



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA FUERZA GRAVITACIONAL EN EL PROCESO DE
ÓSMOSIS DIRECTA CON SOLUCIONES DE ÁCIDO BENZOICO, SACAROSA, CLORURO
DE SODIO Y SULFATO DE SODIO**

Luis Arnoldo Zarat Galán

Asesorado por el Ing. César Ariel Villela Rodas

Coasesorado por la Inga. Ana Rufina Herrera Soto

Guatemala, agosto de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA FUERZA GRAVITACIONAL EN EL PROCESO DE
ÓSMOSIS DIRECTA CON SOLUCIONES DE ÁCIDO BENZOICO, SACAROSA, CLORURO
DE SODIO Y SULFATO DE SODIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS ARNOLDO ZARAT GALÁN

ASESORADO POR EL ING. CÉSAR ARIEL VILLELA RODAS
COASESORADO POR LA INGA. ANA RUFINA HERRERA SOTO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Sergio Alejandro Recinos
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Ordoñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA FUERZA GRAVITACIONAL EN EL PROCESO DE ÓSMOSIS DIRECTA CON SOLUCIONES DE ÁCIDO BENZOICO, SACAROSA, CLORURO DE SODIO Y SULFATO DE SODIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 31 de mayo de 2018.

Luis Arnoldo Zarat Galán

Guatemala, 8 de febrero de 2021.

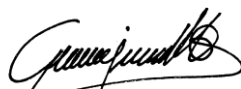
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería -USAC-

Respetable Ingeniero,

Esperando que tenga éxitos en sus actividades laborales, por este medio hago de su conocimiento que en mi calidad de asesor del trabajo de graduación del estudiante **LUIS ARNOLDO ZARAT GALÁN**, quien se identifica con **registro académico No. 201314194** y **carné No. 2311877690805** de la carrera de **INGENIERÍA QUÍMICA**, he revisado el informe final del trabajo de graduación con el título **“EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA FUERZA GRAVITACIONAL EN EL PROCESO DE ÓSMOSIS DIRECTA CON SOLUCIONES DE ÁCIDO BENZOICO, SACAROSA, CLORURO DE SODIO Y SULFATO DE SODIO”**. Por lo que considero que el presente trabajo cumple con los requisitos necesarios para ser presentado ante las autoridades respectivas de la Escuela de Ingeniería Química y lo doy por aprobado.

Por lo tanto, dejo a su consideración que el estudiante continúe con los trámites pertinentes para la defensa y aprobación de este ante la terna evaluadora y su persona. Sin otro particular, agradezco su amable deferencia a la presente.

Atentamente,



Ing. César Ariel Villela Rodas
ASESOR
Colegiado No. 1175

Ing. César Ariel Villela Rodas
INGENIERO QUIMICO
Colegiado No. 1,175

Guatemala, 8 de febrero de 2021.

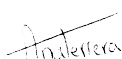
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería -USAC-

Respetable Ingeniero,

Esperando que tenga éxitos en sus actividades laborales, por este medio hago de su conocimiento que en mi calidad de asesora del trabajo de graduación del estudiante **LUIS ARNOLDO ZARAT GALÁN**, quien se identifica con **registro académico No. 201314194** y **carné No. 2311877690805** de la carrera de **INGENIERÍA QUÍMICA**, he revisado el informe final del trabajo de graduación con el título **“EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA FUERZA GRAVITACIONAL EN EL PROCESO DE ÓSMOSIS DIRECTA CON SOLUCIONES DE ÁCIDO BENZOICO, SACAROSA, CLORURO DE SODIO Y SULFATO DE SODIO”**. Por lo que considero que el presente trabajo cumple con los requisitos necesarios para ser presentado ante las autoridades respectivas de la Escuela de Ingeniería Química y lo doy por aprobado.

Por lo tanto, dejo a su consideración que el estudiante continúe con los trámites pertinentes para la defensa y aprobación de este ante la terna evaluadora y su persona. Sin otro particular, agradezco su amable deferencia a la presente.

Atentamente,



ANA RUFINA HERRERA SOTO
INGENIERA QUIMICA
COL. 2151

Inga. Ana Rufina Herrera Soto
CO-ASESORA
Colegiado No. 2151



Guatemala, 13 de abril de 2021.
Ref. EIQ.TG-IF.013.2021.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **021-2018**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Luis Arnoldo Zarat Galán**.
Identificado con número de carné: **2311877690805**.
Identificado con registro académico: **201314194**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA FUERZA GRAVITACIONAL EN EL PROCESO DE ÓSMOSIS DIRECTA CON SOLUCIONES DE ÁCIDO BENZOICO, SACAROSA, CLORURO DE SODIO Y SULFATO DE SODIO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

César Ariel Villela Rodas, profesional de la Ingeniería Química
Ana Rufina Herrera Soto, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ana Gloria Montes Peña
INGENIERA QUÍMICA
COLEGIADO No. 2,185

Ana Gloria Montes Peña profesional
de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo




Guatemala, 17 de agosto de 2021.
Ref. EIQ.157.2021

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA FUERZA GRAVITACIONAL EN EL PROCESO DE ÓSMOSIS DIRECTA CON SOLUCIONES DE ÁCIDO BENZOICO, SACAROSA, CLORURO DE SODIO Y SULFATO DE SODIO** del(la) estudiante Luis Arnoldo Zarat Galán, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

“Id y Enseñad a Todos”

Ing. Williams G. Alvarez Mejia, I.I.Q., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Cc. Archivo
WGAM/wgam



Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939

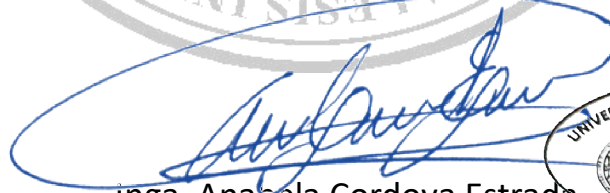


**NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA**

DTG. 357-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA FUERZA GRAVITACIONAL EN EL PROCESO DE ÓSMOSIS DIRECTA CON SOLUCIONES DE ÁCIDO BENZOICO, SACAROSA, CLORURO DE SODIO Y SULFATO DE SODIO**, presentado por el estudiante universitario: **Luis Arnoldo Zarat Galán**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, agosto de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser la luz que guía mi camino.
Mis padres	Héctor Zarat y Magaly Galán. Por apoyarme incondicionalmente en todo momento.
Mi hermano	Osnoel Zarat. Por siempre ser un ejemplo a seguir.
Mi hermana	Katherine Zarat. Por haber sido una gran fuente de inspiración para seguir adelante.
Mis amigos	César Méndez, José Marroquín, Vidal Mactzul, Víctor Morales, Sofía Chajón, Henry Marroquín y Nehoca Godínez. Por su invaluable amistad. En especial a María Alejandra de León, por ser un gran apoyo.
Área de Fisicoquímica	Al doctor Adolfo Gramajo y los ingenieros César Villela, William Fagiani, Ana Herrera, Mayra Quemé, Julio Vargas y Helen Escobar. Por ser personas excepcionales quienes me ayudaron a crecer como persona y como profesional.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por la oportunidad que me brindó para continuar con mi formación académica.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme la oportunidad y los conocimientos necesarios para mi formación como ingeniero.
Mi asesor	Ing. César Villela. Por su apoyo durante la realización de este trabajo.
Mi coasesora	Inga. Ana Herrera. Por brindarme su ayuda y conocimientos durante la realización de este proyecto.
Área de Fisicoquímica	Por brindarme los recursos necesarios para llevar a cabo mi trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Presión hidrostática	3
2.2. Propiedades coligativas.....	3
2.3. Ósmosis.....	3
2.3.1. Presión osmótica	4
2.3.2. Membrana para ósmosis	6
2.3.2.1. Tamaño del poro de la membrana.....	6
2.4. Modelo del tipo de difusión	7
2.4.1. Procesos relacionados con la ósmosis.....	8
2.4.2. Polarización de la concentración en procesos de ósmosis	10
2.4.3. Factor de Van't Hoff.....	11
3. DISEÑO METODOLÓGICO	13
3.1. Variables.....	13

3.1.1.	Variables independientes	13
3.1.2.	Variables dependientes	13
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	14
3.3.	Recursos humanos disponibles	14
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	14
3.5.	Equipo.....	15
3.6.	Cristalería.....	15
3.7.	Reactivos	16
3.8.	Técnica cuantitativa.....	16
3.8.1.	Medición de la masa utilizando un picnómetro.....	16
3.8.2.	Medición de la presión osmótica experimental.....	17
3.8.3.	Medición de la concentración con el refractómetro	18
3.9.	Recolección y ordenamiento de la información.....	19
3.10.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	20
3.11.	Análisis estadístico.....	47
3.11.1.	Media aritmética	47
3.11.2.	Correlación lineal.....	48
3.11.3.	Comparación de medias apareadas.....	49
3.11.4.	Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo	50
4.	RESULTADOS.....	53
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	75

CONCLUSIONES	81
RECOMENDACIONES.....	83
BIBLIOGRAFÍA.....	85
APÉNDICES.....	89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Dispositivo para determinar la presión osmótica	4
2.	Representación esquemática del tamaño nominal del poro y el mejor modelo teórico para el proceso de separación de membrana.....	7
3.	Dirección y magnitud del flujo específico del solvente en función de la presión hidrostática	10
4.	Posiciones en las que fue colocado el equipo de ósmosis durante el experimento: a) vertical, b) horizontal con la solución en la cámara inferior, c) horizontal con la solución en la cámara superior.....	18
5.	Comparación del promedio del flujo de agua a través de la membrana para la posición vertical y la posición horizontal con la solución en la cámara superior	52
6.	Primera prueba de ósmosis directa realizada, utilizando cloruro de sodio, en posición vertical	53
7.	Segunda prueba de ósmosis directa realizada, utilizando cloruro de sodio, en posición vertical	54
8.	Tercera prueba de ósmosis directa realizada, utilizando cloruro de sodio, en posición vertical	55
9.	Cuarta prueba de ósmosis directa realizada, utilizando cloruro de sodio, en posición vertical	56
10.	Quinta prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sulfato de sodio, en posición vertical	57

11.	Sexta prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición vertical	58
12.	Flujo de agua a través de la membrana en la sexta prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición vertical.....	59
13.	Séptima prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición vertical	60
14.	Flujo de agua a través de la membrana en la séptima prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición vertical	61
15.	Octava prueba de ósmosis directa realizada, usando sacarosa, en posición vertical	62
16.	Flujo de agua a través de la membrana en la octava prueba de ósmosis directa realizada, empleando sacarosa, en posición vertical	63
17.	Novena prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior	64
18.	Flujo de agua a través de la membrana en la novena prueba de ósmosis directa realizada, usando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior.....	65
19.	Décima prueba de ósmosis directa realizada, empleando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior	66
20.	Flujo de agua a través de la membrana en la décima prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior.....	67
21.	Décima primera prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior	68
22.	Flujo de agua a través de la membrana en la décima primera prueba de ósmosis directa realizada, empleando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior	69

23.	Forma de colocar la membrana dentro del <i>beaker</i> en la práctica de ósmosis propuesta	74
-----	---	----

TABLAS

I.	Valores para el factor de Van't Hoff y solubilidad de los solutos utilizados en el experimento	12
II.	Constantes utilizadas para el cálculo de las curvas de calibración	20
III.	Datos para realizar la curva de calibración de la sacarosa	20
IV.	Datos para realizar la curva de calibración del cloruro de sodio	21
V.	Datos para realizar la curva de calibración del sulfato de sodio.....	22
VI.	Datos para realizar la curva de calibración del ácido benzoico.....	23
VII.	Datos de concentración de la curva de calibración de la sacarosa.....	24
VIII.	Datos de concentración de la curva de calibración del cloruro de sodio.....	25
IX.	Datos de concentración de la curva de calibración del sulfato de sodio.....	25
X.	Datos de la primera prueba de ósmosis directa realizada, utilizando cloruro de sodio, en posición vertical	26
XI.	Datos de la segunda prueba de ósmosis directa realizada, utilizando cloruro de sodio, en posición vertical	28
XII.	Datos de la tercera prueba de ósmosis directa realizada, utilizando cloruro de sodio, en posición vertical	30
XIII.	Datos de la cuarta prueba de ósmosis directa realizada, utilizando cloruro de sodio, en posición vertical	33
XIV.	Datos de la quinta prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sulfato de sodio, en posición vertical.....	35

XV.	Datos de la sexta prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición vertical.....	36
XVI.	Datos de la séptima prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición vertical.....	39
XVII.	Datos de la octava prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición vertical.....	40
XVIII.	Datos de concentración de la curva de calibración del refractómetro...	41
XIX.	Datos de la novena prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior.....	42
XX.	Datos de la décima prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior.....	43
XXI.	Datos de la décima primera prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior.....	44
XXII.	Datos de la décima segunda prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior.....	45
XXIII.	Datos de la décimo tercera prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara inferior.....	46
XXIV.	Datos de la décimo cuarta prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara inferior.....	46
XXV.	Datos de concentración de las pruebas realizadas con sacarosa al inicio y al final del proceso.....	47
XXVI.	Análisis de coeficiente de correlación de Pearson para las curvas de calibración.....	48

XXVII.	Comparación de medias apareadas para la concentración antes y después del proceso de ósmosis, para las pruebas realizadas con sacarosa.....	50
XXVIII.	Análisis de varianza de dos factores, posición y tiempo, con varias muestras por grupo sobre el flujo de agua a través de la membrana ..	51
XXIX.	Datos de presión osmótica de las pruebas realizadas con sacarosa al inicio y al final del proceso.....	70
XXX.	Práctica de ósmosis diseñada para el Laboratorio de Fisicoquímica 1.....	71

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
h	Altura
A	Área
r	Coefficiente de correlación de Pearson
R	Constante de los gases ideales
A_w	Constante de permeabilidad de la membrana al solvente
ρ	Densidad
i	Factor de Van't Hoff
N_w	Flujo específico de solvente
x_i	Fracción molar de la sustancia 'i'
H₁	Hipótesis alternativa
H₀	Hipótesis nula
m	Masa
n	Moles
N	Número de repeticiones
P	Presión
π	Presión osmótica
T	Temperatura
t	Tiempo
V	Volumen

GLOSARIO

Concentración	Razón en la que existe un componente dentro de una mezcla respecto a la totalidad de esta.
Conductímetro	Dispositivo que mide la conductividad eléctrica de una solución. Algunos modelos pueden determinar la cantidad de sólidos disueltos.
Grados Brix	Forma de expresar la concentración en peso de azúcar en una solución acuosa.
Ósmosis	Flujo espontáneo de moléculas de solvente, a través de una membrana semipermeable, hacia una región con mayor concentración de soluto debido a la diferencia en los potenciales químicos.
Permeabilidad	Capacidad que tiene un material poroso para permitir el paso de un fluido.
Presión osmótica	Presión externa requerida que debe aplicarse a la región de mayor concentración, para detener el proceso de ósmosis.
Membrana	Es una barrera selectiva utilizada en procesos de separación.

Refractómetro	Instrumento que funciona por medio de la refracción de la luz y permite determinar la concentración de un soluto disuelto en una solución.
Solubilidad	Propiedad de un soluto de diluirse en un solvente.
Soluto	Sustancia que es disuelta por un solvente.
Solvente	Sustancia que disuelve a un soluto.

RESUMEN

En el trabajo de investigación se evaluó el proceso de ósmosis directa a escala laboratorio con soluciones de ácido benzoico, cloruro de sodio, sulfato de sodio y sacarosa; como solvente se usó agua.

Para realizar el experimento se diseñó y construyó un equipo para ósmosis directa que permite cambiar la posición de las soluciones para poder evaluar el efecto de la fuerza gravitacional; Se utilizó una membrana semipermeable de celulosa regenerada. El diseño del equipo permitió realizar mediciones por medio de un manómetro diferencial expuesto a la atmósfera, con el fin de calcular la presión osmótica.

De los solutos empleados, el ácido benzoico fue descartado debido a su baja solubilidad en agua. La membrana utilizada no es impermeable a las sales de sodio, provocando que no existiera un diferencial de concentración suficiente entre ambos lados del equipo, por lo cual no se observó el proceso de ósmosis directa con estas soluciones. Sin embargo, la sacarosa también atravesaba la membrana durante los experimentos, lo cual afectó en la magnitud de dicha presión. En las pruebas realizadas con soluciones de sacarosa, se obtuvieron valores de presión osmótica en un rango de 4,4227 a 8,4052 kPa.

Con base en los datos experimentales observados, se concluyó que las diferencias en las concentraciones y presiones de las soluciones entre las posiciones utilizadas son atribuibles a la presión hidrostática ejercida por las soluciones. Dicha presión aumenta el potencial químico de la solución en la que actúa, lo que reduce la magnitud de la presión osmótica.

Por medio de un análisis estadístico, se determinó que la posición del equipo de ósmosis directa afecta significativamente al flujo de agua a través de la membrana.

Se diseñó una práctica que puede ser utilizada en los cursos impartidos por el área de Fisicoquímica, la cual toma en consideración los aspectos desarrollados con las pruebas realizadas de ósmosis directa.

OBJETIVOS

General

Evaluar el efecto de la fuerza gravitacional en el proceso de ósmosis directa, con soluciones de ácido benzoico, sacarosa, cloruro de sodio y sulfato de sodio, a condiciones de temperatura y presión ambientales.

Específicos

1. Determinar el flujo de agua a través de una membrana en función de la presión osmótica para soluciones de ácido benzoico, sacarosa, cloruro de sodio y sulfato de sodio.
2. Comparar los modelos determinados experimentalmente para la presión osmótica, con los modelos de Van't Hoff y de Gibbs.
3. Realizar un análisis estadístico del efecto de la posición de las soluciones en un proceso de ósmosis, sobre el flujo de agua a través de la membrana para soluciones de ácido benzoico, sacarosa, cloruro de sodio y sulfato de sodio.
4. Diseñar una práctica de laboratorio para el área de Físicoquímica sobre la presión osmótica y el efecto de la gravedad.

HIPÓTESIS

La fuerza gravitacional provoca una reducción del flujo de agua a través de la membrana durante el proceso de ósmosis.

Hipótesis nula:

La ubicación de las soluciones en un proceso de ósmosis no provoca un efecto significativo en el flujo de agua a través de la membrana.

Hipótesis alternativa:

La ubicación de las soluciones en un proceso de ósmosis provoca un efecto significativo en el flujo de agua a través de la membrana.

INTRODUCCIÓN

La ósmosis es un fenómeno que puede ser observado en una diversidad de procesos biológicos, y que ha sido replicado para mejorar procesos industriales o crear aplicaciones médicas. En la actualidad se desarrollan muchas investigaciones con el fin de optimizar dichas aplicaciones; no obstante, no se han realizado muchos estudios sobre el efecto de la fuerza gravitacional en el proceso de ósmosis.

Los solutos tienden a ser más pesados que el solvente, lo que implica que la fuerza gravitacional tiene una mayor influencia sobre el movimiento de estas partículas.

El presente informe tiene como objetivo evaluar si la diferencia en la posición de las soluciones tiene un impacto significativo sobre el proceso de ósmosis, y así interpretar, de mejor manera, las variables que afectan al proceso.

Debido a la importancia de la ósmosis, se desea despertar el interés de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química en las propiedades coligativas por medio de una experiencia de laboratorio, que incorpore los elementos principales de este trabajo de investigación.

1. ANTECEDENTES

El fisiólogo Henri Dutochet construyó el primer osmómetro en 1828, un dispositivo capaz de medir la presión osmótica. En 1866 Jacobus Van't Hoff presentó una teoría para explicar el fenómeno de la ósmosis, en donde comparó la presión osmótica con aquella ejercida por un gas. Con el desarrollo de la teoría de las disoluciones a inicios del siglo XX la presión osmótica fue definida como una propiedad coligativa.

En 1959, Charles Reid desarrolló una membrana de acetato de celulosa, un tipo de membrana que limita el paso de sacarosa, cloruro de sodio y sulfato de sodio en disoluciones acuosas.

En 1971, P. F. Scholander, del Instituto de Oceanografía de la Universidad de California, y M. Perez, del *Instituto De Pesquisas Da Marinha* de Brasil, realizaron experimentos utilizando suspensiones coloidales de aceite y óxido de hierro en equilibrio, para evaluar el efecto de la fuerza de empuje sobre la presión osmótica. Concluyeron que la fuerza provocada por las partículas en suspensión es aditiva a la presión osmótica y, por tanto, la presión osmótica siempre está relacionada únicamente con la presión del soluto; estas actúan contra la superficie libre y no tiene una relación directa con las fuerzas que ejercen sobre la membrana.

En 1981, una caracterización de las fuerzas impulsoras y la dirección de los flujos a través de una membrana durante un proceso de ósmosis fue realizado por K. L. Lee, investigador para *Bend Research Inc*; mostró que la polarización de la membrana reduce el flujo de agua en condiciones de ósmosis por presión

retardada. Como consecuencia, los procesos de ósmosis normalmente son llevados a cabo en condiciones de agitación constante, para reducir este efecto. La turbulencia provocada en las soluciones no permite observar el efecto de la fuerza gravitacional en el proceso de ósmosis.

En 2006, Cath, Childress y Elimelech publicaron un estado del arte sobre el proceso de ósmosis directa; anotaron sus principios físicos y las aplicaciones que puede tener en la industria.

En 2009, se realizó un análisis sobre la influencia de la presión osmótica de soluciones salinas y azucaradas, en procesos de ósmosis inversa en la industria de alimentos, llevada a cabo por Beatriz Cancino, Lila Ulloa y Carolina Astudillo. Se determinó la presión osmótica de un conjunto de soluciones con concentraciones de 0,5, 0,8, 1,0, 1,5, 2,0 y 5,0 en porcentaje de peso-volumen. Estos valores fueron comparados con los determinados por las ecuaciones de Gibbs y Van't Hoff. Se concluyó que ninguno de estos modelos predice adecuadamente la presión osmótica de las soluciones.¹

¹ CANCINO, Beatriz; ULLOA, Lila; ASTUDILLO Carolina. *Presión Osmótica de Soluciones Salinas y Azucaradas: su Influencia en Procesos de Ósmosis Inversa en la Industria de Alimentos*. p. 58.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Presión hidrostática

La presión hidrostática es la presión ejercida por un fluido en equilibrio mecánico, en un punto determinado del fluido debido a su peso. Esta presión incrementa en proporción a la profundidad respecto a la superficie del fluido.²

$$P = \rho gh$$

(Ecuación n.º 1)

2.2. Propiedades coligativas

Las disoluciones que contienen un soluto no volátil, como la sacarosa o el cloruro de sodio, junto con un solvente volátil, como el agua, presentan una disminución del potencial químico de la solución con respecto al del solvente puro. Este cambio en el potencial químico da origen a cuatro fenómenos denominados propiedades coligativas. Una de estas propiedades es la presión osmótica. Las propiedades coligativas dependen de la cantidad de moléculas de soluto presente en solución, y no de la naturaleza del soluto.³

2.3. Ósmosis

Cuando se colocan en contacto dos soluciones, compuestas de un solvente volátil y un soluto no volátil, por medio de una membrana semipermeable (una

² STREETER, Victor; WYLEI, Benjamin. *Mecánica de los fluidos*. p. 13.

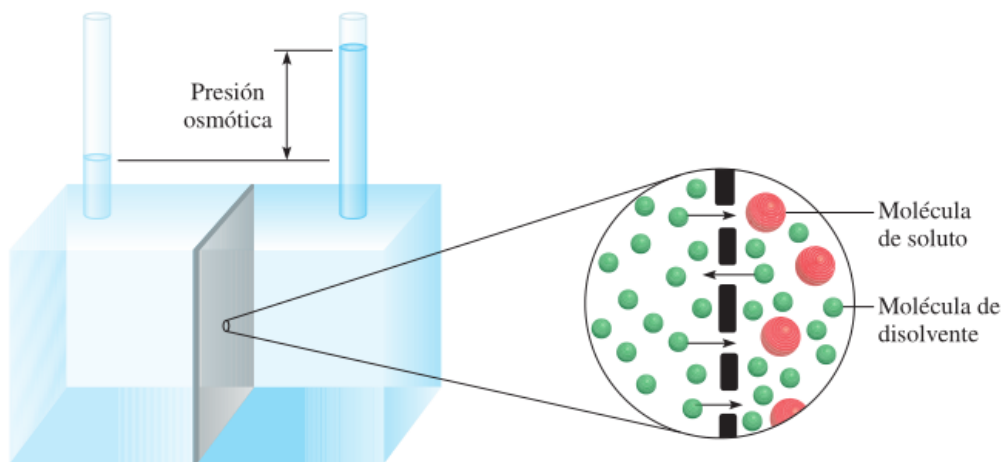
³ LEVINE, Ira. *Principios de Fisicoquímica*. p. 332.

membrana que restringe el paso de una sustancia a través de ella y permite el paso de la otra), ocurre un paso espontáneo de solvente desde la solución de menor concentración hacia la solución de mayor concentración, este es el proceso de ósmosis.⁴

2.3.1. Presión osmótica

La presión osmótica es la presión necesaria que debe ejercerse en la solución concentrada, para detener el flujo de solvente a través de la membrana, es decir, para detener el proceso de ósmosis.⁵ También, puede definirse como la presión necesaria que debe ejercerse para que el potencial químico de la solución de menor concentración sea igual al potencial químico de la solución de mayor concentración.⁶

Figura 1. **Dispositivo para determinar la presión osmótica**



Fuente: CHANG, Raymond. *Química*. p. 534.

⁴ LEVINE, Ira. *Principios de Fisicoquímica*. p. 336.

⁵ CHANG, Raymond. *Química*. p. 534.

⁶ LEVINE, Ira. *Principios de Fisicoquímica*. p. 332.

La presión osmótica puede medirse directamente a partir de la diferencia en los niveles finales del fluido.⁷ En 1866, Van't Hoff demostró que la presión osmótica presenta un comportamiento semejante a la presión ejercida por un gas ideal. Este es el modelo de Van't Hoff para la presión osmótica.⁸

$$\pi = \frac{n_B}{V_A} RT$$

(Ecuación n.º 2)

Donde:

- π = presión osmótica.
- n_B = Moles de soluto.
- V_A = Volumen de solvente.
- R = Constante universal de los gases ideales.
- T = Temperatura.

Willard Gibbs desarrolló un modelo para la presión osmótica con ayuda de la teoría de las disoluciones. Esta parte de la condición de equilibrio, donde se cumple que el potencial químico del solvente puro es igual al potencial químico de la solución.⁹

$$\pi = - \frac{RT}{V_A} \ln x_A$$

(Ecuación n.º 3)

Donde:

- π = presión osmótica.
- x_A = fracción de solvente.

⁷ CHANG, Raymond. *Química*. p. 534.

⁸ ATKINS, Peter. *Química Física*. p. 182.

⁹ CANCINO, Beatriz; Ulloa, Lila. Y Astudillo Carolina. *Presión Osmótica de Soluciones Salinas y Azucaradas: su Influencia en Procesos de Ósmosis Inversa en la Industria de Alimentos*. p. 58.

- V_A = Volumen de solvente.
- R = Constante universal de los gases ideales.
- T = Temperatura.

2.3.2. Membrana para ósmosis

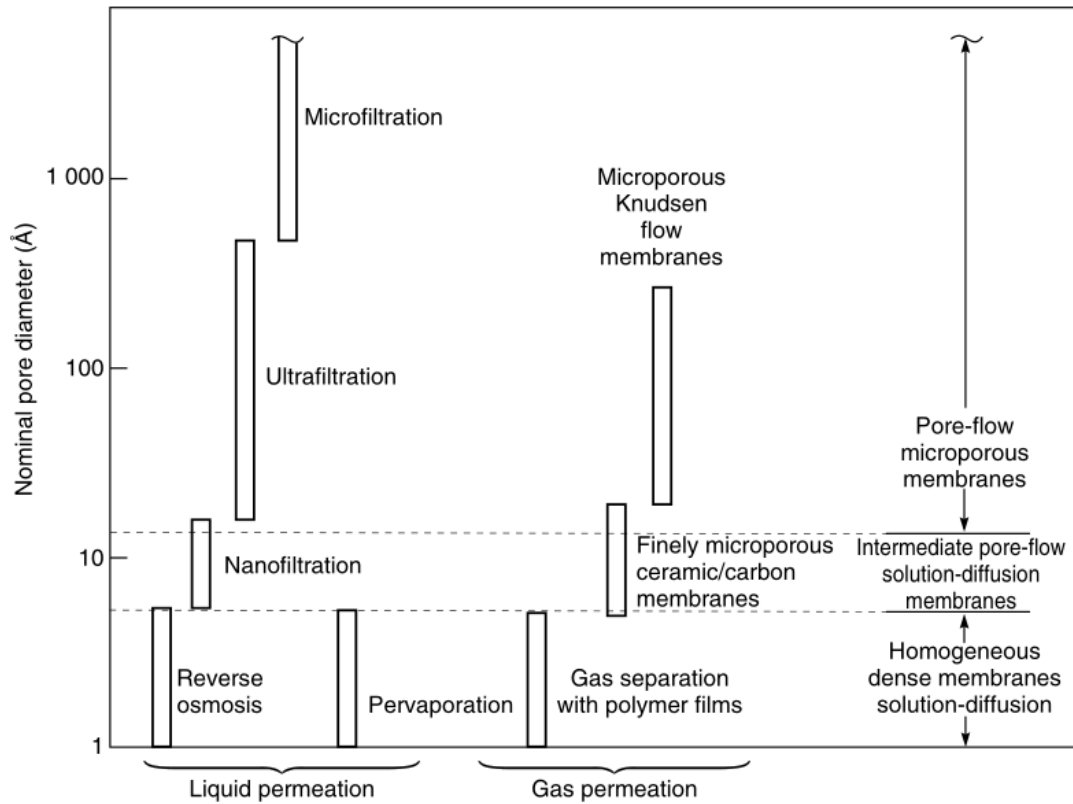
El propósito de la membrana durante el proceso de ósmosis es permitir el paso de la especie y restringir el paso de la otra, a través de ella. Una de las membranas más importantes en los procesos de ósmosis es la de acetato de celulosa. Este tipo de membrana excluye eficientemente a la sacarosa, cloruro de sodio y sulfato de sodio en soluciones acuosas.¹⁰

2.3.2.1. Tamaño del poro de la membrana

El tamaño del poro de la membrana también es un factor para considerar en la selección de la membrana. El tamaño del poro permite estimar la capacidad de la membrana para restringir el paso del soluto de una cámara del equipo a la siguiente.

¹⁰ GEANKOPLIS, Christie. *Procesos de Transporte y Principios de Procesos de Separación*. p. 896.

Figura 2. Representación esquemática del tamaño nominal del poro y el mejor modelo teórico para el proceso de separación de membrana



Fuente: BAKER, Richard. *Membrane Technology and Applications*. p. 18.

2.4. Modelo del tipo de difusión

El proceso de ósmosis puede ser caracterizado por medio de un modelo de difusión,¹¹ de la siguiente manera:

$$N_w = A_w(\Delta P - \Delta \pi)$$

(Ecuación n.º 4)

¹¹ GEANKOPLIS, Christie. *Procesos de Transporte y Principios de Procesos de Separación*. p. 894.

Donde:

- π = presión osmótica.
- P = presión.
- N_w = flujo de solvente a través de la membrana.
- A_w = constante de permeabilidad de la membrana al solvente.

Si se conoce el área de la membrana, el cambio de masa del solvente y el tiempo transcurrido para que ocurra dicho cambio, puede determinarse el flujo específico de solvente.

$$N_w = \frac{\dot{m}_w}{A} = \frac{dm_w}{A dt} \approx \frac{\Delta m_w}{A \Delta t}$$

(Ecuación n.º 5)

Donde:

- m_w = masa de solvente.
- t = tiempo.
- N_w = flujo de solvente a través de la membrana.
- A = área.
- \dot{m}_w = flujo de solvente.

2.4.1. Procesos relacionados con la ósmosis

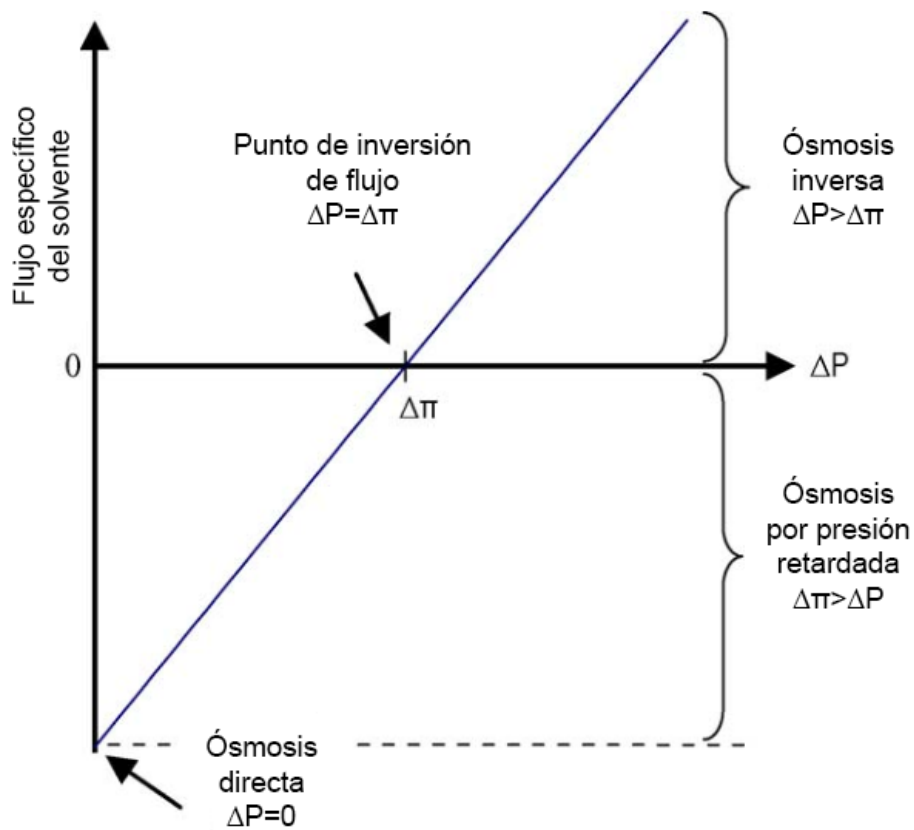
Según el valor de la presión hidrostática en la ecuación n.º 4, el proceso de ósmosis puede clasificarse en una de tres categorías: ósmosis directa, ósmosis por presión retardada y ósmosis inversa.¹²

¹² CATH, Tzahi, CHILDRESS, Amy; ELIMELECH, Menachem. *Forward osmosis: Principles, applications and recent developments*. p. 72.

En la ósmosis directa, no se aplica ninguna presión al sistema; existe un flujo de solvente desde la solución diluida hacia la solución concentrada. Al aplicar una presión sobre la solución concentrada menor a la presión osmótica, el flujo de solvente, desde la solución diluida, es reducido proporcionalmente a la presión aplicada; este proceso se conoce como ósmosis por presión retardada. Cuando la presión aplicada es igual a la presión osmótica, el flujo de solvente a través de la membrana se detiene; este se conoce como el punto de inversión de flujo. Si se aplica una presión mayor a la presión osmótica de la solución, el flujo de solvente se invierte; como consecuencia, el flujo de solvente ocurre desde la solución concentrada hacia la solución diluida; este proceso se conoce como ósmosis inversa.¹³

¹³ CATH, Tzahi, CHILDRESS, Amy; ELIMELECH, Menachem. *Forward osmosis: Principles, applications and recent developments*. p. 72.

Figura 3. **Dirección y magnitud del flujo específico del solvente en función de la presión hidrostática**



Fuente: CATH, Tzahi, CHILDRESS, Amy; ELIMELECH, Menachem. *Forward osmosis: Principles, applications and recent developments*. p. 72.

2.4.2. Polarización de la concentración en procesos de ósmosis

Debido al flujo de solvente que existe en la membrana la concentración del soluto es diferente en la superficie de la membrana que en el resto de la solución. En la ósmosis directa, el flujo de solvente que ocurre de la solución diluida a la

solución concentrada provoca que se forme una capa límite cerca de la membrana en donde la concentración de soluto es menor al resto de la solución. La diferencia de concentración provoca que la presión osmótica disminuya cerca de la membrana, lo que reduce el flujo de solvente. En soluciones muy diluidas este fenómeno es despreciable.¹⁴

2.4.3. Factor de Van't Hoff

Algunos solutos tienden a disociarse o asociarse cuando se encuentran en solución. Esto aumenta o disminuye la cantidad real de moléculas de soluto que se encuentran en la solución, y modifica la magnitud de las propiedades coligativas. Cuando un soluto se disocia en dos o más iones, la presión osmótica de la solución aumenta. Si el soluto se asocia con otras moléculas de soluto, la presión osmótica de la solución disminuye. El factor de Van't Hoff es la relación que existe entre una propiedad coligativa determinada con la cantidad de moléculas inicialmente disueltas en solución y la propiedad coligativa determinada con el número real de moléculas en solución.¹⁵

$$i = \frac{\pi}{\pi_{\text{teórico}}}$$

(Ecuación n.º 6)

Donde:

- i = factor de Van't Hoff.
- π = presión osmótica.
- $\pi_{\text{teórico}}$ = presión osmótica ideal.

¹⁴ GEANKOPLIS, Christie. *Procesos de Transporte y Principios de Procesos de Separación*. p. 899.

¹⁵ CHANG, Raymond. *Química*. p. 539.

Tabla I. **Valores para el factor de Van't Hoff y solubilidad de los solutos utilizados en el experimento**

Soluto	Factor de Van't Hoff	Solubilidad en 100 g de agua
Ácido benzoico	0,5	0,2 g
Sacarosa	1,0	179,0 g
Cloruro de sodio	2,0	35,7 g
Sulfato de sodio	3,0	19,4 g

Fuente: CHANG, Raymond. *Química*. p. 540.

Los valores mayores a 1 indican que ocurre una disociación y los valores menores a 1 indican que las moléculas se asocian.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

A continuación, se enlistan las variables dependientes e independientes.

3.1.1. Variables independientes

- Masa, medida en gramos (g)
- Volumen, medido en mililitros (ml)
- Tiempo, medido en segundos (s)
- Temperatura, medida en grados Celcius (°C)
- Presión, medida en kilopascales (kPa)

3.1.2. Variables dependientes

- Densidad, determinada en gramos sobre mililitros (g/ml)
- Presión osmótica, determinada en kilopascales (kPa)
- Flux de agua, determinado en kilogramos sobre segundo por metro al cuadrado ($\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$)

3.2. Delimitación del campo de estudio

La investigación realizada es de carácter cuantitativo, experimental y comparativo a escala laboratorio. Se utilizaron soluciones de ácido benzoico, sacarosa, cloruro de sodio y sulfato de sodio; se colocaron en contacto con agua por medio de una membrana de celulosa regenerada. Para el experimento, se determinó el cambio de flujo de agua a través de la membrana y el cambio de presión osmótica al hacer variar la concentración de los solutos.

Para determinar el cambio de presión osmótica, se utilizó el principio de funcionamiento del osmómetro de Dutrochet, para fabricar un equipo de laboratorio que permite medir la presión osmótica de las soluciones. La investigación fue llevada a cabo en el Laboratorio de Fisicoquímica, de la Escuela de Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Luis Arnoldo Zarat Galán.
- Asesor: Ing. César Ariel Villela Rodas.
- Coasesora: Inga. Ana Rufina Herrera Soto.

3.4. Recursos materiales disponibles

A continuación, se presentan los recursos empleados durante la realización de la fase experimental.

3.5. Equipo

- Computadora
- Cámara
- Balanza analítica
- Refractómetro
- Cronómetro
- Conductímetro
- Osmómetro

3.6. Cristalería

- Embudos
- Probeta de 100 ml
- *Beakers* de 250 ml
- *Beakers* de 600 ml
- Vidrios de reloj
- Agitadores de vidrio

- Jeringa desechable de 12 ml
- Picnómetro de 10 ml
- Termómetro de alcohol

3.7. Reactivos

- Ácido ascórbico
- Sacarosa
- Cloruro de sodio
- Sulfato de sodio
- Agua

3.8. Técnica cuantitativa

A continuación, se detalla el procedimiento realizado durante la fase experimental.

3.8.1. Medición de la masa utilizando un picnómetro

- Se verificó que el picnómetro se encuentre limpio y seco.
- Se midió el volumen de la solución.

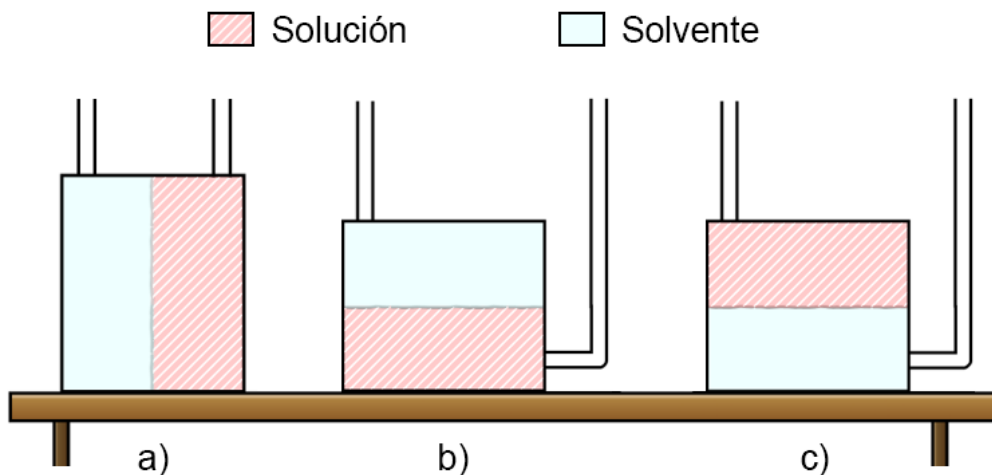
- Se midió la tara del picnómetro vacío.
- Se tomó una muestra de la solución con un volumen mayor al del picnómetro.
- Se llenó el picnómetro hasta su marca de aforo utilizando una pipeta.
- Se colocó el tapón del picnómetro.
- Se secó completamente el exterior del picnómetro.
- Se midió la masa del picnómetro que contenía la solución.
- Se removió el tapón del picnómetro y se regresó la muestra a la solución original.
- Se limpió y secó el picnómetro.

3.8.2. Medición de la presión osmótica experimental

- Se colocó la solución y el solvente en cada cámara del osmómetro.
- Se colocó el equipo en una de las posiciones de la 4.
- Se anotó la altura de la columna del líquido en la cámara que contiene a la solución.
- Se esperó un intervalo de tiempo.

- Se midió nuevamente la altura de la columna del líquido en solución.
- Se repitió el procedimiento hasta que la columna de líquido se mantuvo constante durante tres mediciones o más.

Figura 4. **Posiciones en las que fue colocado el equipo de ósmosis durante el experimento: a) vertical, b) horizontal con la solución en la cámara inferior, c) horizontal con la solución en la cámara superior**



Fuente: elaboración propia.

3.8.3. Medición de la concentración con el refractómetro

- Se calibró el refractómetro con una muestra de agua pura.
- Se tomó una muestra de la solución por medio de una jeringa desechable.
- Se colocó la muestra en el lector del refractómetro.
- Se anotó el valor de la concentración de la solución.

- Se limpió refractómetro con una muestra de agua pura.

3.9. Recolección y ordenamiento de la información

Para cada soluto utilizado, se realizó una curva de calibración de la densidad en función de la fracción molar. Se observó que el ácido benzoico tiene muy baja solubilidad en agua, pues presenta precipitación en las soluciones preparadas para realizar la curva de calibración. Dado que la balanza disponible en el laboratorio no cuenta la resolución adecuada para preparar soluciones a una menor concentración, se decidió descartar la utilización de este reactivo en el experimento.

Se continuó trabajando con sacarosa, cloruro de sodio y sulfato de sodio. Con estos reactivos, se realizaron las pruebas de medición de la presión osmótica con el equipo fabricado. Se obtuvieron resultados para el proceso de ósmosis del cloruro de sodio en posición vertical, los cuales demostraron que la membrana utilizada no es impermeable a esta sal. Al realizar la prueba con sulfato de sodio, se observó el mismo comportamiento, por lo cual ambos reactivos fueron descartados del resto de pruebas.

En la prueba de medición de la presión osmótica para la sacarosa, se observó el cambio en la altura del líquido de la solución, conforme transcurría el tiempo, en la posición vertical y en la posición horizontal, con la solución en la cámara superior. Sin embargo, en la posición horizontal con la solución en la cámara inferior, no se observó un cambio en la altura del líquido de la solución.

3.10. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación, se muestran tabulados los datos recolectados durante la experimentación.

Tabla II. **Constantes utilizadas para el cálculo de las curvas de calibración**

Constantes	
Tara <i>beaker</i>	50,218 g
Tara vidrio de reloj	17,352 g
Masa picnómetro	26,378 g
Masa molar de la sacarosa	342,297 g/mol
Masa molar del cloruro de sodio	58,443 g/mol
Masa molar del sulfato de sodio	142,040 g/mol
Masa molar de agua	18,015 g/mol
Volumen picnómetro	9,430 ml

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Datos para realizar la curva de calibración de la sacarosa**

Tipo de soluto: sacarosa			Temperatura: 25 °C			
Fecha: 2018-12-11			Hora: 13:50			
No.	Masa de soluto (g)	Masa de disolvente (g)	Masa de la solución y el picnómetro (g)			
			R1	R2	R3	Promedio
1	1,305	49,016	35,853	35,854	35,856	35,854
2	1,676	49,364	35,879	35,876	35,877	35,877
3	0,500	48,986	35,791	35,791	35,789	35,790
4	2,209	48,985	35,914	35,916	35,913	35,914
5	0,394	49,624	35,785	35,782	35,784	35,784

Continuación de la tabla III.

No.	Masa de soluto (g)	Masa de disolvente (g)	Masa de la solución y el picnómetro (g)			
			R1	R2	R3	Promedio
6	3,080	49,442	35,973	35,977	35,972	35,974
7	4,222	49,254	36,045	36,050	36,048	36,048
8	5,074	49,519	36,099	36,096	36,102	36,099
9	0,000	49,712	35,761	35,761	35,759	35,760
10	7,096	49,451	36,225	36,228	36,230	36,228
11	0,139	49,644	35,764	35,765	35,764	35,764
12	10,766	49,490	36,441	36,440	36,443	36,441
13	8,637	49,433	36,316	36,321	36,321	36,319
14	6,015	49,466	36,163	36,162	36,161	36,162
15	9,744	49,674	36,380	36,380	36,380	36,380

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Datos para realizar la curva de calibración del cloruro de sodio**

Tipo de soluto: cloruro de sodio			Temperatura: 25 °C			
Fecha: 2019-01-23			Hora: 10:15			
No.	Masa de soluto (g)	Masa de disolvente (g)	Masa de la solución y el picnómetro (g)			
			R1	R2	R3	Promedio
1	0,000	49,071	35,756	35,754	35,756	35,755
2	9,618	49,693	Precipita			-
3	4,629	49,217	36,355	36,356	36,358	36,356
4	6,000	49,504	Precipita			-
5	5,089	49,427	36,383	36,383	36,385	36,384
6	3,186	49,293	36,162	36,160	36,162	36,161
7	2,832	50,138	36,109	36,110	36,109	36,109

Continuación de la tabla IV.

No.	Masa de soluto (g)	Masa de disolvente (g)	Masa de la solución y el picnómetro (g)			
			R1	R2	R3	Promedio
8	0,559	49,306	35,828	35,827	35,829	35,828
9	1,630	48,945	35,969	35,969	35,969	35,969
10	4,139	49,920	36,267	36,265	36,265	36,266
11	1,082	49,393	35,895	35,896	35,897	35,896
12	2,243	49,795	36,040	36,040	36,040	36,040
13	3,545	49,257	36,203	36,201	36,202	36,202
14	0,336	48,992	35,798	35,795	35,799	35,797
15	2,141	49,770	36,026	36,029	36,029	36,028

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Datos para realizar la curva de calibración del sulfato de sodio**

Tipo de soluto: sulfato de sodio			Temperatura: 25 °C			
Fecha: 2019-06-04			Hora: 09:44			
No.	Masa de soluto (g)	Masa de disolvente (g)	Masa de la solución y el picnómetro (g)			
			R1	R2	R3	Promedio
1	0,000	49,753	35,750	35,754	35,754	35,753
2	6,757	49,677	Precipita			-
3	1,824	49,755	36,052	36,052	36,053	36,052
4	2,122	49,584	36,105	36,104	36,105	36,105
5	2,620	49,373	36,182	36,179	36,178	36,180
6	0,646	50,025	35,863	35,861	35,861	35,862
7	0,301	51,028	35,806	35,805	35,810	35,807
8	1,064	49,745	35,927	35,934	35,936	35,932
9	1,390	48,938	35,989	35,992	35,992	35,991
10	1,228	49,203	35,958	35,958	35,960	35,959

Continuación de la tabla V.

No.	Masa de soluto (g)	Masa de disolvente (g)	Masa de la solución y el picnómetro (g)			
			R1	R2	R3	Promedio
11	0,177	49,886	35,783	35,783	35,785	35,784
12	0,825	48,982	35,892	35,892	35,894	35,893
13	1,593	49,102	36,019	36,018	36,019	36,019
14	4,352	49,254	Precipita			-
15	2,352	49,875	36,134	36,131	36,135	36,133

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Datos para realizar la curva de calibración del ácido benzoico**

Tipo de soluto: del ácido benzoico			Temperatura: 25 °C			
Fecha: 2018-08-13			Hora: 14:00			
No.	Masa de soluto (g)	Masa de disolvente (g)	Masa de la solución y el picnómetro (g)			
			R1	R2	R3	Promedio
1	0	9,379	9,379	9,387	9,383	9,383
2	0,398	50,316	Precipita			-
3	0,223	49,696	Precipita			-
4	0,104	49,765	Precipita			-
5	0,054	49,614	Precipita			-
6	0,033	49,462	Precipita			-
7	0,016	49,228	Precipita			-
8	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-

Continuación de la tabla VI.

No.	Masa de soluto (g)	Masa de disolvente (g)	Masa de la solución y el picnómetro (g)			
			R1	R2	R3	Promedio
14	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Datos de concentración de la curva de calibración de la sacarosa**

No.	Molalidad de la solución (mol/kg)	Grados Brix	Fracción molar	Masa de la solución (g)	Densidad de la solución (g/ml)
1	0,07778	2,59335	0,00140	9,476	1,0049
2	0,09919	3,28370	0,00178	9,499	1,0073
3	0,02982	1,01039	0,00054	9,412	0,9981
4	0,13174	4,31496	0,00237	9,536	1,0112
5	0,02320	0,78772	0,00042	9,406	0,9974
6	0,18199	5,86421	0,00327	9,596	1,0175
7	0,25042	7,89513	0,00449	9,670	1,0254
8	0,29935	9,29423	0,00536	9,721	1,0308
9	0,00000	0,00000	0,00000	9,382	0,9949
10	0,41921	12,54885	0,00750	9,850	1,0444
11	0,00818	0,27921	0,00015	9,386	0,9953
12	0,63553	17,86710	0,01132	10,063	1,0671
13	0,51044	14,87343	0,00911	9,941	1,0542
14	0,35524	10,84155	0,00636	9,784	1,0375
15	0,57307	16,39907	0,01022	10,002	1,0606

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Datos de concentración de la curva de calibración del cloruro de sodio**

No.	Molalidad de la solución (mol/kg)	Fracción molar	Masa de la solución (g)	Densidad de la solución (g/ml)
1	0,00000	0,00000	9,377	0,9944
2	-	-	-	-
3	1,60931	0,02818	9,978	1,0581
4	-	-	-	-
5	1,76172	0,03076	10,006	1,0610
6	1,10593	0,01953	9,783	1,0374
7	0,96648	0,01711	9,731	1,0319
8	0,19399	0,00348	9,450	1,0021
9	0,56983	0,01016	9,591	1,0170
10	1,41869	0,02492	9,888	1,0485
11	0,37483	0,00671	9,518	1,0093
12	0,77075	0,01370	9,662	1,0245
13	1,23145	0,02170	9,824	1,0417
14	0,11735	0,00211	9,419	0,9988
15	0,73607	0,01309	9,650	1,0233

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Datos de concentración de la curva de calibración del sulfato de sodio**

No.	Molalidad de la solución (mol/kg)	Fracción molar	Masa de la solución (g)	Densidad de la solución (g/ml)
1	0,00000	0,00000	9,378	0,9944
2	-	-	-	-
3	0,25809	0,00463	9,677	1,0262

Continuación de la tabla IX.

No.	Molalidad de la solución (mol/kg)	Fracción molar	Masa de la solución (g)	Densidad de la solución (g/ml)
4	0,30130	0,00540	9,730	1,0317
5	0,37360	0,00669	9,805	1,0397
6	0,09091	0,00164	9,487	1,0060
7	0,04153	0,00075	9,432	1,0002
8	0,15058	0,00271	9,557	1,0134
9	0,19997	0,00359	9,616	1,0197
10	0,17571	0,00316	9,584	1,0162
11	0,02498	0,00045	9,409	0,9977
12	0,11858	0,00213	9,518	1,0092
13	0,22841	0,00410	9,644	1,0226
14	-	-	-	-
15	0,33200	0,00595	9,758	1,0348

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Datos de la primera prueba de ósmosis directa realizada, utilizando cloruro de sodio, en posición vertical**

Tiempo (min)	Concentración de la sal en el lado del solvente (ppm)	Concentración de la sal en solución (ppm)
0	630	2670
30	640	2650
100	657	2640
150	674	2650
180	673	2650
240	685	2640
300	699	2650

Continuación de la tabla X.

Tiempo (min)	Concentración de la sal en el lado del solvente (ppm)	Concentración de la sal en solución (ppm)
420	717	2580
480	729	2580
510	735	2540
540	732	2610
570	741	2570
600	752	2610
630	755	2600
660	760	2570
690	765	2590
720	770	2600
750	774	2600
780	783	2590
840	795	2590
870	801	2570
900	806	2580
930	812	2580
960	817	2570
1020	828	2580
1080	842	2560
1140	860	2580
1200	865	2580
1260	873	2580
1320	887	2570
1380	910	2560
1440	910	2560
1500	908	2590
3660	1310	2670

Continuación de la tabla X.

Tiempo (min)	Concentración de la sal en el lado del solvente (ppm)	Concentración de la sal en solución (ppm)
4710	1460	2620

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. Datos de la segunda prueba de ósmosis directa realizada, utilizando cloruro de sodio, en posición vertical

Tiempo (min)	Concentración de la sal en el lado del solvente (ppm)	Concentración de la sal en solución (ppm)
0,0	223	818
1,0	222	807
1,5	224	813
2,0	225	809
2,5	224	804
3,0	225	810
3,5	225	806
4,0	225	803
4,5	225	809
5,0	225	805
5,5	225	810
6,0	225	808
6,5	225	803
7,0	225	799
7,5	225	794
8,0	225	792
8,5	225	800
9,0	225	800

Continuación de la tabla XI.

Tiempo (min)	Concentración de la sal en el lado del solvente (ppm)	Concentración de la sal en solución (ppm)
9,5	225	798
10,0	225	798
10,5	225	787
11,0	225	795
11,5	225	793
12,0	225	792
12,5	225	800
13,5	225	795
14,0	225	793
14,5	224	793
15,0	224	791
15,5	224	791
16,0	224	791
17,0	225	785
17,5	225	783
18,0	226	785
19,0	226	779
19,5	227	775
20,0	227	786
21,0	230	786
21,5	228	784
22,0	229	782
23,0	230	784
23,5	231	793
24,0	232	791
25,5	232	789
26,0	233	789
27,0	234	787

Continuación de la tabla XI.

Tiempo (min)	Concentración de la sal en el lado del solvente (ppm)	Concentración de la sal en solución (ppm)
28	235	786
29	236	784
31	238	785
32	239	782
34	241	781
78	305	765
120	342	734
133	350	722
140	353	719
180	383	713

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Datos de la tercera prueba de ósmosis directa realizada, utilizando cloruro de sodio, en posición vertical

Tiempo (min)	Concentración de la sal en el lado del solvente (ppm)	Concentración de la sal en solución (ppm)
0,0	178	9250
2,5	179	9150
5,0	165	9060
7,5	178	9100
11,7	185	9210
12,5	185	9200
15,0	196	9140
17,5	219	9210
20,0	248	9200

Continuación de la tabla XII.

Tiempo (min)	Concentración de la sal en el lado del solvente (ppm)	Concentración de la sal en solución (ppm)
22,5	306	9100
25,0	360	9070
27,5	412	8900
30,0	482	8970
32,5	566	9030
35,0	632	8950
37,5	704	8930
40,0	775	8920
42,5	847	8870
45,0	911	8870
47,5	999	8870
50,0	1050	8770
52,5	1120	8740
55,0	1190	8730
57,5	1240	8740
60,0	1310	8700
62,5	1380	8650
65,0	1420	8640
67,5	1470	8610
70,0	1530	8560
72,5	1580	8470
75,0	1640	8410
77,5	1680	8390
80,0	1730	8350
82,5	1780	8310
85,0	1830	8320
87,5	1860	8230
90,0	1920	8270

Continuación de la tabla XII.

Tiempo (min)	Concentración de la sal en el lado del solvente (ppm)	Concentración de la sal en solución (ppm)
95,0	2000	8230
100,0	2080	8180
105,0	2160	8090
110,0	2220	8050
115,0	2300	7990
120,0	2370	7950
125,0	2430	7900
131,5	2510	7820
135,0	2560	7770
140,0	2620	7720
145,0	2670	7740
150,0	2720	7660
155,0	2800	7630
160,0	2820	7610
165,0	2870	7530
170,0	2920	7470
175,0	2950	7440
180,0	3010	7390
191,0	3060	7190
200,0	3120	7150
210,0	3170	7040
220,0	3230	6930
230,0	3280	6850
240,0	3330	6780
260,0	3450	6740
280,0	3480	6530
300,0	3530	6390
970,0	4090	5560

Continuación de la tabla XII.

Tiempo (min)	Concentración de la sal en el lado del solvente (ppm)	Concentración de la sal en solución (ppm)
1135,0	4060	5520

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Datos de la cuarta prueba de ósmosis directa realizada, utilizando cloruro de sodio, en posición vertical

Tiempo (min)	Concentración de la sal en el lado del solvente (ppm)	Concentración de la sal en solución (ppm)
0,0	347	5120
2,5	350	5120
5,0	351	5130
7,5	352	5130
10,5	354	5140
13,0	355	5150
15,0	356	5130
17,5	359	5140
20,0	364	5160
22,5	375	5150
25,3	418	5150
27,5	453	5140
31,5	530	5130
35,5	624	5120
38,3	692	5110
40,0	736	5090
42,5	796	5100
45,0	851	5090
47,5	916	5080

Continuación de la tabla XIII.

Tiempo (min)	Concentración de la sal en el lado del solvente (ppm)	Concentración de la sal en solución (ppm)
49,8	958	5020
53,0	1030	5010
57,5	1120	4990
60,5	1200	4980
62,5	1230	4960
65,5	1300	4950
70,0	1390	4940
75,0	1480	4900
78,0	1530	4890
80,0	1570	4880
83,5	1630	4860
87,5	1690	4850
91,0	1740	4830
96,0	1820	4520
100,0	1880	4520
107,0	1980	4480
115,5	2110	4470
125,0	2210	4390
130,5	2280	4390
136,3	2350	4360
140,0	2380	4350
145,0	2450	4360
153,0	2520	4320
158,0	2570	4380
163,0	2620	4390
179,8	2770	4430
185,0	2810	4400
190,5	2850	4400

Continuación de la tabla XIII.

Tiempo (min)	Concentración de la sal en el lado del solvente (ppm)	Concentración de la sal en solución (ppm)
196,5	2890	4410
200,0	2900	4370
206,0	2960	4350
211,2	2990	4330
217,7	3030	4320
223,0	3060	4300
255,0	2970	4240
265,0	3010	4260
275,0	3370	4220
281,0	3220	4180
286,0	3280	4200
295,0	3430	4180
788,0	4000	3730
811,5	4030	3740
820,0	4040	3720

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Datos de la quinta prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sulfato de sodio, en posición vertical

Tiempo (min)	Concentración de la sal en el lado del solvente (ppm)	Concentración de la sal en solución (ppm)
0,0	181	7650
2,5	182	7520
5,0	183	7310
7,5	185	7370
10,0	186	7480

Continuación de la tabla XIV.

Tiempo (min)	Concentración de la sal en el lado del solvente (ppm)	Concentración de la sal en solución (ppm)
13,7	188	6830
15,0	187	6870
20,5	201	6880
22,5	210	6510
25,0	239	6540
27,5	262	6730
30,0	298	6890
32,5	340	6870
35,5	393	6820
37,5	410	6680
41,2	492	6740
42,5	511	6670
45,0	562	6620
47,5	598	6630
50,0	616	6600
52,5	692	6630
55,0	723	6310
57,5	785	6600
60,0	832	6110

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Datos de la sexta prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición vertical**

Tiempo (min)	Altura de la columna de líquido (mm)	Flux de agua instantáneo (kg/(s*m ²))
--------------	--------------------------------------	---

Continuación de la tabla XV.

Tiempo (min)	Altura de la columna de líquido (mm)	Flux de agua instantáneo (kg/(s*m ²))
0,0	23	-
16,4	26	9,150E-06
31,3	26	0,000E+00
54,3	29	6,531E-06
73,9	29	0,000E+00
99,8	29	0,000E+00
118,5	29	0,000E+00
150,5	27	-3,129E-06
162,2	27	0,000E+00
187,5	27	0,000E+00
207,5	27	0,000E+00
217,3	27	0,000E+00
240,0	27	0,000E+00
720,0	59	3,338E-06
960,0	106	9,805E-06
1032,7	121	1,034E-05
1054,8	125	9,069E-06
1076,0	130	1,178E-05
1102,2	134	7,639E-06
1122,4	137	7,461E-06
1150,5	143	1,067E-05
1197,9	151	8,453E-06
1228,9	155	6,454E-06
1244,3	158	9,743E-06
1266,5	161	6,776E-06
1290,8	166	1,029E-05

Continuación de la tabla XV.

Tiempo (min)	Altura de la columna de líquido (mm)	Flux de agua instantáneo (kg/(s*m ²))
1310,7	169	7,548E-06
1350,8	173	5,005E-06
1370,0	175	5,202E-06
1505,0	190	5,563E-06
1562,4	194	3,487E-06
1598,7	197	4,138E-06
1618,0	198	2,599E-06
1639,8	200	4,593E-06
1667,4	201	1,814E-06
1729,9	206	4,007E-06
1762,3	207	1,545E-06
2303,6	224	1,573E-06
2380,8	228	2,594E-06
2442,8	229	8,071E-07
2470,3	231	3,646E-06
2505,1	232	1,437E-06
2571,2	234	1,516E-06
2603,8	235	1,533E-06
2674,7	237	1,414E-06
2714,3	238	1,265E-06
2774,5	240	1,662E-06
2824,7	242	1,994E-06
2883,5	244	1,704E-06
2955,1	246	1,399E-06
3031,2	248	1,316E-06
3122,6	251	1,644E-06
3571,0	257	6,699E-07

Continuación de la tabla XV.

Tiempo (min)	Altura de la columna de líquido (mm)	Flux de agua instantáneo (kg/(s*m ²))
3647,1	257	0,000E+00
3695,2	257	0,000E+00
3773,1	258	6,425E-07
3932,4	258	0,000E+00
4139,4	259	2,418E-07
4299,3	259	0,000E+00
4366,7	259	0,000E+00
4445,0	259	0,000E+00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Datos de la séptima prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición vertical**

Tiempo (min)	Altura de la columna de líquido (mm)	Flux de agua instantáneo (kg/(s*m ²))
0,0	35	
246,0	42	1,425E-06
305,8	46	3,347E-06
360,0	56	9,244E-06
639,7	103	8,414E-06
669,4	113	1,682E-05
1183,5	232	1,159E-05
1274,0	245	7,194E-06
1366,3	257	6,512E-06
1410,9	262	5,605E-06

Continuación de la tabla XVI.

Tiempo (min)	Altura de la columna de líquido (mm)	Flux de agua instantáneo (kg/(s*m ²))
1476,4	270	6,120E-06
1540,5	274	3,122E-06
1587,4	278	4,276E-06
1635,3	282	4,174E-06
1694,5	286	3,388E-06
1776,6	290	2,438E-06
1920,7	294	1,390E-06
2050,8	298	1,539E-06
2553,8	299	9,953E-08
2752,8	299	0,000E+00
3244,0	299	0,000E+00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Datos de la octava prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición vertical

Tiempo (min)	Altura de la columna de líquido (mm)	Flux de agua instantáneo (kg/(s*m ²))
0,0	33	
108,9	40	3,219E-06
174,6	40	0,000E+00
311,8	40	0,000E+00
430,5	44	1,687E-06
464,7	53	1,318E-05
1051,6	161	9,214E-06

Continuación de la tabla XVII.

Tiempo (min)	Altura de la columna de líquido (mm)	Flux de agua instantáneo (kg/(s*m ²))
1133,2	171	6,132E-06
1239,1	190	8,982E-06
1310,8	199	6,289E-06
1393,5	212	7,867E-06
1486,5	221	4,845E-06
1635,0	234	4,383E-06
1684,7	236	2,016E-06
1773,0	242	3,401E-06
1882,6	247	2,284E-06
1953,5	249	1,412E-06
2524,0	254	4,388E-07
2607,1	254	0,000E+00
2671,3	254	0,000E+00
2825,5	254	0,000E+00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Datos de concentración de la curva de calibración del refractómetro

Molaridad (mol/L)	Grados Brix (°B)			
	1	2	3	Promedio
0,702	12,1	12,2	12,2	12,2
0,000	0	0	0	0,0
0,351	5,5	5,6	5,6	5,6
0,234	3,9	3,9	3,9	3,9
0,175	3,1	3,1	3,1	3,1

Continuación de la tabla XVIII.

Molaridad (mol/L)	Grados Brix (°B)			
	1	2	3	Promedio
0,140	2,6	2,5	2,5	2,5
0,117	2,2	2,2	2,2	2,2
0,561	9,7	9,8	9,8	9,8
0,468	7,8	7,8	7,8	7,8
0,401	6,5	6,4	6,5	6,5
0,281	4,7	4,7	4,7	4,7

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. Datos de la novena prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior

Tiempo (min)	Altura de la columna de líquido (mm)	Flux de agua instantáneo (kg/(s*m ²))
0,0	0	
81,0	0	0,000E+00
683,3	98	8,147E-06
732,3	113	1,532E-05
790,6	137	2,061E-05
874,2	147	5,993E-06
942,8	162	1,095E-05
1157,0	196	7,946E-06
1278,0	209	5,379E-06
1351,3	216	4,779E-06
1513,0	229	4,026E-06
2110,5	251	1,844E-06

Continuación de la tabla XIX.

Tiempo (min)	Altura de la columna de líquido (mm)	Flux de agua instantáneo (kg/(s*m ²))
2176,3	252	7,611E-07
2264,0	252	0,000E+00
2325,4	252	0,000E+00
2467,3	253	3,528E-07

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. Datos de la décima prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior

Tiempo (min)	Altura de la columna de líquido (mm)	Flux de agua instantáneo (kg/(s*m ²))
0,0	0	
538,5	150	1,395E-05
623,5	173	1,355E-05
671,0	190	1,792E-05
743,1	209	1,320E-05
799,0	223	1,254E-05
848,6	235	1,211E-05
949,5	253	8,932E-06
1010,2	262	7,428E-06
1050,0	268	7,542E-06
1106,5	273	4,431E-06
1176,3	282	6,453E-06
1230,2	288	5,580E-06

Continuación de la tabla XX.

Tiempo (min)	Altura de la columna de líquido (mm)	Flux de agua instantáneo (kg/(s*m ²))
1360,2	298	3,850E-06
1945,2	321	1,969E-06
1990,0	321	0,000E+00
2051,5	321	0,000E+00
2243,0	321	0,000E+00
2518,0	321	0,000E+00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. Datos de la décima primera prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior

Tiempo (min)	Altura de la columna de líquido (mm)	Flux de agua instantáneo (kg/(s*m ²))
0,0	0	
202,0	83	2,057E-05
240,3	107	3,135E-05
340,3	154	2,355E-05
396,2	177	2,058E-05
436,8	196	2,341E-05
901,7	311	1,239E-05
1071,7	346	1,031E-05
1143,2	357	7,703E-06
1230,0	367	5,766E-06
1295,3	376	6,906E-06

Continuación de la tabla XXI.

Tiempo (min)	Altura de la columna de líquido (mm)	Flux de agua instantáneo (kg/(s*m ²))
1512,1	389	3,001E-06
1603,5	396	3,836E-06
1648,8	401	5,522E-06
1744,5	406	2,617E-06
1845,5	410	1,983E-06
2398,3	419	8,151E-07
2526,3	420	3,912E-07
2644,5	420	0,000E+00
2817,0	420	0,000E+00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. Datos de la décima segunda prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior

Tiempo (min)	Altura de la columna de líquido (mm)	Flux de agua instantáneo (kg/(s*m ²))
0,0	63	-
150,0	63	0
345,5	63	0
983,5	63	0
1550,5	63	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. Datos de la décimo tercera prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara inferior

Tiempo (min)	Altura de la columna de líquido (mm)	Flux de agua instantáneo (kg/(s*m ²))
0,0	64	-
180,0	63	0
360,5	63	0
1200,0	63	0
1633,4	63	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. Datos de la décimo cuarta prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara inferior

Tiempo (min)	Altura de la columna de líquido (mm)	Flux de agua instantáneo (kg/(s*m ²))
0,0	65	-
105,0	65	0
513,0	65	0
920,0	65	0
1713,5	63	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Datos de concentración de las pruebas realizadas con sacarosa al inicio y al final del proceso**

Prueba	Solvente (°B)		Solución (°B)	
	Inicio	Fin	Inicio	Fin
Sexta	0	4,13	9,65	4,17
Séptima	0	4,12	9,60	4,11
Octava	0	4,15	9,56	4,14
Novena	0	4,00	9,60	4,41
Décima	0	4,10	9,62	4,40
Décimo primera	0	4,20	9,59	4,90
Décimo segunda	0	2,20	9,60	6,80
Décimo tercera	0	2,00	9,60	6,70
Décimo cuarta	0	2,10	9,60	6,70

Fuente: elaboración propia.

3.11. Análisis estadístico

A continuación, se presenta el análisis estadístico de los resultados experimentales obtenidos.

3.11.1. Media aritmética

Es el valor promedio de un conjunto de datos.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{I}^N X_I}{N}$$

(Ecuación n.º 7)

3.11.2. Correlación lineal

Para realizar la prueba de hipótesis del análisis de correlación lineal se utilizó la herramienta de análisis de datos de Microsoft Excel 2010. Se obtuvo el valor del coeficiente de correlación de Pearson y se comparó con el valor crítico del estadístico de prueba, a un nivel de significancia del 5 %. Se plantearon las siguientes hipótesis en cada uno de los casos:

$H_0: \rho = 0$ (No existe una correlación lineal)

$H_1: \rho \neq 0$ (Existe una correlación lineal)

El valor crítico del estadístico de prueba seleccionado es de 0,514 con $n = 15$ y 0,602 con $n = 11$.¹⁶ Si el valor del coeficiente de correlación de Pearson calculado es mayor que el valor crítico se rechaza la hipótesis nula.

Tabla XXVI. **Análisis de coeficiente de correlación de Pearson para las curvas de calibración**

Curva de calibración	Variable dependiente	Variable independiente	n	r	r_c	¿Se rechaza H_0 ?
Sacarosa	Densidad	Fracción molar	15	0,999	0,514	Sí
Cloruro de sodio	Densidad	Fracción molar	15	0,999	0,514	Sí
Sulfato de sodio	Densidad	Fracción molar	15	0,999	0,514	Sí
Refractómetro	Molaridad	Grados Brix	11	0,998	0,602	Sí

Fuente: elaboración propia.

¹⁶ TRIOLA, Mario. *Estadística*. p. 780.

Según la tabla XXVI, se rechaza la hipótesis nula en todos los casos, debido a que el valor calculado para el coeficiente de correlación de Pearson es mayor al valor crítico. Por lo tanto, se concluye que las curvas de calibración se ajustan a un modelo lineal, con un nivel de significancia del 5 %.

3.11.3. Comparación de medias apareadas

Para realizar la prueba de hipótesis de comparación de media apareadas se utilizó la herramienta de análisis de datos de Microsoft Excel 2010. Se compararon las medias de la concentración en grados Brix de la solución antes de realizar el proceso de ósmosis contra las medias de concentración después de realizar el experimento. Al asumir una diferencia de 0 entre las medias, se obtuvo el valor estadístico t y se comparó con el valor crítico de t de dos colas, a un nivel de significancia del 5 %, con una magnitud de 2,26215. Se plantearon las siguientes hipótesis en cada uno de los casos:

$H_0: \mu_d = 0$ (La media de las diferencias entre las muestras es de cero)

$H_1: \mu_d \neq 0$ (La media de las diferencias entre las muestras es distinta de cero)

Si el valor absoluto del estadístico t de prueba es mayor o igual al valor crítico se rechaza la hipótesis nula.

Tabla XXVII. **Comparación de medias apareadas para la concentración antes y después del proceso de ósmosis, para las pruebas realizadas con sacarosa**

Prueba	Media de concentración inicial (°B)	Media de concentración final (°B)	Estadístico t	¿Se rechaza H_0 ?
Sexta	9,65	4,17	274	Sí
Séptima	9,6	4,11	235,2857143	Sí
Octava	9,56	4,14	186,5149916	Sí
Novena	9,6	4,41	519	Sí
Décima	9,62	4,4	391,5	Sí
Décima primera	9,59	4,9	469	Sí

Fuente: elaboración propia.

Según la tabla XXVII, se rechaza la hipótesis nula en todos los casos debido a que los valores determinados para el estadístico t son mayores al valor crítico. Por lo tanto, se concluye que la concentración de sacarosa al inicio y al final del proceso de ósmosis no es la misma, con un nivel de significancia del 5 %.

3.11.4. Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo

Para realizar la prueba de hipótesis de análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo, se utilizó la herramienta de análisis de datos de Microsoft Excel 2010. Se analizó el efecto de la posición del equipo de ósmosis directa y el tiempo sobre el flujo de agua a través de la membrana, a un nivel de significancia del 5 %. Se plantearon las siguientes hipótesis en cada uno de los casos:

- H_0 : (La posición de las soluciones de sacarosa en el proceso de ósmosis directa no provoca un efecto significativo en el flujo de agua a través de la membrana).
- H_1 : (La posición de las soluciones de sacarosa en el proceso de ósmosis directa provoca un efecto significativo en el flujo de agua a través de la membrana).

Si el valor de la F de Fischer es mayor o igual al valor crítico se rechaza la hipótesis nula. Para determinar los valores de la tabla XXVIII, se utilizaron los datos de la sexta, séptima y octava prueba para la posición vertical y la novena, décima y décimo primera prueba, para la posición horizontal con la solución en la cámara superior.

Tabla XXVIII. **Análisis de varianza de dos factores, posición y tiempo, con varias muestras por grupo sobre el flujo de agua a través de la membrana**

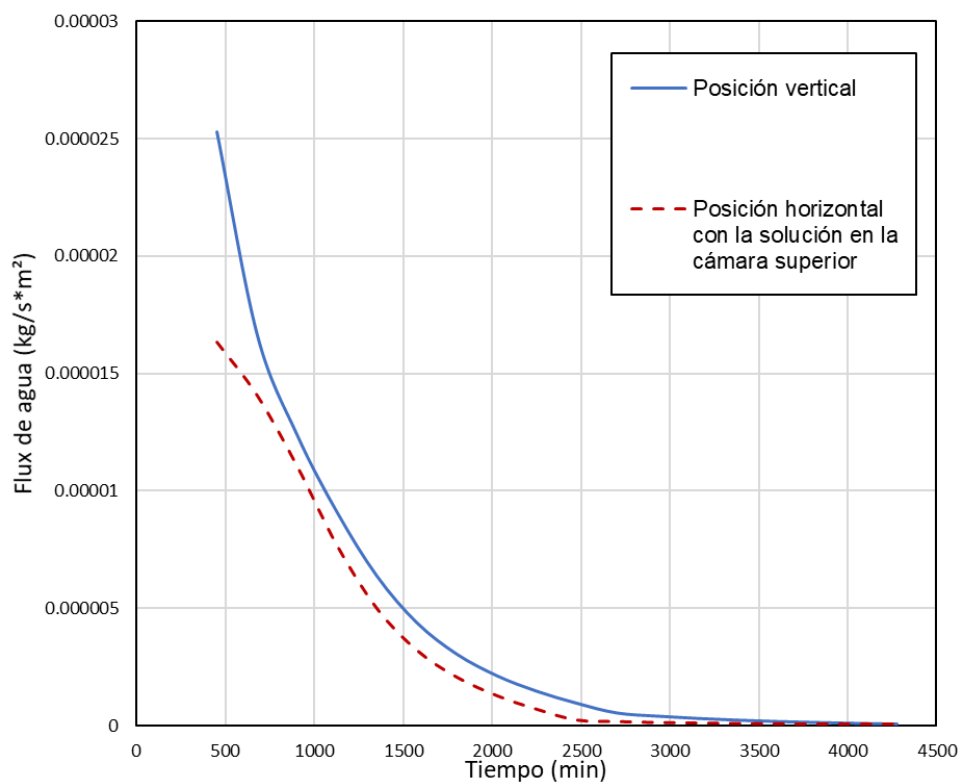
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Posición	3,81E-11	1	3,81E-11	4,405	3,973
Tiempo	3,83E-09	17	2,25E-10	26,053	1,766
Interacción	1,07E-10	17	6,31E-12	0,729	1,766
Dentro del grupo	6,23E-10	72	8,66E-12		
Total	4,60E-09	107			

Fuente: elaboración propia.

Según la tabla XXVIII, el valor de la F de Fischer para la comparación de las posiciones es mayor que el valor crítico para F. Por lo tanto, se concluye que

la posición del equipo de ósmosis provoca un cambio significativo en el flujo de agua a través de la membrana.

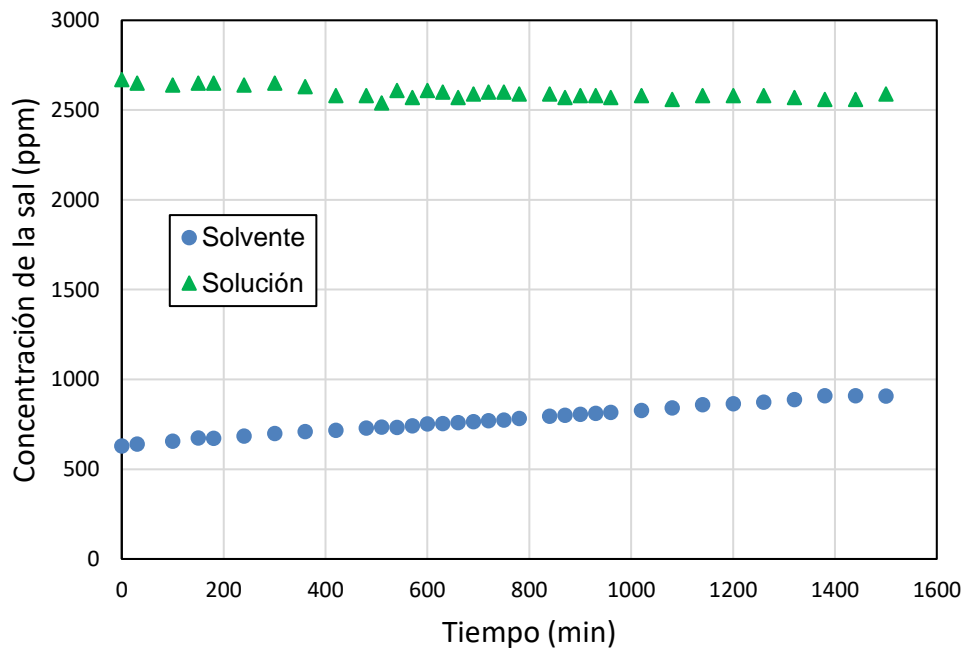
Figura 5. **Comparación del promedio del flujo de agua a través de la membrana para la posición vertical y la posición horizontal con la solución en la cámara superior**



Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

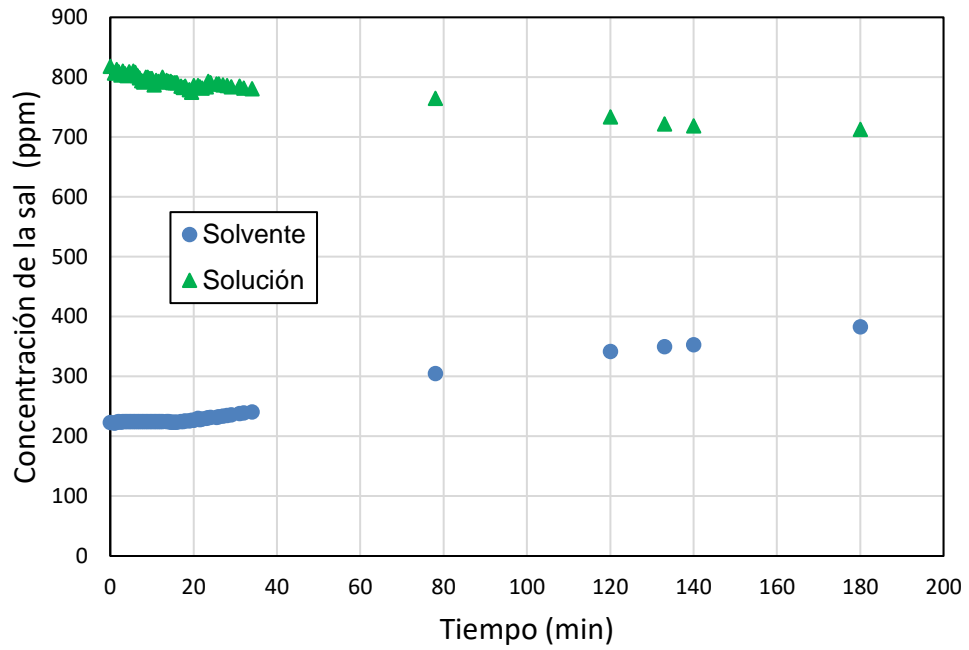
Figura 6. **Primera prueba de ósmosis directa realizada, utilizando cloruro de sodio, en posición vertical**



Fuente: elaboración propia.

Observaciones: No se presentó cambio en la altura de la columna de líquido.

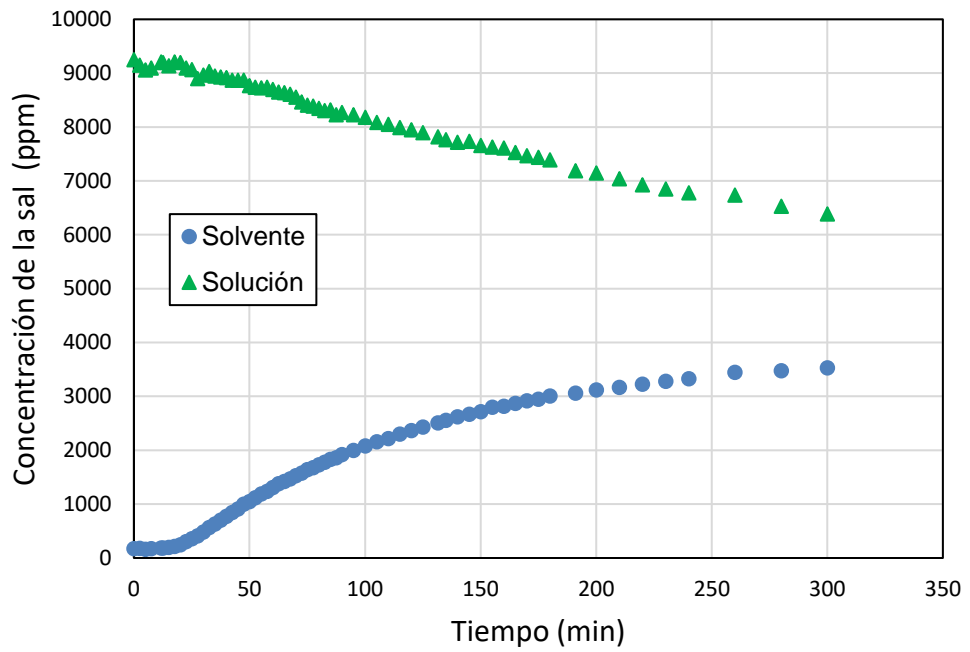
Figura 7. **Segunda prueba de ósmosis directa realizada, utilizando cloruro de sodio, en posición vertical**



Fuente: elaboración propia.

Observaciones: No se presentó cambio en la altura de la columna de líquido.

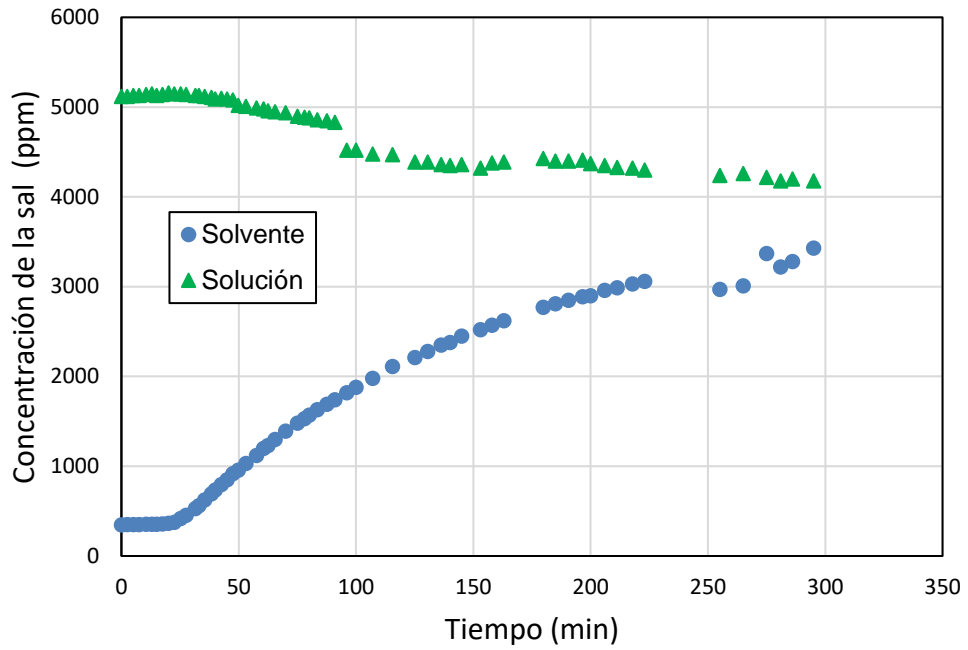
Figura 8. Tercera prueba de ósmosis directa realizada, utilizando cloruro de sodio, en posición vertical



Fuente: elaboración propia.

Observaciones: No se presentó cambio en la altura de la columna de líquido.

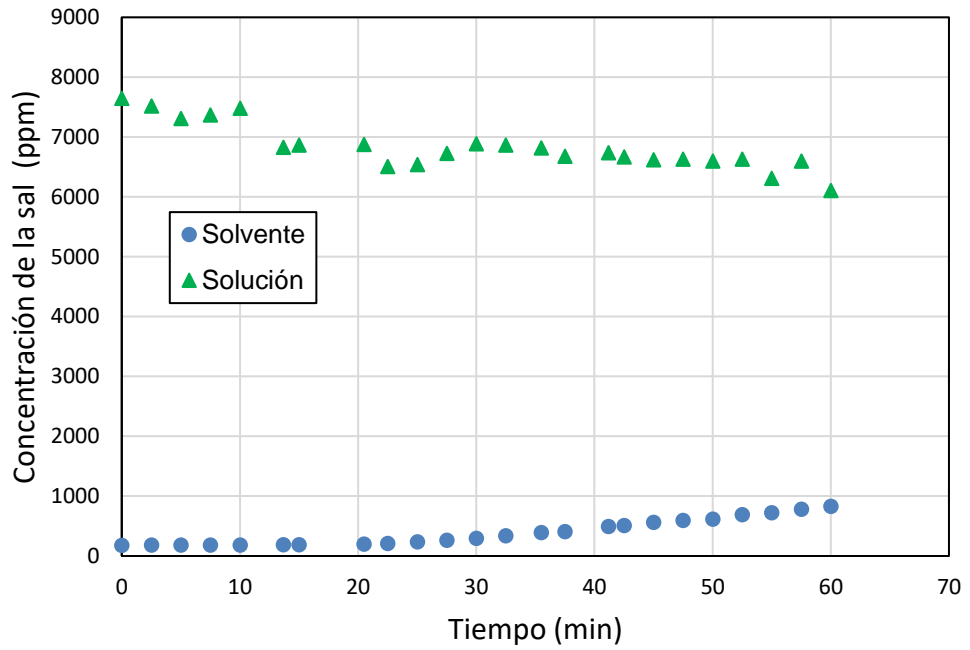
Figura 9. **Cuarta prueba de ósmosis directa realizada, utilizando cloruro de sodio, en posición vertical**



Fuente: elaboración propia.

Observaciones: No se presentó cambio en la altura de la columna de líquido.

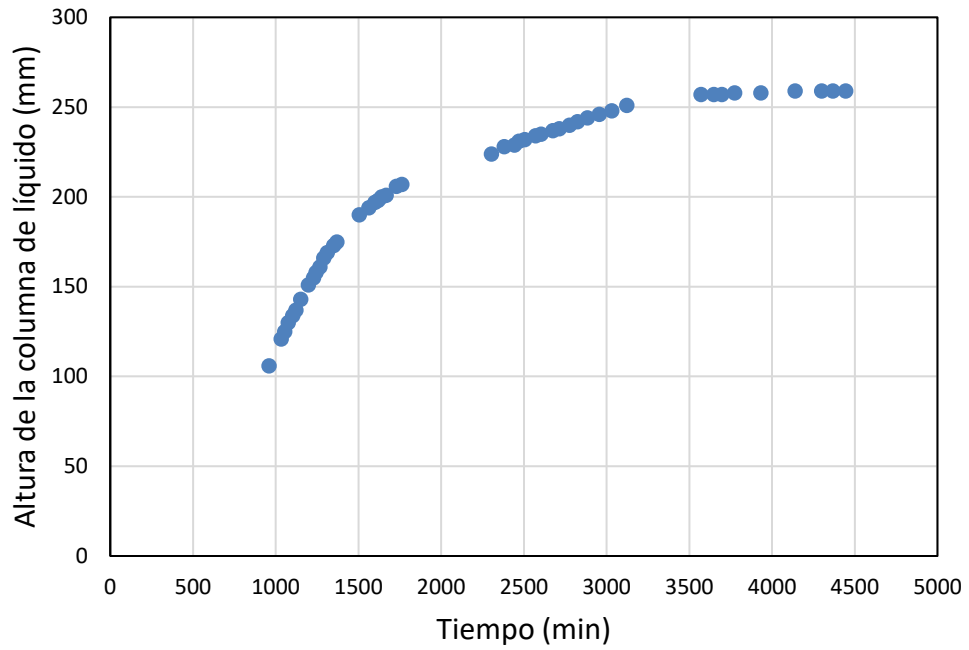
Figura 10. **Quinta prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sulfato de sodio, en posición vertical**



Fuente: elaboración propia.

Observaciones: No se presentó cambio en la altura de la columna de líquido.

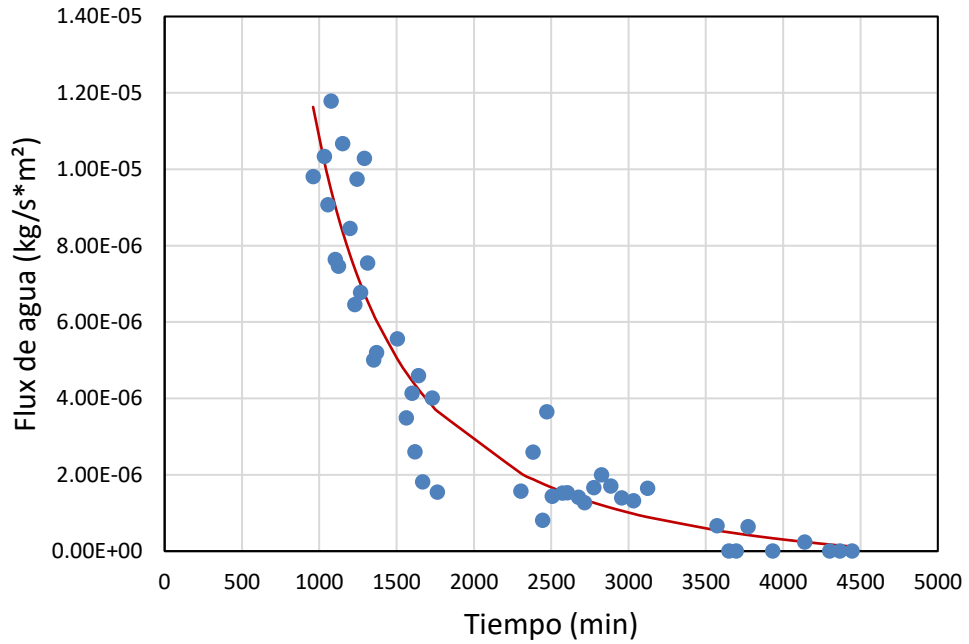
Figura 11. **Sexta prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición vertical**



	Concentración del solvente (°B)	Concentración de la solución (°B)
Inicio	0	9,65
Fin	4;13	4,17

Fuente: elaboración propia.

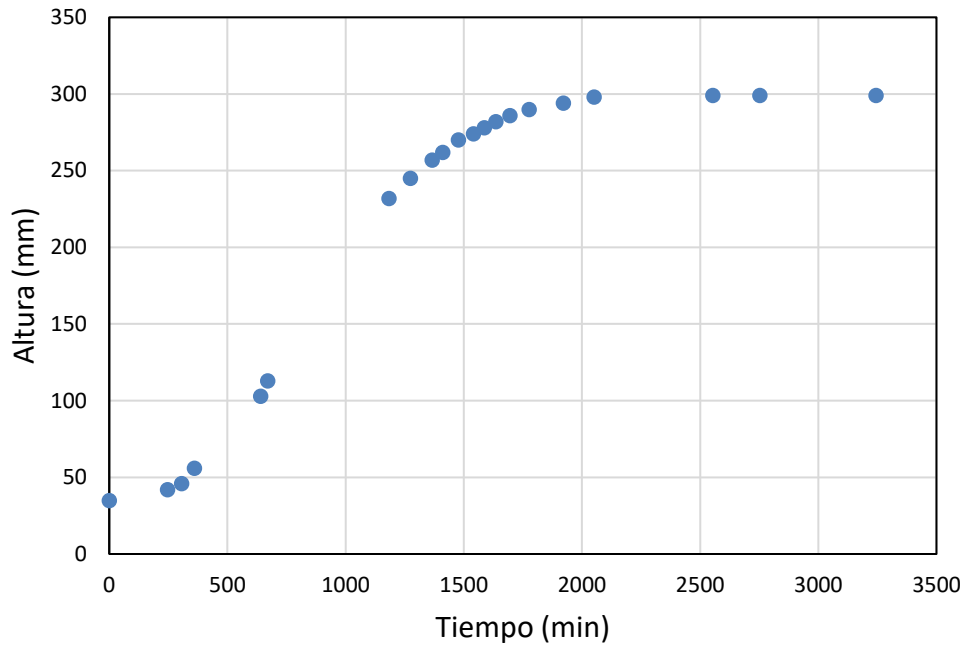
Figura 12. **Flujo de agua a través de la membrana en la sexta prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición vertical**



Modelo matemático:	$N_w = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + (t/B)^p}$
A_1	4,84E-02
A_2	-8,35E-07
p	1,67596721
B	6,93174012
R^2	0,889643651

Fuente: elaboración propia.

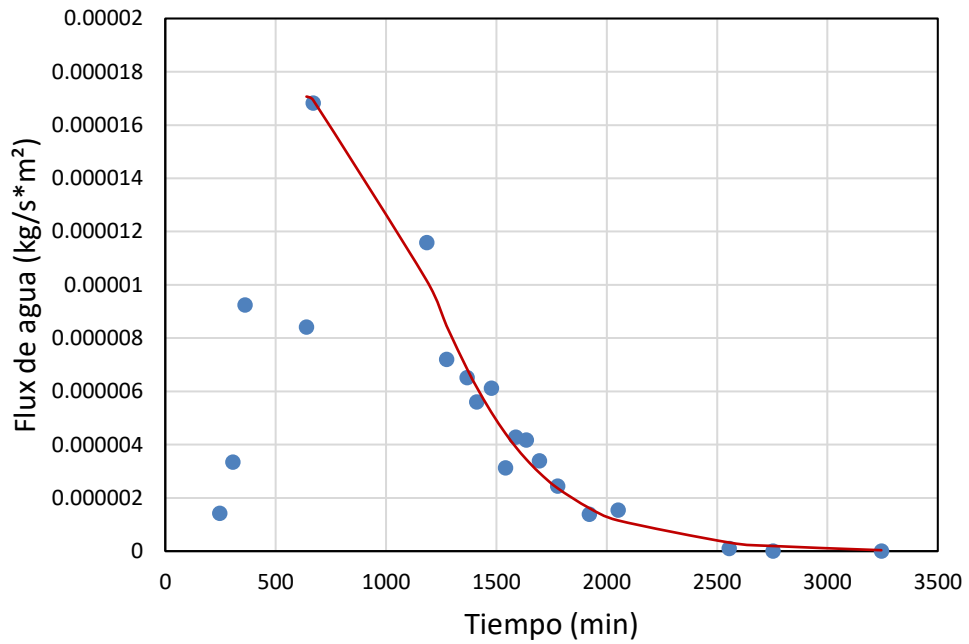
Figura 13. **Séptima prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición vertical**



	Concentración del solvente (°B)	Concentración de la solución (°B)
Inicio	0	9,6
Fin	4,12	4,11

Fuente: elaboración propia.

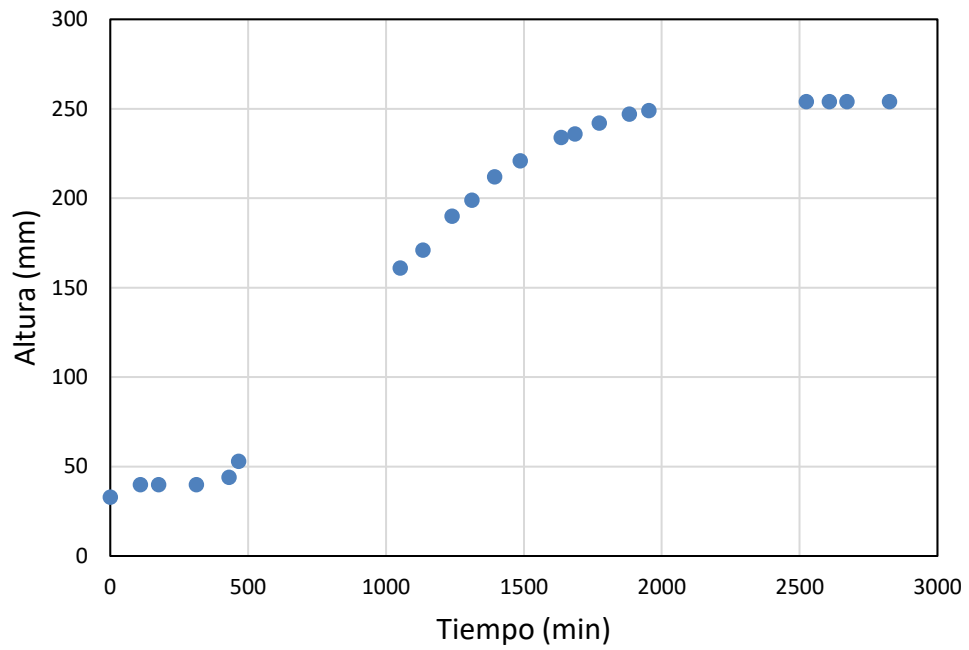
Figura 14. **Flujo de agua a través de la membrana en la séptima prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición vertical**



Modelo matemático:	$N_w = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + (t/B)^p}$
A_1	1,753977E-05
A_2	-8,002899E-08
p	5,302453E+00
B	1,259600E+03
R^2	0,974508639

Fuente: elaboración propia.

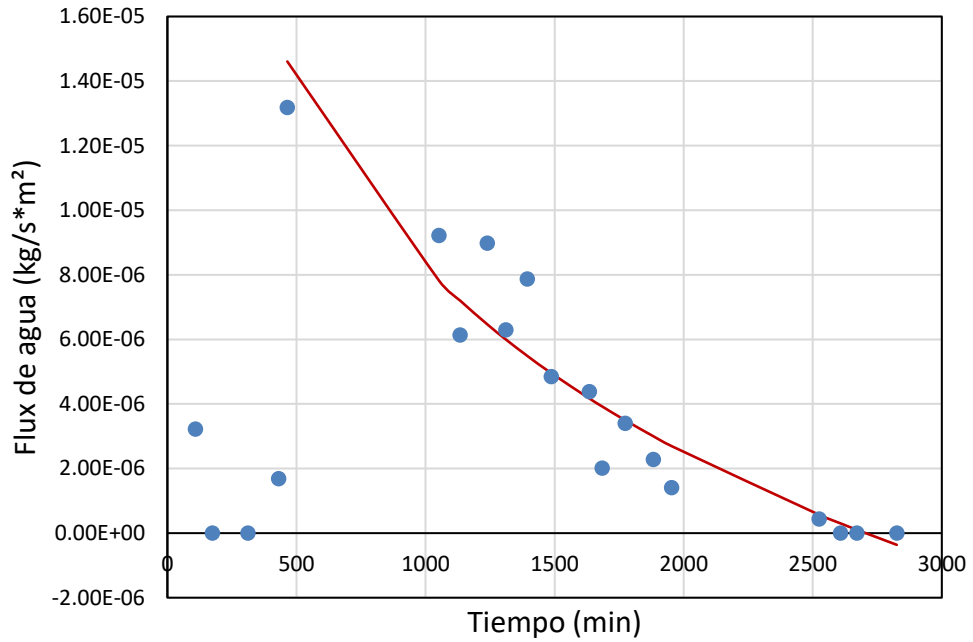
Figura 15. **Octava prueba de ósmosis directa realizada, usando sacarosa, en posición vertical**



	Concentración del solvente (°B)	Concentración de la solución (°B)
Inicio	0	9,56
Fin	4,15	4,14

Fuente: elaboración propia.

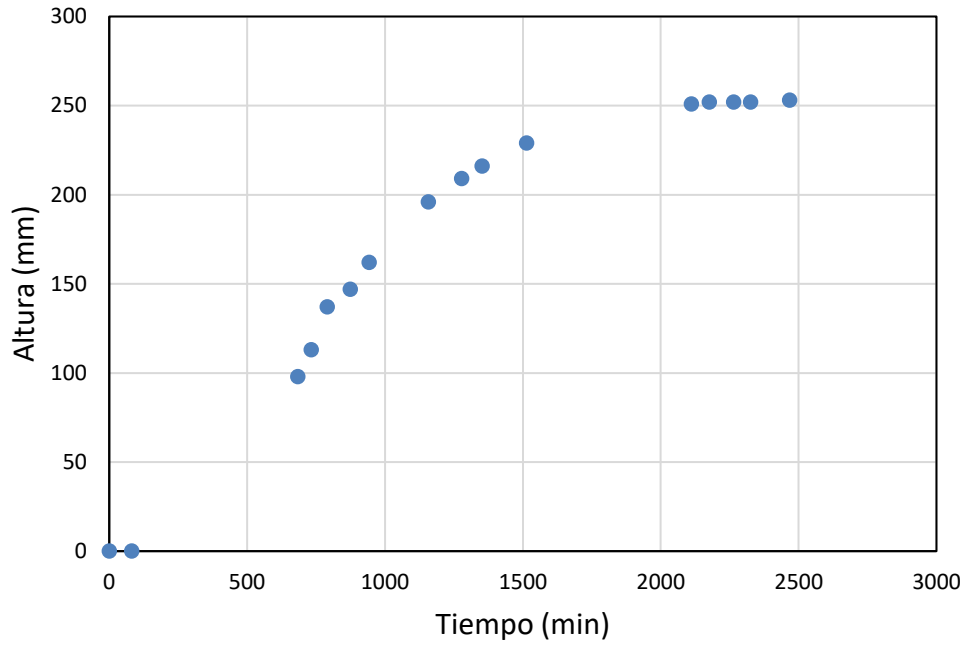
Figura 16. **Flujo de agua a través de la membrana en la octava prueba de ósmosis directa realizada, empleando sacarosa, en posición vertical**



Modelo matemático:	$N_w = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + (t/B)^p}$
A_1	7,747044E-04
A_2	-6,432535E-04
p	2,355432E-02
B	1,008550E+00
R^2	0,900605131

Fuente: elaboración propia.

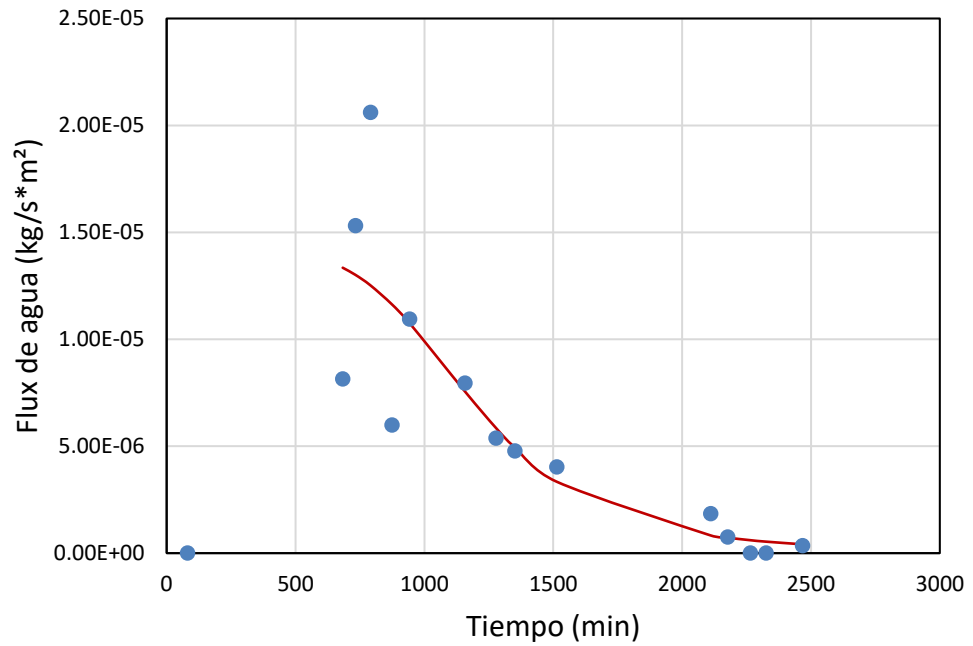
Figura 17. **Novena prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior**



	Concentración del solvente (°B)	Concentración de la solución (°B)
Inicio	0	9,6
Fin	4	4,41

Fuente: elaboración propia.

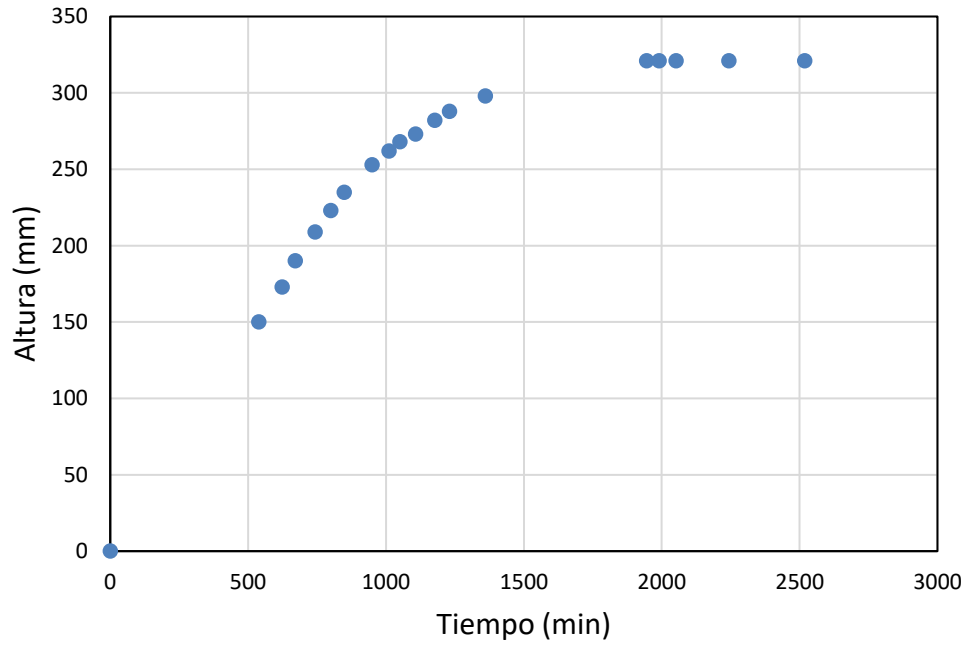
Figura 18. **Flujo de agua a través de la membrana en la novena prueba de ósmosis directa realizada, usando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior**



Modelo matemático:	$N_w = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + (t/B)^p}$
A_1	1,42451E-05
A_2	2,93667E-08
p	4,88855E+00
B	1,18603E+03
R^2	0,728912314

Fuente: elaboración propia.

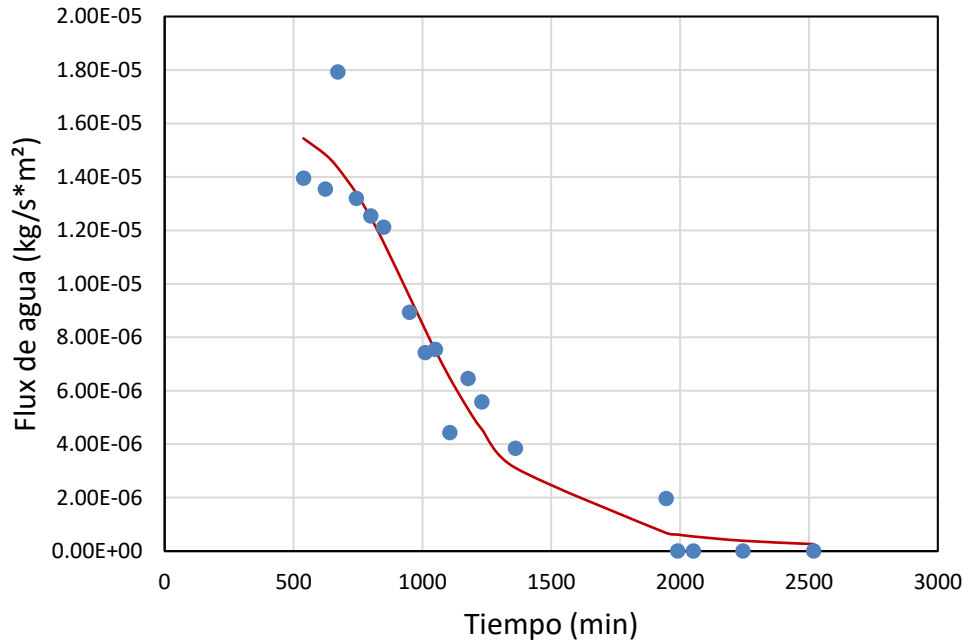
Figura 19. **Décima prueba de ósmosis directa realizada, empleando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior**



	Concentración del solvente (°B)	Concentración de la solución (°B)
Inicio	0	9,62
Fin	4,1	4,4

Fuente: elaboración propia.

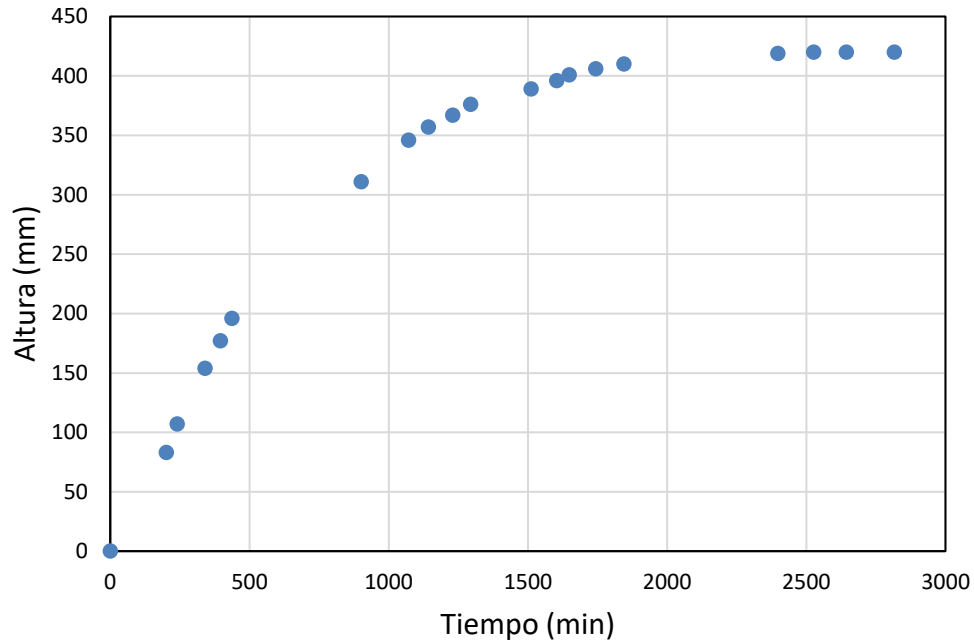
Figura 20. **Flujo de agua a través de la membrana en la décima prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior**



Modelo matemático:	$N_w = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + (t/B)^p}$
A_1	1,60326E-05
A_2	1,02717E-07
p	5,08312E+00
B	1,02180E+03
R^2	0,949665501

Fuente: elaboración propia.

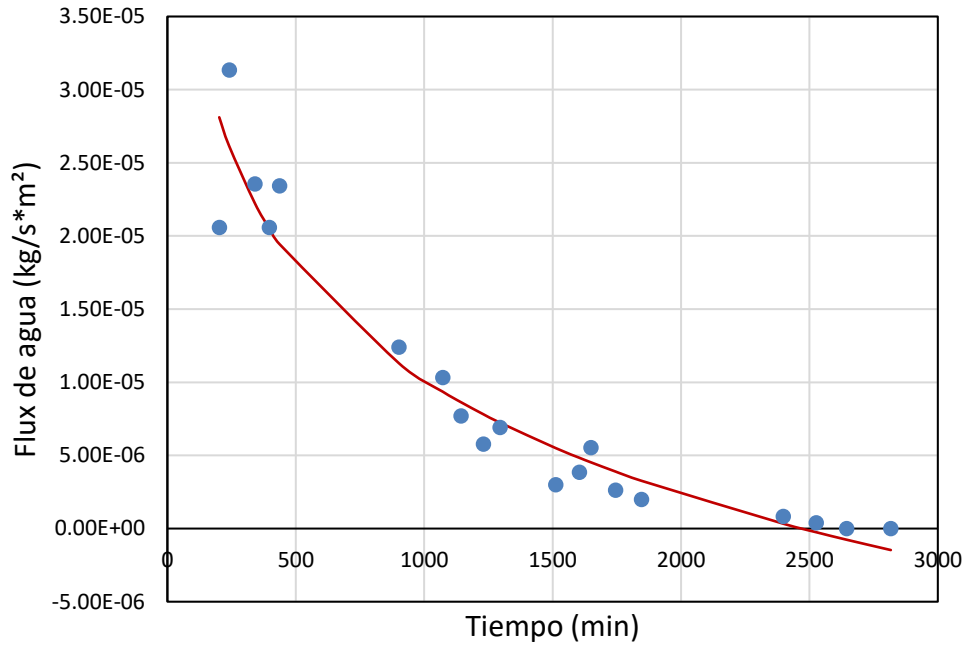
Figura 21. **Décima primera prueba de ósmosis directa realizada, utilizando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior**



	Concentración del solvente (°B)	Concentración de la solución (°B)
Inicio	0	9,59
Fin	4,2	4,9

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Flujo de agua a través de la membrana en la décima primera prueba de ósmosis directa realizada, empleando sacarosa, en posición horizontal con la solución en la cámara superior**



Modelo matemático:	$N_w = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + (t/B)^p}$
A_1	9,99831E-04
A_2	-8,24058E-04
p	2,47857E-02
B	1,01162E+00
R^2	0,926494445

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Datos de presión osmótica de las pruebas realizadas con sacarosa al inicio y al final del proceso**

Prueba	Presión osmótica medida (kPa)	Presión osmótica según el modelo de Van't Hoff (kPa)	Presión osmótica según el modelo de Gibbs (kPa)
Sexta (PV)	4,7229	1365,102	766,582
Séptima (PV)	5,2833	1358,038	762,456
Octava (PV)	4,4227	1352,387	759,156
Novena (PH1)	5,0631	1358,038	762,456
Décima (PH1)	6,4240	1360,864	764,106
Décimo primera (PH1)	8,4052	1356,625	761,631
Décimo segunda (PH2)	0	1358,038	762,456
Décimo tercera (PH2)	0	1358,038	762,456
Décimo cuarta (PH2)	0	1358,038	762,456

Nota:
 PV = posición vertical
 PH1 = posición horizontal con la solución en la cámara superior
 PH2 = posición horizontal con la solución en la cámara inferior

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Práctica de ósmosis diseñada para el Laboratorio de Físicoquímica 1**

ÓSMOSIS	
Objetivos:	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Analizar el comportamiento de la presión osmótica para soluciones de sacarosa y cloruro de sodio. 2. Examinar la cinética del proceso de ósmosis directa. 3. Observar el funcionamiento de una membrana semipermeable en el proceso de ósmosis directa. 	
Cristalería, equipo y materiales:	
<ul style="list-style-type: none"> - Refractómetro - Conductímetro - Probeta de 100 ml - Membrana semipermeable de celulosa regenerada, 2 pulgadas de ancho - Regla de medición 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Beaker</i> de 600 ml - <i>Beaker</i> de 250 ml - Soporte universal - Balanza - Cronómetro - Manguera de plástico de 1/8 de pulgada
Reactivos:	
<ul style="list-style-type: none"> - Sacarosa - Cloruro de sodio - Agua desmineralizada 	

Continuación de la tabla XXIX.

Procedimiento experimental:

1. Preparar 7 soluciones de 100 ml de agua con sacarosa a las siguientes concentraciones: 5 °B, 10 °B, 15 °B, 20 °B, 25 °B y 30 °B.
2. Preparar 100 ml una solución de agua con cloruro de sodio a 5 000 ppm.
3. Cortar 8 segmentos de 8 pulgadas de largo de la membrana y colocarlos en agua durante 1 minuto.
4. Cortar 8 segmentos de la manguera de plástico con una longitud de 20 pulgadas.

Realizar un nudo en uno de los extremos de cada segmento de membrana, formando una bolsa.

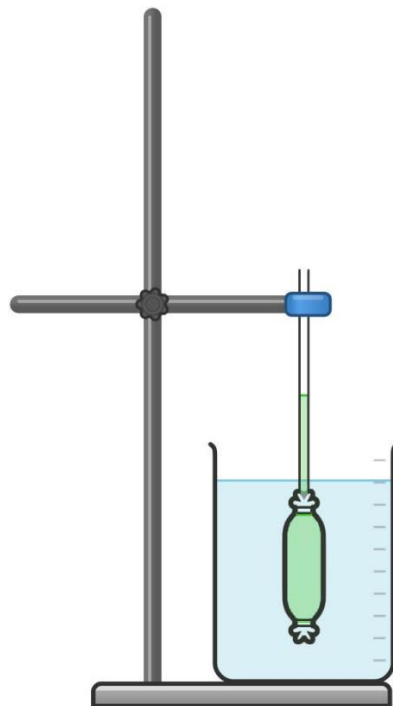
5. Preparar 8 *beakers* de 600 ml con 500 ml de agua desmineralizada.
6. En cada uno de los segmentos de membrana, colocar cada una de las soluciones preparadas.
7. Insertar en cada bolsa con solución, un segmento de la manguera recortada y sellar.
8. Colocar cada bolsa en cada uno de los *beakers* de 600 ml con agua, como se observa en la figura 23.
9. Cada 3 minutos, medir la altura de la columna de líquido en la manguera y la concentración del agua en el *beaker*.
10. Cuando la altura se mantenga constante, retirar la bolsa del *beaker* y medir la concentración de la solución.
11. De ser posible, repetir todo el procedimiento 2 veces más.

Continuación de la tabla XXIX.

Reportar:

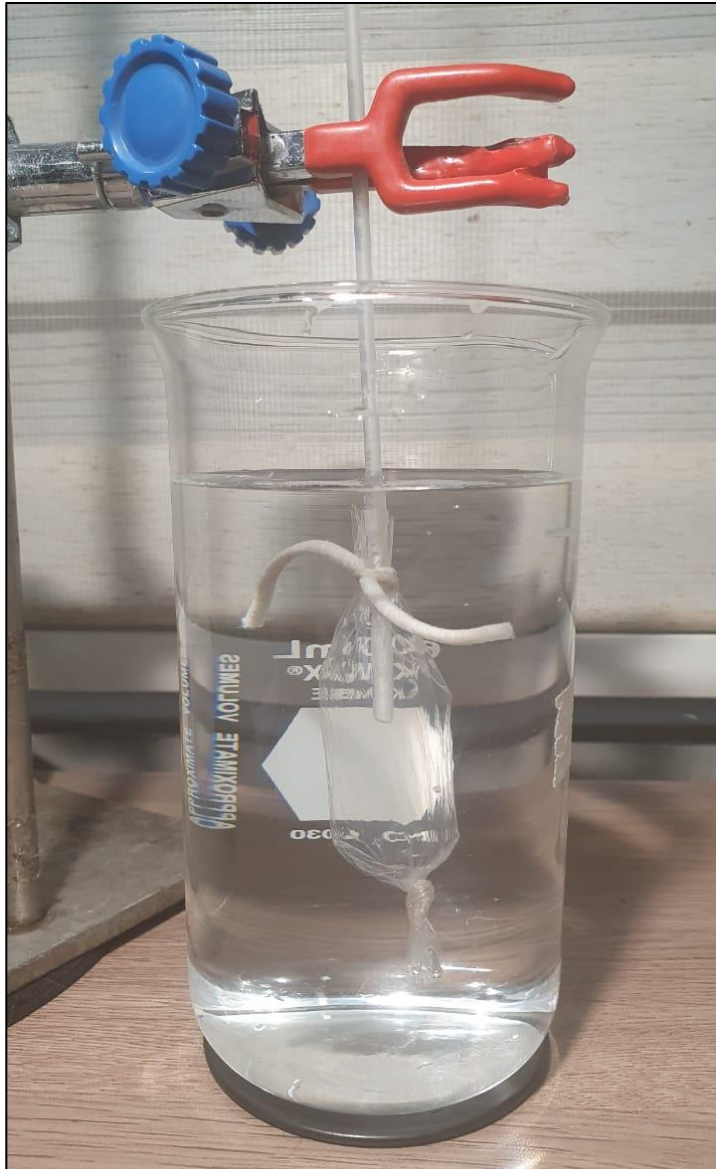
- Gráficas de la altura de la columna de líquido en función del tiempo para todas las soluciones.
- Gráfica de la concentración del solvente en función del tiempo.
- Gráfica de la presión osmótica en función de la concentración de las soluciones de sacarosa.
- Comparación de la presión osmótica medida y la determinada con el modelo ideal.

Diagrama del equipo:



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Forma de colocar la membrana dentro del *beaker* en la práctica de ósmosis propuesta**



Fuente: elaboración propia, fotografía en el Laboratorio de Físicoquímica de la Universidad de San Carlos de Guatemala. *Beaker* que contiene agua y una membrana.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Durante la realización de la curva de calibración del ácido benzoico, se observó que este reactivo tiene poca solubilidad en agua (ver tabla VI). Debido a esto, la masa en disolución requerida de ácido benzoico es muy pequeña y no puede ser medida utilizando la balanza disponible en el Laboratorio de Fisicoquímica. Se decidió descartar el ácido benzoico como soluto, debido a que la resolución del equipo disponible no permitiría controlar adecuadamente su concentración durante el experimento.

El equipo de ósmosis diseñado para el experimento se basa en la figura 1, el plano se encuentra en el apéndice 3. Este consta de dos cajas de acrílico con perforaciones para introducir mangueras de $\frac{1}{4}$ de pulgada; ambas cajas son unidas por medio de tornillos, y entre ellas se colocó una hoja de etilvinilacetato no espumado a modo de empaque. Se utilizó silicón F109 para sellar las fugas de líquido observadas. En el equipo, se instaló un conductímetro con dos electrodos para controlar la concentración de sólidos disueltos en cada una de las cámaras, como se observa en el apéndice 4. Las mangueras del equipo cuentan con accesorios en T, para permitir que el equipo pueda utilizarse en otras posiciones.

Para seleccionar la membrana, se realizaron pruebas con varios tipos de materiales: papel celofán, papel bond, material de celulosa de fibra larga, polietileno de baja densidad y celulosa regenerada. De los materiales anteriormente mencionados, la membrana de celulosa regenerada fue seleccionada para realizar el experimento, dado que los demás materiales no fueron adecuados para realizar el proceso de ósmosis con ninguno de los

reactivos utilizados. Por lo tanto, se utilizó la membrana semipermeable tubular hecha de celulosa regenerada, proveniente de línter de algodón. Según las especificaciones técnicas del fabricante de dicha membrana, el tamaño del poro es de 12 - 14 daltons.

En las primeras cuatro pruebas de ósmosis directa, se utilizó cloruro de sodio como soluto a cuatro concentraciones distintas: 2 670 ppm, 818 ppm, 9 250 ppm y 5 120 ppm, respectivamente. Los resultados de dichas pruebas se encuentran en las figuras 6, 7, 8 y 9. Se observó que la concentración de la solución de cloruro de sodio disminuyó conforme transcurría el tiempo; mientras que la concentración del soluto en la otra celda aumentaba. No obstante, no se presentaron cambios en la altura de la columna de líquido del solvente ni de la solución.

Dado que el diámetro del poro de la membrana utilizada es mayor al diámetro de los iones en disolución¹⁷, esta no es capaz de retenerlos en un lado del equipo de ósmosis para generar el gradiente de concentración necesario para impulsar el movimiento de solvente, a través de la membrana hacia la mayor concentración. El hecho de que la membrana no sea impermeable al cloruro de sodio, provocaría que la búsqueda del equilibrio en los potenciales químicos del sistema se logre también por medio de la transferencia de iones de la cámara que contiene solución hacia la cámara que contiene solvente.

La quinta prueba de ósmosis directa fue realizada utilizando sulfato de sodio como soluto a una concentración de 7 650 ppm. El resultado de esta prueba se encuentra en la figura 10. Al igual que con el cloruro de sodio, el sulfato de sodio no presentó un cambio en la altura de la columna de líquido que represente la

¹⁷ GUO, Laodong; SANTSCHI, Peter. *Ultrafiltration and its Applications to Sampling and Characterisation of Aquatic Colloids*. p.163.

presión osmótica de la solución. Al considerar que el sulfato de sodio es un compuesto iónico de similar tamaño al cloruro de sodio, el diámetro del poro de la membrana utilizada tampoco sería el adecuado para llevar a cabo el proceso de ósmosis directa.

De la sexta a la décimo cuarta prueba de ósmosis directa, se realizaron utilizando sacarosa como soluto. Los resultados de estas pruebas se encuentran en las figuras 11 a la 22 y en la tabla XXVIII. La sacarosa tiene un tamaño molecular suficiente para ser retenida por la membrana utilizada¹⁸, por lo tanto, permite que exista una diferencia de concentración adecuada para llevar a cabo el proceso de ósmosis directa. Esto se observa durante los experimentos en que se presenta un cambio de altura en la columna de líquido de ambas cámaras del equipo.

A pesar de ello, en todas las pruebas realizadas con sacarosa se determinó que la concentración de sacarosa en la celda que contenía solo solvente fue mayor a 0 °B al finalizar los experimentos. Esto significa que la sacarosa también fue capaz de atravesar la membrana, en manera similar a las sales de sodio o de alguna otra manera.¹⁹ Lo descrito anteriormente, implicaría que durante las pruebas realizadas existen dos procesos competidores que ocurren al mismo tiempo: el flujo de solvente desde la cámara que contiene el solvente hacia la que contiene la solución y el flujo de soluto desde la cámara que contiene la solución hacia la que contiene al solvente.

¹⁸ GUO, Laodong; SANTSCHI, Peter. *Ultrafiltration and its Applications to Sampling and Characterisation of Aquatic Colloids*. p. 163.

¹⁹ SHIWEI, Guo, JIANQUAN, Luo, QIANGJIAN, Yang, XIUFU, Qiang, SHICHAO, Feng; YINHUA Wan. *Decoloration of molasses by ultrafiltration and nanofiltration unraveling the mechanism of high sucrose retention*. p. 6.

Las figuras 11, 13 y 15 presentan el cambio en la altura de la columna de líquido de la cámara que contiene a la solución de sacarosa, y el equipo colocado en posición vertical. En vista de que el gradiente de concentración entre ambas cámaras del equipo es la condición impulsora de la ósmosis durante el experimento y al tener en cuenta la transferencia de masa que se observa durante las pruebas realizadas, el proceso alcanzó un estado de equilibrio al momento en que se igualaron las concentraciones en ambos lados del equipo. En las figuras 12, 14 y 16, se presenta el flujo de solvente a través de la membrana en función del tiempo, este se aproxima a cero en forma asintótica, conforme transcurre el tiempo.

En las figuras 17, 18, 19, 20 y 21 se presentan los resultados de las pruebas realizadas con sacarosa y con el equipo colocado en posición horizontal con la solución en la cámara superior. El comportamiento de estas gráficas es similar al presentado por las gráficas de las pruebas realizadas con sacarosa en posición vertical. La diferencia más apreciable entre ambas es la concentración de las soluciones al finalizar los experimentos. En el caso de la posición vertical, la concentración de la solución y del solvente es igual; por otro lado, para la posición horizontal con la solución en la cámara superior, aún existe una ligera diferencia de concentraciones al finalizar las pruebas de ósmosis directa. Debido a la posición del equipo, la presión hidrostática ejercida por la solución sobre el solvente deberá ser compensada por la diferencia de concentración presente en esta configuración del equipo.

En las pruebas de ósmosis realizadas con sacarosa, en la posición horizontal con la solución en la cámara inferior, no se presentó un cambio en la altura de la columna de líquido. Esto puede ser debido a que la presión hidrostática ejercida por el solvente en la solución retarda el flujo de solvente

hacia la solución, debido al proceso de ósmosis.²⁰ También se presenta un cambio en la concentración del solvente, lo que en consecuencia reduce el gradiente de concentración entre ambos lados del equipo y, por lo tanto, también reduce la presión osmótica de la solución.

La tabla XXVIII presenta los valores estimados de presión osmótica para cada una de las pruebas realizadas con sacarosa, y también los valores calculados con el modelo de Gibbs y el modelo de Van't Hoff. La presión osmótica reflejada en la altura de la columna del líquido es menor a los valores predichos por los modelos teóricos, esto debido a que existe la difusión de soluto a través de la membrana, esto reduce la diferencia de concentración.

La práctica propuesta en la tabla XXIX para el Laboratorio de Fisicoquímica I se enfoca en introducir el concepto de presión osmótica al estudiante. Se utilizará la membrana semipermeable de celulosa regenerada y agua como solvente. Se tomará al cloruro de sodio y a la sacarosa como reactivos, debido a sus interacciones particulares con la membrana y a su baja peligrosidad para las personas y para el ambiente. La sacarosa permitirá observar el proceso de ósmosis con los materiales planteados para la práctica; mientras que el cloruro de sodio permitirá demostrar la permeabilidad de la membrana a un soluto. Se diseñó la práctica considerando el menor costo posible para la ejecución del experimento, así como la cantidad de tiempo necesaria para realizarlo dentro de las operaciones normales del laboratorio.

²⁰ CATH, Tzahi; CHILDRESS, Amy y ELIMELECH, Menachem. *Forward osmosis: Principles, applications and recent developments*. p. 72.

CONCLUSIONES

1. El ácido benzoico no es un reactivo adecuado para evaluar el proceso de ósmosis directa a escala laboratorio en el área de Físicoquímica debido a su baja solubilidad y el equipo de medición disponible.
2. Al cambiar la posición de las soluciones de sacarosa existe una diferencia en el comportamiento del proceso de ósmosis directa, debido a la presión hidrostática ejercida por la sustancia que se encuentre en la cámara superior.
3. La presión osmótica de las soluciones de sacarosa determinada durante el experimento es menor a los valores predichos por el modelo de Gibbs y el modelo de Van't Hoff.
4. La posición del equipo de ósmosis directa diseñado tiene un efecto significativo en el flujo de agua a través de la membrana.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar otros tipos de reactivos con un tamaño molecular mayor y alta solubilidad para mejorar la calidad de los datos obtenidos, si se utiliza la misma membrana con la que se realizó el experimento.
2. Utilizar una membrana semipermeable con un tamaño de poro de menor diámetro al del soluto más pequeño utilizado en el experimento, si se utilizan los mismos solutos.
3. Diseñar un equipo que permita controlar más variables relevantes, como la temperatura, presión y concentración durante el proceso de ósmosis directa.
4. Aplicar otras técnicas para determinar la concentración de las soluciones sometidas a procesos de ósmosis.
5. Elaborar localmente una membrana semipermeable con las características necesarias para el experimento de ósmosis dentro del Laboratorio de Fisicoquímica.

BIBLIOGRAFÍA

1. ATKINS, Peter. *Química Física*. 6a ed. España: Ediciones Omega, 1999. 1 018 p.
2. BAKER, Richard. *Membrane Technology and Applications*. 2a ed. Estados Unidos: Editorial John Wiley & Sons, 2004. 534 p.
3. CANCINO, Beatriz; ULLOA, Lila; ASTUDILLO Carolina. *Presión Osmótica de Soluciones Salinas y Azucaradas: su Influencia en Procesos de Ósmosis Inversa en la Industria de Alimentos*. Información Tecnológica. Chile: 2009. 64 p.
4. CATH, Tzahi; CHILDRESS, Amy y ELIMELECH, Menachem. *Forward osmosis: Principles, applications and recent developments*. Journal of Membrane Science. Estados Unidos de América: 2006. 87 p.
5. CHANG, Raymond. *Química*. 10a ed. México: McGraw-Hill, 2010. 1 085 p.
6. GEANKOPLIS, Christie. *Procesos de Transporte y Principios de Procesos de Separación*. 4a ed. México: Compañía Editorial Continental, 2006. 1 034 p.
7. GUO, Laodong; SANTSCHI, Peter. *Ultrafiltration and its Applications to Sampling and Characterisation of Aquatic Colloids*. Environmental

Colloids and Particles: Behaviour, Separation and Characterisation.
Estados Unidos de América: 2007. 221 p.

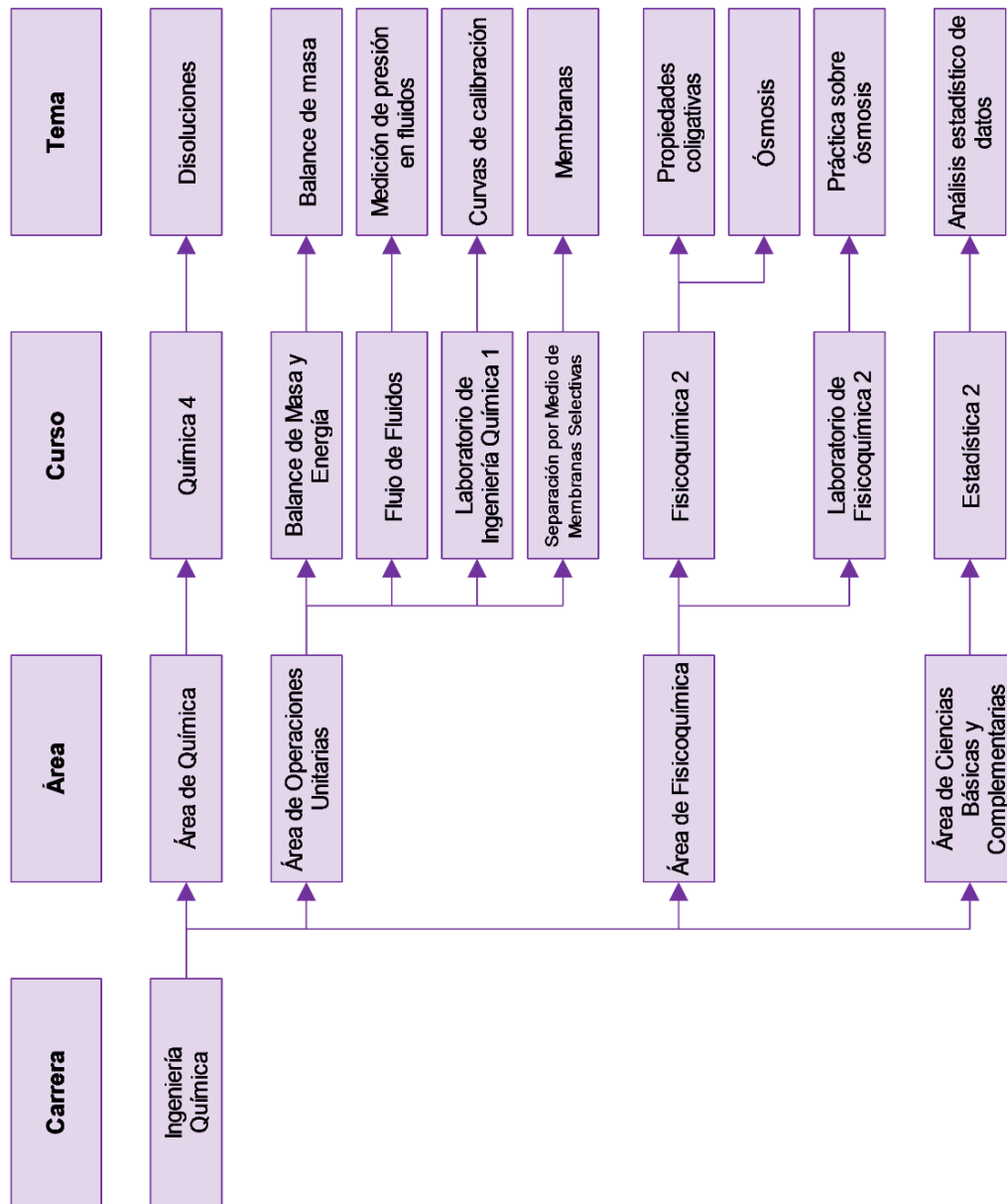
8. JOHNSON, Richard. *Probabilidad y estadística para ingenieros de Miller y Freund*. 5a ed. México: Pretince Hall, 1997. 630 p.
9. LEE, K. L.; BAKER, Richard; LONSDALE, Harold. *Membranes for power generation by pressure-retarded osmosis*. Journal of Membrane Science. Estados Unidos de América: Bend Research, 1980. 171 p.
10. LEVINE, Ira. *Principios de Fisicoquímica*. 6a ed. México: McGraw-Hill, 2014. 571 p.
11. MULDER, Marcel. *Basic Principles of Membrane Technology*. 2a ed. Países Bajos: Kluwer Academic Publishers, 1996. 564 p.
12. REID, Catherine; BRENTON, E. J. *Water and Ion Flow Across Cellulosic Membranes*. Journal of Applied Polymer Science. Estados Unidos de América: University of Florida, 1959. 143 p.
13. SHIWEI, Guo; JIANQUAN, Luo; QIANGJIAN, Yang; XIUFU, Qiang; SHICHAO, Feng; YINHUA Wan. *Decoloration of molasses by ultrafiltration and nanofiltration unraveling the mechanism of high sucrose retention*. En: Food and Bioprocess Technology. Beijing: 2018. 15 p.
14. SCHOLANDER, P. F.; PEREZ, M. *Effect of Gravity on Osmotic Equilibria*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United

States of America. Estados Unidos de América: University of California, 1971. 3 p.

15. STREETER, Victor; WYLEI, Benjamin. *Mecánica de los fluidos*. 8a ed. México: McGraw-Hill, 1988. 594 p.
16. TRIOLA, Mario. *Estadística*. 10a ed. México: Pearson Educación, 2009. 866 p.
17. ZHAO, Shuaifei; ZOU, Linda; TANG, Chuyang; MULCAHY, Dennis. *Recent developments in forward osmosis: Opportunities and challenges*. Journal of Membrane Science. Singapore: 2012. 21 p.

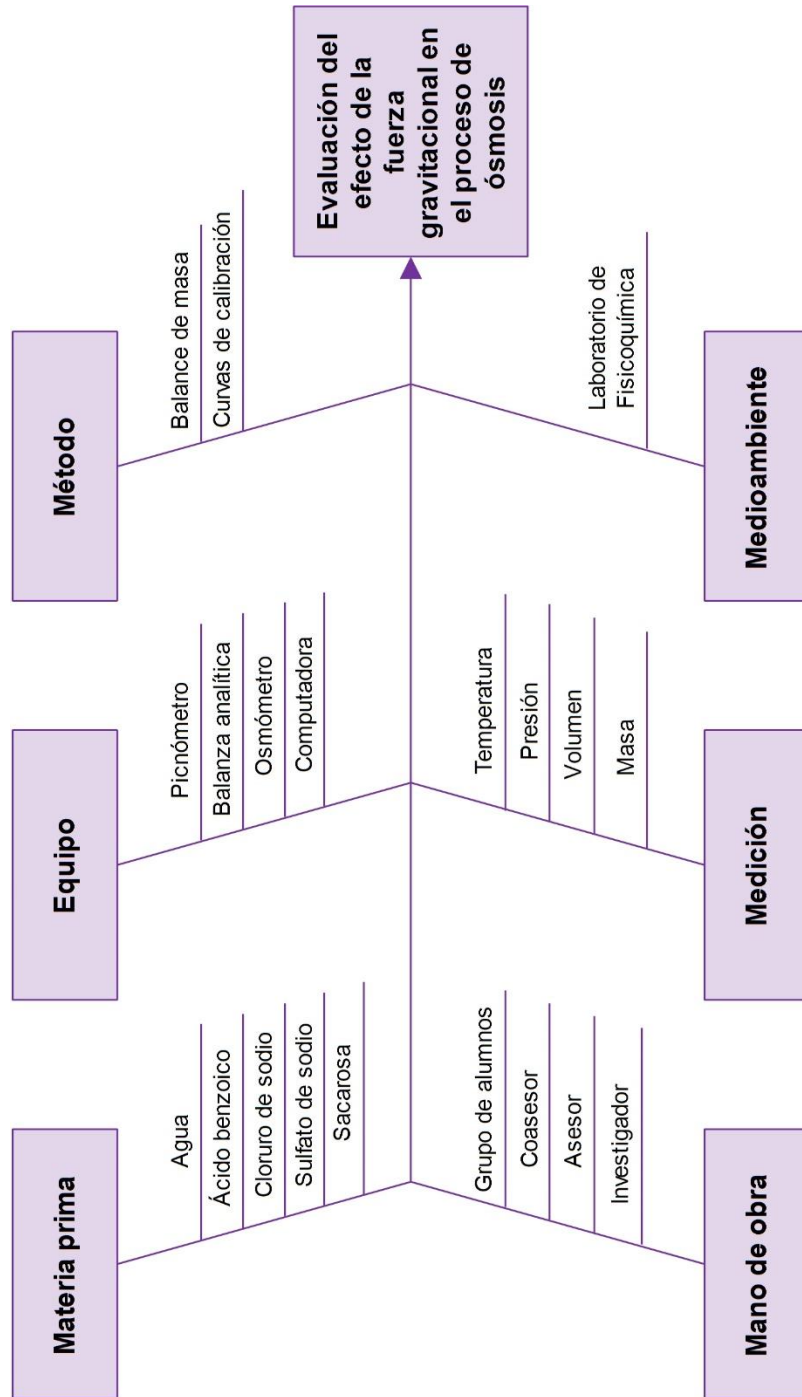
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



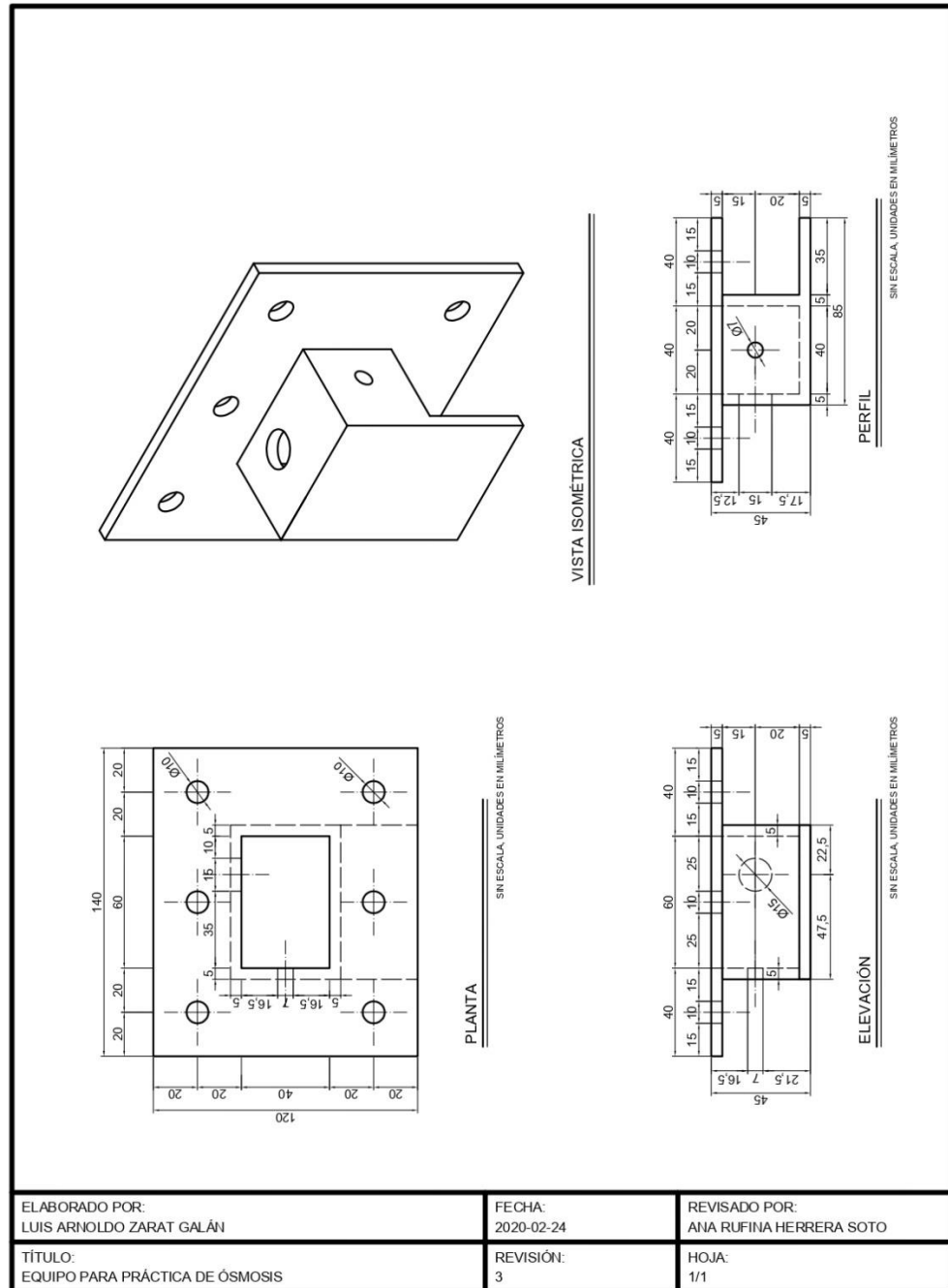
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



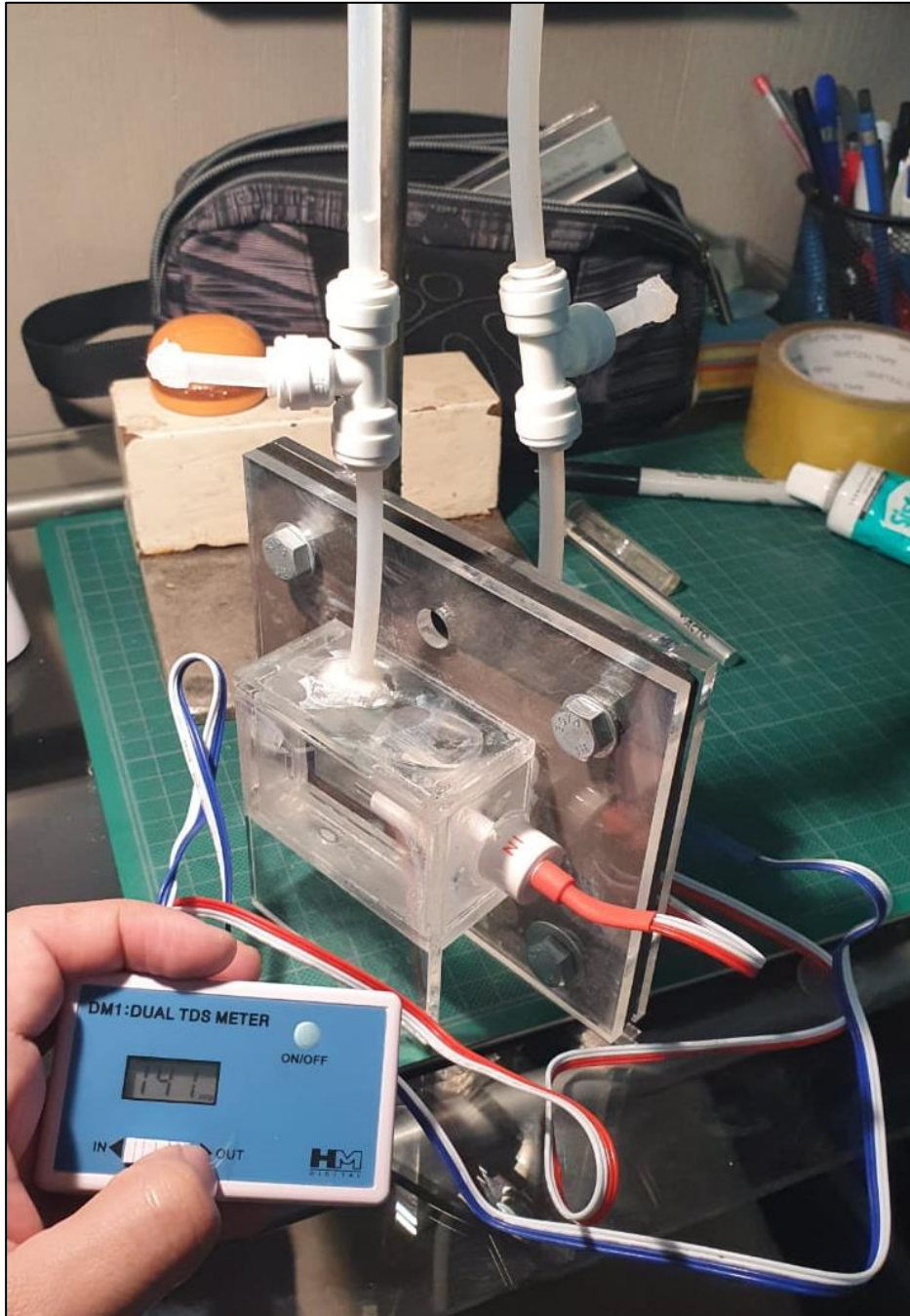
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Diseño del equipo para ósmosis directa



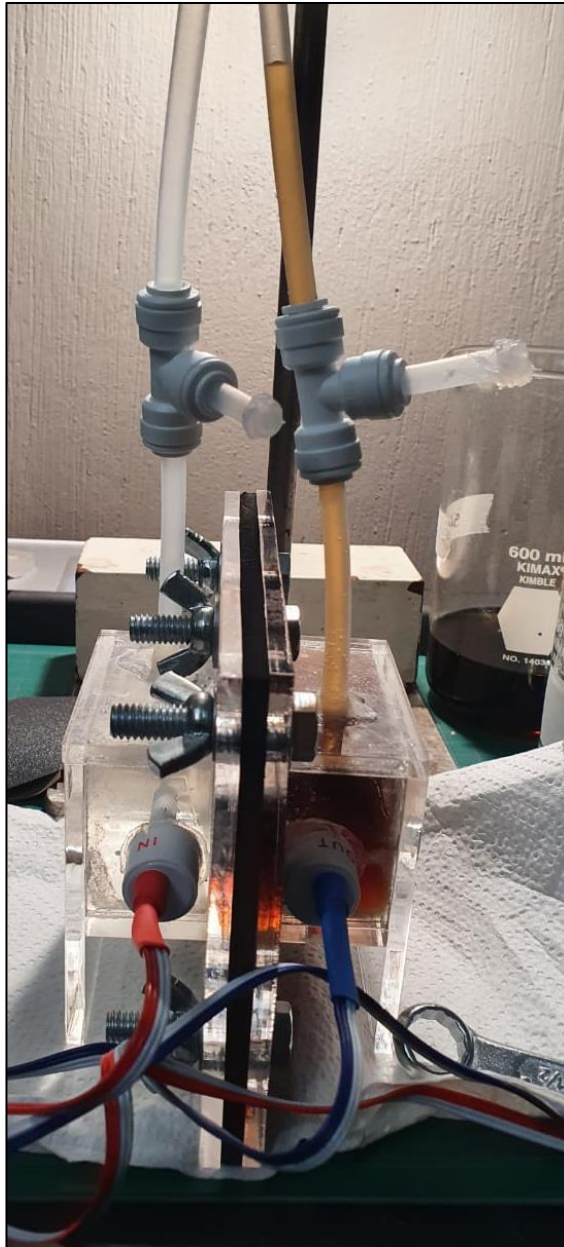
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Apéndice 4. **Equipo para ósmosis directa fabricado**



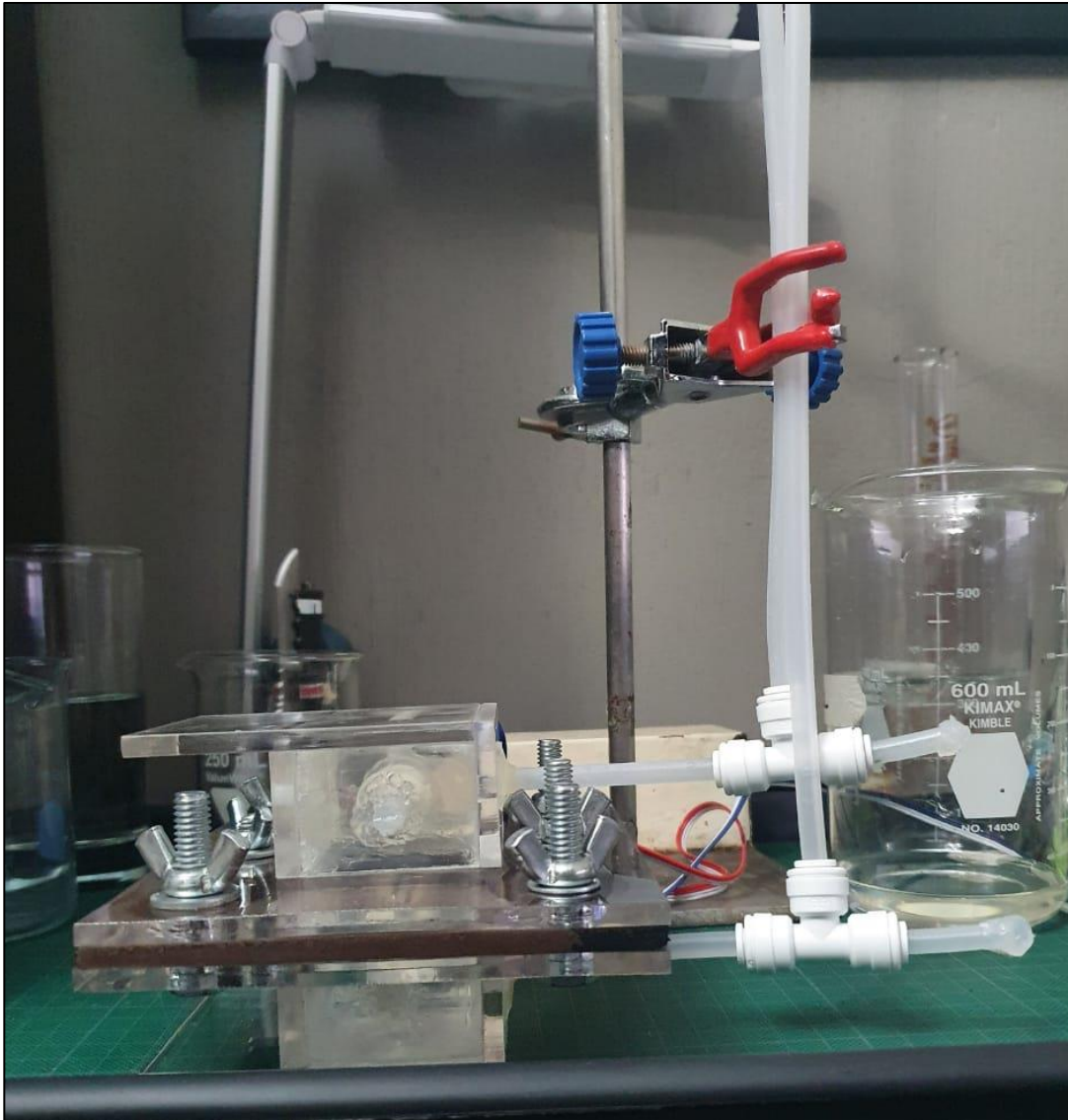
Fuente: elaboración propia, en el Laboratorio de Físicoquímica de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Equipo para ósmosis directa.

Apéndice 5. **Funcionamiento del equipo para ósmosis directa en posición vertical, utilizando una bebida carbonatada como prueba**



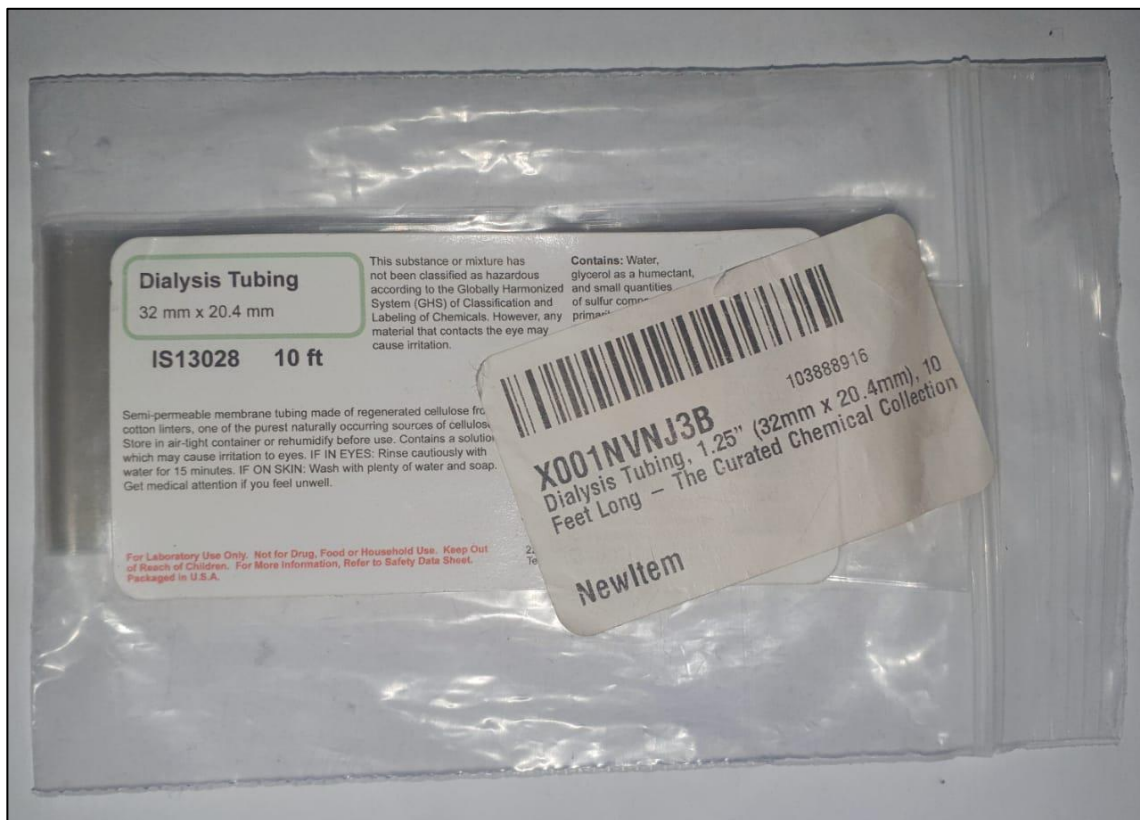
Fuente: elaboración propia, en el Laboratorio de Físicoquímica de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Equipo para ósmosis directa.

Apéndice 6. **Funcionamiento del equipo para ósmosis directa en posición horizontal**



Fuente: elaboración propia, en el Laboratorio de Físicoquímica de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Equipo para ósmosis directa en posición horizontal.

Apéndice 7. Membrana semipermeable de celulosa regenerada



Fuente: elaboración propia, en el Laboratorio de Físicoquímica de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Etiqueta de la membrana semipermeable de celulosa regenerada.

