

Evaluación del desalado de hidrolizados clarificados de sangre de bovino por la técnica de electrodiálisis

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico

Modalidad Investigación

Karen Ximena Bermudez Jaimes y Melany Tatiana Aponte Sandoval

Director

Carlos Jesús Muvdi Nova

Ingeniero Químico M.Sc., Ph.D.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

Dedicatorias

*A Dios, por escuchar mis peticiones, sostenerme cada día y brindarme los medios necesarios para avanzar. Con su guía y misericordia, todo ha sido, es y será posible.
A la Virgen Santísima, por su constante intercesión y amparo maternal en cada etapa de este camino.*

A mis padres, Nestor y Luz Marina, por ser el pilar fundamental de mi vida. Gracias por su amor incondicional, por su esfuerzo y sacrificio, por motivarme a seguir adelante y brindarme la oportunidad de alcanzar mis sueños. Su paciencia y apoyo han sido clave en la realización de este proyecto.

A mis hermanas, Angie, Luz Amparo y Lorena, por su cariño y por cada palabra de aliento que me impulsó a continuar.

A mi primo Pablo Antonio y su esposa Waldina; a mi hermana Angie y su esposo Edwin, por abrirme las puertas de sus hogares y brindarme su apoyo con generosidad y afecto.

A familiares y amigos, quienes creyeron en mí, me acompañaron en el proceso y depositaron su confianza en cada paso que di. Su respaldo ha sido invaluable.

Karen Ximena Bermudez Jaimes

*“Cree en ti y todo será posible.”
Audrey Hepburn*

A Dios, por ser mi guía constante, mi refugio en los momentos difíciles y la luz que iluminó mi camino.

A mis padres, especialmente a mi mamá Carol Sandoval, por su amor incondicional, por ser mi mayor ejemplo de fortaleza, por cada palabra de aliento y apoyo.

A mis hermanos Edison y Maryi, quienes caminaron conmigo en cada etapa de este proceso, a Daniel y Juan José, cuya existencia fue mi motor, mi alegría y mi motivación diaria.

A mis amigas de la universidad, por compartir risas, lágrimas, desvelos y logros. Ustedes fueron mi red de apoyo y mi segunda familia.

A mis amigos por estar presentes aún en la distancia, por hacerme sentir acompañada.

A Ximena, mi compañera de trabajo de grado, gracias por elegirme para ser parte de este proyecto, por tu compromiso y tu responsabilidad

Y a Nicolas, gracias por acompañarme con amor y paciencia, por creer en mí incluso en mis días más grises, por brindarme siempre tu apoyo.

Melany Tatiana Aponte Sandoval.

Agradecimientos

A **DIOS**, por guiarnos y brindarnos la fortaleza, sabiduría y salud para culminar con éxito esta etapa académica.

A la **Universidad Industrial de Santander**, por brindarnos una educación de calidad, por sus espacios, servicios y recursos que hicieron posible nuestro crecimiento profesional.

A la **Escuela de Ingeniería Química**, por ser nuestro espacio de formación, por su excelencia académica y por permitirnos adquirir conocimientos fundamentales para nuestro desarrollo como ingenieros.

Al **Grupo de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos – CICTA**, por su valioso respaldo durante la ejecución de este proyecto, permitiéndonos el uso de sus equipos, instalaciones y acompañamiento técnico.

Al **profesor Carlos Jesús Muvdi Nova**, por su dedicación, guía y compromiso en cada etapa de este proceso. Su acompañamiento fue fundamental para el desarrollo y orientación de esta investigación.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos.....	12
1.1. Objetivo general.....	12
1.2. Objetivos específicos	12
2. Marco teórico y estado del arte.....	13
3. Metodología	18
3.1. Etapa 1. Influencia de la variación del voltaje y concentración de sales en el proceso de desalado por electrodiálisis de soluciones ideales.....	18
3.2. Etapa 2. Efecto del proceso de desalado por electrodiálisis sobre las propiedades fisicoquímicas sobre la solución real.	20
3.3. Métodos experimentales y de análisis.....	21
4. Análisis y discusión de resultados	23
4.1. Desarrollo experimental y evaluación de las variables operativas con soluciones ideales.23	
4.2. Retención de hierro y sodio: Selectividad de las membranas.....	27
4.3. Efecto del proceso de desalado por electrodiálisis sobre las propiedades fisicoquímicas del hidrolizado.....	32
5. Conclusiones	38
6. Recomendaciones	39
Referencias bibliográficas.....	40

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Voltaje y concentración utilizados durante cada prueba con soluciones ideales.....	19
Tabla 2. Métodos para el análisis fisicoquímico.....	22
Tabla 3. Promedio para original y duplicado del porcentaje de hierro y sodio retenido.	26
Tabla 4. Sodio, hierro y proteínas hidrolizadas retenidos en solución real a una misma concentración a 25 y 30 V	34

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema del funcionamiento de un módulo de electrodiálisis con cinco celdas.	15
Figura 2. Diagrama metodológico.	18
Figura 3. Piloto de electrodiálisis utilizado durante el proyecto.	21
Figura 4. Desalado de soluciones ideales a una concentración C1 en CD a voltajes de 20, 25 y 30 V. a) Original CD, b) Duplicado CD, c) Original CC, d) Duplicado CC.	23
Figura 5. Desalado de soluciones ideales a una concentración C2 en CD a voltajes de 20, 25 y 30 V. a) Original CD, b) Duplicado CD, c) Original CC, d) Duplicado CC.	24
Figura 6. Desalado de soluciones ideales a una concentración C3 en CD a voltajes de 20, 25 y 30 V. a) Original CD, b) Duplicado CD, c) Original CC, d) Duplicado CC.	25
Figura 7. Sodio retenido con voltajes de 20, 25 y 30 V a concentraciones C1, C2 y C3.	28
Figura 8. Hierro retenido con voltajes de 20, 25 y 30 V a concentraciones C1, C2 y C3.	30
Figura 9. Selectividad de las membranas respecto al hierro con voltajes de 20, 25 y 30 V a concentraciones C1, C2 y C3.	31
Figura 10. Desalado de soluciones reales a una misma concentración a 25 V para prueba original y duplicado. a) CD, b) CC.	33
Figura 11. Desalado de soluciones reales a una misma concentración a 30 V para original y duplicado. a) CD, b) CC.	33

Resumen

Título: Evaluación del desalado de hidrolizados clarificados de sangre de bovino por la técnica de electrodiálisis*

Autores: Karen Ximena Bermudez Jaimes, Melany Tatiana Aponte Sandoval**

Palabras clave: Hidrolizado de sangre, electrodiálisis, desalinización, hierro

Descripción: El alto contenido de sales en los hidrolizados de sangre bovina hace que se limite su uso en alimentos enriquecidos, debido a sus efectos negativos, tanto sensoriales como nutricionales. Este proyecto evaluó el desalado de hidrolizados clarificados de sangre de bovino por la técnica de electrodiálisis, buscando reducir el contenido de sodio sin afectar compuestos de interés como el hierro y las proteínas. El trabajo se desarrolló en dos etapas. En la primera se aplicó un diseño factorial 3^2 variando voltaje y concentración, usando soluciones ideales con $\text{NaCl} + \text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el circuito de diluido buscando determinar el efecto de las variables evaluadas. En la segunda etapa, se aplicaron las condiciones seleccionadas a la solución real de acuerdo con los resultados de la Etapa 1. Los resultados mostraron que el voltaje y la concentración influyen en la retención de sodio y hierro. En soluciones ideales, el mayor porcentaje de remoción de sodio (79,8 %) y hierro (73,4 %) se logró a 20 V con concentración C3. Sin embargo, voltajes más altos redujeron la selectividad hacia el hierro, promoviendo su pérdida. En el tratamiento del hidrolizado real, se alcanzaron retenciones de proteína hidrolizada superiores al 90 % y de hierro cercanas al 100 %, mientras que el sodio se redujo en más del 50 % a 25 V. En conclusión, la electrodiálisis es una alternativa efectiva para reducir la salinidad en hidrolizados de sangre bovina sin afectar de manera importante su valor nutricional. La retención de hierro y proteínas demuestra la selectividad del proceso y su potencial para ser aplicado en el desarrollo de ingredientes alimentarios funcionales.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Carlos Jesús Muvdi Nova

Abstract

Title: Evaluation of the desalination of clarified bovine blood hydrolysates using the electro dialysis technique*

Authors: Karen Ximena Bermudez Jaimes, Melany Tatiana Aponte Sandoval**

Keywords: Blood hydrolysate, electro dialysis, desalination, iron

Description: The high salt content in bovine blood hydrolysates limits their use in enriched foods due to their negative sensory and nutritional effects. This project evaluated the desalting of clarified bovine blood hydrolysates using the electro dialysis technique, seeking to reduce the sodium content without affecting compounds of interest such as iron and proteins. The work was carried out in two stages. In the first stage, a 3^2 -factor design was applied, varying voltage and concentration, using ideal solutions with $\text{NaCl} + \text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ in the dilute circuit to determine the effect of the variables evaluated. In the second stage, the selected conditions were applied to the actual solution according to the results of Stage 1. The results showed that voltage and concentration influence sodium and iron retention. In ideal solutions, the highest percentage of sodium (79.8%) and iron (73.4%) removal was achieved at 20 V with concentration C3. However, higher voltages reduced selectivity toward iron, promoting its loss. In the treatment of the actual hydrolysate, hydrolyzed protein retention of over 90% and iron retention of close to 100% were achieved, while sodium was reduced by more than 50% at 25 V. In conclusion, electro dialysis is an effective alternative for reducing salinity in bovine blood hydrolysates without significantly affecting their nutritional value. The retention of iron and proteins demonstrates the selectivity of the process and its potential for application in the development of functional food ingredients.

* Degree work

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director Carlos Jesús Muvdi Nova

Introducción

En los procesos de hidrólisis enzimática, utilizados para la obtención de hidrolizados enriquecidos, es común el uso de soluciones como hidróxido de sodio (NaOH) y ácido clorhídrico (HCl) para ajustar el pH durante el tratamiento. Esta etapa, aunque es fundamental para la eficiencia del proceso enzimático, conlleva un incremento importante en la concentración de sales en el producto final. Este contenido salino elevado representa una limitante técnica cuando se busca aplicar el hidrolizado en formulaciones alimentarias, ya que puede afectar tanto la funcionalidad del ingrediente como su aceptación sensorial y nutricional.

Este tipo de situación fue evidenciada durante la obtención de un hidrolizado proteico a partir de sangre bovina. En esta matriz se observó un aumento del 175 % en la concentración de sodio tras la hidrólisis, pasando de 256,90 mg/100 g en la sangre fresca a 707,72 mg/100 g en el hidrolizado (Castillo Hernández & Ortiz Ardila, 2023). Posteriormente, en la etapa de clarificación, el contenido se redujo a 521,97 mg/100 g (González Herrera & Santiago Villar, 2025), valor que aún supera los límites recomendables para el uso en alimentos. Estos hallazgos sugieren la necesidad de incluir una etapa de desalado que permita disminuir la concentración de sales sin comprometer los compuestos de interés nutricional.

En este escenario, la electrodiálisis se presenta como una alternativa tecnológica adecuada para el tratamiento de soluciones que contienen sales disueltas. Esta técnica, que se basa en la aplicación de un campo eléctrico y el uso de membranas selectivas, permite remover iones de forma controlada, con eficacia y sin la incorporación de agentes químicos adicionales.

En el marco del presente proyecto, financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, y desarrollado por el grupo de investigación CICTA, se plantea la evaluación del proceso de desalado por electrodiálisis aplicado a hidrolizados clarificados de sangre bovina, considerando tanto soluciones reales como ideales, con el fin de comprender el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de voltaje y concentración salina.

De esta manera, se buscó dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación: ¿De qué manera influyen el voltaje y la concentración de sales en la efectividad de la electrodiálisis aplicada a hidrolizados clarificados de sangre bovina y en la reducción de las pérdidas de hierro en el hidrolizado final?

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Evaluar el desalado de hidrolizados clarificados de sangre de bovino por la técnica de electrodiálisis.

1.2. Objetivos específicos

- Identificar la influencia del voltaje y la concentración de sal en el proceso de desalado por electrodiálisis con soluciones ideales.
- Estudiar el efecto del proceso de desalado por electrodiálisis sobre las propiedades fisicoquímicas de los hidrolizados clarificados de sangre de bovino.

2. Marco teórico y estado del arte

El grupo CICTA lideró el proyecto de investigación de MinCiencias: “Desarrollo de una harina vegetal fortificada con hierro obtenido del procesamiento enzimático controlado de la sangre de bovino, como futura estrategia para aumentar la disponibilidad de hierro hemínico en la dieta de las familias con niños menores de 5 años del departamento de Boyacá”. El presente trabajo de investigación se integra en el objetivo específico 4, el cual trabajó en la implementación de etapas de postratamiento de los hidrolizados obtenidos, entre ellas, una etapa de desalado.

La hidrólisis es un proceso por el cual una molécula se descompone al reaccionar con agua, provocando la ruptura de enlaces moleculares. Esta puede realizarse de forma química o enzimática. La hidrólisis química implica el uso de ácidos para romper los enlaces peptídicos de las proteínas (Álvarez García, 2012). En contraste, la hidrólisis enzimática se basa en el uso de enzimas proteolíticas para descomponer las proteínas en péptidos más pequeños (Benítez et al., 2008).

La hidrólisis enzimática es una técnica que permite tratar efluentes como la sangre de bovino para recuperar compuestos de interés, conservando el valor nutritivo de las proteínas sanguíneas (Park & Hyun, 2002). Este proceso aumenta la solubilidad, las propiedades emulsificantes y la liberación de péptidos biológicamente activos, lo que beneficia su aplicación en diferentes productos alimenticios (Salazar-Posada et al., 2005).

En el proceso de hidrólisis enzimática, el pH cambia durante la ruptura de los enlaces peptídicos y, para mantener el equilibrio, se hace necesario agregar agentes reguladores de pH y controladores de la acción de la enzima (Fernández Alonso, 2015), como, por ejemplo, NaOH y

HCl. Esto da lugar a la formación de sales que se mantienen presentes en el hidrolizado. Así lo muestran Castillo Hernández & Ortiz Ardila (2023) en su trabajo con hidrolizados de sangre de bovino, y Ramakrishnan et al. (2024) en hidrolizados de salmón; ambos casos muestran un alto contenido de cenizas.

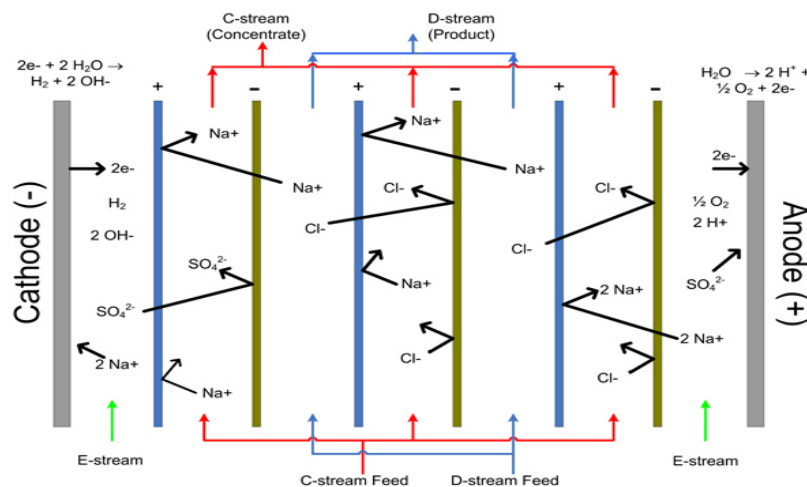
La presencia de altas concentraciones de sal no es favorable para posibles aplicaciones en fortificación de alimentos, ya que representa un riesgo para la salud y afecta las propiedades sensoriales. Hasta la fecha no se han hallado investigaciones relevantes sobre la eliminación de sales en hidrolizados de sangre, salvo un estudio que aplicó diafiltración al hidrolizado de salmón tras la filtración para este propósito (Ramakrishnan et al., 2024).

El proyecto de MinCiencias sugiere el uso de la electrodiálisis para eliminar las sales presentes en el hidrolizado. La electrodiálisis es una técnica de separación por membranas que se está utilizando en la industria agroalimentaria para concentrar, purificar o modificar alimentos (Pillo Santamaría, 2015). También ha sido muy utilizada para el tratamiento de aguas debido a su eficiencia energética, adaptabilidad ambiental y flexibilidad (Sedighi et al., 2023). Por otro lado, estudios muestran el uso de la electrodiálisis con membranas de ultrafiltración para la separación selectiva de péptidos bioactivos, mostrando la separación de los péptidos de los hidrolizados en función de la carga peptídica y la masa molecular, dando como resultado fracciones con mayor bioactividad (Cournoyer et al., 2024). A diferencia de la ósmosis inversa y la ultrafiltración, que separan las moléculas por tamaño, la electrodiálisis lo hace por carga eléctrica (Pillo Santamaría, 2015). En este proceso, se emplea un potencial eléctrico y membranas iónicas (cargadas) para llevar a cabo la separación (Pillo Santamaría, 2015).

Las membranas de intercambio iónico son láminas producidas a partir de materiales poliméricos. Estas membranas en la electrodiálisis convencional pueden ser catiónicas o aniónicas también conocidas como homopolares. Las membranas de intercambio catiónico contienen cargas negativas fijas, permitiendo el paso de cationes y rechazando los aniones (Parra Carmona, 2015). En las membranas de intercambio aniónico ocurre lo contrario, contienen cargas positivas fijas y permiten el paso de aniones mientras que rechazan los cationes (Parra Carmona, 2015). Las membranas son fundamentales en la unidad de electrodiálisis, y se espera que tengan ciertas características clave, como la selectividad entre iones de carga opuesta y una alta conductividad iónica (Pillo Santamaría, 2015). En la Figura 1 se muestra un esquema representativo de un módulo membranario.

Figura 1

Esquema del funcionamiento de un módulo de electrodiálisis con cinco celdas, donde se observa el movimiento de cationes y aniones a través de las membranas entre el ánodo y el cátodo.



Nota. De "Electrodiálisis", en Wikipedia (2022) (<https://es.wikipedia.org/wiki/Electrodi%C3%A1lisis>)

En esta figura se puede visualizar el transporte de iones a través de membranas de intercambio iónico dispuestas alternadamente entre el ánodo y el cátodo. Como se observa, los cationes (Na^+) migran hacia el cátodo atravesando las membranas catiónicas, mientras que los aniones (Cl^- , SO_4^{2-}) lo hacen hacia el ánodo a través de las membranas aniónicas, lo que permite separar las sales disueltas en diferentes compartimientos.

En el 2023, con apoyo del CICTA y MinCiencias, Cedeño González & Coronado Medrano (2023) construyeron y pusieron en marcha un equipo de electrodiálisis, en la sede UIS Guatiguará para el procesamiento de soluciones salinas. Este equipo de electrodiálisis ha sido probado para soluciones salinas como lactosuero, hidrolizados de requesón y caldos de fermentación. Cedeño González & Coronado Medrano (2023) establecieron ciertas condiciones de operación para el tratamiento de las soluciones salinas mencionadas, señalando que la turbidez no debe ser mayor a 10 NTU, por lo tanto, el proceso se debe trabajar con soluciones clarificadas; en la presente propuesta correspondería a hidrolizados clarificados.

El proceso de clarificación se realiza para separar sólidos suspendidos con ayuda de membranas. En el estudio realizado por Castillo Hernández & Ortiz Ardila (2023), se presentan cambios importantes en la turbidez entre el hidrolizado de sangre (17.300 NTU), el clarificado final (5,41 NTU) y el retenido (62.200 NTU), mostrando un porcentaje de reducción de la turbidez de 99,96% para el clarificado (Castillo Hernández & Ortiz Ardila, 2023).

En el proceso de electrodiálisis, la selectividad es un factor importante a la hora de recuperar compuestos de interés. En este caso se desea eliminar únicamente las sales presentes en la solución, sin afectar la presencia de hierro hemo y de proteínas en el hidrolizado. Estudios han mostrado una reducción del 92,1% en la concentración de NaCl en soluciones ideales de derivados

de lactosuero (Cedeño González & Coronado Medrano, 2023). Por otra parte, en busca de dar valor agregado a digestatos de subproductos alimentarios, la electrodiálisis eliminó más del 90% de las sales y recuperó entre el 35% y el 70% de N y P del digestato líquido fresco y maduro (Wang et al., 2022). A pesar de que las membranas iónicas están diseñadas para ser selectivas, la eficiencia de la separación puede verse afectada por diversos factores. En su trabajo, Torres Rodríguez et al. (2019) mostraron que los iones multivalentes y las concentraciones más altas aumentan la resistencia al transporte, lo cual termina afectando la selectividad de la membrana.

Por otra parte, el aprovechamiento de subproductos de origen animal para la fortificación de alimentos por medio de la hidrólisis enzimática ha adquirido importancia, sin embargo, no se han encontrado estudios que aborden las etapas de postratamiento como lo es el desalado de los hidrolizados. En ese sentido, durante el año 2024 se realizaron pruebas preliminares en el laboratorio de la UIS Sede Guatiguará, con estudiantes de pregrado. Estas pruebas fueron realizadas con soluciones ideales de NaCl y sulfato de hierro heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), variando el voltaje aplicado, y muestran que parte del hierro se pierde en el proceso de desalado (Argüello Quintero & Reyes Mojica, 2024).

Dado lo anterior, surge el interés en evaluar y comprender el comportamiento del desalado de hidrolizados de sangre de bovino mediante la técnica de electrodiálisis, especialmente dirigido al comportamiento de la selectividad y posibles pérdidas de hierro y proteínas en el proceso. Esto aporta en el desarrollo de estrategias para la eliminación de sales sin que se pierda el valor nutricional del hidrolizado.

3. Metodología

En la Figura 2 se muestra el diagrama de la metodología propuesta para alcanzar los objetivos planteados, la cual se llevó a cabo en dos etapas.

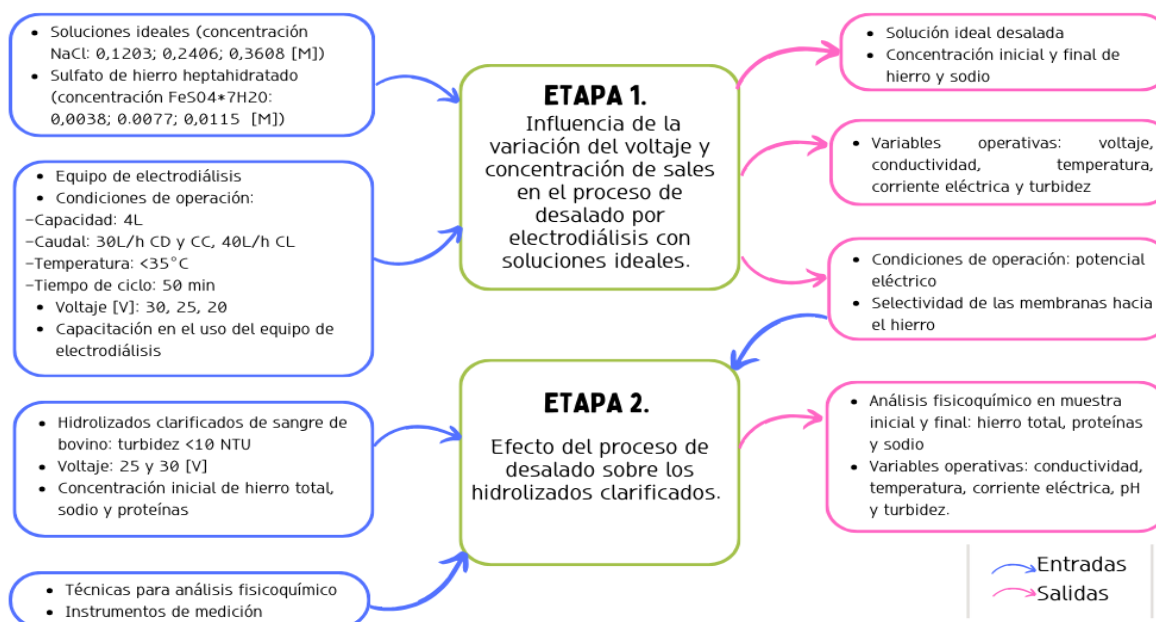


Figura 2. Diagrama metodológico.

3.1. Etapa 1. Influencia de la variación del voltaje y concentración de sales en el proceso de desalado por electrodiálisis de soluciones ideales.

Las primeras pruebas de desalado se llevaron a cabo utilizando el piloto de electrodiálisis bajo condiciones operativas específicas, con el fin de establecer las mejores condiciones para el tratamiento de soluciones reales. Las soluciones ideales se prepararon replicando el trabajo de Cedeño González & Coronado Medrano (2023), utilizando agua desmineralizada y NaCl; esta sal representó las sales presentes en el hidrolizado. La cantidad de NaCl se calculó teniendo en cuenta el sodio presente en el hidrolizado, el cual fue de 521,97 mg/100g (González Herrera & Santiago Villar, 2025). También, se añadió FeSO₄*7H₂O para simular el hierro presente en la solución real.

El cálculo de la cantidad de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ se realizó teniendo en cuenta la cantidad de hierro en la sangre, el cual es de 40,44 mg/100g (Castillo Hernández & Ortiz Ardila, 2023), esto da como resultado 0,0077 M de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

El diseño experimental que se utilizó fue un diseño factorial 3^2 . Este tipo de diseño permitió evaluar simultáneamente los efectos de dos factores (voltaje y concentración de $\text{NaCl} + \text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), observando cómo afectan estas dos variables en las pérdidas de hierro y sodio. Se trabajó con 3 niveles para el voltaje (20, 25 y 30 V) y 3 niveles de concentración de $\text{NaCl} + \text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,1203; 0,2406; 0,3608 M + 0,0038, 0,0077, 0,0115 M, respectivamente, correspondientes a C1, C2 y C3), lo que resultó en un total de 9 combinaciones experimentales, con duplicado. En la Tabla 1 se presentan las variables a trabajadas en cada prueba.

Tabla 1

Voltaje y concentración utilizados durante cada prueba con soluciones ideales.

Prueba	Voltaje (V)	Concentración	CD NaCl (g/L)	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (g/L)	CE Na_2SO_4 (g/L)	CC NaCl (g/L)
1	20	C1	7,03	1,06	71	1
2	20	C2	14,06	2,13	71	1
3	20	C3	21,09	3,19	71	1
4	25	C1	7,03	1,06	71	1
5	25	C2	14,06	2,13	71	1
6	25	C3	21,09	3,19	71	1
7	30	C1	7,03	1,06	71	1
8	30	C2	14,06	2,13	71	1
9	30	C3	21,09	3,19	71	1

Durante esta etapa se monitorearon variables clave como la conductividad, la temperatura, la corriente eléctrica y la turbidez tomando muestras cada 10 min.

Se determinó la selectividad de las membranas con respecto al hierro presente en las soluciones ideales. Para el cálculo de la selectividad se utilizó la siguiente expresión (Montserrat Quirós, 2015):

$$S_a = \frac{(Ca_t - Ca_0)}{(Ca_t - Ca_0) + (Cb_t - Cb_0)} \cdot 100 \quad (\text{Ec.1})$$

Donde, a y b corresponden a los dos iones entre los cuales se estudiará la selectividad, Ca_0 y Cb_0 son las concentraciones iniciales de cada ion y Ca_t y Cb_t son las concentraciones al momento del cálculo de la selectividad (Montserrat Quirós, 2015). Los iones presentes en las soluciones fueron Fe^{2+} , Na^+ . La selectividad estudiada fue $S_{Fe/Na}$. Un valor alto cercano a 100% se produce cuando el ion b se retiene en gran medida en el lado diluido, lo que resulta en una alta selectividad para el ion a (Van Der Bruggen et al., 2004).

3.2. Etapa 2. Efecto del proceso de desalado por electrodiálisis sobre las propiedades fisicoquímicas sobre la solución real.

Los hidrolizados clarificados de sangre de bovino congelados fueron suministrados por González Herrera & Santiago Villar (2025). Inmediatamente después de descongelados se midió su turbidez la cual fue de 5,84 NTU. Se trabajó a una misma concentración de hidrolizado en todas las pruebas, debido al bajo contenido de hierro en el hidrolizado clarificado. Las pruebas se realizaron a 25 y 30 V, ya que estos voltajes permitían una mejor remoción de sodio y no había gran pérdida de hierro (resultados obtenidos en la Etapa 1).

Durante las pruebas, al igual que con las soluciones ideales, se realizó un seguimiento del comportamiento del proceso de desalado mediante la toma de muestras cada 10 min, con el fin de identificar la variación en el tiempo, de la conductividad, pH, turbidez, temperatura y corriente

eléctrica. Luego del proceso de desalado se realizaron pruebas de caracterización para conocer el contenido final de hierro, sodio y proteína hidrolizada presentes en los hidrolizados. Estas pruebas se realizaron con ayuda de diferentes equipos y técnicas.

3.3. Métodos experimentales y de análisis.

En la Figura 3 se muestra el equipo de electrodiálisis utilizado para el desalado de las soluciones tratadas en este trabajo.

Figura 3

Piloto de electrodiálisis utilizado durante el proyecto.



- **Piloto de electrodiálisis.**

La unidad de electrodiálisis se conforma principalmente por tanques de almacenamiento, bombas centrífugas, el módulo membranario, rotámetros y manómetros. El módulo membranario está integrado por tres circuitos independientes; un circuito de concentrado (CC) por el que circula parte de la solución que irá enriqueciéndose de iones, un circuito de diluido (CD) en el que la solución se irá empobreciendo de iones, y un circuito de eluido (CE) para minimizar la presencia de reacciones en el área de los electrodos (Cedeño González & Coronado Medrano, 2023). Se

llevó a cabo el proceso de electrodiálisis con un volumen de 4 L para cada circuito, una temperatura por debajo de 35°C (iniciando en <10°C) y un tiempo de ciclo de 50 min.

- **Técnicas de caracterización**

En la Tabla 2 se presentan las técnicas de caracterización fisicoquímica utilizadas en el presente Trabajo de grado.

Tabla 2

Métodos para el análisis fisicoquímico.

Características	Normatividad	Principio de funcionamiento
Contenido de hierro	Norma NTC-EN 14084:2021	Espectroscopía de absorción atómica asistida por digestión por microondas.
Contenido de sodio	Norma UNE-EN 15505:2008	Espectroscopía de absorción atómica asistida por digestión por microondas.
Proteínas	Norma GOMEPL.01 V08 2019-04-01.	Proteínas por titulación (Kjeldahl)

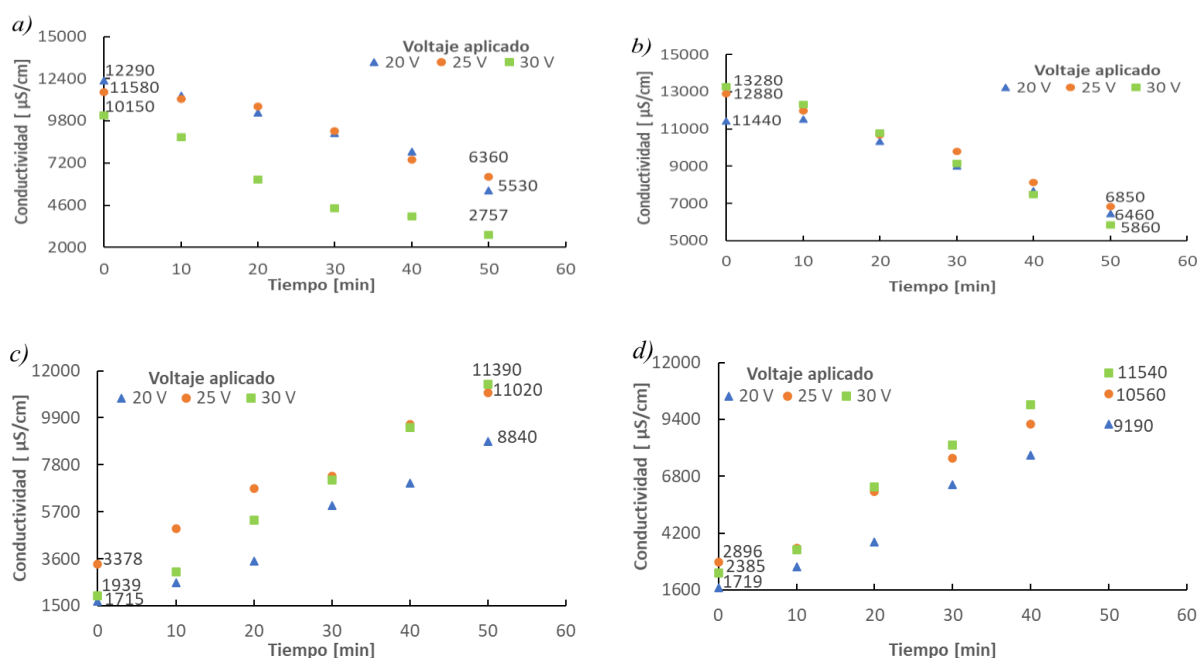
4. Análisis y discusión de resultados

4.1. Desarrollo experimental y evaluación de las variables operativas con soluciones ideales.

En la Figura 4 se muestra la variación de la conductividad a una misma concentración inicial (C1) para los circuitos CD y CC a lo largo de las pruebas de desalado en original y duplicado. Se observa que la conductividad en el circuito CD va disminuyendo, mientras que en el circuito CC va aumentando a medida que transcurre la prueba. Esto se debe a la transferencia iónica inducida por el voltaje aplicado.

Figura 4

*Desalado de soluciones ideales a una concentración en CD de 7,03 g/L NaCl + 1,06 g/L FeSO₄*7H₂O a voltajes de 20, 25 y 30 V. a) Original CD, b) Duplicado CD, c) Original CC, d) Duplicado CC.*



Algo similar ocurre cuando se aumenta la concentración de sales en las soluciones en el circuito CD (Figuras 5 y 6). A un mismo voltaje se alcanzan valores de conductividad más altos, lo que ratifica una mayor presencia de iones en las soluciones. Para el circuito CC se observa que a medida que aumenta la concentración también aumenta la conductividad en la muestra final. Lo anterior se presenta tanto en originales como en duplicados. En todas las pruebas, al aumentar la concentración, la conductividad de la solución del circuito CD también aumenta; lo cual muestra el aumento en la presencia de iones en la solución.

Figura 5

*Desalado de soluciones ideales a una concentración en CD de 14,06 g/L NaCl + 2,13 g/L FeSO₄*7H₂O a voltajes de 20, 25 y 30 V. a) Original CD, b) Duplicado CD, c) Original CC, d) Duplicado CC*

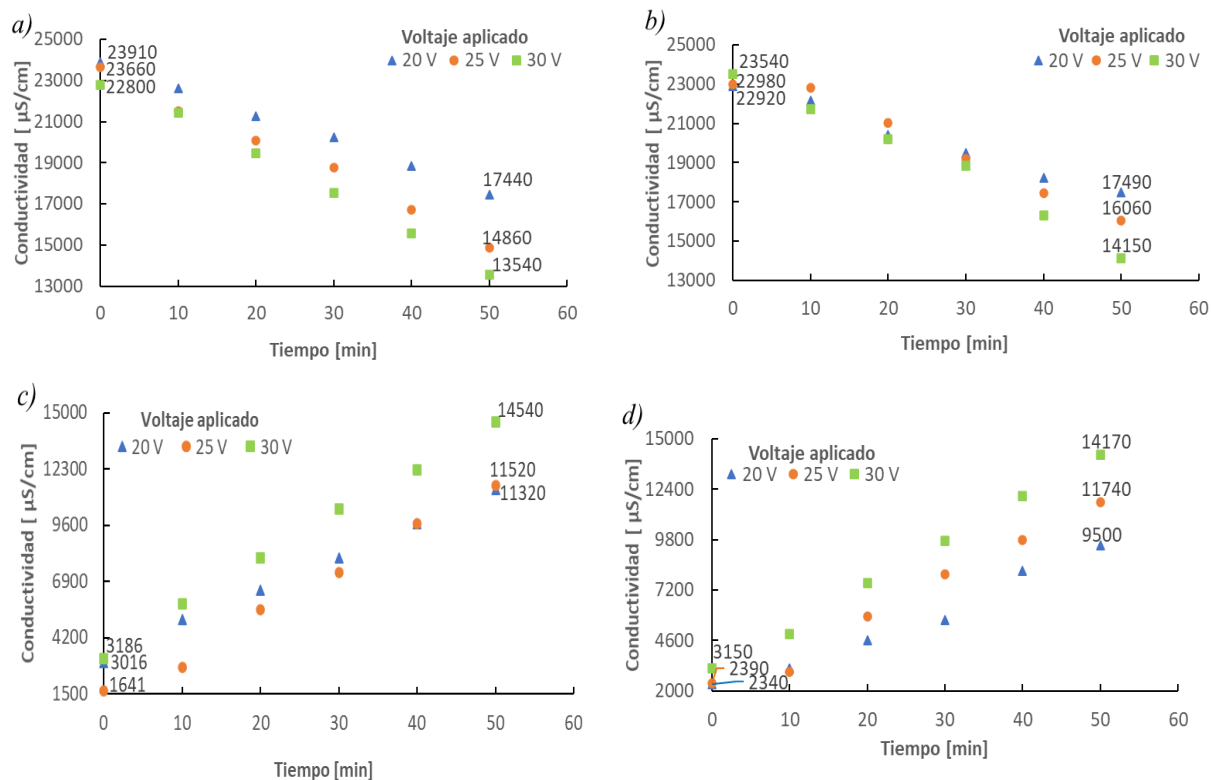
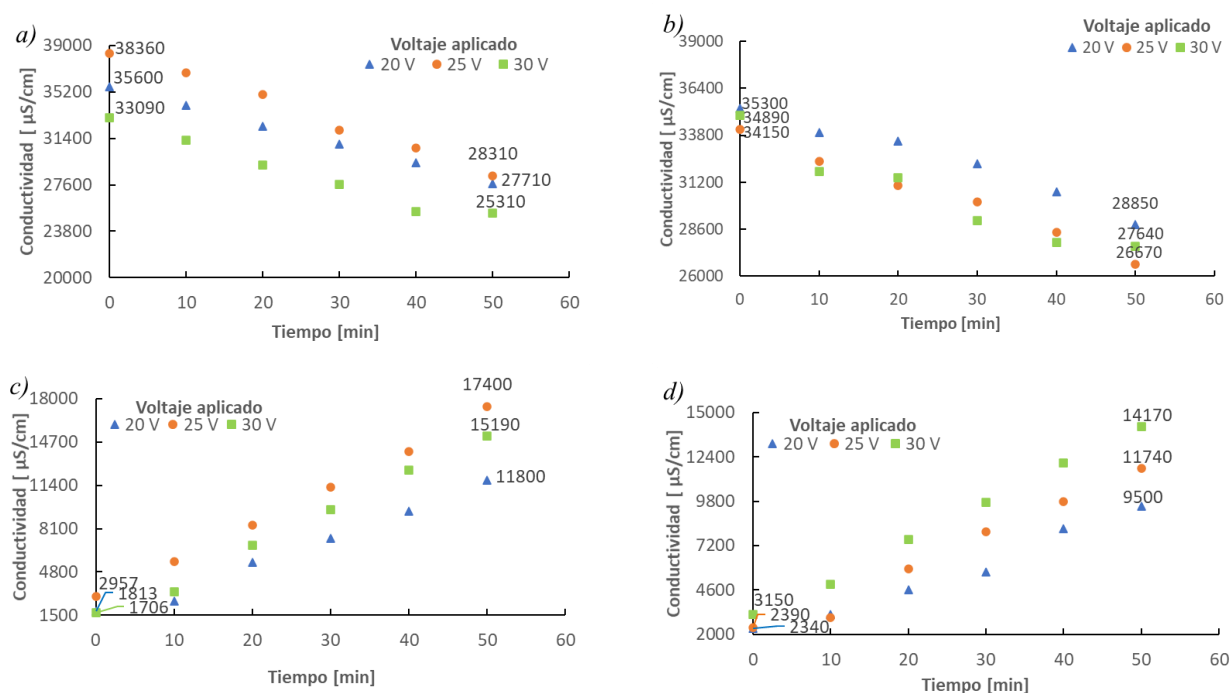


Figura 6

*Desalado de soluciones ideales a una concentración en CD de 21,09 g/L NaCl + 3,19 g/L FeSO₄*7H₂O a voltajes de 20, 25 y 30 V. a) Original CD, b) Duplicado CD, c) Original CC, d) Duplicado CC*



En la Tabla 3 se muestran los promedios y desviación media de los porcentajes de retención para Na⁺ y Fe²⁺, así como los valores de corriente eléctrica (inicial, final y máxima) registrados durante los ensayos a diferentes voltajes (20, 25 y 30 V) y concentraciones (C1, C2 y C3). Los valores de corriente registrados durante el proceso de separación mostraron un aumento con el incremento del voltaje aplicado. A un mismo voltaje la corriente máxima y la corriente final alcanzada incrementa su valor al aumentar la concentración inicial del circuito CD. Por otra parte, a una misma concentración inicial, la corriente inicial, final y máxima aumentan cuando se incrementa el voltaje aplicado. Por ejemplo, para 20 V, la corriente máxima alcanzada estuvo entre

0,57 y 0,94 A, mientras que para 30 V se observaron valores máximos entre 0,92 y 1,31 A; este último valor presentándose a los valores más altos aplicados de voltaje y concentración.

Tabla 3

Promedio para original y duplicado del porcentaje de hierro y sodio retenido.

Voltaje [V]	Concentración	Na ⁺ retenido [%] *	Fe ²⁺ retenido [%] *	Corriente [A] **		
				Inicial	Final	Max
20	C1	55,7±9,1	24,1±3,0	0,36	0,52	0,57
20	C2	68,4±0,9	59,6±2,6	0,47	0,73	0,77
20	C3	79,8±1,9	73,4±1,8	0,53	0,92	0,94
25	C1	53,1±0,1	29,4±8,5	0,51	0,55	0,63
25	C2	66,8±5,9	54,4±10,7	0,50	0,86	0,90
25	C3	77,6±6,5	67,0±4,7	0,62	1,13	1,24
30	C1	30,9±3,3	21,5±1,8	0,55	0,59	0,92
30	C2	58,4±3,1	54,4±6,9	0,68	1,03	1,05
30	C3	60,1±0,0	61,3±7,0	0,65	1,25	1,31

* La desviación presentada corresponde a la desviación media de los promedios de los porcentajes de retención de Na⁺ y Fe²⁺ de las pruebas original y duplicado.

** Correspondiente a los promedios de las pruebas original y duplicado de los datos tomados a lo largo de cada prueba

Es importante señalar que en todas las pruebas la corriente disminuye después de aproximadamente 30 min. Pilco Núñez et al. (2018), al trabajar en electrodiálisis de sales de cromo, observaron que durante las primeras horas de prueba la corriente aumentaba, pero luego comenzaba a disminuir. Este comportamiento inicial fue atribuido al aumento progresivo de corriente en los primeros minutos de prueba debido a la alta disponibilidad de iones, a lo que se suma, el aumento de la temperatura, fenómeno que genera una reducción en la viscosidad de la solución. Dicha disminución en la viscosidad ocasiona un aumento en la conductividad de la solución, lo cual facilita la movilidad de los iones (Manzo Parra, 2023). Posteriormente, el

empobrecimiento de iones presentes en el compartimento del diluido CD ocasiona una reducción en la disponibilidad iónica y un aumento de la resistencia eléctrica (Pilco Núñez et al., 2018).

Adicionalmente, se observa que, al aumentar el voltaje, la corriente alcanza valores más altos, evidenciando un mayor flujo de iones a través de las membranas. Esto es esperado, ya que, según la ley de Ohm, la corriente es directamente proporcional al voltaje. Lo anterior indica que el sistema no ha alcanzado la denominada corriente límite; la cual se presenta cuando el amperaje no aumenta con el aumento de voltaje debido a la polarización por concentración en las membranas. Por lo tanto, el aumento de la corriente con el voltaje demuestra condiciones favorables de operación, que facilita la migración de iones y, por ende, la eliminación de sales presentes en las soluciones (Cedeño González & Coronado Medrano, 2023; Zuta & Pilco 2018).

De acuerdo con la curva de calibración de la concentración de NaCl en el tiempo calculada por Cedeño González & Coronado Medrano (2023), se estimaron las concentraciones de NaCl en cada fase del proceso de desalado en el piloto de electrodiálisis. Para ello, se utilizaron los valores de conductividad obtenidos en las caracterizaciones de cada prueba. Se observó una tendencia de pérdida de sales en la línea diluida y de ganancia en la línea concentrada. La conductividad aportada por $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ no se tuvo en cuenta ya que es baja en comparación con la del NaCl.

4.2. Retención de hierro y sodio: Selectividad de las membranas.

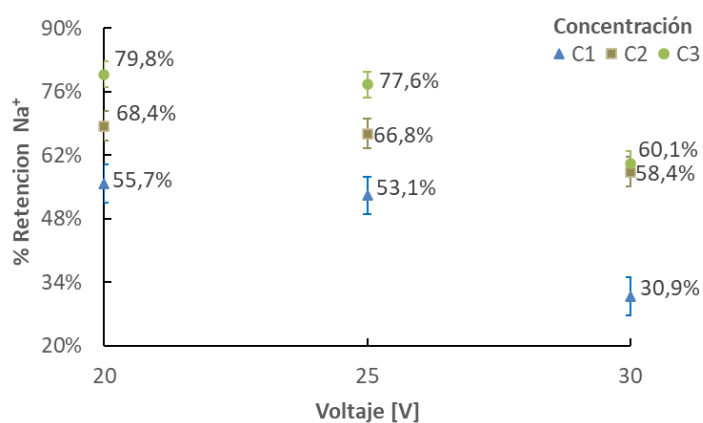
De igual manera, en la Tabla 3 (presentada anteriormente) se observa que, en general, un aumento en el voltaje aplicado tiende a disminuir la retención de iones, especialmente, en condiciones de baja concentración. Por ejemplo, a 30 V y concentración C1, se obtuvo una de las retenciones más bajas tanto para Na^+ ($30,9 \pm 3,3$ %) como para Fe^{2+} ($21,5 \pm 1,8$ %) y a 20 V y

concentración C3 se alcanzaron las mayores retenciones tanto para Na^+ ($79,8 \pm 1,9$ %) como para Fe^{2+} ($73,4 \pm 1,8$ %).

La Figura 7 muestra el promedio de los porcentajes de retención de Na^+ retenido respecto a las concentraciones y el voltaje aplicado (original y duplicado). El porcentaje de Na^+ retenido tiende a disminuir cuando aumenta el voltaje aplicado a una misma concentración, lo cual es coherente con los fundamentos que aplican a la electrodiálisis. Por otro lado, a un mismo voltaje, la cantidad de Na^+ retenido aumenta al incrementar la concentración de sales, esto indica que, aunque el voltaje aplicado permite transportar los iones presentes en la solución, la velocidad de separación no aumenta en la misma proporción al incremento de la concentración.

Figura 7

Sodio retenido con voltajes de 20, 25 y 30 V a concentraciones de 7,03 g/L NaCl + 1,06 g/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 14,06 g/L NaCl + 2,13 g/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y 21,09 g/L NaCl + 3,19 g/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ correspondientes a C1, C2 y C3.



Strathmann (2004) explica que, en procesos de electrodiálisis un aumento en el voltaje genera un campo eléctrico más intenso, lo que mejora la movilidad iónica y la eficiencia del transporte a través de las membranas de intercambio iónico. Van Der Bruggen et al. (2004) al trabajar en electrodiálisis de sales (NaCl, NaNO₃, MgCl₂, Na₂SO₄, MgSO₄) con iones monovalentes y divalentes a 5 V y 10 V señala que, se alcanza una mayor transferencia de iones y en menor tiempo al aplicar mayor voltaje (10 V). Por su parte Merkel & Ashrafi (2019) en su estudio sobre eliminación electrodiálítica de NaCl del agua, observaron que el aumento del voltaje mejoraba la remoción de sodio. Realizaron pruebas a voltajes entre 15 y 50 V con concentraciones iniciales de 5 g NaCl/L y encontrando que a 15 V tardaba 1 h en remover el 90% de la sal mientras que a 50 V tardaba solo 21 min, pero con disociación del agua evidenciado con cambios importantes en el pH.

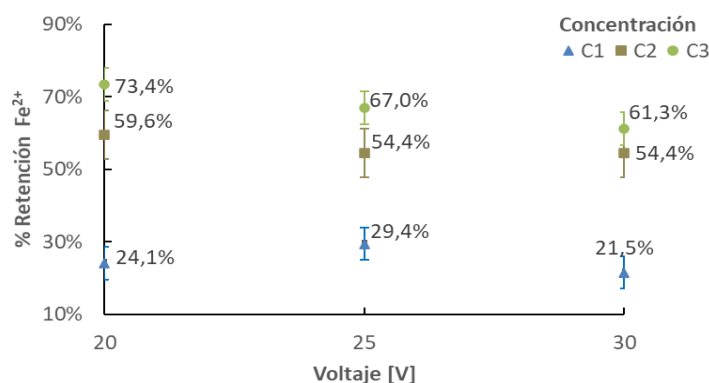
Lo anterior es consistente con los valores promedio del flux de Na⁺ calculados, presentando valores más bajos a 20 V ($0,00106 \pm 0,00004$ - $0,00127 \pm 0,00013$ mol/s*m² entre las tres concentraciones) que a 30 V ($0,00131 \pm 0,00000$ - $0,00165 \pm 0,00001$ mol/s*m²). Por otro lado, el valor más alto de flux para la variación de concentración se registró en la concentración C3, con rangos entre $0,00140$ y $0,00178$ μmol/s*m² (el valor más bajo de flux se presentó en C1 estuvo en el rango de $0,00093$ y $0,00132$ μmol/s*m²). Al incrementarse la concentración en el circuito CD se observa una mayor velocidad de separación, pero esta no aumenta en la misma proporción como ocurre con la concentración, es por ello, que hay un aumento en el porcentaje de retención.

En la Figura 8 se presenta el comportamiento de la retención de hierro a diferentes voltajes (20, 25 y 30 V) y concentraciones del circuito de diluido CD (C1, C2 y C3). Se puede observar

que el hierro retenido tiende a aumentar cuando aumenta la concentración del circuito CD a un mismo voltaje y no presenta una tendencia al cambio de voltaje.

Figura 8

Hierro retenido con voltajes de 20, 25 y 30 V, a concentraciones de 7,03 g/L NaCl + 1,06 g/L $FeSO_4 \cdot 7H_2O$; 14,06 g/L NaCl + 2,13 g/L $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ y 21,09 g/L NaCl + 3,19 g/L $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ correspondientes a C1, C2 y C3.



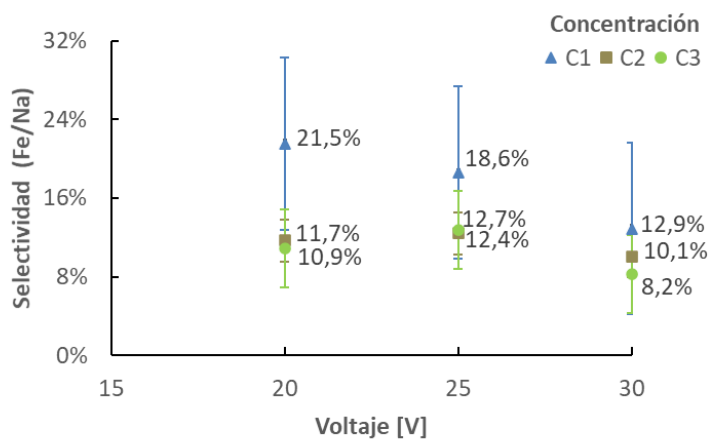
Como parte del análisis estadístico de las pruebas realizadas con soluciones ideales, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba Tukey para identificar diferencias significativas en la retención de sodio y hierro bajo las distintas condiciones operativas. Los resultados mostraron que existen diferencias estadísticamente significativas entre algunos tratamientos, ya que el valor crítico de HSD (0,50747 para Na^+ y 0,23831 para Fe^{2+}) fue superado por algunos de los contrastes entre promedios, lo que indica que ciertos niveles de concentración afectan de manera significativa la eficiencia de remoción de iones. En el caso del ion hierro el cambio entre C1-C2 y C1-C3 fue significativo en cada nivel de voltaje; para el ion sodio solo una variación fue significativa C1-C3 a 30 V. Para los valores de voltaje, los resultados del análisis

estadístico no mostraron variación significativa, posiblemente debido a las desviaciones obtenidas para algunos valores de voltaje.

En la Figura 9 se muestra la selectividad promedio y la desviación media de los datos experimentales. Las líneas de desviación media muestran que se presentaron mayores diferencias entre las pruebas original y duplicado para la concentración C1. Debido a las altas desviaciones observadas en los datos, no se evidencia el efecto del voltaje ni de la concentración de sales utilizadas; los análisis estadísticos realizados indican que el voltaje no presenta una influencia significativa. Cabe resaltar que los resultados de selectividad se miden entre 0% y 100%. Un valor bajo de $S_{Fe/Na}$ indica que las membranas presentan baja selectividad hacia Fe^{2+} , lo cual es favorable, ya que se evita su pérdida durante el proceso.

Figura 9

Selectividad de las membranas respecto al hierro con voltajes de 20, 25 y 30 (V) a concentraciones de 7,03 g/L NaCl + 1,06 g/L $FeSO_4 \cdot 7H_2O$; 14,06 g/L NaCl + 2,13 g/L $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ y 21,09 g/L NaCl + 3,19 g/L $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ correspondientes a C1, C2 y C3.



Los resultados de selectividad indican que los iones monovalentes como el sodio se transportan en mayor proporción que los iones divalentes como el hierro, ya que los valores de selectividad del Fe^{2+} se mantuvieron bajos (entre 8 % y 21 %); esto se debe a que los iones multivalentes como el Fe^{2+} presentan una mayor afinidad electrostática hacia otras especies cargadas, lo que les permite retener un mayor número de moléculas de agua en su entorno inmediato, formando esferas de hidratación más grandes que se movilizan a menor velocidad que los iones con una sola carga (Hamani et al., 2011).

Así mismo, Van Der Bruggen et al. (2004) mencionan que la velocidad de transporte de los iones a través de las membranas está influenciada por su valencia, lo cual se explica por la naturaleza de las membranas utilizadas: compuestas por resinas con sitios de intercambio iónico que presentan una mayor afinidad por los iones multivalentes. Esta afinidad implica una mayor retención de los iones con mayor carga, reduciendo su movilidad a través del material de la membrana y, en consecuencia, ralentizando su transferencia en comparación con los iones monovalentes (Van Der Bruggen et al., 2004).

4.3. Efecto del proceso de desalado por electrodiálisis sobre las propiedades fisicoquímicas del hidrolizado.

El hidrolizado de proteínas clarificado fue proporcionado del trabajo de grado realizado por González Herrera & Santiago Villar (2025) . La turbidez inicial de toda la solución utilizada durante las pruebas fue de 5,84 NTU. El pH no mostró una variación importante a lo largo del proceso; en las pruebas a 25 V, el pH estuvo en $8,29 \pm 0,040$ y para 30 V en $8,38 \pm 0,012$. En consecuencia, se puede evidenciar que el proceso no provoca alteraciones en el pH del circuito CD a voltajes de 25 y 30 V.

En las Figuras 10 y 11 se muestra el comportamiento de la conductividad a lo largo de las pruebas para original y duplicado a 25 y 30 V, en los circuitos CD y CC con soluciones reales.

Figura 10

Desalado de soluciones reales a una misma concentración a 25 V para prueba original y duplicado. a) CD, b) CC

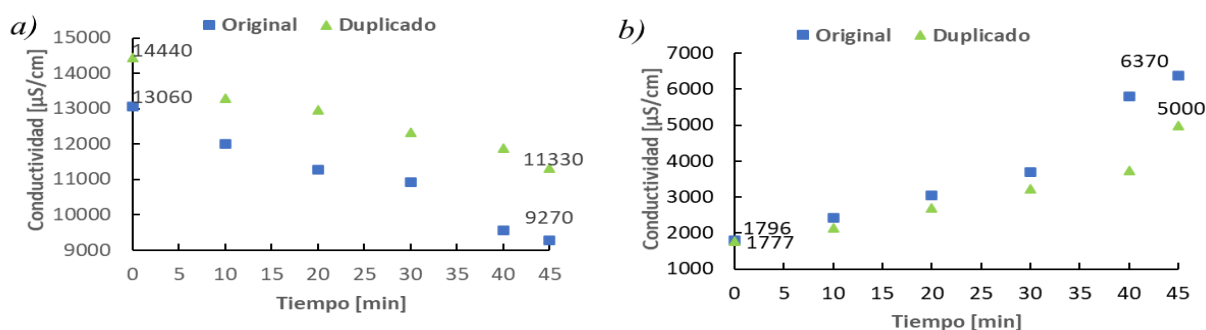
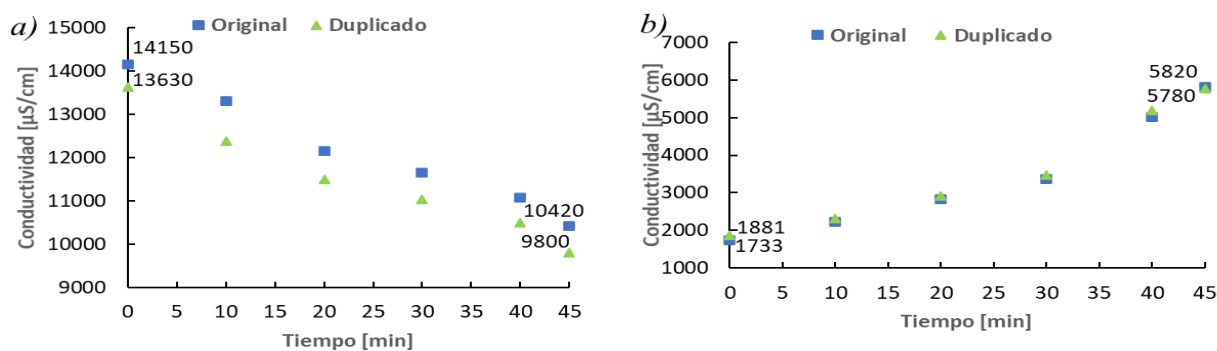


Figura 11

Desalado de soluciones reales a una misma concentración a 30 V para prueba original y duplicado. a) CD, b) CC.



Se puede observar que, aunque hay incremento de la conductividad en el circuito CC y disminución en el circuito CD, esta no lo hace con el mismo impacto comparado con las soluciones ideales. Esto podría ser debido a que la corriente alcanzada fue relativamente baja (0,36 A corriente

máxima alcanzada de todas las pruebas, con una corriente final de 0,31 A correspondiente a las pruebas donde se alcanzó la máxima).

De acuerdo con los valores de flux calculados, se evidencia que se alcanzan valores más bajos (entre $0,00055 \pm 0,00006$ y $0,00067 \pm 0,00006$ mol/s*m² a 25 V y entre $0,00066 \pm 0,00001$ y $0,00068 \pm 0,00001$ mol/s*m² a 30 V) comparado con los datos obtenidos para soluciones ideales (pág. 31).

En la Tabla 4 se puede observar el promedio de los porcentajes de retención de las pruebas para los iones de Na⁺, Fe²⁺, y de proteínas, respecto al voltaje aplicado (original y duplicado). Se observa que hay menor retención de Na⁺ a 25 V, lo cual es favorable ya que implica una mayor eliminación de este ion con un menor consumo energético, permitiendo obtener hidrolizados con menor contenido de sodio. El porcentaje de retención de proteínas hidrolizadas evidencia que hay poca pérdida de éstas, con valores superiores al 90% de retención. El porcentaje de hierro presenta valores cercanos al 100% de retención, indicando que no hay pérdida aparente de este ion en el circuito de diluido; la ligera variación observada puede corresponder a la precisión del método de análisis.

Tabla 4

Sodio, hierro y proteínas hidrolizadas retenido en solución real a una misma concentración a 25 y 30 V.

Voltaje (V)	Retención Na⁺ [%] *	Retención Fe²⁺ [%] *	Retención Proteína Hidrolizada [%] *
25	46,7±0,7	109,5±5,2**	92,0±4,3
30	67,4±0,7	99,0±5,2	91,1±4,3

* La desviación presentada corresponde a la desviación media.

** Este valor supera el 100%, lo cual no es físicamente posible para un porcentaje de retención, sin embargo, se presenta debido a la precisión del método de cuantificación utilizado.

Al comparar los resultados obtenidos en soluciones ideales con los registrados en soluciones reales, en cuanto a la retención de sodio se observan tendencias al parecer contradictorias a las reportadas en diversos estudios. Esto debido a que en las pruebas con soluciones reales la cantidad de sodio removida disminuyó al aumentar el voltaje. Urbina Mijangos (2022) aplicando electrodiálisis durante 3 h a aguas salobres con concentración inicial 0,01 M de NaCl con voltajes de 7 y 14 V, indica que no hay un cambio notorio al aumentar el voltaje en la remoción de iones Na^+ , obteniendo una remoción de 24,6 % de sodio.

El aumento aparente de la retención de sodio podría deberse a interacciones iónicas complejas en medios reales. Durante la electrodiálisis de soluciones complejas, las cuales pueden contar con presencia de compuestos orgánicos como proteínas se puede presentar el fenómeno de ensuciamiento. Este ensuciamiento depende de las características de las membranas, las condiciones de la solución a tratar, y las propiedades físicas y químicas de los contaminantes (Lee et al., 2002). Merkel & Ashrafi (2019) en su trabajo con suero ácido, señalan que a 50 V se alcanzó una desmineralización del 85% en 195 min, pero también una gran acumulación de materiales orgánicos e inorgánicos en las superficies de las membranas. Esto fue revelado mediante imágenes SEM (*Scanning Electron Microscopy*) las cuales mostraron una capa densa de material adherido en las membranas usadas en electrodiálisis convencional, especialmente en el lado del diluido que genera una disminución del flux y por ende una mayor retención.

Durante los ensayos con hidrolizados de sangre bovina el ensuciamiento de las membranas se evidenció de forma indirecta: a los pocos días de concluidas las pruebas el módulo de electrodiálisis desprendía un olor intenso, indicativo de actividad microbiana sobre la materia orgánica retenida en la superficie de las membranas. El ensuciamiento por presencia de coloides

aumenta por corrientes altas debido a la polarización por concentración y la posible formación de una estructura de membrana bipolar que promueve la deposición de coloides y por altas concentraciones, ya que reducen la conductividad del medio y favorecen la adherencia de coloides (De Jaegher et al., 2020).

Por otra parte, respecto al hierro, en soluciones ideales se observaron pérdidas notorias en todas las pruebas, con un mínimo de retención de $21,5 \pm 1,8$ %; mientras que en soluciones reales no hay pérdida aparente de este componente. Esto puede deberse a la naturaleza del hierro en los hidrolizados, que se encuentra principalmente en complejos orgánicos como el hierro hemo asociado a las proteínas, lo que podría dificultar su migración a través de las membranas de intercambio iónico. Otra posible explicación es la presencia de limitaciones en el método analítico utilizado, ya que las concentraciones iniciales de hierro en el hidrolizado eran considerablemente bajas, lo que aumenta el margen de error en la cuantificación. Se ha reportado que el método de espectroscopía de absorción atómica asistida por digestión por microondas presenta un coeficiente de variación aceptado de 7,3 % para repetibilidad y 11 % para precisión intermedia en concentraciones entre 1 y 9 mg/100 g, según los criterios del Apéndice F de *Guidelines for Standard Method Performance Requirements of the Association of Official Analytical Collaboration*.

Con respecto a las proteínas hidrolizadas, estos compuestos se encuentran en forma de péptidos que pueden tener carga y, por lo tanto, verse afectados por el voltaje aplicado, lo que favorece su migración parcial haciendo que queden atrapadas en las membranas, generando ensuciamiento. Estudios con lactosuero confirman que proteínas como la lactoalbúmina y lactoglobulina se conservan intactas en el diluido tras procesos de electrodiálisis, incluso a voltajes de 15-30 V (Pillo Santamaría, 2015).

Por otro lado, técnicas no convencionales como la electrodiálisis con campos eléctricos pulsados (*Pulsed Electric Field* - PEF) o electrodiálisis con membranas de ultrafiltración (*Electrodialysis with Ultrafiltration Membranes* - EDUF) han demostrado mejorar la reducción del ensuciamiento en membranas, manteniendo la integridad de péptidos valiosos. Chen et al. (2015), en un proceso integrado de electro-ultrafiltración con electrodiálisis, evaluaron la separación de mezclas de proteínas (albúmina de suero bovino y lisozima) y demostraron que, al aplicar electrodiálisis en sistemas proteicos, estas proteínas no migraron a través de la membrana, quedando retenidas en la solución de origen. Suwal et al. (2016), evaluando un sistema de hidrolizados proteicos de subproductos de cangrejo aplicando pulsos a voltajes de 20 V y 40 V, durante 3-3,3 h de tratamiento, observaron que el PEF redujo el ensuciamiento en membranas de intercambio aniónico sin pérdidas significativas de componentes proteicos (<5%).

Por su parte, Vanhoute et al. (2010), quienes trabajaron con hidrolizados de hemoglobina bovina (concentración inicial: 0,5% p/v) en EDUF a 8 V durante 2 h, observaron que se alcanzaba un bajo rendimiento: 0,43% (concentración final de 0,016 mg/mL), atribuyendo este comportamiento al ensuciamiento de las membranas de ultrafiltración causado por la formación de agregados entre el hemo y los péptidos, los cuales aumentaron la resistencia del sistema en un 30% después de tres corridas.

5. Conclusiones

- Se identificó que tanto el voltaje como la concentración inicial de sal influyen en el proceso de desalado por electrodiálisis durante el tratamiento de soluciones ideales. El aumento del voltaje aplicado mejora la remoción del ion Na^+ y no mostró una tendencia en cuanto a la retención del ion Fe^{2+} . Las condiciones de operación con mayor concentración inicial de NaCl y $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ presentaron porcentajes de retención más altos para los iones Na^+ y Fe^{2+} . La mayor retención de sodio ($79,8 \pm 1,9\%$) y de hierro ($73,4 \pm 1,8\%$) alcanzado se dio a concentración C3 y voltaje 20 V, y la menor retención, tanto para el sodio como para el hierro, ($30,9 \pm 3,3\%$ para Na^+ y $21,5 \pm 1,8\%$ para Fe^{2+}) se presentó a concentración C1 y voltaje 30 V.
- Se estudió el efecto del proceso de desalado por electrodiálisis de hidrolizados clarificados de sangre de bovino. La conductividad del sistema disminuyó en el circuito de diluido, mientras que en el de concentrado aumentó, aunque en menor manera al compararlo con soluciones ideales. En las soluciones reales el flux mostró valores más bajos con respecto a los obtenidos con soluciones ideales (hasta 59% inferior), en coherencia con los valores de corriente alcanzados durante las pruebas (hasta 68% inferior).
- En las pruebas con hidrolizados clarificados de sangre de bovino realizadas a 25 y 30 V, el pH del circuito diluido se mantuvo sin variaciones. La mayor remoción de sodio (>50%) se alcanzó a 25 V. En el caso de la retención de proteínas hidrolizadas, esta fue superior al 90% en todos los casos, lo que sugiere que estas no migran a través de las membranas y se conservan en el diluido sin pérdidas importantes. En cuanto al hierro, se evidenció una retención cercana al 100%, lo que indica que este ion no fue eliminado durante el proceso, posiblemente por encontrarse asociado a estructuras macromoleculares como péptidos derivados de la hemoglobina.

6. Recomendaciones

- Al realizar dos o más pruebas en un día se recomienda hacer una adecuada limpieza a todo el piloto, ya que si no se hace puede generar errores en la caracterización de resultados de las pruebas posteriores.
- Se recomienda realizar más pruebas con solución real que presenten una mayor concentración de hierro, con el fin de reducir la variabilidad de los datos.
- Debido a que la temperatura aumenta rápidamente se recomienda el cambio de las bombas centrífugas por unas de menor capacidad, ya que el flujo que se maneja es bajo para las bombas que se tienen.

Referencias bibliográficas

- Álvarez García, C. (2012). *Transformaciones de proteínas de sangre. Propiedades funcionales de materias primas y productos*. <http://hdl.handle.net/10651/13160>
- Argüello Quintero, A. S., & Reyes Mojica, F. E. (2024). *Propuesta de prácticas experimentales de electrodiálisis y ultrafiltración con fines didácticos para la Electiva Ingeniería de Procesos en la Industria de Alimentos*.
- Benítez, R., Ibarz, A., Pagan, J., Bioquímica, A., & Latinoamericana, C. (2008). Química Biológica Actualización Hidrolizados de proteína: procesos y aplicaciones Protein hydrolysates: processes and applications Palabras clave: hidrólisis enzimática * proteínas * proteasas * caracteriza-ción * grado de hidrólisis: enzymatic hydrolysis * proteins * proteases * characterization * degree of hydrolysis. *Acta Bioquím Clín Latinoam*, 42(2), 227–263.
- Castillo Hernández, L. A., & Ortiz Ardila, R. J. (2023). *Evaluación de las etapas de evaporación de película descendente en vacío y secado por aspersión de hidrolizados clarificados de sangre de bovino para la obtención de pulverizados enriquecidos en hierro*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/14766>
- Cedeño González, L. V., & Coronado Medrano, L. C. (2023). *Implementación de un Piloto de Electrodiálisis para la Desalinización del Lactosuero y Derivados*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/14866>
- Chen, G., Song, W., Qi, B., Li, J., Ghosh, R., & Wan, Y. (2015). Separation of protein mixtures by an integrated electro-ultrafiltration–electrodialysis process. *Separation and Purification Technology*, 147, 32–43. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2015.04.003>

- Cournoyer, A., Daigle, G., Thibodeau, J., Perreault, V., & Bazinet, L. (2024). Effects of applied current modes on the migration selectivity of peptides from a porcine cruor hydrolysate during electro dialysis with ultrafiltration membrane. *Separation and Purification Technology*, 338, 126280. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2024.126280>
- De Jaegher, B., Larumbe, E., De Schepper, W., Verliefde, A., & Nopens, I. (2020). Colloidal fouling in electro dialysis: A neural differential equations model. *Separation and Purification Technology*, 249, 116939. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2020.116939>
- Fernández Alonso, R. (2015). *Hidrólisis enzimática de Seroalbúmina Bovina. Producción de péptidos bioactivos*. <http://hdl.handle.net/10651/32167>
- González Herrera, J. P., & Santiago Villar, S. A. (2025). *Evaluación del proceso de diafiltración para la producción de hidrolizados clarificados a partir de sangre bovina*. Universidad Industrial de Santander.
- Hamani, H., Lahcene, D., Boufeldja, C., Haddou, B., Kameche, M., Innocent, C., & Derriche, Z. (2011). Study of fouling of a cation exchange membrane with a surfactant using voltamperometry. *Separation Science and Technology*, 46(15), 2322–2331. <https://doi.org/10.1080/01496395.2011.595031>
- Lee, H. J., Moon, S. H., & Tsai, S. P. (2002). Effects of pulsed electric fields on membrane fouling in electro dialysis of NaCl solution containing humate. *Separation and Purification Technology*, 27(2), 89–95. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(01\)00167-8](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(01)00167-8)
- Manzo Parra, M. H. (2023). *Revisión bibliográfica y validación teórica de las constantes σ , ϕ , y ρ , de un sistema de electrodiálisis (ED)*. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria

- Merkel, A., & Ashrafi, A. M. (2019). An investigation on the application of pulsed electro dialysis reversal in whey desalination. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(8). <https://doi.org/10.3390/ijms20081918>
- Monserrat Quirós, C. (2015). *Evaluación de procesos de electrodiálisis para la valorización de efluentes industriales mediante membranas de intercambio iónico*. <http://hdl.handle.net/2117/84186>
- Park, K. J., & Hyun, C. K. (2002). Antigenotoxic effects of the peptides derived from bovine blood plasma proteins. *Enzyme and Microbial Technology*, 30(5), 633–638. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(02\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(02)00024-8)
- Parra Carmona, A. (2015). *Valorización de salmueras concentradas mediante electrodiálisis con membranas bipolares*. <http://hdl.handle.net/2117/79739>
- Pilco Núñez, A., Tinoco Angeles, F., Mamani Pichihua, P., & Yallico Acosta, G. (2018). Remoción de cromo de efluentes de la industria curtiembre mediante electrodiálisis. *Industrial Data*, 21(1), 27–34. <https://doi.org/10.15381/idata.v21i1.14908>
- Pillo Santamaría, V. H. (2015). *Desacidificación de lactosuero ácido mediante electrodiálisis*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10513>
- Ramakrishnan, V. V., Hossain, A., Dave, D., & Shahidi, F. (2024). Salmon processing discards: a potential source of bioactive peptides – a review. En *Food Production, Processing and Nutrition* (Vol. 6, Número 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00197-2>
- Salazar-Posada, C., López-Padilla, A., & Cano-Salazar, J. A. (2005). Efecto del pH y la temperatura en la hidrólisis enzimática de subproductos de la industria bovina*. *Revista Lasallista de Investigación*, 9(2), 26–32.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-44492012000200004&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Sedighi, M., Behvand Usefi, M. M., Ismail, A. F., & Ghasemi, M. (2023). Environmental sustainability and ions removal through electrodialysis desalination: Operating conditions and process parameters. En *Desalination* (Vol. 549). Elsevier B.V.

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116319>

Strathmann, H. (2004). *Ion-Exchange Membrane Separation Processes* (First, Vol. 9). Elsevier.

Suwal, S., Amiot, J., Beaulieu, L., & Bazinet, L. (2016). Effect of pulsed electric field and polarity reversal on peptide/amino acid migration, selectivity and fouling mitigation. *Journal of Membrane Science*, 510, 405–416.

<https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2016.03.010>

Torres Rodríguez, L. M., Montes Rojas, A., Vázquez Rodríguez, G., & Pérez Díaz, E. (2019).

Uso de curvas de polarización para entender el transporte de iones a través de una membrana de intercambio iónico. *Educación Química*, 30(4), 6.

<https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2019.4.67333>

Urbina Mijangos, A. (2022). *Aplicación de la electrodiálisis con y sin efecto de resina de intercambio iónico para la remoción de iones Na⁺ y Cl⁻ en aguas salobres*.

Van Der Bruggen, B., Koninckx, A., & Vandecasteele, C. (2004). Separation of monovalent and divalent ions from aqueous solution by electrodialysis and nanofiltration. *Water Research*, 38(5), 1347–1353. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2003.11.008>

Vanhoute, M., Firdaous, L., Bazinet, L., Froidevaux, R., Lecouturier, D., Guillochon, D., & Dhulster, P. (2010). Effect of haem on the fractionation of bovine haemoglobin peptic

hydrolysate by electrodialysis with ultrafiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, 365(1–2), 16–24. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2010.08.003>

Wang, Z., He, P., Zhang, H., Zhang, N., & Lü, F. (2022). Desalination, nutrients recovery, or products extraction: Is electrodialysis an effective way to achieve high-value utilization of liquid digestate? *Chemical Engineering Journal*, 446.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136996>

Wikipedia. (2022, octubre 15). *Electrodialisis*.

<https://es.wikipedia.org/wiki/Electrodi%C3%A1lisis>

Zuta, L., & Pilco, A. (2018). *DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE TRANSPORTE DE IONES COBRE Y NÍQUEL EN UNA MEMBRANA DE INTERCAMBIO CATIONICO*.