamente confiable. La R^2 prevista de 0,9026 concuerda razonablemente con la R^2 ajustada de 0,9590; ya que la diferencia entre ambas es menor a 0,2. Con respecto al coeficiente de variación ($CV=9.21$) se obtuvo un valor inferior al 10% que es deseable, indicando que el modelo es adecuado para explorar el espacio de diseño.

Tabla 16
ANOVA para el modelo cuadrático

Término	Respuesta
Desviación estándar	0.4563
Media	4.95
C.V. %	9.21
R^2	0.9727
R^2 Ajustada	0.9590
R^2 Predicha	0.9026

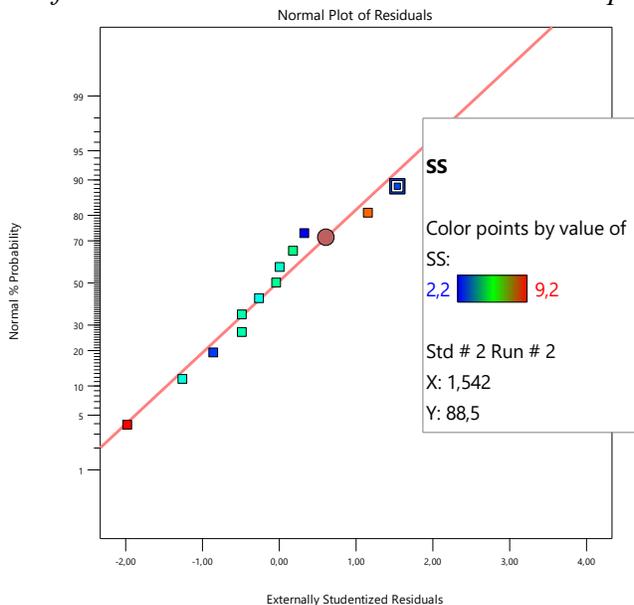
En la figura 13 se puede apreciar que hay 0.49 de diferencia entre el valor predicho por el paquete estadístico y el valor obtenido en el presente estudio. Esto sugiere que el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.9727$) es satisfactorio, por ende, la variabilidad de los datos es limitada.

Figura 13
Valores predichos vs reales para los sólidos solubles



La Figura 14 exhibe la distribución normal de los residuos en relación con los valores predichos para los sólidos solubles. Los datos muestran proximidad y siguen una tendencia lineal, indicando que cumplen con la distribución normal y presentan mínimas discrepancias entre los valores.

Figura 14
Grafica de distribución normal de los residuos para los SS

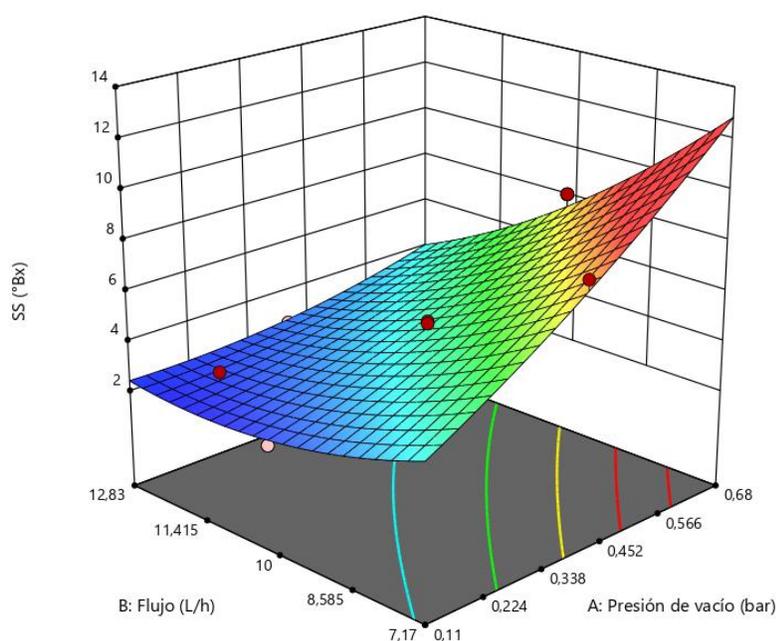


La figura 15 exhibe el análisis de la superficie de respuesta relacionado con la concentración de sólidos solubles. En esta gráfica, se observa que la región óptima, donde se logra la mayor concentración del sirope de fructosa, se encuentra prácticamente fuera de los parámetros establecidos en el estudio con respecto a la presión de vacío.

Figura 15

Análisis de superficie de respuesta relacionado con la concentración

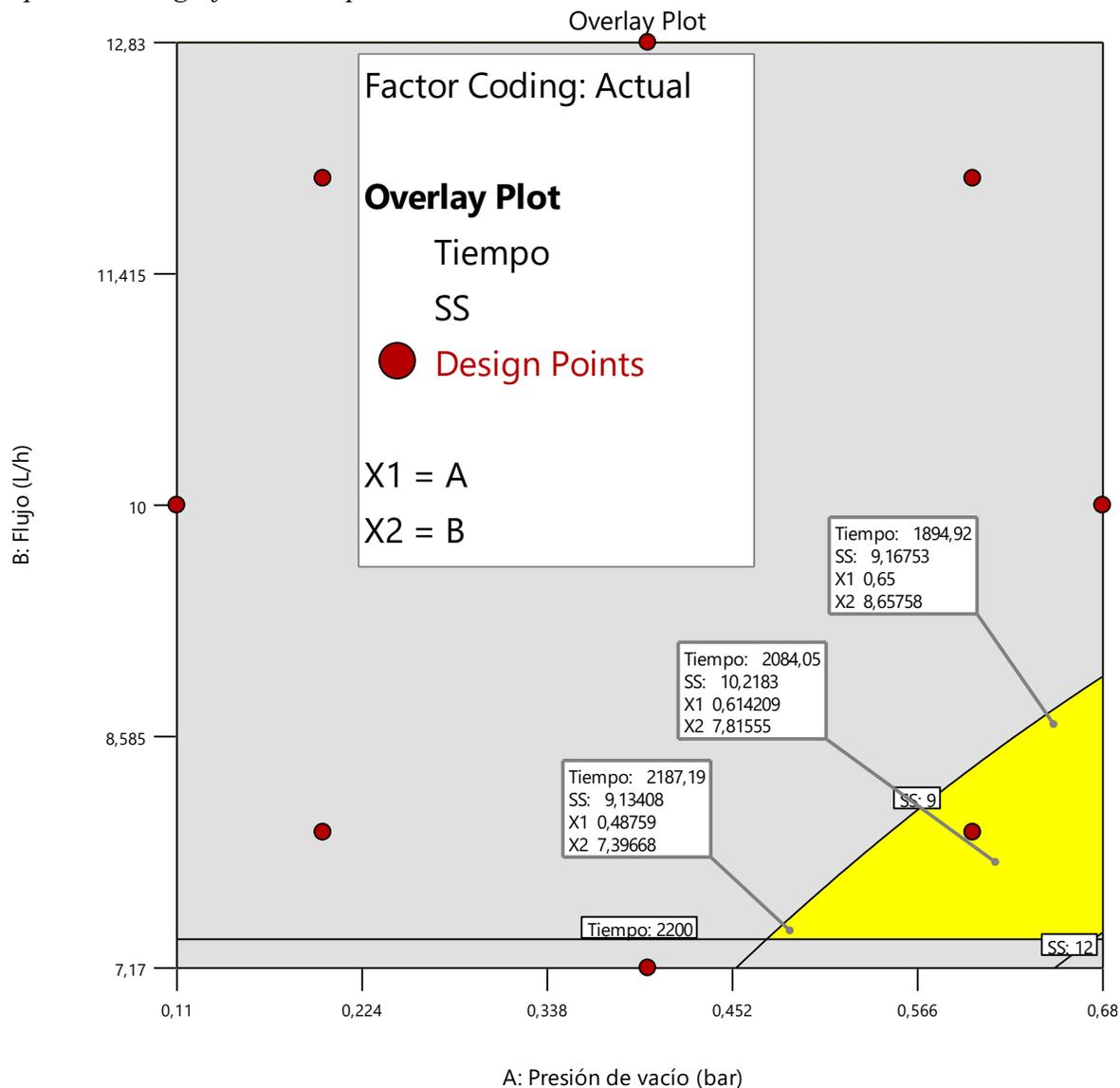
3D Surface



3.2.4 Optimización Numérica y Gráfica de las Variables de Concentración

En la figura 16 muestra la optimización gráfica, la zona amarilla indica la región donde teóricamente el resultado de cualquier combinación de los parámetros producirá una concentración mínima de 9 °Bx en la solución final. Con la finalidad de corroborar dicha optimización se efectuó dos tratamientos adicionales utilizando los parámetros indicados en la figura 14, pero con una solución inicial de 9.2 °Bx, es decir, utilizando el resultado del mejor tratamiento obtenido en el diseño de superficie respuesta.

Figura 16
Optimización gráfica de los parámetros



En la tabla 17 se muestra las propiedades reológicas de los tratamientos adicionales de la optimización. La densidad del jarabe de 45.3 °Bx a 24 °C es de 1189,58 kg/m³, (de Castilhos et al., 2017), reportaron para el jugo de uva a 28 °C, una densidad de 1189.6±8 kg/m³ con una concentración de sólidos solubles de 45 °Bx, es decir, la densidad del jugo de uva es ligeramente superior, debido a que, contiene otros componentes además de los azúcares. (Bellaera et al., 2018), indican que el jarabe de maíz de alta fructosa de 42% m/m tiene una viscosidad de 170 cP a 25 °C,

este producto contiene dextrosa y otros azúcares que elevan su viscosidad, a diferencia del jarabe obtenido tiene una viscosidad dinámica de 1,8435 cP porque contiene solo fructosa en su composición.

Tabla 17

Propiedades reológicas de la optimización

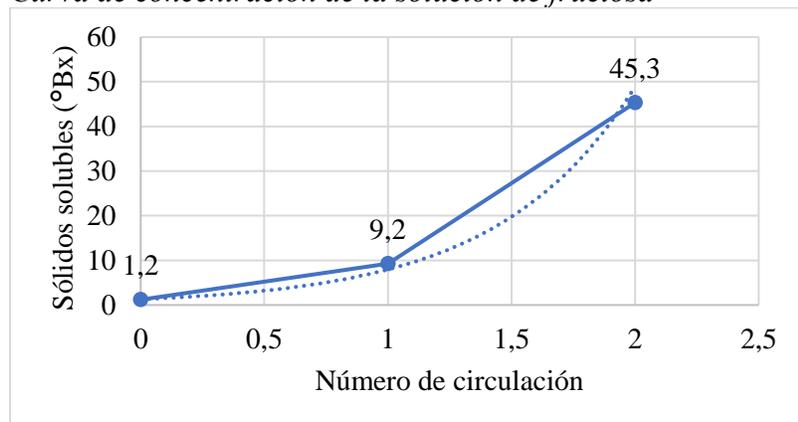
°Bx del jarabe	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad dinámica (μ=kg/m*s)	Viscosidad dinámica (cP)	Viscosidad dinámica (μ=kg/m*s)	Viscosidad cinemática (cSt)
45.3	1189,58	0,01844	1,8435	1,55*10 ⁻⁵	15,5
44.6	1188,56	0,01837	1,8366	1,545*10 ⁻⁵	15,45

3.2.5 Comportamiento del Jarabe de Fructosa

En la figura 17 se observa la curva de concentración, se aprecia que en la segunda circulación aumenta notablemente la concentración de sólidos solubles en 4.9 veces con respecto a su valor inicial.

Figura 17

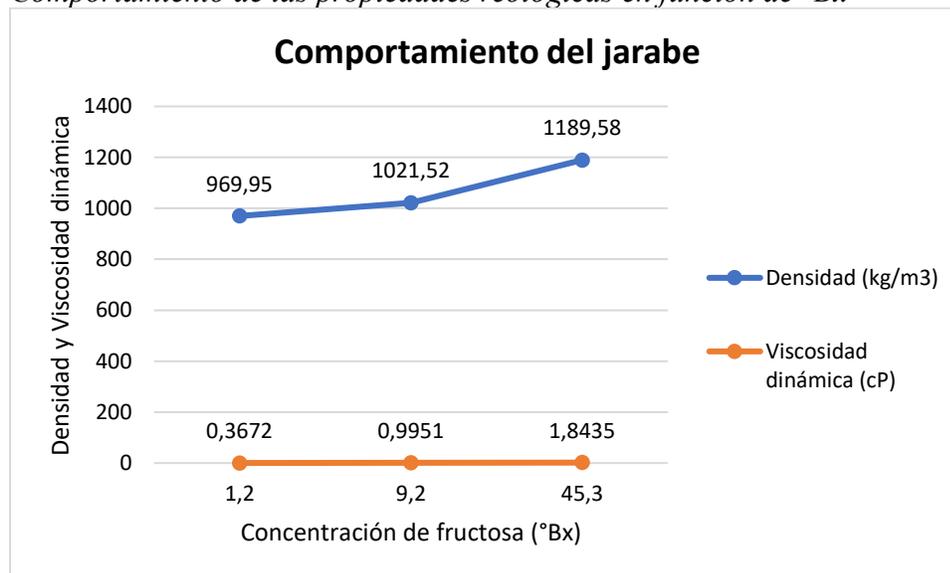
Curva de concentración de la solución de fructosa



En la figura 18, se exhibe la variación de la densidad y viscosidad dinámica en relación con los sólidos solubles. De manera predecible, se evidencia un incremento en estas características a medida que aumenta el contenido de °Bx en el jarabe.

Figura 18

Comportamiento de las propiedades reológicas en función de °Bx



3.3 Estimación Económica del Proceso Diseñado

Los costos de producción comúnmente se componen de dos elementos fundamentales: costos directos que comprenden los costos de los insumos, mano de obra empleados directamente en la fabricación del jarabe de fructosa; y de costos indirectos que involucran los gastos necesarios para mantener la operatividad de la producción, pero que no pueden ser atribuidos de manera directa al jarabe de fructosa (Cabrera De Palacio, 2018).

3.3.1 Costos Directos

En la tabla 18 se indica los costos directos asociados con el tratamiento tres, debido a que se obtuvo mayor concentración de sólidos solubles. De acuerdo con la literatura, la mano de obra representa el gasto más significativo en la elaboración de alimentos, conforme se evidencia en la tabla 16. El costo de la fructosa se calculó de acuerdo con la cantidad utilizada para este tratamiento específico, para el precio del agua se considera el utilizado en la preparación de la solución y el requerido para la limpieza después del proceso y finalmente, la mano de obra se tomó en cuenta desde el acondicionamiento de los equipos, el proceso y la limpieza del evaporador.

Tabla 18
Costos directos en la concentración de fructosa

Descripción	Unidad	Precio unitario (\$)	Cantidad	Total (\$)
Fructosa	kg	9,80	0,055	0,54
Agua	m ³	0,905	0,017	0,01
Envase	u	0,20	1	0,20
Mano de obra	h	2,81	2	5,62
			Total	\$ 4,97

3.3.2 Costos Indirectos

En la tabla 19 se presenta los costos directos relacionados en el proceso de concentración, donde se puede apreciar que se calculó el consumo energético de los equipos involucrados en el proceso, para ello, se revisó el consumo kW/h de cada equipo en las fichas técnicas y en la propia descripción. El costo del kW/h de la energía eléctrica se calculó de acuerdo a lo establecido por (EMELNORTE, 2023) para la tarifa industrial en bajo voltaje con demanda.

Tabla 19
Costos indirectos en la concentración de fructosa

Equipo	Unidad	Precio unitario (\$)	Consumo energético del equipo (kW)	Tiempo de uso (h)	Total
Bomba centrífuga 1.5 HP	kWh	0,073	1,10	0,70	0,06
Bomba de vacío	kWh	0,073	0,75	0,53	0,03
Bomba CIP	kWh	0,073	0,40	1,33	0,04
Evaporador Armfield - FT22-A	kWh	0,073	3,00	2,00	0,44
Caldero eléctrico	kWh	0,073	30,00	1,00	2,19
Banco de agua fría	kWh	0,073	5,32	0,70	0,27
				Total	\$ 3,02

3.3.3 Costo Total de Producción

El costo total para la producción de 0.521 kg del jarabe de fructosa con una concentración de 45.3 °Bx es de \$ 7.99. Según Alvarado (2020), el kilogramo se encuentra en \$ 9.5, no obstante, entre

sus componentes esta la sacarosa, dextrosa y la fructosa en una concentración menor, debido a esto el costo por kg es menor, por el contrario, la composición del jarabe obtenido en la presente investigación se compone solo de fructosa. Producir un jarabe que contenga únicamente fructosa eleva los costos de producción ya que conlleva más procesos (Mokale Kognou et al., 2022).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Se determinó que la solución del sirope de fructosa a partir de la conversión enzimática de inulina es estable y no se precipita, además se determinó la concentración (%p/v y %p/p) y propiedades reológicas de solución inicial, lo que garantiza la fiabilidad, reproducibilidad y comparabilidad en análisis y experimentos científicos e industriales para el desarrollo de nuevas tecnologías de concentración y/o transformación.
- En base a la correlación significativa entre los parámetros de concentración y los resultados obtenidos, se acepta la hipótesis alternativa propuesta. Los hallazgos indican que una mayor presión de vacío (superior a 0.5) y un flujo de aproximadamente 8 L/h permiten que el proceso de evaporación por película ascendente logra obtener jarabe de fructosa.
- Los resultados obtenidos sugieren que en la primera circulación se logra una concentración de más de 9 °Bx, lo que indica una eficiente concentración inicial de la solución. Además, en el segundo ciclo, se alcanza 45 °Bx, lo que demuestra una mejora sustancial en la concentración del producto final.
- Se obtuvo un costo de producción de \$8.00 para 502 ml de sirope de fructosa, esto evidencia una eficiencia notable en la producción de la solución. Además, en comparación con las industrias de jarabe de maíz alto en fructosa, el costo asociado al proceso de producción es un logro significativo.

4.2 RECOMENDACIONES

- Realizar un barrido espectrofotométrico o cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) del sirope de fructosa obtenido a partir del hidrolizado de inulina, con el fin de identificar y determinar con precisión los compuestos presentes en la solución.
- Mantener un monitoreo constante de la presión de vacío y el flujo establecidos para prevenir cualquier perturbación en los resultados. Al final, del proceso agregar una cantidad de agua considerable para evitar la incrustación de producto en la superficie del tubo.
- A raíz de los resultados positivos evidenciados en este estudio, se sugiere realizar estudios de mezclas con encapsulantes y el jarabe obtenido con la finalidad de obtener fructosa cristalizada en el equipo de secado por pulverización.
- Se sugiere realizar estudios de concentración del sirope de fructosa en distintos evaporadores con el ánimo de contrastar los resultados y costos obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

- Alavi, T., Pazuki G Fau - Raisi, A., & Raisi, A. Solubility of fructose in water-ethanol and water-methanol mixtures by using H-bonding models. (1750-3841 (Electronic)).
- Alonso, J. R. (2010). Edulcorantes naturales. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 12(2), 3-12. (IN FILE)
- Armfield. (2015). Manual de instrucciones del evaporador de película ascendente. In (pp. 46).
- Bellaera, F., Hammerschmidt, J., Sanz, J., Zaccarello, D., & Beccio, B. (2018). JARABE DE MAÍZ DE ALTA FRUCTOSA, SUS IMPLICANCIAS EN LA SALUD Y LA INFORMACIÓN DISPONIBLE EN EL ROTULADO DE LOS ALIMENTOS http://escuelanutricion.fmed.uba.ar/revistani/pdf/19a/rb/851_c.pdf
- Cabrera De Palacio, M. D. (2018). La contabilidad de costos en la producción de bienes y servicios. Revisión bibliográfica actualizada (2010-2018). *En-Contexto Revista de Investigación en Administración, Contabilidad, Economía y Sociedad*, 6(9), 203-230. (IN FILE)
- Capuñay, M. (2019). *EVAPORADORES EN LA INDUSTRIAALIMENTARIA*. <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-nacional-pedro-ruiz-gallo/calidad-educativa/trabajo-de-evaporadores-en-la-industria-alimentaria/9462969>
- Chiluisa, A. (2015). *ESTUDIO DEL EFECTO DE LA HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA EN LA OBTENCIÓN DE UN JARABE DE GLUCOSA Y FRUCTOSA A PARTIR DEL PLÁTANO MADURO (Musa paradisiaca)* UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO]. <http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/15895/1/AL%20593%20.pdf>
- COMYCE, & Clinicas. (2023). *Jarabe de maíz alto en fructosa*. <https://www.comycebalears.com/jarabe-de-maiz-alto-en-fructosa-/>

Corzo-Barragán, D. C., Salcedo Galán, F., & Arturo Pacheco, R. (2019). Desarrollo de una bebida mixta tipo néctar con cápsulas de Aloe vera (L.) Burm. f. y vitamina C. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 22.

Dahdouh, L., Wisniewski, C., Ricci, J., Vachoud, L., Dornier, M., & Delalonde, M. (2016). Rheological study of orange juices for a better knowledge of their suspended solids interactions at low and high concentration. *Journal of Food Engineering*, 174, 15-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.11.008>

de Castilhos, M. B. M., Betiol, L. F. L., de Carvalho, G. R., & Telis-Romero, J. (2017). Experimental study of physical and rheological properties of grape juice using different temperatures and concentrations. Part I: Cabernet Sauvignon. *Food Research International*, 100, 724-730. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.075>

Del Amo, I. (2021). *Medidas de capacidad y medidas de masa*. [smartick.es/blog/matematicas/medidas-y-datos/medidas-de-capacidad-medidas-de-masa/#:~:text=El%20agua%20tiene%20una%20densidad,masa%20justo%20de%201%20kilogramo.](https://www.smartick.es/blog/matematicas/medidas-y-datos/medidas-de-capacidad-medidas-de-masa/#:~:text=El%20agua%20tiene%20una%20densidad,masa%20justo%20de%201%20kilogramo.)

EMELNORTE. (2023). <https://www.emelnorte.com/eern/>

Eurofins. (2016). Measurement of Total Fructan in Foods. In.

Ferguson, P. H. (2003). EVAPORATION | Uses in the Food Industry. In B. Caballero (Ed.), *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition (Second Edition)* (pp. 2205-2211). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B0-12-227055-X/00431-4>

Guachamín, Cuzco, Mayra, & Lizeth. (2023). *EVALUACIÓN DEL PROCESO DE EVAPORACIÓN DE PELÍCULA ASCENDENTE*

SOBRE EL CONTENIDO DE VITAMINA C Y LA CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DE LA

MANDARINA Citrus reticulada L UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE].

<http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/14274/2/03%20EIA%20612%20TRABAJO%20GRADO.pdf>

Hernández, M. (2020). *Cuantificación espectrofotométrica de azúcares reductores*.

https://www.youtube.com/watch?v=2kTd57g_jCs&list=PLrtMpvqJCKU8EvmveEB28-FuHLcW8ldhH&index=1&t=625s

Lara Fiallos, M. V., Ayala Chamorro, T., González Suárez, E., & Pérez Martínez, A. (2021).

OBTENCIÓN DE SIROPE DE FRUCTOSA POR ENCAPSULACIÓN ENZIMÁTICA DE INULINASA EN ALGINATO DE SODIO. *Centro Azúcar*, 48, 117-126.

Lara, M., Chamorro, T., Suárez, E., & Pérez, A. (2021). [https://www.researchgate.net/profile/Jose-](https://www.researchgate.net/profile/Jose-Pais-Chanfrau/publication/350700419_Optimization_of_inulin_extraction_from_garlic_Allium_sativum_L_waste_using_the_response_surface_methodology/links/606db063299bf1c911b1f801/Optimization-of-inulin-extraction-from)

[Pais-](https://www.researchgate.net/profile/Jose-Pais-Chanfrau/publication/350700419_Optimization_of_inulin_extraction_from_garlic_Allium_sativum_L_waste_using_the_response_surface_methodology/links/606db063299bf1c911b1f801/Optimization-of-inulin-extraction-from)

[Chanfrau/publication/350700419_Optimization_of_inulin_extraction_from_garlic_Allium_sativum_L_waste_using_the_response_surface_methodology/links/606db063299bf1c911b1f801/Optimization-of-inulin-extraction-from](https://www.researchgate.net/profile/Jose-Pais-Chanfrau/publication/350700419_Optimization_of_inulin_extraction_from_garlic_Allium_sativum_L_waste_using_the_response_surface_methodology/links/606db063299bf1c911b1f801/Optimization-of-inulin-extraction-from)

López, Anrango, Paola, & Alejandra. (2021). *EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE*

EVAPORACIÓN POR PELÍCULA ASCENDENTE SOBRE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES FÍSICO-QUÍMICAS Y ORGANOLÉPTICAS DEL CONCENTRADO DE

BABACO Carica pentagona H. UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE].

<http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/11896/2/03%20EIA%20536%20TRABAJO%20GRADO.pdf>

Massón, L. (2016). FIBRA DIETÉTICA , ASPECTOS GENERALES Y ANALÍTICOS In.

Mohammadi, M., Rezaei Mokarram, R., Ghorbani, M., & Hamishehkar, H. (2019). Inulinase

immobilized gold-magnetic nanoparticles as a magnetically recyclable biocatalyst for

- facial and efficient inulin biotransformation to high fructose syrup. *International Journal of Biological Macromolecules*, 123, 846-855.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.160>
- Mokale Kognou, A. L., Shrestha, S., Jiang, Z., Xu, C., Sun, F., & Qin, W. (2022). High-fructose corn syrup production and its new applications for 5-hydroxymethylfurfural and value-added furan derivatives: Promises and challenges. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 7(3), 148-160. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.03.004>
- Moltavo, D. (2020). *EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ENCAPSULACIÓN POR UNIÓN QUÍMICA ENZIMÁTICA DE INULINASA PARA LA CONVERSIÓN DE SUSTRATOS DE INULINA A SIROPE DE FRUCTOSA A PARTIR DE TUNA BLANCA Opuntia ficus-indica UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE*].
- Montalvo, D. (2020). *EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ENCAPSULACIÓN POR UNIÓN QUÍMICA ENZIMÁTICA DE INULINASA PARA LA CONVERSIÓN DE SUSTRATOS DE INULINA A SIROPE DE FRUCTOSA A PARTIR DE TUNA BLANCA Opuntia ficus-indica UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE*].
- Olvera, C., Castillo, E., & Lopez Munguía, A. (2007). Fructosiltransferasas, fructanas y fructosa. 14.
- Ortolá Ortolá, M., Fito Suñer, P., & Castro Giráldez, M. (2018). TIPOS DE EVAPORADORES EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA. <https://riunet.upv.es/handle/10251/102965>
- Quesada, M., & Hernández, A. (2012). *Portal de Revistas Académicas*. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/cienciaytecnologia/article/download/10585/9976/>
- Ramírez, L., Núñez, C., Valderrama, M., & Porras, Ó. (2016). Caracterización fisicoquímica de Pava Guajava (*Bellucia grossularioides* L.Triana) en sus diferentes estados fisiológicos

- Rubio, M., Bernal, M., & García, R. (2011). *Montaje de técnicas analíticas para medir glucosa, fructosa y sacarosa por cromatografía de líquidos en jugos de caña de azúcar* (UNAM, Ed.)
- Sabanci, S., & Icier, F. (2022). Evaluation of an ohmic assisted vacuum evaporation process for orange juice pulp. *Food and Bioproducts Processing*, 131, 156-163.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.09.009>
- SNAE. (2015). *Servicio Nacional de Aduana del Ecuador*.
https://www.aduana.gob.ec/archivos/Boletines/2015/resolucion_011_2015%20Comex.pdf
- Sokolowski, D. (2016). *Diseño del Sistema de Control de un Evaporador* Universidad de Sevilla].
<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/90883/fichero/proyecto+fin+de+grado+DSB.pdf>
- Sosa, M. G., & Delgado, V. A. (2016). PROPIEDADES FUNCIONALES Y APLICACIONES TECNOLÓGICAS DE FRUCTANOS. In OmniaScienza (Ed.), *ALIMENTOS FUNCIONALES DE HOY* (pp. 97-116).
- Souzanchi, S., Nazari, L., Rao, K. T. V., Yuan, Z., Tan, Z., & Xu, C. (2023). 5-HMF production from industrial grade sugar syrups derived from corn and wood using niobium phosphate catalyst in a biphasic continuous-flow tubular reactor. *Catalysis Today*, 407, 274-280.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.07.032>
- Tavares, H. M., Tessaro, I. C., & Cardozo, N. S. M. (2022). Concentration of grape juice: Combined forward osmosis/evaporation versus conventional evaporation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 75, 102905.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102905>

Trujillo, F. (2011). *QUÍMICA EN SOLUCIONES ACUOSAS* (S. Editoril, Ed.).

VAXA. (2023). *Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas.*

http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/viscoh2o.pdf

Ávila Núñez, R., Rivas Pérez, B., Hernández Motzezak, R., & Chirinos, M. (2012). Contenido de azúcares totales, reductores y no reductores en Agave cocui Trelease. *Multiciencias*, 12(2), 129-135. (IN FILE)

ANEXOS

Anexo I.

Liquid density / specific gravity using a pycnometer

Objective

To measure density and relative density (specific gravity) of various liquids using a pycnometer (density bottle).

Method

By measuring the change in weight of a density bottle filled with the liquid to be tested then calculating the density from the known volume and increase in weight.

Equipment Required

50 ml Gay-Lussac Pycnometer

Lever operated balance

Suitable liquids for testing

Note: The liquids used in this exercise must be safe to handle. For convenience it is suggested that the liquids tested should be those to be used in Exercise D for determining the viscosity of liquids: E.g. Glycerol and edible oil such as Sunflower oil, Rape seed oil or Olive oil.

Optional Equipment

Accurate Laboratory balance

Theory

Density is defined as the ratio of the mass of a body to its volume. Therefore, if a known volume of liquid is weighed, the density of the liquid can be determined from the equation:

$$\rho_L = \frac{M_L}{V_L}$$

Where

ρ_L = Density of the liquid

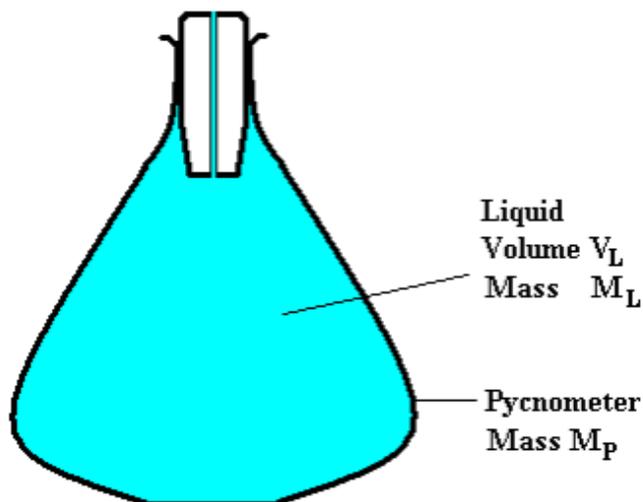
M_L = Mass of the liquid

V_L = Volume of the liquid

All at temperature t °C

Armfield Instruction Manual

The glass pycnometer is calibrated so that when filled with a liquid and the stopper is fully inserted, excess liquid is expelled via the hole in the stopper leaving a precise known volume of liquid inside.



Measurement of the dry pycnometer and the pycnometer filled with liquid therefore allows the density of the liquid to be calculated as follows:

$$\rho_L = \frac{(M_{P+L} - M_P)}{V_P}$$

where

ρ_L = Density of the liquid

M_L = Mass of the liquid

M_P = Mass of pycnometer

M_{P+L} = Mass of pycnometer filled with liquid

V_P = Volume of the pycnometer

= Volume of the liquid V_L

= 50 mL for the pycnometer supplied

All at temperature t °C

Equipment Set Up

Ensure that the pycnometer has been cleaned and is thoroughly dry before proceeding with this exercise.

Set up and level the lever balance on a solid work surface.

Note: The lever balance supplied with F1-30 is adequate to demonstrate how the change in weight can be used to calculate liquid density but will not provide an accurate value. If an accurate laboratory balance is available then this can be used to obtain an accurate value for the liquid density.

Procedure

Ensure that pycnometer is dry then weigh it, complete with its stopper, and record the weight.

Fill the pycnometer with the liquid to be tested, allow any air bubbles to rise to the surface then insert the stopper fully. Wipe the outside of the pycnometer to remove any spilt liquid then reweigh it and record the weight.

If it is required to measure the density of an alternative liquid then the pycnometer must be cleaned and dried before repeating the procedure.

Results

Dry weight of pycnometer $M_P =$ gm

Filled weight of pycnometer $M_{P+L} =$ gm

Weight increase due to liquid $M_L = M_{P+L} - M_P$ gm

Volume of pycnometer $V_P =$ 50 mL

$$\rho_L = \frac{M_L}{V_P} = \frac{(M_{P+L} - M_P)}{V_P} \quad \text{kg/m}^3$$

Density of liquid

Anexo II.
Ficha técnica de la fructosa

Foodchem®

Let Chinese Food Ingredients Answer Global Food Industry

CERTIFICATE OF ANALYSIS

PRODUCT NAME:	FRUCTOSE CRYSTAL		
BATCH NUMBER:	21021492	NET WEIGHT:	3000KGS
PRODUCTION DATE:	FEB.14,2022	EXPIRATION DATE:	FEB.13,2024
INVOICE NUMBER:	BFC1210406003		
ITEMS	STANDARD		TESTING RESULTS
APPEARANCE	White crystals or crystalline powder		Eligible
ODOR	Has unique aroma of crystalline fructose		Eligible
FRUCTOSE (OF DRY MATTERS)(%)	≥99.5		99.63
GLUCOSE(%)	≤0.5		0.34
LOSS ON DRYING (%)	≤0.2		0.08
5-HMF (OF DRY MATTERS)(%)	≤0.005		0.0013
CHLORIDE(%)	≤0.01		<0.01
WATER INSOLUBLE IMPURITIES(MG/KG)	≤20		8.5
SULPHATE ASH(%)	≤0.05		0.033
LEAD (MG/KG)	≤0.50		Eligible
ARSENIC(MG/KG)	≤1.00		Eligible
TOTAL BACTERIA COUNT(CFU/G)	≤100		<10
COLIFORMS(MPN/G)	≤30		<0.3
YEAST(CFU/G)	≤10		<10
MOLD(CFU/G)	≤10		<10
CONCLUSION:THE ABOVE PRODUCT CONFORMS TO STANDARD.			
STORAGE:STORE IN COOL, DRY PLACE .			

FOODCHEM INTERNATIONAL COMPANY

4100 20th AVENUE WEST, SUITE 200, CALGARY, ALBERTA, CANADA

4100 20th AVENUE WEST, SUITE 200, CALGARY, ALBERTA, CANADA T2C 1Y8

TEL: (403) 243-8888 FAX: (403) 243-8889 E-MAIL: info@foodchem.com Website: www.foodchem.com

Our ingredients, your success!

Anexo III.
Resultado de los tratamientos

Run	Factor A (presión bar)	Factor B (caudal L/h)	Solución fructosa (ml)	Agua agregada (ml)	Volumen inicial (ml)	Concentra do (ml)	Condensa do (ml)	Volumen final (ml)	Diferenci a volumétri ca (ml)	Tiempo total (min)	°Bx
1	0,4	10	3500	1000	4500	666	3610	4276	224	1588	4,5
2	0,2	12	3500	1250	4750	2124	2400	4524	226	1430	2,7
3	0,6	8	3500	1000	4500	320	3885	4205	295	1910	9,2
4	0,4	12,83	3500	1000	4500	1012	3230	4242	258	1351	2,6
5	0,4	10	3500	1000	4500	508	3785	4293	207	1757	4,2
6	0,4	10	3500	1000	4500	590	3560	4150	350	1653	4,8
7	0,6	12	3500	1000	4500	1185	3030	4215	285	1272	4,1
8	0,68	10	3500	1000	4500	415	3855	4270	230	1740	8,1

9	0,4	10	3500	1000	4500	630	3600	4230	270	1650	4,7
10	0,4	10	3500	1000	4500	708	3540	4248	252	1649	4,5
11	0,4	7,17	3500	1000	4500	482	3885	4367	133	2309	8,5
12	0,2	8	3500	1000	4500	1028	3115	4143	357	2053	4,3
13	0,11	10	3500	1000	4500	1980	2185	4165	335	1568	2,2

**Anexo IV.
Estandarización de solución de fructosa**



Figura 19. Estandarización de solución de fructosa

**Anexo V.
Elaboración curva patrón de fructosa**



Figura 20. Elaboración curva patrón de fructosa

Anexo V.
Concentración de sirope de fructosa



Figura 21. Concentración de sirope de fructosa

Anexo VI.
Cuantificación jarabe de fructosa concentrado



Figura 22. Cuantificación jarabe de fructosa concentrado

Anexo VII.
Lectura °Bx de jarabe de fructosa



Figura 23. Lectura °Bx de jarabe de fructosa