

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ELECTRODISOLUCIÓN-FLOCULACIÓN
CON ELECTRODOS DE HIERRO PARA EL TRATAMIENTO DE
LACTOSUERO**

**VIVIEN LIZETH AGUDELO GARCÍA
SANDRA LILIANA GÓMEZ ESTEBAN**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2013

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios, por ser nuestro guía en este arduo camino y por proporcionarnos salud para lograr nuestros objetivos y culminar esta etapa tan enriquecedora.

Agradecemos a nuestros padres, por su apoyo constante, por brindarnos su amor y motivación en todo momento.

A Nilson Marriaga y Fiderman Machuca, por su ejemplo de perseverancia, que nos permitió no rendirnos ante los obstáculos.

A Nhora Suaterna y Natalí Mena, por acompañarnos en esto proceso y por la ayuda brindada en el laboratorio.

A Margarita, Alfonso y Nelson de la hacienda la Gloria por proporcionarnos el lactosuero para el desarrollo de este estudio.

A nuestros amigos, Ana Caicedo, Carlos Cote, Mauricio Londoño, Johnnatan Zuluaga, Cindy Realpe, Ricardo Medina y Edinson Muñoz por el apoyo brindado en esta etapa de formación profesional y por todas las experiencias compartidas.

“El camino más largo por recorrer se inicia con un primer paso, una vez dado ese primer paso ya se ha recorrido la mitad del camino”

CONTENIDO

1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO CONCEPTUAL.....	3
2.1 Lactosuero	3
2.1.1 Pretratamiento: Separación de grasas	4
2.2 Electrodisolución.....	5
2.2.1 Celda de electrodisolución	7
2.2.2 Elección del material de los electrodos y electrolito soporte.....	10
2.3 Coagulación	12
2.3.1 pH de floculación.....	14
2.3.2 Burbujeo de aire.....	15
2.3.3 Fosfato disódico (FD):	16
2.4 Floculación	18
3. METODOLOGIA.....	20
3.1 Obtención, caracterización y pretratamiento del lactosuero	20
3.2 Montaje experimental.....	21
3.3 Procedimiento experimental	23
3.3.1 Electrodisolución.....	23
3.3.2 Floculación y coagulación	24
3.4 Pruebas preliminares	25
3.4.1 pH de floculación	26
3.4.2 Carga de la solución de hierro	26
3.4.3 Proporción (lactosuero-coagulante).....	26
3.4.4 Cantidad de polímero.....	27

3.5 Pruebas finales.....	27
3.6 Medición de variables.....	28
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	29
4.1 Caracterización y pretratamiento del lactosuero	29
4.2 Electrodisolución.....	30
4.2.1 Comportamiento de pH.....	30
4.2.2 Comportamiento de la conductividad.....	31
4.2.3 Comportamiento de voltaje	32
4.3 Pruebas preliminares – Flocculación y coagulación	33
4.3.1 pH de flocculación.....	33
4.3.2 Carga de la solución de hierro y proporción (lactosuero-coagulante)	34
4.3.3 Cantidad de polímero.....	37
4.4 Pruebas finales.....	39
4.4.1 Variación de DQO (Demanda química de oxígeno) y COD (Carbono orgánico total) con la proporción (lactosuero-coagulante) y con la carga de la solución coagulante.....	39
4.4.2 Caracterización de las fases obtenidas.....	43
4.4.3 Evaluación preliminar de costos	45
5. CONCLUSIONES.....	47
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de los compuestos emulsificantes (proteínas) del lactosuero, para atrapar un glóbulo de grasa (U).	5
Figura 2. Celda de electrodisolución.	8
Figura 3. Representación de las caras anódicas para un arreglo de 6 electrodos	9
Figura 4. Efecto de la electrocoagulación de lactosuero en una celda electroquímica con un voltaje constante de 8V.	10
Figura 5. Velocidad de corrosión de hierro como función de pH.	11
Figura 6. Mecanismo de coagulación.	12
Figura 7. Atrapamiento de las partículas (P) en un coágulo.	13
Figura 8. Estructura del ión fosfato.	17
Figura 9. Cadena de fosfatos con iones de calcio remanentes en el sobrenadante.	17
Figura 10. Estructura molecular de la poliacríamida	18
Figura 11. Tipos de separación de componentes.	19
Figura 12. Fases separadas con el pretratamiento	20
Figura 13. Montaje experimental para la coagulación floculación.	23
Figura 14. Comportamiento del pH durante la ED (Electrodisolución)	30
Figura 15. Comportamiento de la conductividad durante la ED.	31
Figura 16. Comportamiento del voltaje durante la ED.	32
Figura 17. Barrido de pH tomando como variable de respuesta la turbidez del sobrenadante, a dos dosis de solución de hierro en 50 mL de lactosuero y 20 ppm de APAM (Poliacrilamida aniónica).	34
Figura 18. Variación de la carga de la solución de hierro versus turbidez del sobrenadante obtenido de la ECF, a 200 ppm de fosfato disódico y 20 ppm de APAM.	35
Figura 19. Barrido de carga de la solución coagulante a dos pH de coagulación 11 y 11.8.	36
Figura 20. Variación de la cantidad de solución de hierro de 3000 C/L agregada a 50 mL de lactosuero versus la turbidez del sobrenadante después de FC.	36
Figura 21. Variación de la concentración de APAM a pH 11 y 10.5, teniendo como variable de respuesta la turbidez residual del sobrenadante, para 50 mL de lactosuero con una solución de hierro de 3000 C/L y 200 ppm FD.	38
Figura 22. Efecto del burbujeo y adición de FD en la turbidez del sobrenadante, a diferente concentración de polímero.	39
Figura 23. Variación de la cantidad de solución coagulante de 3000 C/L adicionada a 50 mL de lactosuero versus la DQO del sobrenadante.	40

Figura 24. Variación de la cantidad de solución coagulante adicionada a 50 mL de lactosuero versus el COD del sobrenadante.	41
Figura 25. Variación de la carga de la solución coagulante versus la DQO del sobrenadante.	41
Figura 26. Variación de la carga de la solución coagulante versus el COD del sobrenadante.	42
Figura 27. Lactosuero antes y después del tratamiento con ECF (Electrodisolución coagulación floculación).	43

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Efecto en la remoción de turbiedad con la cantidad de coagulante.....	14
Tabla 2. Parámetros utilizados en el proceso de electrodisolución.....	24
Tabla 3. Resumen de los parámetros usados en la Coagulación y Floculación.....	25
Tabla 4. Parámetros de caracterización del lactosuero antes y después de la decantación.	29
Tabla 5. Caracterización de los lodos obtenidos después de la ECF.....	44
Tabla 6. Caracterización del sobrenadante o fase liviana obtenida después de la ECF.....	45
Tabla 7. Costos de energía y químicos para el tratamiento de lactosuero con ECF.	46

INTRODUCCIÓN

Para la producción de 1 kilogramo de queso se usan aproximadamente 10 litros de leche, el subproducto es entre 8 y 9 litros de lactosuero, que se compone de 93% de agua, 5% de lactosa, 1% de proteína, 0.6% de ceniza, 0.3% de grasa y una pequeña cantidad de ácido láctico. El lactosuero posee una alta capacidad contaminante que se evidencia en su DQO, la cual oscila entre 35000 y 80000 ppm de O_2 . Por lo que este residuo se convierte en un gran contaminante e inhibidor del crecimiento del hábitat natural de los ríos, lo que ocasiona que sea más difícil y costoso de tratar.

Se sabe que la composición del lactosuero varía considerablemente dependiendo del tipo de leche, de la clase de queso que se elabora y de la tecnología que se utiliza, pero independientemente de esto, es perjudicial para el medio ambiente por la mala disposición que se le da actualmente. El lactosuero posee gran cantidad de materia orgánica que al desecharse a las fuentes de agua, permite la reproducción de microorganismos que consumen el oxígeno disuelto y reducen la vida acuática y si se desecha sobre los suelos, afecta la estructura física y química de estos, disminuyendo el rendimiento de cultivos agrícolas [Parra 2009]

El lactosuero es el mayor residuo de la industria quesera con una producción de 920 millones de litros al año [Londoño et al., 2008], que se genera tanto por las principales industrias de productos lácteos en Colombia, Alpina y Colanta, como por fábricas artesanales, que abarcan cerca del 50% de este mercado. Cabe resaltar que el sector de lácteos ocupa el segundo lugar en participación dentro del PIB del país, razón por la que sus residuos deben tratarse con especial interés [Valencia 2003], actualmente la mayor cantidad se desecha a los efluentes de agua, otra parte se usa para alimento de animales y en el mejor de los casos se pulveriza para obtener suero en polvo.

Para el tratamiento de lactosuero se pueden considerar 3 opciones, la primera de ellas es la aplicación de tecnologías con el fin de recuperar componentes valiosos del lactosuero como las proteínas y la lactosa. La segunda opción se basa en la aplicación de tratamientos biológicos. La tercera opción es la aplicación de tratamientos fisicoquímicos tales como coagulación y floculación, ozonización, fenton, precipitación térmica e isoelectrica, oxidación electroquímica, entre otros.

Comúnmente, para la digestión biológica de lactosuero se usan procesos aeróbicos tales como lodos activados, filtros percoladores, almacenamiento en lagunas, etc. pero estos procesos se limitan por la variabilidad en las propiedades de entrada del efluente y por la alta carga de contaminante del lactosuero, además de los requisitos de energía para el suministro de oxígeno, la elevada producción de lodos y la dificultad en la sedimentación de sólidos, entre otros. Además la caseína, principal proteína de la leche, es altamente resistente a la degradación con microorganismos

Por otro lado los tratamientos anaeróbicos presentan grandes dificultades para lograr una operación estable, además de dificultades en la degradación de lípidos. Para el aprovechamiento de lactosuero se presentan tratamientos con membranas como la nanofiltración y la ósmosis inversa, pero son muy costosos para ser aplicados a pequeñas empresas productoras de queso. Por esto se pretende evaluar la técnica de electrodisolución, coagulación y floculación (ECF) por visualizarse como una alternativa viable para el tratamiento de este residuo.

La electrodisolución y floculación, presentan resultados satisfactorios para distintos tipos de efluentes industriales, removiendo gran parte de los sólidos disueltos y reduciendo así el grado de contaminación de estas aguas. Se encuentran estudios de electrocoagulación del lactosuero, es decir, del proceso de obtención del coagulante in situ [Ruiz 2007], sin embargo no se reportan estudios de la aplicación de la electrodisolución y floculación en lactosuero, por lo que se desconocen sus resultados. En los estudios realizados dentro del grupo de investigación de procesos avanzados para tratamientos químicos y biológicos (GAOX), se han obtenido resultados satisfactorios en cuanto a reducción de color, turbidez y DQO de aguas residuales como vinazas, licor negro, lixiviados, entre otras.

Con el fin de clarificar este subproducto para una adecuada disposición y de esta forma disminuir el impacto ambiental negativo, se pretende evaluar la técnica de electrodisolución, coagulación y floculación como alternativa para el tratamiento de lactosuero, realizando un análisis preliminar de costos que permita determinar si la técnica es viable económicamente.

RESUMEN

En la producción de queso se genera gran cantidad de lactosuero, este es un subproducto indeseado debido a su gran poder contaminante, por lo cual se hace necesario encontrar alternativas para su tratamiento. Se evaluó el proceso de electrodisolución de placas de hierro para la coagulación y floculación química (ECF) de lactosuero a escala de laboratorio. Se evaluaron los efectos de variables como pH de floculación, carga de coagulante, concentración de floculante, relación entre lactosuero y coagulante. Se consideraron como variables de respuesta la turbidez, la demanda química de oxígeno (DQO) y el carbono orgánico disuelto (COD) y se realizaron mediciones adicionales para determinar la cantidad de hierro en la solución coagulante y la proteína presente en el lactosuero con y sin tratamiento. Con esta técnica se logró una reducción de 97 % en turbidez, la DQO se disminuyó en 63.3% y el COD en 14.25%.

1. ANTECEDENTES

A medida que la industria quesera crece, la producción de lactosuero es mayor, por esto la legislación ambiental es cada día más exigente, lo que lleva a buscar nuevas formas de tratamiento y aprovechamiento de los componentes del lactosuero, especialmente la proteína y la lactosa. Existen varias técnicas para obtener valor agregado del lactosuero como la ultrafiltración, el secado por aspersión, el tratamiento biológico o simplemente la alimentación directa a animales [Göven., 2008]. Aún así más de la mitad del lactosuero que se produce se vierte a los ríos, lagos u otros cuerpos de agua [Gonzalez et al., 1996; Berruga et al., 1997].

El tratamiento de lactosuero en reactores anaerobios se considera inviable debido a las dificultad de mantener estable la operación, ya que el efluente se acidifica rápidamente, se requiere de un flujo continuo de una solución reguladora de pH [Kalyuzhnyi et al., 1997]. Los métodos biológicos convencionales involucran grandes tiempos de residencia hidráulicos, alrededor de 5 días para los más rápidos, con lo que se logra una reducción de 76% para la DQO [Lo et al., 1986].

El quitosán (2-acetamino-2-deoxi- β -D-glucosa), es un biopolímero catiónico de glucosamina derivado de la desacetilación del quitín ($C_8H_{13}O_5N$)_n, presente en el exoesqueleto de los crustáceos [Rupak et al., 2003], se usa como floculante con el fin de precipitar las proteínas del lactosuero. Tan y colaboradores [2001] presentan un método de iones metálicos adheridos a la superficie de una resina de quitosán, con lo que se reduce 32-95% en turbidez, de 62-85% en proteína y de 70-80% en grasa en el tratamiento de lactosuero. Sin embargo el alto costo para la regeneración del ácido en el proceso del quitosán, la competencia de su uso con otros campos como la medicina y la presencia de escamas limitan su aplicación en efluentes [Su et al., 2003, 2005].

Las técnicas electroquímicas como los procesos de oxidación avanzada ejercen un fuerte control de contaminantes, dando grandes eficiencias de reducción [Rajeshwar et al., 1994], pero no son específicos para algunos tipos de contaminantes y además son incapaces de prevenir la producción de productos no deseados. [Göven et al., 2008]. Por ejemplo, el proceso de ozonización no presentó buenos resultados en el tratamiento de lactosuero, por la alta carga

orgánica de éste que se encuentra entre 50000 y 80000 ppm, lo que limita su aplicación en este efluente. [Almeida et al., 2004; Assalin et al., 2004]

Los métodos electroquímicos se consideran como un proceso alternativo cuando los métodos tradicionales fallan al momento de reducir la contaminación de los efluentes, lo que desplaza los métodos biológicos convencionales [Brillas et al., 1998], [Panizza et al., 2001]. Uno de estos métodos contempla la reducción de la carga contaminante con la producción de un coagulante vía electroquímica, en el que los iones de hierro se producen usando electrodos de hierro, [Siso, 1996; Souza et al., 2010] en este tipo de tratamiento se enfoca este estudio.

Güven [2008] aplicó tratamientos electroquímicos para reducción de los indicadores de contaminación del lactosuero como la materia orgánica, la turbidez y sólidos suspendidos y para la recuperación de productos valiosos como la proteína y lactosa. En dicho estudio las placas de hierro, conectadas a una fuente de poder, se sumergían en el lactosuero, del cual se extraía una muestra cada determinado tiempo para cuantificar remoción de DQO. De esta forma, Güven y colaboradores, [2008] lograron remover en 8 horas 100% de turbiedad y 53% de DQO con una concentración inicial de 27600 ppm. En cuanto a la recuperación de proteínas Janson y colaboradores [1994] reportan 73.8% de remoción del sobrenadante.

2. MARCO CONCEPTUAL

Para efecto de este estudio se realiza un tratamiento primario de lactosuero, subproducto que se obtuvo de una empresa que elabora queso y otros derivados lácteos de forma artesanal, este tratamiento es similar a la floculación convencional pero el floculante se obtiene por vía electroquímica. Este tratamiento se realiza con el fin de reducir la carga de contaminantes del vertido y convertirlo en inocuo para el medio ambiente y la salud humana.

El floculante que se obtiene por electrodisolución de placas de hierro, se adiciona al lactosuero y este neutraliza las cargas y propicia que se vuelvan insolubles. Además es necesario adicionar un coagulante, cuya función es aglutinar los coloides, aumentando el tamaño de estos, lo que ayuda a su sedimentación y posterior separación.

2.1 Lactosuero

El lactosuero es el líquido resultante de la precipitación de la caseína de la leche en el proceso de producción de queso. Su composición varía con respecto al tipo de leche y al proceso de cuajado del queso, pero en general éste se compone de 94-93% de agua, 6-4.5% de lactosa, 1.1-0.6% de proteína, 0.8-1.0% de cenizas, 0.9-0.05 de ácido láctico y 0.5-0.06% de grasa. Este se obtuvo de la Hacienda la Gloria que se encuentra en la vía panamericana, en donde se realizan varios tipos de queso de forma artesanal. En este estudio se usó el lactosuero que se obtuvo en la elaboración de queso tipo cuajada, este tiene la característica de que el proceso de salado se hace luego de que se cuaje la leche.

Al adicionar las pastillas de cuajo Marschall M50 a la leche, a condiciones pre establecidas dependiendo del tipo de queso a producir, se producen 2 efectos, el primero de ellos es la proteólisis usando las enzimas del cuajo que degradan la caseína, lo cual forma dos fragmentos uno hidrofílico y otro hidrofóbico. El segundo efecto consta de la unión de las partes hidrofóbicas, que fomenta la agregación de micelas que dan origen a una fase insoluble, dándose el proceso de coagulación y producción de queso. El lactosuero resultante es el 85% del volumen inicial de la leche y posee la mitad de los componentes de esta. En el proceso de la coagulación, gran cantidad de la lactosa permanece en el queso y la cantidad residual aporta el 90% de toda la carga orgánica [Ghaly et al., 2004; Kisaalita et al., 1990].

El lactosuero impacta el ambiente significativamente debido a que contiene minerales (0.46-10%), sólidos suspendidos (0.1-22 kg/m³), fósforo (0.006-0.5 kg/m³), nitrógeno total Kjeldahl (0.01-1.7 kg/m³) y además tiene un pH variable (3.3-9.0). La alta carga de materia orgánica en el lactosuero (600-102000 ppm), se debe principalmente a la presencia de grasas (80-10580 ppm), lactosa (180-60000 ppm) y proteínas (1400-33500 ppm) como la caseína, la β -lactoglobulina y la α -lactoalbúmina [Prazeres et al., 2012]. Sin embargo esta materia orgánica es 99% biodegradable [Ergüder et al., 2001].

El lactosuero también contiene sustancias inorgánicas como sales y minerales, principalmente NaCl, que se adiciona en la producción de queso, en este estudio esta carga inorgánica no es representativa ya que para la producción de queso cuajada, la etapa de salado se encuentra después de la extracción del lactosuero.

Este efluente no cumple con las características para disponerse en ríos por lo que se debe tratar para eliminar un fuerte contaminante de la industria química y al mismo tiempo aprovechar sus componentes y para darle un valor agregado a este efluente.

2.1.1 Pretratamiento: Separación de grasas: La leche es una emulsión que se forma por 2 fases inmiscibles, una fase continua (acuosa) y una fase dispersa (grasosa), que gracias a la caseína permanecen unidas, de igual forma sucede en el lactosuero. La caseína contiene los grupos COO^- , NH_3^+ y fosfolípidos (lípidos anfipáticos), que le confieren propiedades polares e hidrófilas y apolares e hidrófobas [Becker et al., 1977].

Los emulsificantes como la caseína se organizan de tal forma que sus cabezas polares se proyectan hacia el agua y la cola apolar hacia el interior atrapando los glóbulos de grasa (Figura 1). La caseína es el “puente” entre las partículas de distinta naturaleza, creando una estabilidad entre las moléculas.

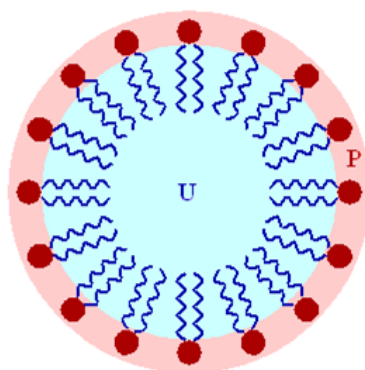


Figura 1. Distribución de los compuestos emulsificantes (proteínas) del lactosuero, para atrapar un glóbulo de grasa (U).

La caseína no puede emulsionar el lactosuero por un largo período ya que es una mezcla inestable, si además las condiciones de almacenamiento no son las adecuadas, los microorganismos degradan la lactosa a ácido láctico (proceso natural de fermentación), lo que hace que las proteínas pierdan su poder emulsificante y las fases se disgreguen. Este fenómeno se aprovecha para separar la grasa del lactosuero por diferencia de densidades y de este modo reducir DQO y COD.

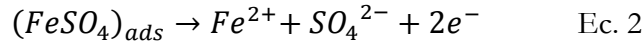
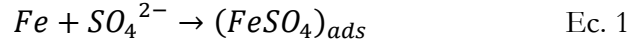
2.2 Electrodisolución

Los procesos electroquímicos que se usan en el tratamiento de aguas utilizan electricidad para producir una reacción química, la cual se destina a la eliminación o destrucción de los contaminantes presentes en el agua. Básicamente el sistema electroquímico se forma por un ánodo, donde ocurre la oxidación, un cátodo, donde tiene lugar la reducción y una fuente de corriente continua que se encarga de suministrar la electricidad. Los parámetros claves a la hora de aplicar un proceso electrolítico son: el diseño del reactor, la naturaleza de los electrodos, la diferencia de potencial y la corriente de trabajo.

La principal ventaja del proceso ECF es que los cationes de hierro generados en la ED son más eficientes en la etapa de coagulación, que los provenientes de productos químicos tradicionales como el cloruro férrico, debido a que no poseen iones de cloro como en el coagulante comercial propiciando la formación de ácido clorhídrico, lo que ocasiona un descenso en el pH y ralentiza el tratamiento. Además de equipos más compactos, menor costo, posible automatización y menor generación de sales y residuos, se usan en la ECF.

En el desarrollo de este estudio se realiza electrodisolución (ED) de hierro en medio ácido, la solución resultante de este proceso se usa como floculante. Es decir que la generación del floculante no se realiza directamente en el agua residual a tratar, en este caso el lactosuero. Sin embargo, la electrocoagulación, proceso en el que la generación del floculante se realiza directamente en el agua a tratar, se menciona en varias oportunidades por la similitud que existe en los mecanismos de reacción.

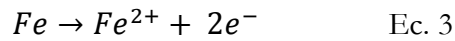
Como primera medida en la electrodisolución de hierro ocurre un paso químico que precede al paso electroquímico, dicho paso ocurre de la siguiente manera [Florionovich, 1996]:



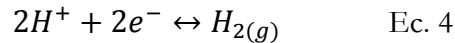
En este mecanismo de reacción, los átomos de hierro (Fe) interactúan con los aniones del electrolito SO_4^{2-} lo que acelera la disolución del hierro, al formarse una capa adherida a la superficie del ánodo.

En el paso electroquímico, los ánodos empleados en la ED se llaman ánodos de sacrificio ya que se consumen en el proceso, se oxidan y generan un flujo de electrones en el circuito hacia el cátodo. En el cátodo se produce hidrógeno a partir de los protones, éste se libera como pequeñas burbujas que suben a la superficie. Las reacciones que ocurren en ánodo y cátodo respectivamente, para pH inferior a 4, se muestran a continuación:

- Ánodo



- Cátodo



A continuación se presentan las variables que afectan el proceso de electrodisolución:

- Densidad de corriente (J): es la corriente aplicada por unidad de área del electrodo. La eficiencia del proceso depende de la intensidad de la densidad de corriente. [Sasson et al., 2009].
- Acidez del electrolito (pH): Determina el tipo de reacciones que desarrollan los iones en el electrolito y la velocidad de corrosión del electrodo. Si el proceso se opera a bajas densidades de corriente ($1\text{mA}/\text{cm}^2$), no se modifica significativamente el pH [Moreno et al., 2007].
- Características de los electrodos: El material, la uniformidad de la superficie y el arreglo de los electrodos influyen fuertemente en la celda. El material es el mismo para todos los electrodos y en el procedimiento experimental se realiza un tratamiento previo para dar uniformidad a la superficie de todos los electrodos.
- Agitación: La velocidad de agitación puede mejorar la disolución del hierro [Schweinsberg et al., 2005].

2.2.1 Celda de electrodisolución: Un reactor simple de electrodisolución está compuesto por una celda electrolítica con un ánodo y un cátodo. Cuando se conecta a una fuente de alimentación externa, el ánodo se corroe debido a la oxidación. No se usa una celda con acomodación simple porque no es adecuada para el tratamiento de aguas residuales, para este fin se requiere electrodos con mayor área, que ayuden a que la velocidad de disolución del hierro sea viable [Yousuf et al., 2001]

En la Figura 2 se muestra un arreglo en paralelo con dos ánodos y dos cátodos, conectados a una fuente de alimentación de corriente continua que suministra una diferencia de potencial para que los electrones se muevan a través del circuito. En el marco de este estudio, se realiza la electrodisolución con 6 placas de hierro, acomodadas en paralelo y se adiciona entre la fuente de alimentación y los electrodos un inversor de polaridad, con el fin de evitar el ensuciamiento de los electrodos.

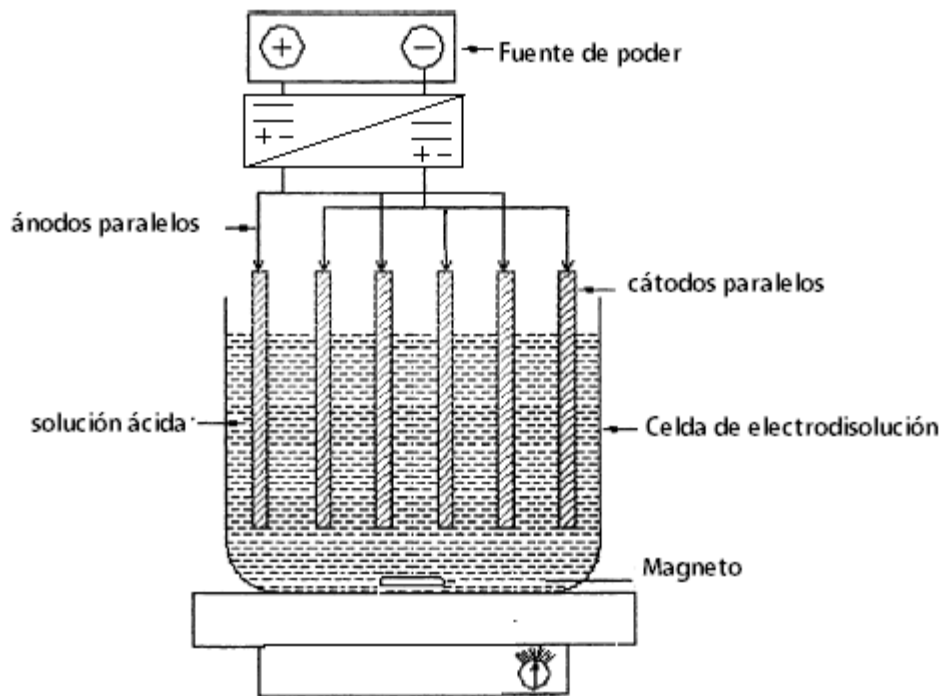


Figura 2. Celda de electrodisolución.

Las placas de hierro que se usan para el proceso de electrodisolución poseen 6 cm de ancho por 9.2 cm de alto, es decir que el área de cada placa es de 55.2 cm². Sin embargo el área efectiva dispuesta para el proceso de electrodisolución depende del volumen de solución floculante que se prepare. El área efectiva resulta de multiplicar el área sumergida de cada placa por la cantidad de caras anódicas, para un arreglo de 6 electrodos se tienen 5 caras anódicas que son las partes activa del electrodo desde donde difunden los iones de hierro (Figura 3). El cálculo de la intensidad de corriente deseada para el proceso de electrodisolución se determinó con la siguiente ecuación:

$$A_{ef} * J = I \quad \text{Ec.5}$$

Donde

A_{ef} es el área de contacto efectiva de los electrodos con la solución ácida (cm²)

J es la densidad de corriente (mA/ cm²)

I es la intensidad de corriente (mA)

Para efectos de este estudio, se trabajo con una densidad de corriente de 0.6 mA/cm² con base en el estudio realizado por [Sengil et al., 2006]:

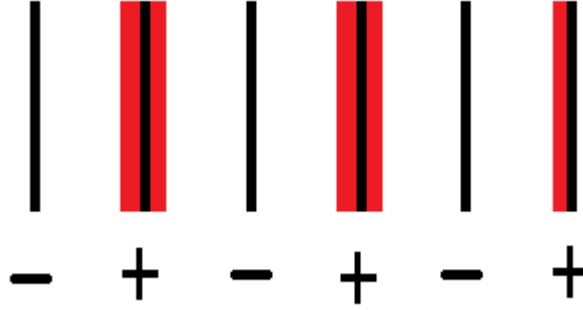


Figura 3. Representación de las caras anódicas para un arreglo de 6 electrodos

La relación entre la intensidad de corriente del proceso electroquímico y la cantidad de floculante disuelto en la solución desde el ánodo se describe por la ley de Faraday, que establece que la cantidad de masa que reacciona en la superficie de los electrodos es proporcional a la cantidad de electricidad que se transfiere entre ellos [Sasson et al., 2009]:

$$W = \frac{ItM_w}{nF} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

- I es la intensidad de corriente (A)
- t es el tiempo de operación (s)
- M_w es el peso molecular del metal (g/mol)
- F es la constante de Faraday (96485 C/mol)
- n es el número de electrones involucrados en la reacción, 2.
- W es la cantidad de metal disuelto (g)

Como se establece un volumen fijo para la electrodisolución, se puede encontrar la concentración teórica de hierro en la solución. La determinación de la cantidad real de hierro en la solución ácida se hizo por absorción atómica.

De la ecuación 6 se puede extraer un parámetro empírico nombrado como carga, Q, usado como punto de referencia para la ED.

$$Q = \frac{t(seg) * I(A)}{V(L)} \quad Ec.7$$

Donde V es el volumen de solución expresado en litros.

2.2.2 Elección del material de los electrodos y electrolito soporte: Güven y colaboradores [2008] realizaron electrocoagulación de lactosuero para comparar el desempeño de 3 materiales de electrodos, carbón, hierro y acero al carbono, en presencia de NaCl como electrolito. En la Figura 4 se puede ver el comportamiento de la DQO, turbidez y pH versus el tiempo en el que ocurre la electrocoagulación con una concentración de 50 g/L de electrolito y un voltaje aplicado de 8V.

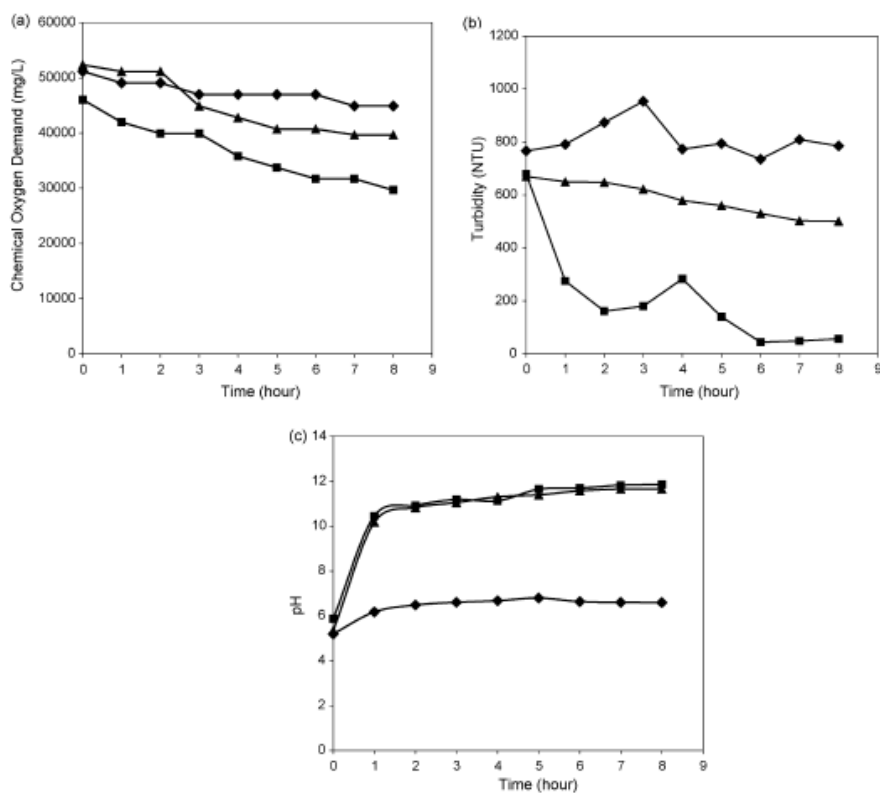


Figura 4. Efecto de la electrocoagulación de lactosuero en una celda electroquímica con un voltaje constante de 8V (a) Perfil de DQO vs tiempo (b) Perfil de turbidez vs tiempo (c) Perfil de pH vs tiempo para pruebas con electrodos de carbón (◆), hierro (■) y acero inoxidable (▲). [Güven y colaboradores 2008].

Después de 8 horas se lograron reducciones en la DQO de 35.6%, 24.2%, 12.3% para electrodos de hierro, acero inoxidable y carbón respectivamente. En cuanto a turbidez se da

una reducción de 91.6 y 25.2% para hierro y acero inoxidable, en tanto los electrodos de carbón se erosionan suavemente durante la reacción es por esta razón por la que la turbidez aumenta un poco [Güven y colaboradores 2008]. El material con el que se obtuvieron las mayores reducciones en DQO y turbidez fue el hierro (para el caso de este estudio se usó acero al carbono), por esta razón se eligieron placas de este material para la realización de este estudio.

En la Figura 5 se presenta la velocidad de corrosión en función del pH para un proceso de corrosión natural, ésta también es válida para la electrodisolución, ya que en este proceso lo que se hace es inducir con ayuda de la corriente y del pH del electrolito, las reacciones de óxido reducción. La elección del electrolito soporte se basó en el pH, ya que es una variable importante dentro del proceso de ECF, ya que éste es una medida de la concentración del ión hidrogenión H^+ , el cual tiene la facilidad de atrapar los electrones y fomentar la oxidación, aspecto fundamental del proceso de reducción de carga contaminante de los efluentes.

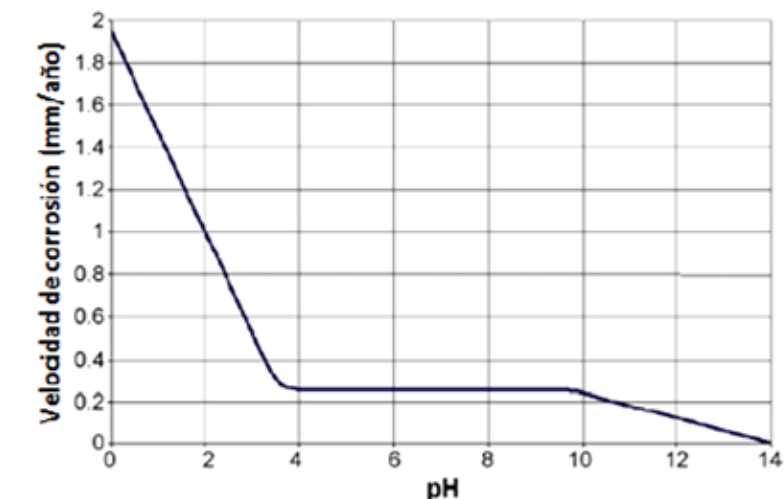


Figura 5. Velocidad de corrosión de hierro como función de pH. Fuente: [Moreno et al., 2007]

Se optó por ácido sulfúrico como electrolito soporte, ya que otros ácidos presentan inconvenientes si se le desea dar un uso alimenticio a los lodos que se obtuvieron luego del pre tratamiento. Por ejemplo el ácido fosfórico, produce el ión fosfato que ensucia los electrodos formando una sal insoluble y el ácido clorhídrico puede generar $Cl_{2(g)}$, un gas tóxico para la salud.

2.3 Coagulación

Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se produce por medio de la neutralización de las fuerzas que las mantiene separadas, con la adición de coagulantes químicos y aplicando energía de mezclado, ya que el movimiento browniano no es suficiente.

La repulsión de las partículas coloidales se mide por el potencial zeta, que es la caída de potencial que existe dentro de la doble capa eléctrica que rodea la partícula cargada, entre el plano de cizallamiento y el cuerpo de la solución [Barnes et al., 2009]. Esta magnitud refleja cuanto pueden aproximarse las partículas, cuanto mayor es esta medida, en valor absoluto, mayor es la carga de la partícula [Barnes et al., 2009]. El coagulante neutraliza en gran medida este potencial, comprimiendo la doble capa, haciendo que el potencial zeta tienda a cero y que de esta forma el espesor disminuya, aumentando la posibilidad de una colisión entre los coloides y fomentando la unión de coágulos, ver Figura 6.

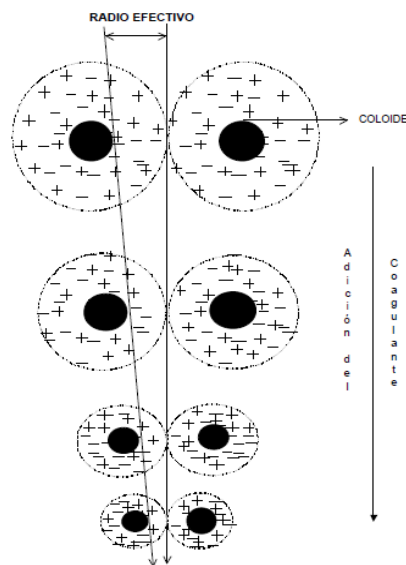


Figura 6. Mecanismo de coagulación

La desestabilización de las partículas se da también por atrapamiento de éstas dentro de un precipitado, este fenómeno se basa en la unión de dichas partículas dentro de un coágulo conformado por complejos de hierro. De esta forma los compuestos de hierro crean un anillo

que contiene las partículas desestabilizadas y ciertos iones, generando un coágulo más denso, que posteriormente sedimentará. Este método de coagulación se evidencia en la Figura 7.

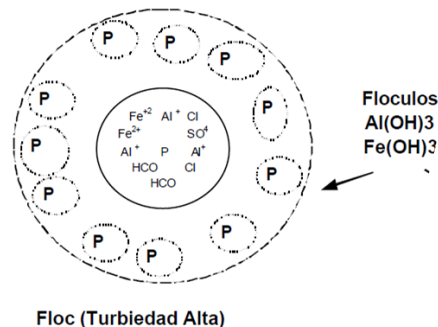


Figura 7. Atrapamiento de las partículas (P) en un coágulo.

La diferencia de usar los coagulantes convencionales (sulfato de aluminio y cloruro férrico) y la solución obtenida de la ED, se basa en que los adsorbentes producidos forman largas cadenas de polihidróxidos, por lo tanto tienen diferente estructura hidratada. Esta situación permite retirar, retener y desecar con mayor facilidad los lodos residuales del proceso de electrocoagulación. Los flocs formados de esta forma son menos hidratados, por lo tanto se compactan fácilmente. [Martin et al., 2008].

La coagulación es eficaz en el tratamiento de aguas, ya que se remueve gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas y de distintos pesos moleculares a un bajo costo, el proceso debe estar bien diseñado, de lo contrario conduce a gastos de operación no justificados, como por ejemplo la sobredosificación de coagulante, que además genera una reversión en la remoción de turbidez. En la siguiente tabla se resume el efecto de la adición de coagulante en la remoción de turbidez.

Tabla 1. Efecto en la remoción de turbiedad con la cantidad de coagulante.

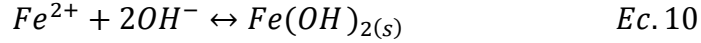
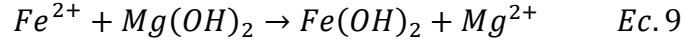
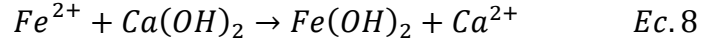
Cantidad de coagulante	Efecto
Poca	No neutraliza la carga. Poca formación de flóculos. Poca remoción de turbiedad.
Apropiada	Neutraliza la carga. Flóculos fuertes. Genera la mayor remoción de turbiedad.
Alta	Produce la inversión de la carga de la partícula. Flóculos muy pequeños, sedimentación muy lenta. Turbiedad residual relativamente alta.
Muy alta	Se produce un precipitado de los coagulantes que ayudan a remover turbiedad.

2.3.1 pH de floculación: el pH se debe ajustar dependiendo de la naturaleza de la solución y del tipo de coagulante que se va a usar, para que la coagulación se dé de forma eficiente. El pH es uno de los factores con mayor influencia en la coagulación, ya que los iones de hierro formados en la ED son susceptibles a variaciones, por la formación de variados compuestos de hierro. Por lo tanto es importante controlar el pH para obtener los hidróxidos que son el puente para la formación de complejos oxihidróxidos, que propician la floculación.

Otras variables importantes en este paso son una correcta agitación y la alcalinidad, la primera genera igualdad de reactivos en todo el volumen de la solución, por lo tanto una alta eficiencia en la reacción y la segunda propicia que se formen las cadenas de oxihidróxidos, por esta razón se ajusta el pH con cal dolomita, ya que el calcio y el magnesio se solubilizan para alcanzar el pH deseado.

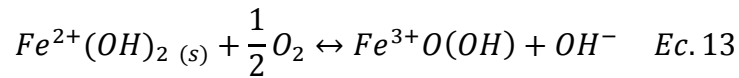
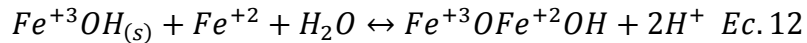
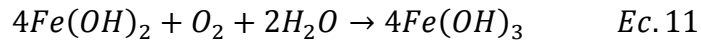
Las reacciones que ocurren al realizar el ajuste con cal se muestran en las ecuaciones 8, 9 y 10, en éstas se forma el hidróxido de Fe (II). En las reacciones 8 y 9 el ión de hierro reacciona con los hidróxidos de calcio y magnesio de la cal dolomita y en la última el ión de hierro reacciona con los iones OH^- de agua que se disocia, estos hidróxidos son el puente para la obtención del coagulante. Esto se basa en el principio de LeChatelier de las reacciones reversibles, por lo cual

a un pH altamente alcalino se forman los hidróxidos de hierro (II) que propician la coagulación.



2.3.2 Burbujeo de aire: Posteriormente al ajuste con cal, se burbujea aire a la mezcla, esto fomenta las reacciones de oxidación de especies Fe (II) a especies de Fe (III), que a pH alto son instantáneas. El hidróxido de Fe (II) formado, se oxida a hidróxido de Fe (III) (ecuación 11) y a una variedad de especies ferrosas y férricas complejas parcialmente oxidadas, meta estables y difíciles de caracterizar.

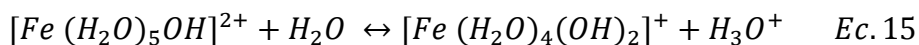
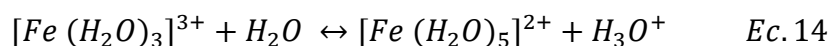
Los compuestos intermedios de hierro se transforman en óxidos de hierro estables, posteriormente los hidróxido de Fe (III) reaccionan con iones de Fe (II) que no se oxidaron y forman oxihidróxidos de Fe (II) y (III) como se muestra en las ecuaciones 12 y 13, que son el principio activo de la floculación [Chaturvedi et al., 2012], [Gendel et al., 2010]. La formación de estos productos dependen de condiciones ambientales como el pH, temperatura, composición de la solución y la velocidad de oxidación.



Cuando se burbujea aire lo que se hace es propiciar la oxidación homogénea en solución del Fe (II) , la cinética de ésta reacción es altamente dependiente del pH, lo que se debe a que varias especies de Fe (II), Fe^{2+} , $FeOH^+$, y $Fe(OH)_{2(aq)}$ se oxidan paralelamente para formar complejos hidróxido de hierro insolubles [Barnes et al., 2009]. Morgan y Lahav [2007]

[Vigneswaran et al., 1995]. Bajo condiciones alcalinas, el Fe^{+2} se oxida inmediatamente a Fe^{+3} (pH entre 7.6 y 14). A un pH inferior a 7.6, las velocidades de reacción son mucho menores y a valores de pH inferiores a 4, el proceso de oxidación se vuelve insignificante. Para este estudio se tomó que un tiempo de burbujeo de 20 minutos es suficiente para alcanzar altas conversiones a Fe^{+3} .

Los oxihidróxidos son complejos que se forman cuando la coagulación ocurre simultáneamente con la oxidación [Szpyrkowicz et al., 2000], en las ecuaciones 14 y 15, se presentan en forma desarrollada estos complejos:



Los $[Fe (HO)_{n(s)}]$ formados permanecen en la suspensión acuosa en forma gelatinosa, estos pueden remover materia orgánica por reacciones complejas y por atracción electrostática, seguidas de la coagulación. Los iones férricos electro generados forman monómeros iónicos, complejos de oxihidróxidos de hierro y especies poliméricas llamadas $[Fe (H_2O)_6]^{3+}$, $[Fe (H_2O)_5(OH)]^{2+}$, $[Fe (H_2O)_4(OH)_2]^+$, $[Fe_2 (H_2O)_8(OH_2)]^{4+}$, $[Fe_2 (H_2O)_6(OH_4)]^{2+}$ y $[Fe_2 (HO)_4]^-$, cada una de estas se forma dependiendo del rango de pH [Kim et al., 2002].

2.3.3 Fosfato disódico (FD): En la fabricación de quesos y lácteos, se utilizan fosfatos, citratos, y muchas otras sustancias quelantes como aditivos para mejorar la estabilidad de estos productos a variaciones de temperatura [Holt., 1985]. Los quelantes desplazan los equilibrios proteína-mineral lo que disminuye la concentración de iones libres de calcio y agota los coloides de fosfato de calcio, estos desplazamientos aumentan la repulsión entre los aminoácidos cargados negativamente en las micelas de caseína, lo que resulta en un aumento de la hidratación y la voluminosidad de las micelas [Dewan et al., 1972; Snoeren et al., 1982]

El fosfato disódico, es importante porque genera propiedades funcionales como secuestrante de minerales como el calcio y el magnesio, controla pH [Caric et al., 1987; Berger et al., 1989] y

tiene características antimicrobianas creadas a partir de barreras físicas que protegen la proteína [Gupta y colaboradores., 1984]. Si éste disminuye por acción de la fermentación de la lactosa, la caseína que actúa como agente emulsionante se hidrata y se dispersa.

El FD que se adiciona a la mezcla de lactosuero y coagulante durante la etapa de burbujeo, actúa como agente secuestrante de dureza y de metales, en este caso la cal que no reaccionó. Al entrar en contacto con la solución, el fosfato disódico se disocia en el ion fosfato Figura 8, como se ve en la Ecuación 16.

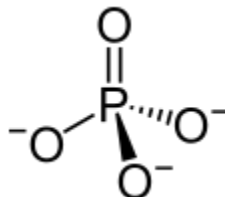
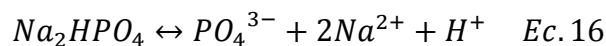


Figura 8. Estructura del ión fosfato.

De esta forma el ión fosfato por medio de sus extremos negativos forma enlaces con el calcio y el magnesio presenten en la cal dolomita, y como estos metales poseen 2 cationes, se unen a otro ión fosfato, y así se forma una cadena que ayuda a remover turbidez del sobrenadante, tal y como se ve en la Figura 9.

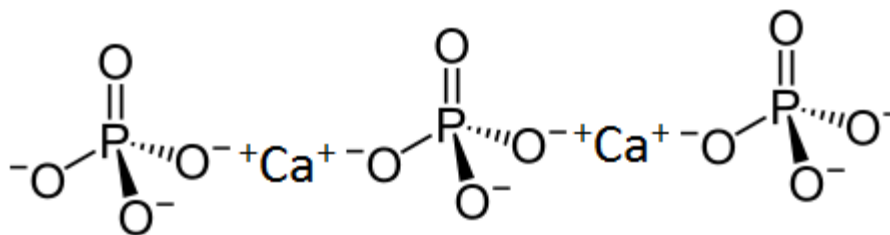


Figura 9. Cadena de fosfatos con iones de calcio remanentes en el sobrenadante.

2.4 Floculación

En esta etapa se adiciona el polímero que ayuda al crecimiento y aglomeración de los flóculos formados, ya que estos no son suficientemente grandes y fuertes para mantenerse unidos y sedimentar. Con la adición de un coagulante, en este caso poliacrilamida aniónica (APAM), que tiene una carga baja y un peso molecular alto, se propicia el enlace entre las partículas desestabilizadas, ver Figura 10. Este polímero crea una red que enlaza las partículas individuales por medio de sus extremos, y enlaza las cargas positivas creadas por el floculante, en este caso el Fe^{+3} .

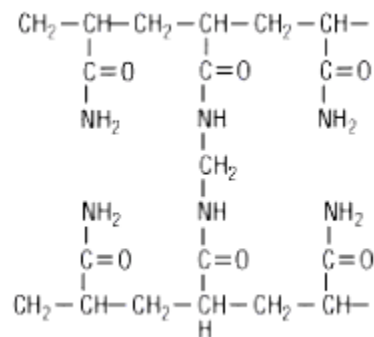


Figura 10. Estructura molecular de la poliacríamida

La agitación dentro del proceso de floculación y coagulación se da en dos etapas, una lenta y una rápida. La primera de ellas es prolongada, evita la destrucción de los coágulos y se usa para dispersar el coagulante dentro del lactosuero, propiciando la formación de los micro flóculos y la segunda es de menor duración y más intensa, cuya función es difundir el polímero y hacer que se formen los puentes de unión entre los micro flóculos.

Existen una serie de mecanismos a través de los cuales se da el proceso de desestabilización tales como la coalescencia, la coagulación, la sedimentación, el cremado y la floculación, entre otros. En la Figura 11, se pueden apreciar los distintos tipos de separación de componentes, para este caso en particular, el cremado se dio en el pretratamiento del lactosuero, la floculación se dio al adicionar la solución de hierro y finalmente se propició la sedimentación con la APAM.

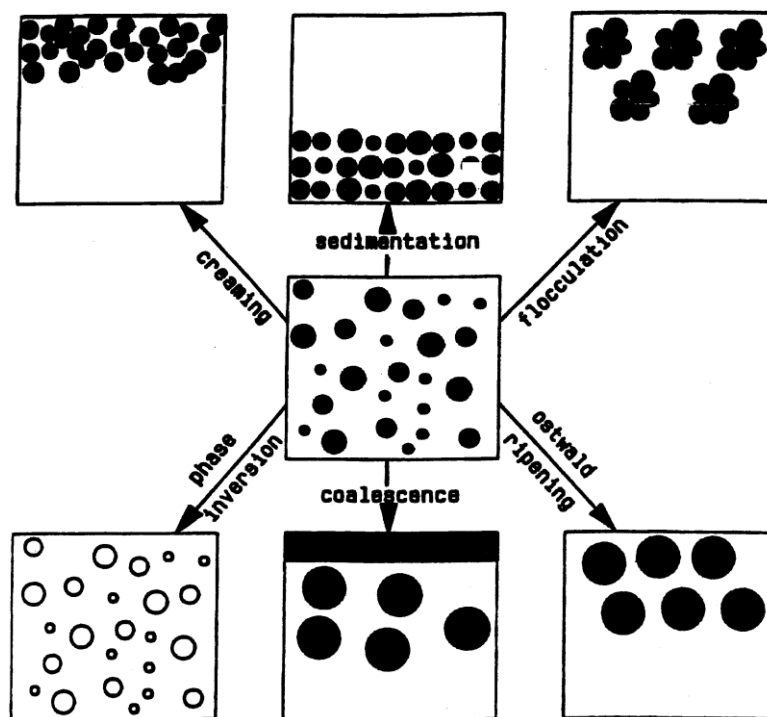


Figura 11. Tipos de separación de componentes [Tadros., 2004].

3. METODOLOGIA

3.1 Obtención, caracterización y pretratamiento del lactosuero

En la elaboración del queso del cual se obtuvo el lactosuero para este estudio, se tomaron en cuenta las condiciones establecidas por la hacienda La Gloria para la elaboración de queso tipo cuajada: la leche se calentó durante 30 minutos hasta 25° C, en el minuto 31 se adicionó 1 pastilla de cuajo Marschall M50 por cada 40 litros de leche, estas pastillas previamente se disolvieron en agua a 40° C. A los 43 minutos se procedió al lirado del queso (proceso de fragmentación de la masa coagulada para beneficiar el desuerado) y a los 47 minutos se realizó la extracción del lactosuero.

La caracterización del lactosuero se realizó en el laboratorio de la escuela de ingeniería química, teniendo en cuenta las variables: densidad, turbidez, COD, DQO, pH y conductividad. Antes de someter el lactosuero al tratamiento con la técnica de ECF, se realizó un pre tratamiento en el que este se dejó decantar durante 24 horas a 4° C, con el fin de eliminar los componentes grasos presentes, como se muestra en la Figura 12. El lactosuero pretratado se almacenó a -16° C, con el fin de usar una muestra uniforme al inicio de cada prueba y de esta forma minimizar el ruido por el uso de diferentes tipos de lactosuero, ya que éste varía dependiendo de los parámetros en la elaboración del queso.



Figura 12. Fases separadas con el pretratamiento

La turbidez, el pH, la conductividad y la densidad se midieron con equipos del Laboratorio de Investigación y Docencia de la Escuela de Ingeniería Química, mientras que el COD y la DQO se midieron con instrumentos del Laboratorio de Microbiología de la Escuela de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Para la medición de la turbidez inicial del lactosuero, fue necesario hacer una dilución en agua destilada de 1:9, ya que el valor sin dilución no se encontraba dentro del rango de medición del turbidímetro, por lo cual todas las muestras se sometieron a la misma dilución.

3.2 Montaje experimental

El tratamiento del lactosuero se realizó en tres etapas: electrodisolución de hierro, coagulación y floculación, todas estas realizadas a condiciones atmosféricas. La primera etapa consistió en introducir 6 placas de hierro de 6 cm de ancho y 9.2 cm de alto cada una, durante 3 horas, en una solución de agua destilada con 3120 ppm de ácido sulfúrico, para obtener una solución de hierro con una carga de 3000 C/L. En la segunda etapa, la solución de hierro obtenida se añadió al lactosuero pretratado, durante 15 minutos se ajustó el pH hasta 11 con cal dolomita al 5%, luego se burbujeó aire durante 20 minutos con ayuda de un compresor con un difusor poroso, en el quinto minuto de burbujeo, se adicionó fosfato disódico en una concentración de 200 ppm, en este punto comenzó la formación de los flóculos. En la última etapa se usó poliacrilamida aniónica (APAM) como floculante, comercialmente conocida como Profloc 6040, ésta se adicionó en una concentración de 20 ppm, en este momento los flóculos previamente formados se unieron produciendo coágulos de mayor tamaño, que sedimentaron con mayor facilidad.

El proceso de ED de hierro anteriormente mencionado, se realizó en un reactor en el que los electrodos de hierro y la solución ácida estaban en contacto, aquí los iones de hierro se disolvieron gracias a una fuerza impulsora, es decir la corriente eléctrica generada en la fuente de poder. El montaje experimental para esta etapa se puede apreciar en la Figura 2, que consta de los siguientes elementos:

- Vaso de precipitado de 600 mL.
- Plancha de agitación magnética, sobre ésta se soportó el montaje.

- Magneto Fisherbrand 1-1/2" * 3/8": se introdujo en el vaso de precipitado previamente llenado con la solución ácida, con el fin de eliminar las burbujas adheridas a los electrodos.
- 6 electrodos de acero al carbono: el acero utilizado en la electrodisolución es acero al carbono laminar común acorde a la norma ASTM A36, el cual contiene entre una concentración de carbón < 0.5% y hierro > 97%, por lo que se considera como una fuente rica en hierro.
- 1 soporte de acrílico en el que se insertaron los electrodos, en el cual la distancia de electrodo a electrodo es de 0.7 cm, de modo que los electrodos quedaban fijos dentro del montaje.
- Fuente de corriente y voltaje regulable, con su respectivo cableado.
- Inversor de polaridad, que tenía la función de convertir el ánodo en cátodo y viceversa, cada vez que se ejecutaba el interruptor manualmente.

Las etapas de floculación y coagulación se realizaron en un vaso de precipitado de 100 mL, en este se hizo el ajuste con cal, el burbujeo, la adición de fosfato disódico y la coagulación con APAM. En la Figura 13 se puede observar el montaje experimental para estas dos etapas, que consta de los siguientes elementos:

- Vaso de precipitado de 100 mL
- Plancha magnética: sobre esta plancha hizo el ajuste con cal y a la adición de la APAM.
- Magneto Fisherbrand 1/2" * 5/16"
- Compresor, se usó para burbujear el aire a la mezcla de lactosuero con la solución de hierro, este se encuentra conectado mediante una manguera plástica a un difusor poroso de piedra pómez, que aumenta el área de las burbujas.

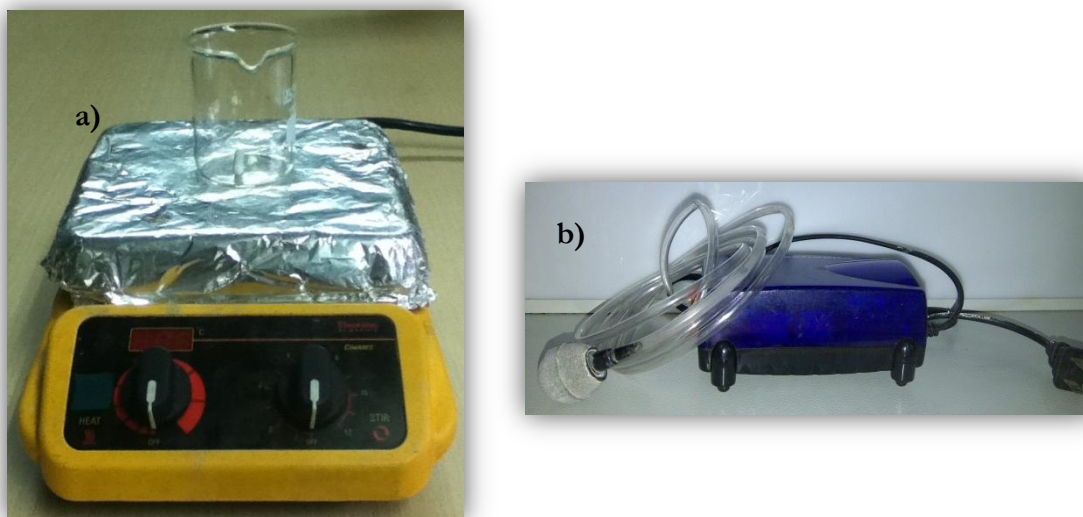


Figura 13. Montaje experimental para la coagulación floculación. (a) Plancha de agitación magnética (b) Bomba con difusor poroso para realizar el burbujeo.

3.3 Procedimiento experimental

3.3.1 Electrodisolución: Se preparó en un vaso de precipitado de 600 mL una solución con 400 mL de agua destilada y 0.7 mL de ácido sulfúrico al 98.62%, con esto se logró un pH inicial de 1.5. Los 6 electrodos se pulieron previamente con lijas de agua marca Abracol calibre 150, 600 y 1000 y se limpiaron con acetona para eliminar cualquier impureza o grasa en la superficie, se introdujeron en los soportes de acrílico y se sumergieron en la solución ácida. El área de cada cara que estuvo en contacto con la solución ácida fue 36 cm^2 , obteniendo un área de contacto efectiva de 180 cm^2 .

La fuente de poder que se usó para la electrodisolución poseía un cable anódico y otro catódico que conducían al inversor de polaridad, estos se conectaron a los electrodos de forma intercalada. Según las pruebas realizadas la carga adecuada fue 3000 C/L y la densidad de corriente se fijó en 0.6 mA/cm^2 basados en el estudio realizado con lactosuero por [Güven y colaboradores., 2008]. El tiempo durante el cual se llevó a cabo la electrodisolución se calculó con la ley de Faraday (ver Ecuación 6), a continuación se muestran los parámetros usados en esta etapa:

Tabla 2. Parámetros utilizados en el proceso de electrodisolución

Parámetro	Valor
Carga (C/L)	3000
Área efectiva (cm ²)	180
Corriente eléctrica (A)	0.108
Tiempo electrodisolución (h)	3.08
Volumen de solución (L)	0.4
Concentración de H ₂ SO ₄ (v/v)	0.17 %

Durante la electrodisolución se monitoreó el pH, el voltaje y la conductividad haciendo mediciones cada 10 minutos, para esto era necesario apagar la fuente con el fin de evitar interferencias en la medición. El pH se mantuvo por debajo de 3.5 con la restitución de ácido sulfúrico hasta un pH aproximado de 2; durante la electrodisolución la agitación se fijó en 550 rpm con el fin de remover las burbujas. La polaridad de los electrodos se invirtió manualmente con el inversor de polaridad cada 4 minutos. La ED se realizó a temperatura ambiente (25 °C).

3.3.2 Floculación y coagulación: En la etapa de floculación, la solución obtenida en la primera etapa (solución de hierro) se mezcló en una proporción 50:15 (v/v) (lactosuero-coagulante), agitando a 125 rpm. Luego se realizó un ajuste lento de pH, adicionando gota a gota durante 15 minutos 4.5 mL de cal dolomita al 5% (p/p), con esta cantidad se alcanzó un pH de 11, el cual fue el pH de coagulación.

Posteriormente, se burbujeó la solución durante 15 minutos y en el sexto minuto de burbujeo se adicionaron 0.3 mL de fosfato disódico para obtener una concentración de 200 ppm en la mezcla lactosuero-coagulante. Finalmente, la coagulación ocurrió al adicionar la APAM para una concentración de 20 ppm que fue la apropiada según las pruebas preliminares, simultáneamente se agitó la solución a 350 rpm durante 1 minuto en la plancha de agitación magnética.

Después de la coagulación se dejaron sedimentar las muestras por 1 hora, se extrajeron 3 mL del sobrenadante de cada una y se diluyó en relación 1:9 con agua destilada, finalmente se

midieron la turbidez y demás parámetros a cada una de ellas. En la Tabla 3 se resumen los parámetros utilizados en las etapas de floculación y coagulación.

Tabla 3. Resumen de los parámetros usados en la Coagulación y Floculación

Parámetro	Valor
Cantidad lactosuero	50 mL
Cantidad solución hierro	15 mL
Ajuste con cal (pH=11)	15 minutos
Burbujeo	20 minutos
Fosfato disódico a 14000 ppm	200 ppm
APAM Profloc 6040 a 1000ppm	20 ppm
Agitación lenta (15 min)	125 rpm
Agitación rápida(1 min)	350 rpm

3.4 Pruebas preliminares

En las pruebas preliminares, la variable de respuesta con mayor importancia fue la turbidez, ya que ésta indirectamente permitió saber si la formación de los flóculos era la adecuada, es decir evaluar si la mayor cantidad de sólidos presentes inicialmente en el lactosuero quedaron en la fase pesada, además la turbidez fue una variable de fácil y rápida medición. Por su parte el DQO y el COT son variables ampliamente usadas para determinar la carga contaminante de una solución líquida, por lo tanto se midieron en las pruebas finales.

Con las pruebas preliminares se hallaron las condiciones de operación adecuadas para las 3 etapas, electrodisolución de hierro, floculación y coagulación de lactosuero. Se determinó la carga de la solución coagulante, el pH de floculación, la proporción entre la cantidad de lactosuero y la solución coagulante, y la concentración de polímero. Se fijaron n-1 variables (donde n es el número total de variables) y se manipuló la variable restante hasta encontrar el valor apropiado, luego se fijó ésta como parámetro y se realizó nuevamente el procedimiento para las otras variables en el siguiente orden: carga de la solución de hierro, proporción lactosuero-coagulante, pH de floculación y cantidad de polímero.

3.4.1 pH de floculación: Para determinar el pH al que se debía realizar la floculación, se tomaron 6 muestras de lactosuero de 50 mL cada una, cada muestra se mezcló con 15 mL de solución de hierro con una carga de 3000 C/L. Se ajustó con cal dolomita al 5% cada muestra hasta 6 diferentes valores de pH: 11, 10.5, 10, 9.5, 8.5 y 8, durante 15 minutos con una agitación de 125 rpm. Se burbujeó durante 20 minutos con ayuda del difusor poroso, al quinto minuto de burbujeo se adicionaron 0.3 mL de fosfato disódico a cada muestra y se esperó a que culminara el burbujeo. Finalmente se adicionaron 1.3 mL de APAM a cada muestra en agitación rápida (350 rpm) durante 1 minuto. Se dejó sedimentar los lodos durante 1 hora y se midió la turbidez del sobrenadante a cada una de las muestras, con esto se determinó el pH a l cual se dió la mejor remoción de turbiedad, teniendo como parámetro inicial la mostrada en la tabla 3.

3.4.2 Carga de la solución de hierro: Para la determinación de la carga de trabajo, se realizó una electrodisolución de hierro con una carga de 5000 C/L. Esta solución se diluyó con agua destilada para obtener 6 muestras con diferentes cargas: 1000 C/L, 2000 C/L, 2500 C/L, 3000 C/L, 3500 C/L y 4000 C/L. Se tomaron 15 mL de cada una de las soluciones preparadas y se le adicionaron a 50 mL de lactosuero, se ajustó el pH hasta 11 con cal dolomita al 5% durante 15 minutos a 125 rpm, se burbujeó durante 20 minutos, en el quinto minuto se adicionó fosfato disódico hasta llegar a una concentración de 200 ppm en la mezcla y finalmente se adicionaron 5 ppm de APAM con una agitación rápida a 350 rpm durante 1 minuto. Se midió la turbidez de cada una de las muestras del mismo modo que en las pruebas anteriores, con esto se determinó la carga de la solución de hierro ideal para la floculación.

3.4.3 Proporción (lactosuero-coagulante): Se fijaron 6 cantidades (10 mL, 15 mL, 20 mL, 25 mL, 30 mL y 50 mL) de solución de hierro con una carga de 3000 C/L, para realizar el barrido de proporción en un volumen constante de lactosuero de 50 mL. Se midió el pH inicial y se ajustó durante 15 minutos con cal dolomita al 5% hasta un pH de 11, se burbujeó durante 20 minutos con el compresor y el difusor poroso; en el quinto minuto de burbujeo se adicionó fosfato disódico para obtener una concentración de 200 ppm. Después de 20 minutos, se agregó APAM con una agitación rápida (350 rpm) durante 1 minuto, hasta llegar a una concentración en la mezcla de 20 ppm. Se dejó separar las dos fases durante 1 hora y se midió

turbidez a cada una de las muestras, con esto se determinó la proporción adecuada de solución de hierro/lactosuero.

3.4.4 Cantidad de polímero: Con los parámetros encontrados en las pruebas anteriores se elaboró una curva de concentración de APAM, desde 5 ppm hasta 120 ppm versus turbidez. Esta gráfica se elaboró con las siguientes condiciones de operación: carga de 3000 C/L, proporción lactosuero-coagulante 50:15, un pH de ajuste con cal de 11 y un tiempo de sedimentación de las muestras de 1 hora. La elección de la concentración de APAM apropiada para la floculación se basó en los valores de turbidez de las muestras para diferentes concentraciones de polímero.

3.5 Pruebas finales

En las pruebas finales se elaboró un barrido de carga y de cantidad de solución de hierro teniendo como variable de respuesta DQO y COD, parámetros de gran importancia en la caracterización de efluentes para indicar el grado de contaminación. Estas pruebas tienen como base los valores hallados en las pruebas preliminares:

- pH de floculación o pH de ajuste con cal: 11.0
- Concentración de polímero: 20 ppm
- Proporción lactosuero-coagulante: 50:15 (mL)

Se realizaron pruebas complementarias, con la primera de ellas se determinó la cantidad de hierro presente en el sobrenadante y en la solución coagulante por medio de absorción atómica; con la segunda prueba se determinó la cantidad de proteína del lactosuero original y del sobrenadante en el laboratorio de análisis industrial de la Universidad del Valle, según el método planteado en la NTC 282, 1986 (Norma Técnica Colombiana). Esto permitió hallar la cantidad de hierro y proteína que contenían los lodos con lo que se vislumbró un posible uso para estos.

Para finalizar, se realizó un análisis preliminar de costos de los insumos y energía eléctrica de la técnica de ECF para el tratamiento de 50 mL de lactosuero, se tomaron en consideración los

costos asociados a insumos químicos y a energía eléctrica, se extrapolaron dichos costos para el tratamiento de 1 m³ de efluente.

3.6 Medición de variables

Para la medición de las diferentes características del lactosuero original, del sobrenadante, del lactosuero tratado y de la solución de hierro, se utilizaron los siguientes instrumentos:

- Peso: balanza RADWAG AS 220/C/2. Laboratorio de investigación Ingeniería Química.
- pH y Conductividad: Conductivímetro EIJKELKAMP AGRISEARCH EQUIPMENT 18.50.01. Se calibró al inicio de cada prueba. Laboratorio de investigación Ingeniería Química.
- Turbidez: HACH 2100N Turbidimeter. El lactosuero inicial y los sobrenadantes se diluyeron 1/9 en agua destilada. Laboratorio de investigación Ingeniería Química.
- Determinación de la cantidad de hierro: ABSORCIÓN ATÓMICA
- Proteínas: Método NTC 282, laboratorio de análisis industrial, Facultad de ciencias exactas.
- COD: SHIMADZU TOC ANALYZER VCPH 5050. Se diluyó 1/250 el lactosuero sin tratar y 1/250 los sobrenadantes obtenidos en las pruebas. Laboratorio de microbiología.
- DQO: HACH COD REACTOR y espectrofotómetro SHIMADZU UV-1800. Se realizó una dilución de 1/250 para el lactosuero inicial y 1/250 para las pruebas finales. Laboratorio de microbiología.
- Agitación: plancha de agitación magnética CimarecTM stirring hot plates, modelo SP131014
- Fuente de poder: GW laboratory DC power supply, modelo: GPS-3030D
- Magnetos: Fisherbrand, magnetic stirring bars

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Caracterización y pretratamiento del lactosuero

Con la refrigeración del lactosuero durante 24 horas a 4 °C se logró separar 9.42% de grasa de la fase acuosa. De esta forma el lactosuero pretratado tiene menor contenido graso, lo que beneficia la ECF y hace que la desproteinización sea más sencilla para los coagulantes y floculantes, debido a que el COD, la DQO y el contenido de sólidos disueltos es menor. Los resultados de caracterización obtenidos antes y después del pretratamiento se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4. Parámetros de caracterización del lactosuero antes y después de la decantación.

	Lactosuero original	Lactosuero pre tratado	Reducción
Turbidez (NTU-Nephelometric Turbidity Unit)*	3473	1711	50.0%
pH	7.03	6.59	--
Densidad (g/mL)	0.921	0.908	--
Conductividad (mS/cm)	13.74	9.60	--
DQO (ppm)	149786	116145	22.5%
COD (ppm)	34080	32580	4.40%
Proteína (% m/m)	--	1.3	--

* Dilución de lactosuero en agua destilada 1:9

Al realizar el pretratamiento se permitió que los microorganismos presente usen la lactosa como sustrato y produzcan ácido láctico, disminuyendo el pH como se evidencia en la Tabla 4. La DQO y el COD del lacto suero pretratado fue menor, pues la fase separada aportaba significativamente a estas propiedades, este comportamiento se evidenció también en la densidad. El color del lactosuero permanece prácticamente constante (un poco más claro en la muestra pretratada), esto se debe a la presencia de riboflavina o vitamina B2 según De Wit

[2001], por lo que se concluye que el lactosuero pretratado aun contiene gran cantidad de este compuesto.

4.2 Electrodisolución

Las Figuras 14, 15 y 16 corresponden a una electrodisolución de 3000 C/L realizada con un volumen de solución ácida de 400 mL y un área de contacto efectiva de 180 cm² de acuerdo con el procedimiento establecido en la metodología.

4.2.1 Comportamiento de pH: El pH presenta una tendencia ascendente, la cual decae en el momento de la restitución de ácido, que se hizo para mantener el pH por debajo de 3.5, necesario para que los iones de Fe (II) se transfirieran desde las placas hacía la solución ácida. El pH aumentó a medida que el catión H⁺ se convierte en hidrógeno gaseoso.

Como se observa, el pH disminuyó de forma regular hasta aproximadamente 2, lo que implica que la adición de ácido sulfúrico al 98% se realizó con la misma frecuencia y en la misma cantidad. El pH final de la solución de hierro fue de 3.36. El monitoreo que se le realizó al pH durante el proceso de electrodisolución fue oscilatorio por la restitución de ácido (Figura 14).

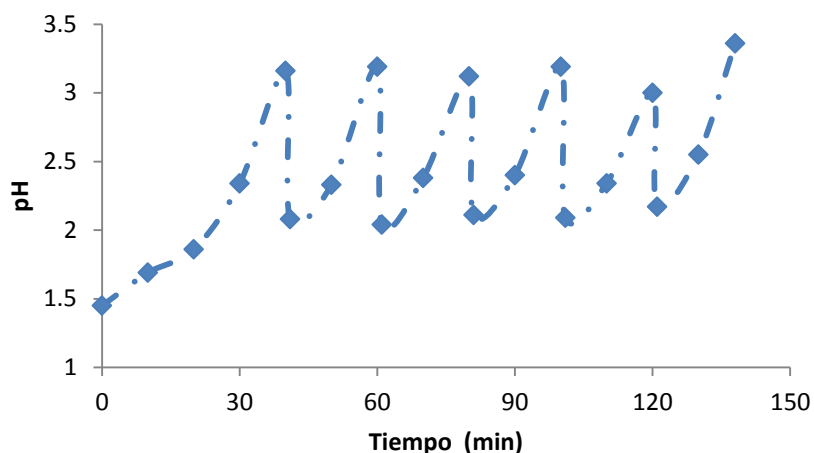


Figura 14. Comportamiento del pH durante la ED

El comportamiento del pH en este proceso electroquímico depende de la cinética de las reacciones que ocurrieron en la celda. La velocidad de reacción para la producción de H₂ ocurre rápido para valores de pH inferiores a 4, debido a que en este intervalo la velocidad de

corrosión es más alta que para el resto de pH [Moreno et al., 2007], por esto cuando la reacción (Ecuación 4) se desplazó hacia la derecha haciendo que la concentración de iones H^+ decreciera, ocasiona un aumento del pH.

4.2.2 Comportamiento de la conductividad: En la Figura 15 se observa que en el transcurso de la ED, la conductividad de la solución disminuye, lo que sugiere que la conductividad es inversa al pH de la solución, ya que cuando se hace la restitución con ácido sulfúrico la conductividad aumenta.

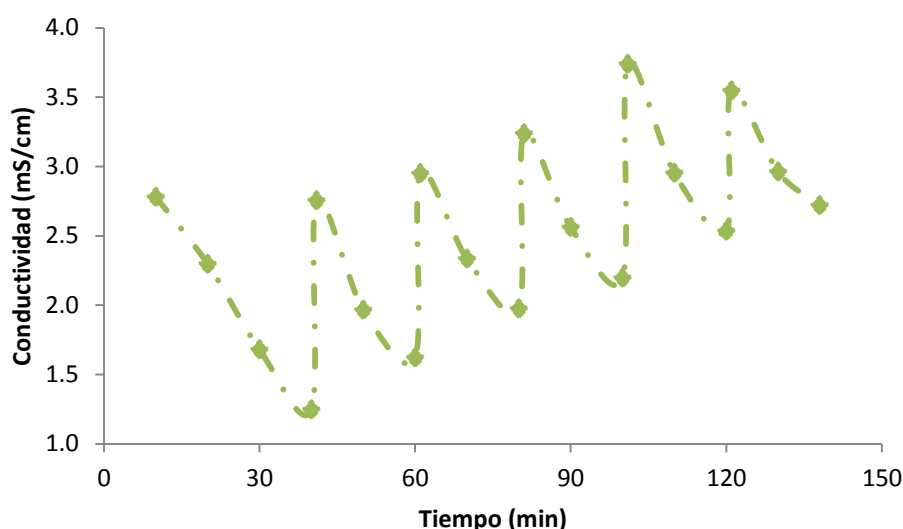


Figura 15. Comportamiento de la conductividad durante la ED.

En el transcurso de la ED, antes de adicionar la restitución de ácido, el comportamiento de la conductividad disminuyó. Esto se debe a que la concentración de iones de hidrógeno decreció (aumento de pH). La conductividad es una medida de la movilidad de iones en una solución, el hidrogenión tiene una alta difusividad entre 5 a 10 veces mayor que la de otros iones presentes en la solución, y son precisamente éstos los que contribuyen significativamente a la conductividad de la solución. Además la conductividad del H^+ es mayor que la del Fe^{2+} .

La conductividad se aumentó añadiendo una pequeña cantidad de electrolito soporte, lo que redujo el consumo de energía durante la electrodisolución. La conductividad de la solución afectó el voltaje de la celda, la eficiencia de la corriente y el consumo de energía eléctrica de la

celda. Se requiere más energía para superar una alta resistencia óhmica entre el ánodo y el cátodo cuando la conductividad eléctrica de la solución es baja [Lung et al., 2009].

4.2.3 Comportamiento de voltaje: El voltaje presentó un comportamiento oscilatorio a lo largo de la ED. Al inicio el voltaje aumentó, sin embargo tiende a mantenerse constante y decae debido a la adición de ácido al proceso. El intervalo en el que osciló el voltaje estuvo entre 0.2 y 0.5 V y no cae nunca de su valor inicial. El valor más bajo de voltaje fue 0.2 V, y se obtuvo cuando el pH tenía un valor de 1.5 y el más alto que corresponde a 0.5 V se obtuvo a un pH de 3.4, valor promedio del voltaje en la electrodisolución fue de 0.35 V. En la Figura 16 se muestra la variación del voltaje respecto al tiempo en el proceso de electrodisolución:

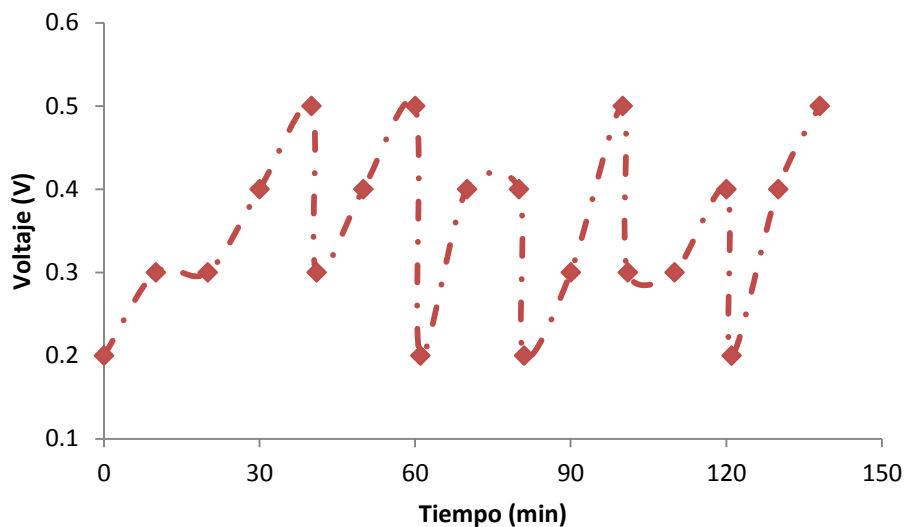


Figura 16. Comportamiento del voltaje durante la ED.

La variación del voltaje en el proceso de electrodisolución se encuentra ligada a la conductividad. A medida que la electrodisolución tomó lugar, los iones H^+ que rodean las placas se transformaron en H_2 , por lo cual el potencial de oxidación era mayor, entonces la fuente por medio del voltaje compensó el trabajo de captación de electrones que realizaban los iones H^+ . Se puede ver en la Figura 16, que el voltaje decae aproximadamente cada 20 minutos, que corresponde a los momentos en los que se hizo la restitución de ácido. Cuando este se adicionó, aumentó la cantidad de iones H^+ que ayudaron a atrapar los electrones, aumentando

la conductividad de la solución, y esto representó un alivio para la fuente ya que el potencial de oxidación disminuyó, evidenciado en la Figura 16 como la disminución del voltaje cada vez que se adicionó ácido sulfúrico.

El comportamiento del voltaje es similar al reportado por Mouedhen et al., [2008] en el estudio de electrocoagulación de agua residual realizado con electrodos de aluminio, en el que a bajas concentraciones del electrolito (hasta 50 ppm de NaCl) el voltaje aumentaba desde 10 hasta 50 V, mientras que a concentraciones altas del electrolito (600 ppm) el voltaje era aproximadamente 5 V. En el presente estudio el electrolito usado fue H_2SO_4 , el cual se disocia en H^+ y SO_4^{2-} por lo cual al hacer una restitución de ácido se aumentaba la concentración del ión hidrogenión y el voltaje decae de igual forma que en el estudio mencionado.

4.3 Pruebas preliminares – Flocculación y coagulación

A continuación se muestra el análisis que se realizó para la fijación de los parámetros del proceso de ECF para el lactosuero.

4.3.1 pH de floculación: En la Figura 18 se muestra un barrido de pH para dos cantidades de coagulante adicionadas a 50 mL de lactosuero, teniendo como variable de respuesta la turbidez residual. El punto mínimo obtenido corresponde a condiciones de pH de 11 y 15 mL de coagulante. En contraste, la mayor turbidez residual alcanzada, hace referencia a pH medianamente básicos. La mayor reducción de turbidez se encontró a un pH de 11 y una proporción de lactosuero- coagulante de 50:15, con una concentración de 20 ppm de APAM.

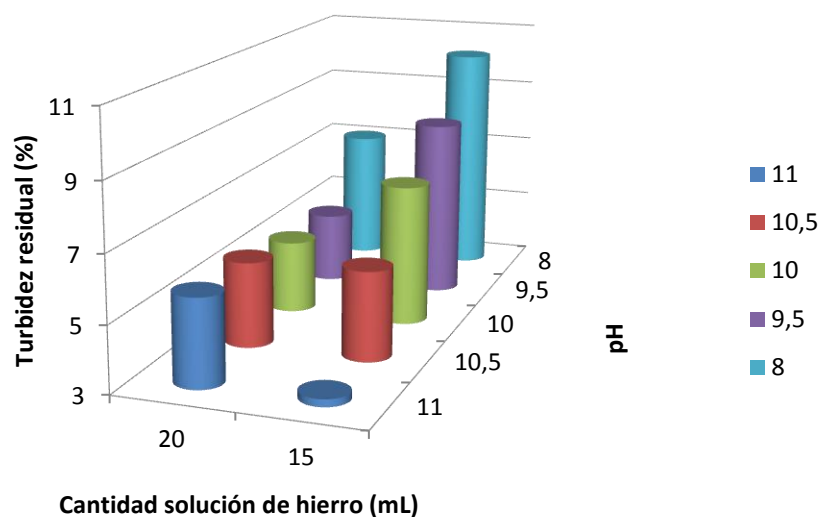


Figura 17. Barrido de pH tomando como variable de respuesta la turbidez del sobrenadante, a dos dosis de solución de hierro en 50 mL de lactosuero y 20 ppm de APAM.

Para obtener reducciones significativas de turbidez el hierro debe ser oxidado a un estado en el que puede formar complejos insolubles. La oxidación implica la transferencia de electrones del hierro a otros productos químicos que están siendo tratados con el agente oxidante. A pH altos las especies de hierro formaron compuestos insolubles, que actúan como coaguladores o desestabilizadores de carga y precipitan la mayor cantidad de sólidos disueltos presentes en el lactosuero, por medio de la formación de complejos o atracción electrostática.

4.3.2 Carga de la solución de hierro y proporción (lactosuero-coagulante): Para encontrar el valor teórico de la concentración de hierro en la solución coagulante se basó en la teoría de las reacciones electroquímicas que se rigen por la ley de Faraday, por medio de la Ecuación 6.

En este estudio se varió el parámetro de carga a un pH de coagulación de 11, tomando como variable de respuesta la turbidez del sobrenadante. La carga con la mayor disminución en turbidez fue 3000C/L (Figura 18), tanto para la prueba realizada con burbujeo y FD como para la que no se usó ninguno de estos. Además el tratamiento con burbujeo y FD benefició la remoción de turbiedad disminuyéndola en 5% comparada con la otra prueba en la que no se

oxidó el hierro, lo que evidencia que el efecto coagulante Fe (III) es más efectivo que el de Fe (II).

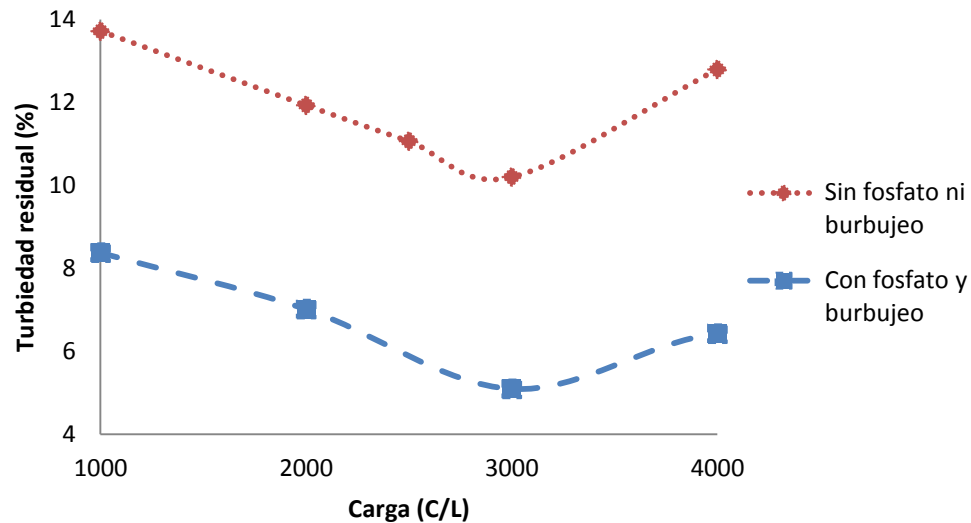


Figura 18. Variación de la carga de la solución de hierro versus turbidez del sobrenadante obtenido de la ECF, a 200 ppm de fosfato disódico y 20 ppm de APAM.

En la Figura 19 se presenta un diagrama de barras en el que se varió la carga y el pH de coagulación, en este último caso se realizó con un nivel de pH adicional, superior a todos los puntos anteriormente analizados, para descartar que a un pH mayor se obtuvieran mejores resultados en cuanto a remoción de turbidez, efectivamente lo que se encontró fue que la diferencia de turbidez remanente con una carga de 3000 C/L de la solución coagulante, para pH de 11,8 y 11, fue de 1.8%. La turbidez residual cayó significativamente a una carga del coagulante de 3000 C/L, tanto en la Figura 18, como en la Figura 19.

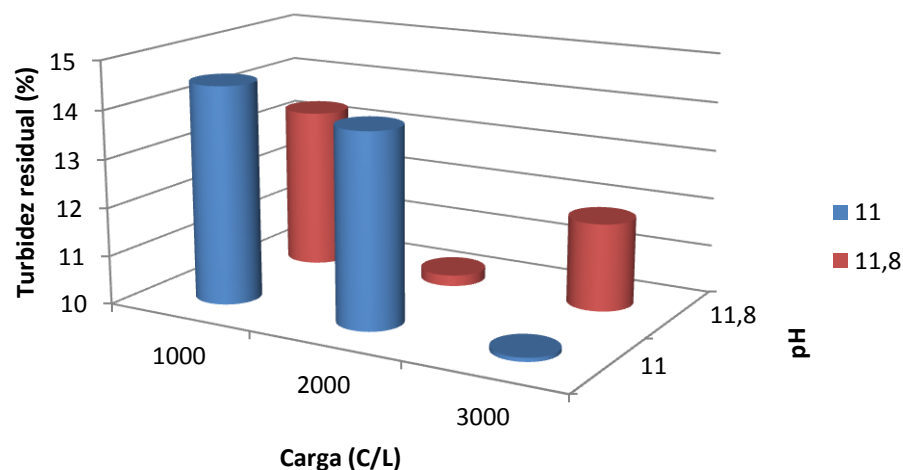


Figura 19. Barrido de carga de la solución coagulante a dos pH de coagulación 11 y 11.8.

Con el parámetro de carga establecido se procedió a realizar un análisis de la cantidad de solución coagulante que debía ser adicionada a 50 mL de lactosuero. La mayor reducción de turbidez se alcanza con 50 mL de solución de hierro (Figura 20), sin embargo no fue necesario adicionar esta cantidad, ya que con 15 mL se obtiene una turbidez similar a la mínima, con una diferencia de 1 NTU. Como esta diferencia no fue significativa se decidió trabajar con 15 mL de solución de hierro de 3000 C/L por cada 50 mL de lactosuero.

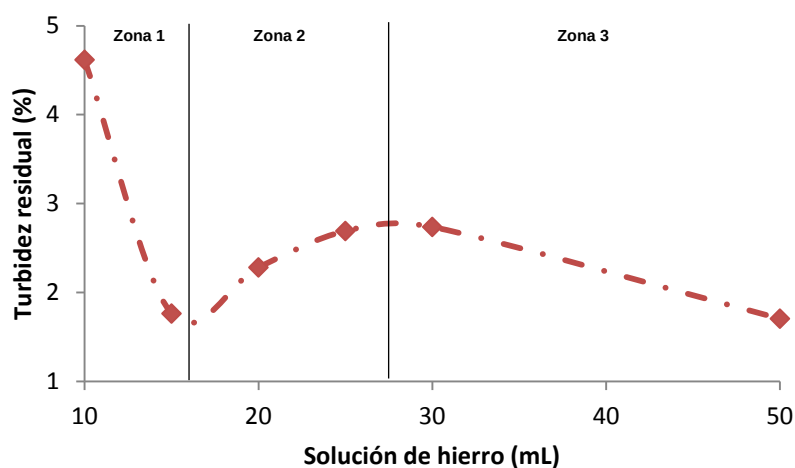


Figura 20. Variación de la cantidad de solución de hierro de 3000 C/L agregada a 50 mL de lactosuero versus la turbidez del sobrenadante después de FC.

La solución coagulante produjo una desestabilización de las cargas que rodean cada partícula coloidal, lo que aumentó la probabilidad de formar coágulos y reducir a un punto mínimo la turbidez residual, así las partículas son más susceptibles de penetración iónica a medida que el potencial Z disminuye, este es precisamente el principio que ataca el hierro.

La Figura 20 está dividida en zonas, en la zona 1 se alcanzó la mayor reducción en 15 mL de solución de hierro, equivalente a 1.7% con respecto al valor de turbiedad inicial (1711 NTU). Sin embargo al adicionar solución de hierro en exceso, es decir más de 15 mL, se produjo una redistribución de la carga de la partícula que se absorbió nuevamente en la superficie de esta, produciendo una carga invertida a la carga original y generándose nuevamente la repulsión y posterior dispersión, fenómeno evidenciado en la zona 2 donde la turbidez residual aumenta. Finalmente en la zona 3, después de adicionar 30 mL de solución coagulante en 50 mL de lactosuero, hay una nueva caída en la turbidez residual, este fenómeno ocurre cuando hay una saturación de hierro en la mezcla, generando una precipitación de los coagulantes, arrastrando en su descenso las partículas que generan turbiedad.

Rizzo et al [2007] evaluaron el efecto de reducción de turbiedad versus dosis de quitosano, como agente coagulante para el tratamiento primario de agua de potabilización, y concluyó un comportamiento similar a la Figura 20, en la que se llega a un punto máximo de turbiedad reducida y al sobredosificar la turbiedad disminuye gracias a la interacción de las cargas electrostáticas dentro del proceso de coagulación.

4.3.3 Cantidad de polímero:

El efecto que tiene la sobredosificación de polímero en la turbiedad residual se ilustra en la Figura 21, para pH de coagulación de 10.5 y 11. La curva de concentración de APAM que corresponde al primer valor de pH tiene magnitudes de turbiedad remanente mayores que la curva a 11 a cada dosis de floculante, lo cual afirma que 11 es el pH adecuado para realizar el ajuste con cal y posteriormente adicionar APAM.

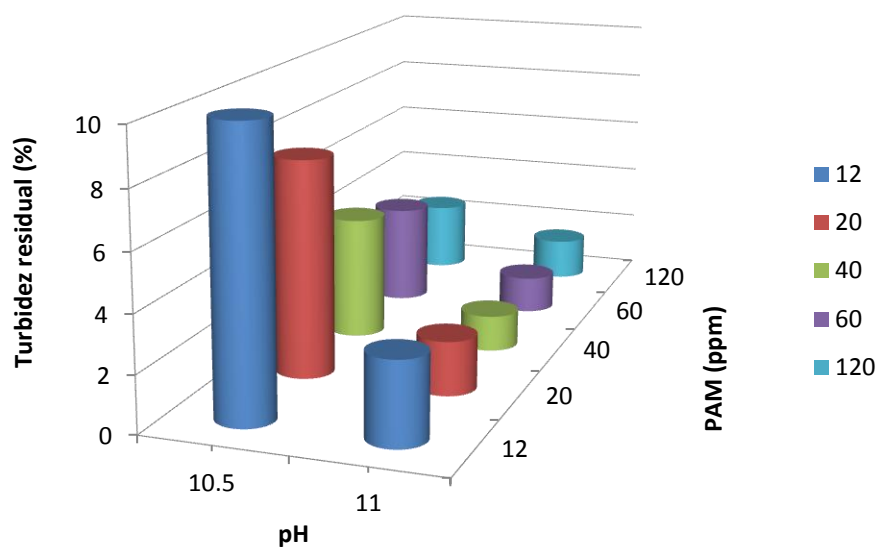


Figura 21. Variación de la concentración de APAM a pH 11 y 10.5, teniendo como variable de respuesta la turbidez residual del sobrenadante, para 50 mL de lactosuero con una solución de hierro de 3000 C/L y 200 ppm FD.

El efecto sobre la turbidez del sobrenadante a diferentes concentraciones de APAM, se compara en la Figura 21, de igual forma el efecto del tratamiento con burbujeo y la adición de FD al lactosuero. Los 2 tratamientos se realizaron a un pH de coagulación de 11. La tendencia de las dos curvas es similar, pero difieren en la altura en la que sus comportamientos se vuelven asintóticos. El tratamiento sin FD ni burbujeo presentó valores mayores de turbidez residual que el lactosuero tratado con el FD y burbujeo, lo que evidencia que el efecto coagulante Fe (III) fue más efectivo que el de Fe (II).

Las curvas para los 2 tratamientos adoptan un comportamiento asintótico, en el cual no tiene sentido adicionar más APAM ya que el efecto en reducción de turbiedad es insignificante. Para la curva punteada se alcanzó el valor mínimo de turbidez en 60 ppm de polímero y en la prueba realizada con FD y burbujeo, es de 20 ppm, por lo que se disminuye la cantidad de polímero a un tercio y disminuye la turbidez residual un 3.5% al adicionar el burbujeo y el FD al proceso de ECF. Se eligió 20 ppm como la concentración apropiada de APAM.

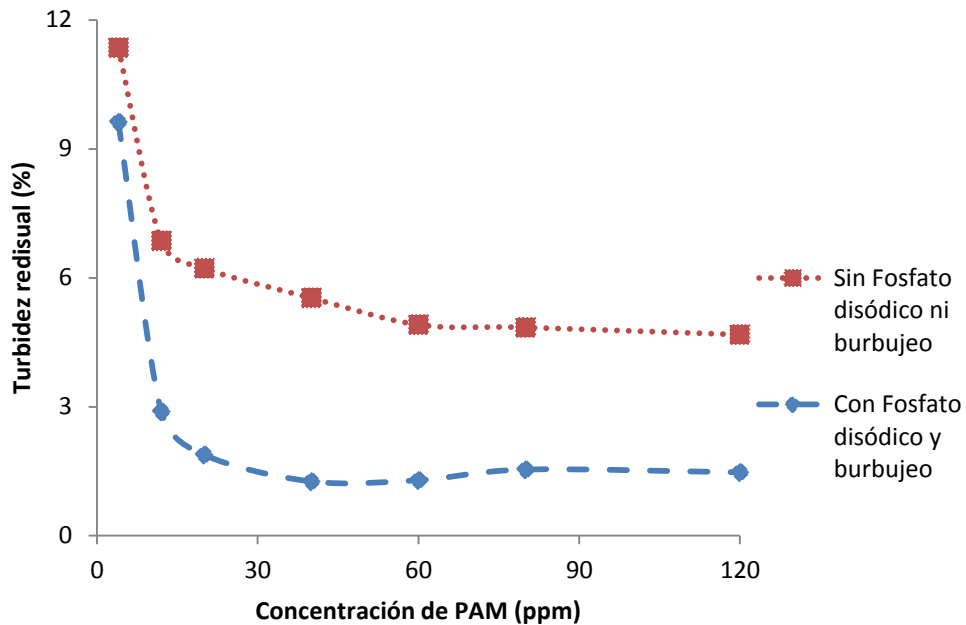


Figura 22. Efecto del burbujeo y adición de FD en la turbidez del sobrenadante, a diferente concentración de polímero

El comportamiento asintótico se debe a que la solución se saturó y los flóculos ya no tienen la capacidad de formar más puentes de unión con el polímero, debido a que toda su periferia está en contacto con la APAM. Como el polímero tiene baja carga eléctrica, las cargas desestabilizadas no se ven afectadas y no se revierte el efecto de coagulación del hierro, por esta razón la turbidez se mantiene constante aunque se sobredosifique el polímero.

4.4 Pruebas finales

4.4.1 Variación de DQO y COD con la proporción (lactosuero-coagulante) y con la carga de la solución coagulante: A medida que se adiciona más solución de hierro (3000 C/L), de 10 mL a 50 mL, a una misma cantidad de lactosuero, el DQO presenta una tendencia descendente. Para 15 mL el DQO disminuye en 52.7% (Figura 23). En cuanto al comportamiento del valor apropiado (15 mL), no se observa un comportamiento similar con la Figura 20, lo que indica que para enfocarse en disminuir la DQO de este efluente se deben de trabajar con dosis más altas de coagulante o en su efecto someter el sobrenadante a un post tratamiento de oxidación avanzada para disminuir la DQO a un valor aceptable para la

legislación colombiana (remoción en DQO superior al 80%) o cual sea el requerimiento de la disposición final. El mismo fenómeno ocurre en las siguientes tres gráficas.

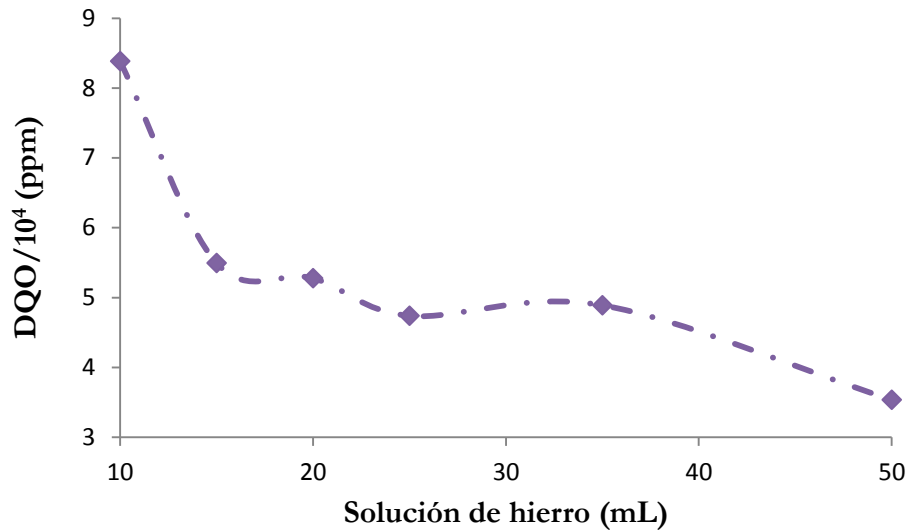


Figura 23. Variación de la cantidad de solución coagulante de 3000 C/L adicionada a 50 mL de lactosuero versus la DQO del sobrenadante.

El comportamiento de la Figura 24 es similar al mostrado en la gráfica anterior con una tendencia decreciente y con una disminución de 24.52% entre la adición de solución de hierro de 10 mL y 50 mL. Además se observa que después de que se adiciona 30 mL de solución de hierro a 50 mL de lactosuero, el cambio en el COD residual es muy pequeño haciéndolo despreciable.

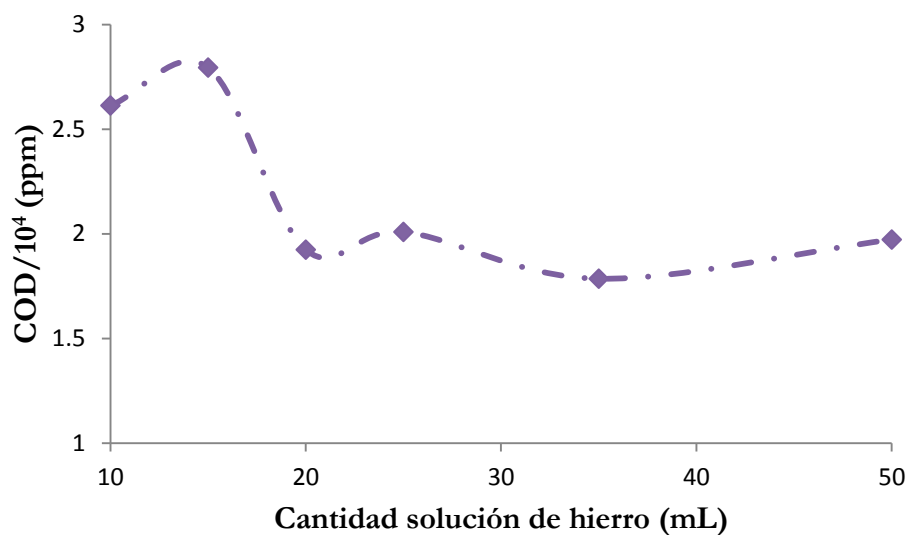


Figura 24. Variación de la cantidad de solución coagulante adicionada a 50 mL de lactosuero versus el COD del sobrenadante.

Una tendencia similar se presenta en la Figura 25 donde con 5000C/L se obtuvo la mayor reducción en DQO equivalente a 71.88 %. Se muestra en la figura que en 3000C/L un pequeño aumento en DQO residual.

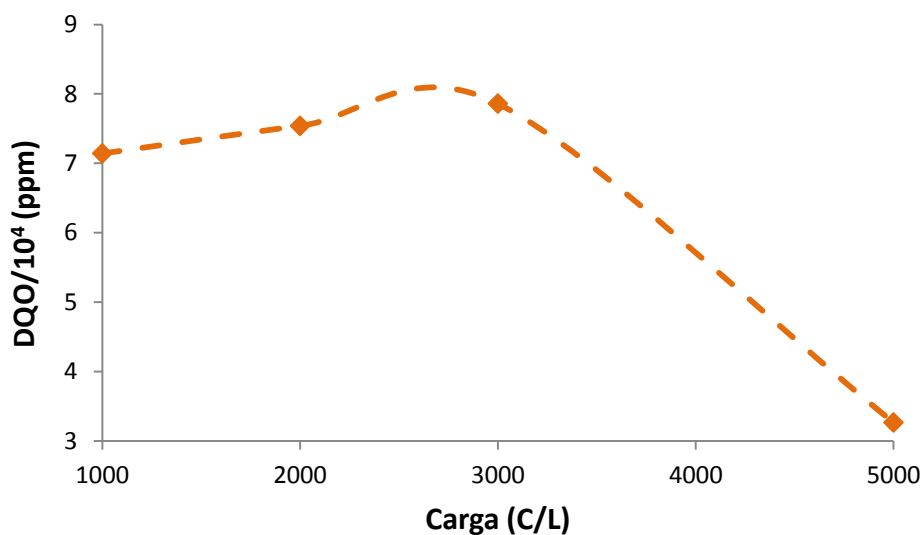


Figura 25. Variación de la carga de la solución coagulante versus la DQO del sobrenadante.

En la variación de carga versus el COD (Figura 26), donde tiene un comportamiento decreciente. La reducción de COD a 5000C/L fue de 74.31% comparada con la reducción para 2000 C/L de 10.1%.

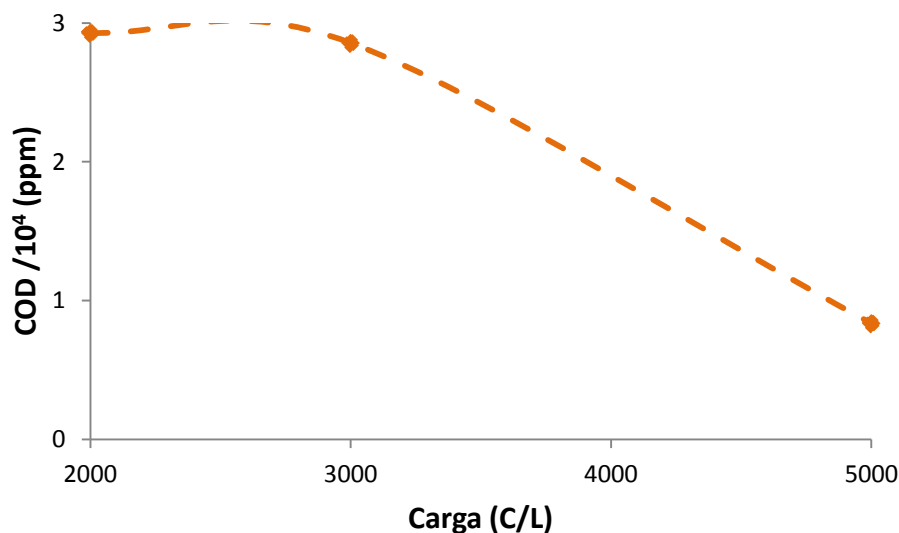


Figura 26. Variación de la carga de la solución coagulante versus el COD del sobrenadante.

Esta tendencia de las Figuras 23, 24, 25 y 26 es la esperada debido a que al adicionar más cantidad de solución de hierro o carga, causantes de la neutralización de las partículas coloidales, se desestabilizan más partículas que aportan DQO y COD haciendo que la tendencia sea decreciente a medida que la concentración de hierro aumenta. El COD y el DQO residual o remanente se puede atribuir a sustancias que no son fácilmente coagulables y compuestos que no reaccionaron con la solución de hierro para sedimentarse en la fase pesada como grasa, lactosa, proteína, cal, FD, ácido láctico, sulfúrico y complejos de hierro.

En estas pruebas finales se evidenció que 3000 C/L y 15 mL no son los valores apropiados para reducir al máximo las variables de COD y DQO, caso contrario a lo que ocurre con la turbidez, la variable con más seguimiento en las pruebas preliminares. Cabe aclarar que los métodos analíticos de DQO por el método dicromato potásico sufren interferencias por la presencia de sustancias orgánicas susceptibles de ser oxidadas como sulfuros, yoduros, cloruros, sulfitos, entre otros. Es probable que estas mediciones se vean afectadas en especial por los sulfitos, muy posiblemente formados al adicionar el ácido sulfúrico en la ED.

Es importante aclarar que la carga y solución de coagulante son una forma de medir indirectamente la concentración de hierro. Para obtener los valores más bajos de COD (8367 ppm) alcanzado en las Figura 26, se deberían incrementar las cantidades de solución de hierro, la diferencia radica en que al aumentar ésta, bajo una misma concentración, se debe agregar más coagulante por lo tanto se entraría a diluir el suero. Entonces se prefiere manejar cargas altas (5000C/L) y dosis bajas, ya que si se manejan de forma opuesta, se entraría a agregar más agua al sistema, cuestión operativamente no práctica.

4.4.2 Caracterización de las fases obtenidas: Al aplicar la técnica de ECF al lactosuero se obtienen dos fases del volumen tratado, como se observa en Figura 27, una fase rica en sólidos denominada fase pesada o lodos la cual ocupa alrededor del 4.5% en base húmeda, y una fase liviana o sobrenadante que es pobre en sólidos disueltos y en la cual se hizo especial énfasis.



Figura 27. Lactosuero antes y después del tratamiento con ECF.

La cantidad de proteína contenida en los lodos se caracterizaron en el laboratorio de ingeniería química y en el laboratorio de análisis industriales de la Universidad del Valle, los parámetros medidos se exponen en la siguiente tabla.

Tabla 5. Caracterización de los lodos obtenidos después de la ECF.

Parámetro	Lodos
Proteína (% m/m)	6.4
Hierro (ppm)	7598

Los lodos que se obtuvieron contenían 6.4% (m/m) en proteína, debido a que la cantidad de proteínas iniciales del lactosuero es de 1.3% (m/m) (ver Tabla 4), lo que mostró que la proteína se concentró en la fase pesada. En el proceso de ECF el 31.4 % de las proteínas presentes se sedimentaron en los lodos mientras que el resto se encuentra remanente en el sobrenadante. El alto contenido en hierro genera complicaciones para darle un valor agregado a los lodos lo cual imposibilita la opción de un posible uso en productos para consumo humano, teniendo en cuenta los requerimientos de la industria alimenticia, aspectos que salen del alcance del trabajo presentado. Además de estos parámetros es importante para un posible uso de estos lodos cuantificar la cantidad de lactosa y de complejos de hierro y analizar si estos son asimilables por los seres humanos, debido a que en la ED se dan reacciones difíciles de controlar que forman complejos de hierro.

Para estos cálculos se supuso que la cantidad de hierro presente en el lactosuero inicial es insignificante comparada con la cantidad de hierro adicionada en la solución ácida.

Como se observó cualitativamente el color del sobrenadante es significativamente más claro que el del lactosuero original y este tono es gracias a la vitamina B2 o riboflavina [De Wit., 2001], se puede decir que gran cantidad de este compuesto se encuentra después de la ECF en el lodo lo que le da un valor agregado nutricional a este.

En la Tabla 6 se pueden apreciar que la caracterización del sobrenadante obtenido, fue mucho más detallada debido a la importancia que esta representa dentro de la línea que maneja el grupo de investigación en la cual está enmarcado este trabajo.

Tabla 6. Caracterización del sobrenadante o fase liviana obtenida después de la ECF.

Parámetro	Sobrenadante
pH	9.43
Turbidez	51.86
DQO (ppm)	13030.38
COD (ppm)	14148
Proteína (% m/m)	0,85
Hierro (ppm)	6.67

Como se puede apreciarse la DQO y el COD siguen siendo altos, aunque se haya logrado una reducción de 63 % y 18 % respectivamente, comparado con el lactosuero original. Esto se debe a que aunque se haya removido el 96.97% de turbiedad, que está representada principalmente por lactosa y proteína, además la solución de hierro que se agregó al proceso de ECF que contiene complejos que aportan a la contaminación del sobrenadante.

El contenido de proteína en el sobrenadante fue menor comparado con la concentración en el lactosuero original, con lo que se logró la desproteinización del lactosuero y se concentró en la fase pesada. Por otro lado, la mayor cantidad del hierro usado en el tratamiento se quedó en el lodo, por lo cual el sobrenadante tuvo una mínima parte cuya concentración no influyó significativamente en la calidad del agua obtenida.

4.4.3 Evaluación preliminar de costos: Los principales costos asociados a la ECF fueron los correspondientes a la energía eléctrica en la ED y a los químicos como el ácido sulfúrico, el óxido de calcio, óxido de magnesio, fosfato disódico y APAM. Para la energía eléctrica consumida durante la electrodisolución se tiene:

$$\frac{0.35 V * 0.108 A * 3.08 h}{0.4 L_{sln Fe}} = 0.3 \frac{Wh}{L_{sln Fe}}$$

$$0.2911 Wh * \frac{1KW}{1000 W} * \frac{1000 L_{sln Fe}}{1 m^3_{sln Fe}} = 0.2911 \frac{KWh}{m^3_{sln Fe}}$$

$$0.2911 \frac{KWh}{m^3_{sln Fe}} * \frac{\$350}{KWh} = \frac{\$102}{m^3_{sln Fe}}$$

Para obtener un metro cúbico de solución de hierro se gasta en energía eléctrica 102 pesos y con un metro cúbico de esta solución de hierro se pueden tratar 3.3 m³ de lactosuero, equivalente a \$30.9 por metro cúbico de lactosuero tratado.

De esta manera se resumen los costos asociados con la técnica de ECF aplicada al tratamiento de 50 mL de lactosuero, en la siguiente tabla:

Tabla 7. Costos de energía y químicos para el tratamiento de lactosuero con ECF.

Concepto	Costo unitario	Cantidad usada en ECF/50 mL LS	Costo /m ³
Energía eléctrica	\$350/KWh	4.2525 E-6 KWh	
Ácido sulfúrico 98.78%	\$0.519/mL	0.0262 mL	\$272
Óxido de calcio	\$0.199/g	0.1350 g	\$54
Óxido de magnesio	\$0.514/g	0.0900 g	\$926
Fosfato disódico	\$2.430/g	0.0042 g	\$204
APAM Profloc 6040	\$ 0.35/g	0.0006 g	\$4
COSTO TOTAL INSUMOS			\$1490

5. CONCLUSIONES

Se logró, por medio de la electrodisolución de hierro y floculación de lactosuero, una reducción de 97% en turbidez, 53% en DQO y 14% en COD, para un lactosuero inicialmente decantado para separar la mayor cantidad de grasa, usando un pH de floculación de 11, una carga de coagulante de 3000 C/L, con una relación de lactosuero y solución de floculante de 50:15, utilizando una concentración de APAM de 20 ppm.

Se logró el tratamiento de lactosuero con un costo de energía eléctrica correspondiente a \$30.9 y un costo asociado a insumos químicos de \$1470 por metro cúbico de lactosuero tratado, lo que evidencia que es una técnica económicamente aceptable además es un tipo de tratamiento que requiere un control menos riguroso, comparado con métodos de tratamiento biológicos o tratamientos químicos con coagulantes comerciales.

Las especies de hierro (III) tienen un efecto coagulante más efectivo que las especies de hierro (II) en el tratamiento de lactosuero, ya que se obtuvo una reducción adicional del 5% en turbidez al burbujearse la mezcla.

El lactosuero es un agua residual muy contaminante, lo que se evidenció en sus altos valores de DQO y COD. Uno de los mayores aportes de carga contaminante que tiene este efluente, es la grasa donde al eliminarse por medio del pretratamiento aplicado, la turbidez disminuyó en 50%, la DQO en 22.5% y en una menor cantidad el COD en 4.4%. Comparando el lactosuero como se obtiene de la producción de queso con el sobrenadante alcanzado en la ECF, las reducciones fueron de 98% para la turbidez, 72% para el DQO y 18% para el COD.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, E., Assalin, M.R., Rosa, M.A., Duran, N., Wastewater treatment by oxidation with ozone, *Quim. Nova* 27 (5) (2004) 818–824.
- Assalin, M.R., Almeida, E.S., Rosa, M.A., Moraes, S.G., Duran, N., Application of ozonation process in industrial wastewaters: textile, kraft E-1 and whey effluents, *Environ. Technol.* 25 (8) (2004) 867–872.
- Becker, W., Ralph, S., Wayne, E., General Chemistry. P 468-482. Ed. Reverté S.A. Barcelona, (1977).
- Berger, W., Klostermeyer, H., Merkenich, K., Uhlmann, G., Processed Cheese Manufacture, A JOHA Guide. BK Ladenburg GmbH, Würzburg, Germany, (1989).
- Berruga, M.I., Jaspe, A., SanJose, C., Selection of yeast strains for lactose hydrolysis in dairy effluents, *Int. Biodeter. Biodegr.* 40 (1997) 119–123.
- Brillas, E., Sauleda, R., Casado J., Degradation of 4-chlorophenol by anodic oxidation, electro Fenton, photoelectro-Fenton and peroxi-coagulation processes, *J. Electrochem. Soc.* 145 (1998) 759–765.
- Cardona, C., Remoción continua de solidos totales en vinazas por electrocoagulación y floculación, Universidad del Valle, Cali, Colombia, (2010).
- Caric, M., Kaláb, M., Processed cheese products. In: Fox, P.F. Ed., Cheese: chemistry, physics and microbiology. vol. 2: Major cheese groups. Elsevier Applied Science, London, (1987).
- De Wit, J.N., Lecturer's Handbook on Whey and Whey Products, first ed. European Whey Products Association, Brussels, Belgium, (2001).
- Dewan, R.K., Bloomfield, V.A., Chudgar, A., Morr, C.V., Viscosity and voluminosity of bovine milk casein micelles. *Journal of Dairy Science*, 56, 699e705, (1972).
- Ergüder, T.H., Tezel, U., Güven, E., Demirer, G.N., Anaerobic biotransformation and methane generation potential of cheese whey in batch and UASB reactors, *Waste Manage*, 21 (7), (2001) 643-650.
- Florionovich, G.M., Lazorenko-Manevich, R.M., Role of solution components in the processes of anodic dissolution of metals. *Electrochimica Acta*, 42(5), 879–885. doi: 10.1016/S0013-4686(96)00327-1, (1997).

Ghaly, A.E., Kamal, M.A., Submerged yeast fermentation of acid cheese whey for protein production and pollution potential reduction. *Water Res.* 38 (3), 631e644, (2004).

Gonzalez-Siso, M.I., The biotechnological utilization of cheese whey: a review, *Bioresour. Technol.* 57, (1996), 1–11.

Gupta, S.K., Karahdian, C., Lindsay, R.C., Effect of emulsifier salts on textural and flavor properties of processed cheeses. *Journal of Dairy Science* 67, (1984), 764 – 778,.

Güven, G., Perendeci, A., Tanyolac, A., Electrochemical treatment of deproteinated whey wastewater and optimization of treatment conditions with response surface methodology, *Journal of Hazardous Material.* 157, (2008), 69-78.

Holt, C. The milk salts: their secretion, concentrations and physical chemistry. In P. F. Fox (Ed.), *Developments in dairy chemistry e 3. Lactose and minor constituents* (pp. 143e181). London, UK: Elsevier Applied Science Publishers, (1985).

Janson, H.V., Lewis, M.J., Electrochemical coagulation of whey protein. *Int. J. Dairy Technol.* 47 (3), (1994), 87-90.

Jeantet, R., Roignant M., Brulé G., Traducido por José María Peiró Esteban. *Ingeniería de los procesos aplicada a la industria láctea*. España: Editorial Acribia, (2005).

Kalyuzhnyi, S.V., Martinez, E.P., Martinez, J.R., Anaerobic treatment of high-strength cheese-whey wastewater in laboratory and pilot UASBreactors, *Bioresour. Technol.* 60, (1997) 59–65.

Kim, T.H., Park, C., Lee, J., Shin, E.B., Kim, S., Pilot scale treatment of textile wastewater by combined process fluidized biofilm process – chemical coagulation – electrochemical oxidation, *Water Res.* 36 (16), (2002) 3979–3988.

Kisaalita, W.S., Lo, K.V., Pinder, K.L., Influence of whey protein on continuous acidogenic degradation of lactose. *Biotechnol. Bioeng.* 36 (6), 642e646, (1990).

Lo, K.V., Liao, P.H., Digestion of cheese whey with anaerobic rotating biological contact reactor, *Biomass* 10, (1986) 243–252.

Londoño, M., Sepúlveda, J., Hernández, A. y Parra, J., Bebida fermentada de suero de queso fresco inoculada con *Lactobacillus casei*. *Revista Facultad Nacional Agronomía Medellín* 61(1), (2008) 4409-4421.

Morgan, B., Lahav, O., The effect of pH on the kinetics of spontaneous Fe(II) oxidation by O₂ in aqueous solution—basic principles and simple heuristic description, *Chemosphere* 11, (2007) 2080–2084.

Mouedhen, G., Feki, M., De Petris W.M., Ayedi, H.F., Behavior of Aluminum Electrodes in Electrocoagulation Process, *Journal of Hazardous Materials* 150, no. 1 (2008), 124–35.

Panizza, M., Cerisola, G., Removal of organic pollutants from industrial wastewater by electrogenerated Fenton's reagent, *Water Res.* 35, (2001) 3987–3992.

Parga, J.R., Cocke, D., Valenzuela, J., Gomez, J., Kesmez, M., Irwin, G., Moreno, H., Weir, M., Arsenic removal via electrocoagulation from heavy metal contaminated groundwater in La comarca Lagunera México. *J. Hazard. Mater.* B124, (2005), 247-254.

Parra, R., Lactosuero: importancia en la industria de alimentos. En: revista facultad nacional de agronomía, vol.62, No.1, (2009), 4967-4982.

Prazeres, A.; Carvalho, F.; Rivas, J.; Cheese whey management: A review. *Journal of environmental management* 110, (2012), 48-68.

Rajeshwar, K., Ibanez, J.G., Swain, G.M., Electrochemistry and the environment, *J. Appl. Electrochem.* 24, (1994) 1077–1091.

Rizzo, L., Di Gennaro, A., Gallo, M., Belgiorno, V., Coagulation/chlorination of surface water: A comparison between chitosán and metal salts, *Elservier applied science* 62, (2008), 79-85.

Ruiz, A., Giraldo, L., Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea, Visitado el día 9 de Noviembre de 2011. Extraído de (2007).
http://www.slasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/RevistaLimpia/vol2n2/PL_V2N2_23-30_electrocoagulación.pdf

Rupak, M., Dipa, T., Bishnu, P.C., Arun, K.G., Whey processing with chitosán and isolation of lactose, India, (2003).

Sengil, I., Özacar, M., Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes, *Journal of Hazardous Materials* B137 (2006) 1197–1205

Siso, M.I.G., The biotechnological utilization of cheese whey: a review. *Bio-resour, Technol.* 57 (1), (1996), 1-11.

Snoeren, T.H.M., Damman, A.J., Klok, H.J., The viscosity of skim-milk concentrates. *Netherlands Milk and Dairy Journal*, 36, (1982), 305-316.

Souza, R.R., Bergamasco, R., Costa, S.C., Feng, X., Faria, S.H.B., Gimenes, M.L., Recovery and purification of lactose from whey. *Chem. Eng. Process.* 49 (11), (2010), 1137-1143.

Su, H., Wang, Z., Tan, T., Preparation of a surface molecular-imprinted adsorbent for Ni²⁺ based on *Penicillium chrysogenum*. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 80 (4), (2005), 439-444.

- Su, H., Wang, Z., Tan, T., Adsorption of Ni²⁺ on the surface of molecularly imprinted adsorbent from *Penicillium chrysogenum* mycelium. *Biotechnol. Lett.* 25 (12), (2003), 949-953.
- Szpyrkowicz, L., Juzzolino, C., Kaul, S.N., A comparative study on oxidation of disperse dyes by electrochemical process, ozone, hypochlorite and Fenton reagent, *Water Res.* 35, (2001) 2129–2136.
- Tadros, T., Application of rheology for assessment and prediction of the longterm physical stability of emulsions, *Advances in Colloids and Interface Science*, (2004), 108-109, 227 – 258
- Tan, T.W., He, X.J., Du, W.X., Adsorption behaviour of metal ions on imprinted chitosán adsorbent. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 76 (2), (2001), 191-195.
- Valencia, E., Ramirez, M., La industria de la leche y la contaminación del agua. En: *Elementos*, vol.16, No 73, (2009), pag:27.
- Yousuf, M.M., Schennach R., Parga J., Cocke D., *Electrocoagulation (EC)—science and applications* Gill Chair of Chemistry & Chemical Engineering, Lamar University, Beaumont, TX 77710, USA, (2001).