

Caracterización fisicoquímica de un lactosuero: potencialidad de recuperación de fósforo

Judith Callejas Hernández*, Francisco Prieto García*, Víctor E. Reyes Cruz**, Yolanda Marmolejo Santillán*, María A. Méndez Marzo**

RESUMEN

El objetivo fue caracterizar un lactosuero de la planta de lácteos del municipio Santiago de Anaya en Hidalgo y valorar su recuperación de fósforo. Para ello, se realizó un muestreo compuesto: se determinó, según normas mexicanas, conductividad eléctrica, pH, potencial redox, potencial zeta, tamaños y distribución de partículas, demanda química de oxígeno, sólidos totales, volátiles y suspendidos, grasas, turbidez, proteínas, lactosa, ácido láctico y fósforo. Se aplicó un proceso de electrocoagulación con electrodos de Al y Ru_2O_3 para remoción de carga orgánica. Los resultados promedios arrojaron que es un lactosuero ácido (pH=4,8), pZ de -4,02 mV, que presenta elevadas cargas orgánicas (DQO > 100 000 mg O_2/L), entre las que destacan contenidos de lactosa (4,4 g/dL), ácido láctico (0,27 g/dL), grasas (0,83 g/dL) y proteínas (1,08 g/dL), así como PO_4^{3-} de 20,8 g/dL. Al término de 24 horas de electrocoagulación, se logró remover el 84 % de la DQO y recuperar 17,4 g/dL de PO_4^{3-} de la fase acuosa limpia y 0,07 g/kg del sólido floculado (lo que representa un total del 87 %).

ABSTRACT

The objective of this work was to characterize in the dairy industry of Santiago de Anaya in Hidalgo the whey obtained and to assess the recovery of phosphorus. For this composite sampling was performed: was determined, according to Mexican standards, electrical conductivity, pH, redox potential, zeta potential, particle size and distribution, chemical oxygen demand, total solids, volatile and suspended, fats, turbidity, protein, lactose, lactic acid and phosphorus. We used a process of electrocoagulation with Al and Ru_2O_3 electrodes for removing organic load. The average results showed that a whey acidic (pH = 4,8), pZ of -4,02 mV, which has high organic loads (COD > 100 000 mg O_2/L), among which contained lactose (4,4 g/dL), lactic acid (0,27 g/dL), fat (0,83 g/dL), protein (1,08 g/dL) and PO_4^{3-} of 20,8 g/dL. Following 24 hours of electrocoagulation, was achieved 84 % removal of COD and recover 17,4 g/dL PO_4^{3-} aqueous phase clean and 0,07 g/kg of flocculated solid representing a total of 87 %.

Recibido: 24 de agosto de 2011
Aceptado: 16 de enero de 2012

INTRODUCCIÓN

El lactosuero se ha considerado por años como un desecho. Aunque muy abundante (4-10 L/L de leche tratada), sin valorización alguna este elemento ha sido vertido en los ríos, lo que ha provocado la contaminación de mantos freáticos y suelos [1-4].

Según las propiedades fisicoquímicas, un lactosuero puede ser clasificado como ácido o dulce. En el primer grupo, se encuentran aquellos que provienen de la fabricación de quesos frescos de pasta blanda, obtenidos a partir de leche de vaca y/o de cabra; en ellos, la lactosa se ha transformado en ácido láctico, son ricos en calcio y fósforo; el pH es < 4,5 y los Grados Dormic son < 20 °. Un lactosuero dulce, en cambio, proviene de la fabricación de quesos de pasta cocida y prensada (vaca) y quesos de ovejas; es pobre en ácido láctico, en calcio y fósforo; el pH es > 6,0 y presentan > 50 ° grados Dormic (°D) [3].

Palabras clave:

Potencial zeta; electrocoagulación; fósforo; lactosa; ácido láctico.

Keywords:

Zeta potential; electrocoagulation; phosphorus; lactose; lactic acid.

El lactosuero ácido es obtenido de una coagulación ácida o láctica de la caseína de la leche, presentando un pH próximo a 4,5. Dicho suero se produce al alcanzar el punto isoelectrico de la caseína con anulación de

*Área Académica de Química. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Ciudad Universitaria, Carretera Pachuca-Tulancingo km 4,5, Pachuca, Hidalgo, México. Correos electrónicos: judith_callejas@yahoo.com.mx, prietog@uaeh.edu.mx

**Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Ciudad Universitaria, Carretera Pachuca-Tulancingo km 4,5, Pachuca, Hidalgo, México.

las cargas eléctricas que las mantienen separadas por las fuerzas de repulsión que generan, impidiendo así la floculación. Esto implica una total destrucción de la estructura micelar. Es un suero muy mineralizado pues contiene más del 80 % de los minerales de la leche de partida. En éste, el ácido láctico secuestra el calcio del complejo de paracaseinato cálcico, produciendo lactato cálcico. El fósforo de la caseína se encuentra bajo la forma de monoéster ortofosfórico de un aminoácido hidroxilado [3].

La composición del lactosuero en g/kg del producto bruto se muestra en la tabla 1 [5]. Como se puede observar, el lactosuero ácido principalmente es rico en fósforo (unas 10-12 veces más que el que puede estar presente como promedio en un residuo acuoso); igualmente es más rico en calcio y ácido láctico.

Poca información disponible existe en la literatura sobre la recuperación de fósforo a partir de lactosueros desechados por la industria láctea (ésta última, una práctica que tiene un fuerte impacto ambiental). En el presente trabajo se realizará una caracterización fisicoquímica de un lactosuero, obtenido de la planta productora de lácteos San Francisco, situada en el municipio de Santiago Anaya, estado de Hidalgo, México.

Tabla 1.

Composición promedio de los lactosueros dulces y ácidos derivados de la elaboración de quesos [5].

| | Lactosueros dulces (g/kg de lactosuero) | Lactosueros ácidos (g/kg de lactosuero) |
|-----------------------|---|---|
| Materia seca (MS) | 55 - 75 | 55 - 65 |
| Lactosa | 40 - 50 | 40 - 50 |
| Grasa bruta (GB) | 0 - 5 | 0 - 5 |
| Proteína bruta (PB) | 9 - 14 | 7 - 12 |
| Cenizas | 4 - 6 | 6 - 8 |
| Calcio | 0,4 - 0,6 | 1,2 - 1,4 |
| Fósforo (Fosfato g/L) | 0,4 - 0,7 (1,0 - 3,0) | 0,5 - 0,8 (2,0 - 4,5) |
| Potasio | 1,4 - 1,6 | 1,4 - 1,6 |
| Cloruros | 2,0 - 2,2 | 2,0 - 2,2 |
| Ácido láctico | 0 - 0,3 | 7 - 8 |
| pH | > 6,0 | < 4,5 |
| Grados Dornic | < 20 ° | > 50 ° |

MATERIALES Y MÉTODOS

Se determinó conductividad eléctrica (CE), pH, potencial redox (Eh), potencial zeta (pZ), tamaños y distribución de partículas, punto isoeléctrico del pZ, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales, volátiles y suspendidos (ST, STV y SS, respectivamente), grasas (G),

turbidez (T), proteínas (Pr), lactosa (L), ácido láctico (AL), fósforo (expresado como PO_4^{3-}) y la intensidad del color.

La determinación de CE, pH y Eh se realizó mediante un Conductronic y pHmetro (modelo CL8 y PH10) con mediciones directas en el lactosuero sin dilución. El pZ se determinó en equipo Zeta-sizer de la firma Malvern, modelo 3000 Hsa en dilución 1:10; se realizaron mediciones con variaciones de pH entre 1-10 para evaluar el punto isoeléctrico. Los tamaños y distribución de partículas coloidales presentes se determinaron mediante un analizador Beckman Coulter, modelo LS 13-320. La DQO se determinó según método estándar de flujo cerrado [6, 7, 8]. Los sólidos totales (ST), volátiles (STV) y suspendidos (SS) según la normatividad mexicana [9]. La T generada por los SS de la muestra fue medida fotométricamente en un nefelómetro modelo Spectronic, a longitud de onda de 860 nm [10, 11].

La intensidad del color del lactosuero se midió en un espectrofotómetro de absorción UV-VIS en la región de 300 nm-700 nm, previa microfiltración del líquido a través de papel de 0,22 μm . Dichas lecturas se hicieron a 475 nm, según reportan algunos autores [12, 13], o bien, a 525 nm o 570 nm, como indican en Arango y Garcés [14] y en la norma mexicana [15]. Los contenidos de G se midieron en un aparato Soxhlet [16]; los contenidos de PO_4^{3-} fueron determinados mediante el método reportado por algunos autores y la norma mexicana [17-20]. La determinación de la acidez mediante la medición de los °D y la concentración de AL se realizó según lo reportado en la literatura [21]; la L se determinó por el método establecido en la norma mexicana [22] y, finalmente, las Pr se determinaron por el método Kjeldahl [23].

Para la realización de la electrocoagulación, se utilizó una celda electroquímica tipo batch (2L) con recirculación constante de la solución de lactosuero [23]. Un potencióstato PARC 263A conectado a una fuente de poder KEPCO con capacidad de 2A y las técnicas utilizadas en el PARC 263A se manejaron a través del software Power Suite de la misma compañía. En la figura 1 se muestra un esquema del sistema utilizado y una foto real en la que se se muestran los electrodos a sumergir y el electrodo de referencia de tipo Calomell. En la tabla 2 se muestran las condiciones experimentales utilizadas. Se evaluó la eficacia del proceso de electrocoagulación del lactosuero, en cuanto a la reducción de los valores de la DQO (% remoción de la DQO), y se midió la recuperación de fósforo (como PO_4^{3-}).

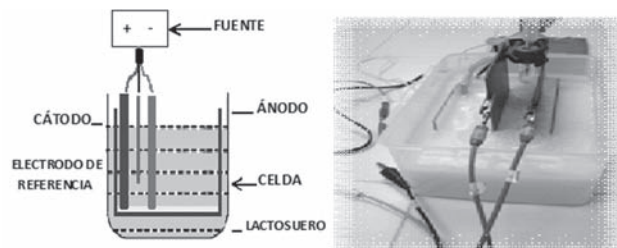


Figura 1. Reactor para electrocoagulación en batch.

Tabla 2.

VARIABLES Y CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA LA ELECTROCOAGULACIÓN (ELECTRODO DE REFERENCIA TIPO CALOMELL).

| Factor | Denominación | Parámetros |
|-------------------|----------------------|------------------------------------|
| Cátodo | C (material) | Ru ₂ O ₃ /Ti |
| Ánodo | A (material) | Al |
| Tiempo | t (horas) | 8 |
| Temperatura | T °C | 25 |
| Voltaje | V(volts) | 3,65 |
| Distancia e/Elect | D (cm) | 2,0 |
| Área de electrodo | A (cm ²) | 90 |

Se siguió la cinética del proceso tomando muestras (2,0 ml) del líquido clarificado y centrifugándolo previamente, y realizando las determinaciones de DQO soluble en microensayo [20] a diferentes tiempos y hasta 24 horas. Se expresó la eficiencia del proceso en función del porcentaje de DQO removida.

Aunque en la actualidad se cuenta con algunas implementaciones a escala industrial, existen distintas tecnologías que permiten el reciclado del fósforo contenido en las aguas residuales. Así, uno de los procesos más estudiados es la recuperación de fósforo en forma de fosfato de magnesio y amonio hexahidratado (MgNH₄PO₄·6H₂O), conocido como *Magnesium Ammonium Phosphate* (MAP) o *estruvita* [24, 25]:



El P se recupera en forma reutilizable a partir del que ha quedado contenido en disolución en el lactosuero depurado, y también a partir de la redisolución de los lodos obtenidos en la depuración del lactosuero por digestión en ácido nítrico concentrado. Para evitar una precipitación incontrolada del P en el líquido claro resultante de la electrocoagulación, se deberá adicionar Mg(OH)₂ en NH₄OH de manera tal que se alcance un pH alcalino [26, 27]. También se puede utilizar una aireación con CO₂. El Mg(OH)₂ presenta el inconveniente de que no se puede controlar de forma independiente el pH y la relación Mg/P (dos parámetros importantes

del proceso), pero en cambio favorece la precipitación al aumentar la concentración de magnesio [28]. Si no se alcanza la relación estequiométrica para la formación de estruvita, se suele adicionar magnesio en forma de cloruro (MgCl₂).

La precipitación de estruvita es controlada por el pH, la sobresaturación, la temperatura y la presencia de impurezas como el calcio. Ésta puede ocurrir cuando las concentraciones de Mg²⁺, NH₄⁺ e iones de fosfato PO₄³⁻ exceden el producto de solubilidad (KPS). Son muchos los estudios que se han realizado para determinar el KPS de la estruvita [27-29]. Existe una gran disparidad de criterios respecto a este valor, ya que el pH al cual se logra la máxima precipitación de estruvita por mínima solubilidad oscila entre valores de 8,0 a 10,7 [29]. Esto indica que la solubilidad de la estruvita decrece con el aumento del pH, resultando este parámetro como el principal a controlar durante el proceso de precipitación de estruvita para la recuperación de fósforo del lactosuero. En el presente trabajo se utilizó un pH de 9,4 como un valor intermedio en razón de los reportados [29].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la caracterización del lactosuero se muestran en la tabla 3. Se observa un pH que clasifica al lactosuero como ácido; para ser considerado un lactosuero dulce debería ser > 6,0 [5]. A este pH le corresponde un Eh promedio de 157,5 mV, que comparado con el de la leche fresca (el cual a un pH neutro es de 0,2 mV-0,3 mV) [30, 31], corrobora la acidez del lactosuero evaluado. Se obtuvo un valor promedio de pZ de -4,02 mV, lo que indica que aún existen partículas coloidales ya que el punto isoeléctrico (pZ = 0,0) se obtuvo a pH 4,67 (según se puede apreciar en la figura 2).

Tabla 3.

Valores de pH, Eh, pZ y CE en el lactosuero (desviación estándar).

| Réplicas | pH | Eh (mV) | pZ (mV) | CE (mS/cm) |
|----------|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|
| 1 | 4,85 | 154,3 | -4,09 | 8,46 |
| 2 | 4,81 | 151,2 | -3,85 | 8,73 |
| 3 | 4,79 | 166,3 | -3,61 | 8,93 |
| 4 | 4,82 | 158,8 | -4,33 | 8,74 |
| 5 | 4,82 | 157,0 | -4,21 | 8,93 |
| Media | 4,82 (0,019) | 157,52 (5,085) | -4,02 (0,258) | 8,76 (0,173) |

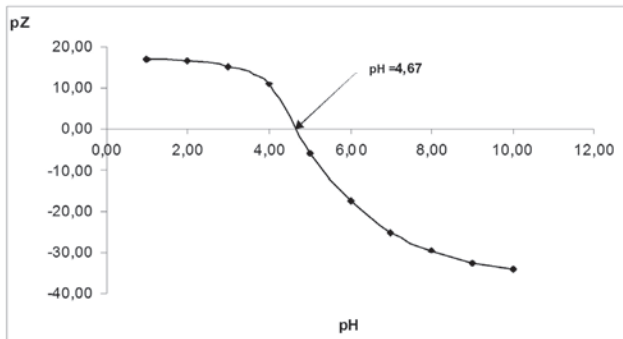


Figura 2. Variación del pZ del lactosuero con el pH. Punto isoeléctrico (pZ=0,00) a pH 4,67.

El valor del punto isoeléctrico encontrado corresponde con el reportado en las bibliografías como valor promedio en lactosueros ácidos, luego de la precipitación de la caseína en la elaboración de quesos. Las proteínas del lactosuero, que representan alrededor del 20 % de las proteínas de la leche de vaca, se definen como aquellas que se mantienen en solución tras precipitar las caseínas a pH 4,6 a una temperatura de 20 °C [32-35].

Las propiedades funcionales del lactosuero vienen dadas por las de sus dos principales proteínas, α -lactoalbúmina y β -lactoglobulina. La α -lactoalbúmina está formada por una sola cadena polipeptídica de 123 aminoácidos, con peso molecular de unos 14 200 Dalton y tamaños de partículas entre 1 μm -2 μm . Es una proteína ácida con un punto isoeléctrico de alrededor de 4,3.

Al pH de la leche, la β -lactoglobulina está formada por una sola cadena de 162 aminoácidos, con peso molecular de unos 18 400 Dalton y tamaños de partículas entre 2 μm -4 μm . Estos dímeros se forman entre pH 7,5-5,2 (punto isoeléctrico de la β -lactoglobulina). Por encima de pH 7,5 y por debajo de pH 3,5, la β -lactoglobulina está en forma de monómeros, mientras que entre pH 5,2-3,5 se encuentra en forma de octámeros, según reportan algunos autores [32, 33]. Por los resultados obtenidos se puede inferir que se tiene en el lactosuero de forma mayoritaria β -lactoglobulina, puesto que se tienen partículas con un tamaño promedio de 2,80 μm (como se observa en la figura 3).

Se aprecian dos tamaños predominantes de partículas, a 2,80 μm que corresponde a las partículas suspendidas de proteínas (α -lactoalbúmina y/o β -lactoglobulina en forma de octámero), y a tamaños diez veces mayores de 26,14 μm que podrían estar asociadas a cúmulos de grasas.

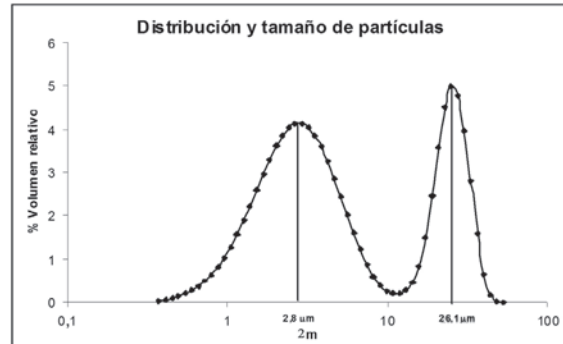


Figura 3. Distribución y tamaños de partículas suspendidas en lactosuero.

La CE promedio fue de 8,76 mS/cm, y corresponde con valores más bajos que los que reportan otros autores; por ejemplo, para lactosuero dulce obtenido de la elaboración de queso de pasta blanda, otros autores [36] encontraron valores de CE de 26,7 mS/cm (tres veces mayor), en tanto que para lactosuero ácido [4, 37] se reporta CE entre 12,7 mS/cm-16,5 mS/cm (unas dos veces mayor). Todo esto está asociado a los contenidos de sólidos totales (ST) en el lactosuero. La diferencia entre los dos tipos de lactosuero son el contenido mineral, la acidez y la composición de la fracción de proteína de lactosuero. En la tabla 4 se observa que del total de sólidos promedio (ST) presentes (7,17 g/dL), el 83 % de ellos pertenecen a SS siendo de 5,96 g/dL, los cuales aportan muy poco a la CE. Del mismo modo, se observa que de los ST, el 90 % (6,48 g/dL) corresponde a los STV que tampoco contribuyen a la CE, por lo cual la contribución a la CE se puede atribuir fundamentalmente a sólidos disueltos. Los contenidos de ST se corresponden con los que señalan algunos autores [2, 4, 38] y con otros reportados [5], aunque, en este último caso, ligeramente inferiores (7,0 g/dL).

Los valores promedio de % de humedad del lactosuero (92,83 %) se corresponden con los reportados [4, 33, 37]. Los contenidos en cenizas (0,67 %) resultan muy parecidos a los reportados (0,69 %) en otros trabajos [5, 40], y algo superiores a los señalados por la literatura [41]. La densidad promedio del lactosuero evaluado de 1,026 g/cm³ está en correspondencia con los valores reportados [42], y ligeramente inferiores a valores de una leche fresca que oscila entre 1,028 g/cm³-1,034 g/cm³ a 15 °C [23]. Los valores promedio de turbidez (525 NTU) resultaron muy elevados. Según la normatividad mexicana para la turbidez, valores superiores a 400 NTU resultan muy altos, lo cual corrobora la presencia de SS coloidales [11].

Tabla 4.

Valores del porcentaje de cenizas, sólidos y humedad en el lactosuero. Valor en unidades nefelométricas de la turbidez del producto.

| Muestra | % Cenizas | g/dLST | g/dLSTV | g/dLSS | % Humedad | Densidad g/cm ³ | Turbidez (NTU) |
|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------------------|----------------|
| 1 | 0,60 | 7,26 | 6,60 | 5,98 | 92,74 | 1,027 | 528 |
| 2 | 0,69 | 7,13 | 6,42 | 5,96 | 92,87 | 1,026 | 553 |
| 3 | 0,72 | 7,14 | 6,43 | 5,94 | 92,86 | 1,026 | 535 |
| 4 | 0,64 | 7,19 | 6,51 | 5,97 | 92,81 | 1,026 | 513 |
| 5 | 0,70 | 7,13 | 6,43 | 5,95 | 92,87 | 1,025 | 497 |
| Media | 0,67 | 7,17 | 6,48 | 5,96 | 92,83 | 1,026 | 525,20 |
| Des. Est. | 0,044 | 0,050 | 0,070 | 0,012 | 0,050 | 0,001 | 19,083 |
| % CV | 6,49 | 0,70 | 1,08 | 0,20 | 0,05 | 0,06 | 3,63 |

El lactosuero filtrado a través de microfiltración (0,22 µm) presentó coloración amarilla verdosa, atribuible a las proteínas solubles y sales disueltas en general [43]. Diferentes autores proponen medir la intensidad del color a diferentes longitudes de onda, así se reporta mediciones a 475 nm [12, 13], a 525 nm, o a 570 nm -como indica respectivamente [14, 15]. Ante estos criterios divididos, se realizó un barrido espectral de la muestra de lactosuero (el cual se aprecia en la figura 3).

Se observan dos máximos de absorción a 525 nm y 570 nm, lo cual corresponde con lo que reportan [14, 15]. Sin embargo, no fue observado a 475 nm ningún máximo de absorción y sólo un submáximo a 425 nm. La intensidad del color del lactosuero presentó los máximos valores a 525 nm.

Los restantes resultados de caracterización del lactosuero se observan en la tabla 5. Se aprecia que la DQO es extremadamente elevada (> 110 000 mg de O₂/L). Estos contenidos corroboran que en la muestra debe haber quedado algo de caseína sin

precipitar, ya que no se alcanzó el pH de 4,67 del punto isoeléctrico (pZ=0,0), y ello se corresponde con los más elevados niveles de T y SS, que unido a los contenidos de L, G y AL, justifican los altos valores de DQO. Estos resultados son más elevados que los que se reportan (86 000 mg O₂/L) para un lactosuero [44], o por lo reportado (80 000 mg O₂/L) por la literatura [45], y casi el doble de lo que afirma otro trabajo [39] (60 000 mg O₂/L).

Espectro de absorción del lactosuero ácido

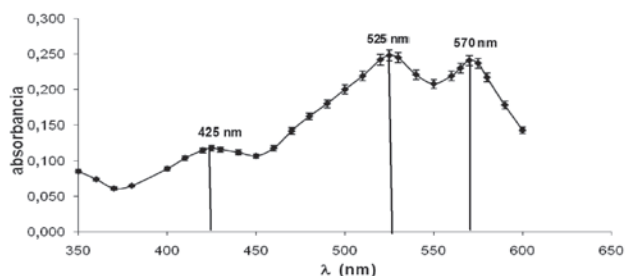


Figura 4. Espectro de absorción UV-Vis del lactosuero.

Tabla 5.

Caracterización química del lactosuero.

| Muestra | DQO (mgO ₂ /L) | Grasas (g/dL) | ° Dornic | Ác. Láctico (g/dL) | Lactosa (g/dL) | Proteínas (g/dL) | Fosfato (g/dL) |
|------------------|---------------------------|---------------|--------------|--------------------|----------------|------------------|----------------|
| 1 | 103 996,1 | 0,80 | 0,261 | 4,424 | 1,045 | 0,210 | 26,10 |
| 2 | 113 995,7 | 0,80 | 0,270 | 4,479 | 1,088 | 0,207 | 27,00 |
| 3 | 116 995,6 | 0,83 | 0,279 | 4,451 | 1,132 | 0,208 | 27,90 |
| 4 | 108 995,9 | 0,90 | 0,279 | 4,451 | 1,045 | 0,209 | 27,90 |
| 5 | 115 495,7 | 0,80 | 0,279 | 4,465 | 1,088 | 0,208 | 27,90 |
| Media | 111 895,80 | 0,83 | 0,27 | 4,45 | 1,080 | 0,210 | 27,36 |
| Des. Est. | 4 778,942 | 0,039 | 0,007 | 0,018 | 0,033 | 0,001 | 0,720 |
| % CV | 4,27 | 4,70 | 2,63 | 0,40 | 3,02 | 0,53 | 2,63 |

Los contenidos promedio de G (0,83 g/dL) resultan también muy elevados, si se comparan con los que se indican para un lactosuero ácido típico ($< 0,50$ g/dL) según [5] y con lo reportado por [39, 46] de 0,30 g/dL. Esto igualmente justifica los elevados valores de DQO que se determinaron.

La acidez resultó en promedio de 27,36 °D, lo cual representa un valor más bajo que el señalado entre 30 °D-60 °D (reportado en [47]), pero superior a los 18 °D que reporta [35]. Estos resultados equivalen en AL a 0,27 g/dL que provienen de una parte de la L que se ha convertido en ácido [5], pero en menores contenidos que los que este autor reporta (0,70 g/dL) y lo que ofrece [35] (0,65 g/dL). Los contenidos de L encontrados (4,45 g/dL) se corresponden con lo que reportan [5, 39, 48] para un lactosuero ácido (4 g/dL-5 g/dL); asimismo, permiten corroborar los altos valores de la DQO.

Los contenidos de Pr se encuentran en el rango que se esperan en un lactosuero en promedio (0,60 g/dL -1,5 g/dL), y que suelen ser alrededor del 50 % del contenido proteico de la leche [39]. El valor encontrado (1,08 g/dL) es próximo al que reportan diferentes autores [39], quienes indican haber encontrado 1,26 g/dL en un lactosuero ácido, o como lo que reportan otros (1,20 g/dL) [43], pero más elevados que los que reportan Guerrero y colaboradores [49] en promedio de lactosueros obtenidos del Valle de Tulancingo (0,68 g/dL), en el estado de Hidalgo.

En la actualidad existen diversos métodos para analizar los componentes de los productos lácteos, son métodos que requieren de un proceso de la muestra [39]. Las técnicas más utilizadas actualmente para determinar la composición, detectar adulteraciones o encontrar sustancias indeseables son: cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), método espectrofotométrico de ninhidrina acidica (ANSM), electroforesis, espectrofotometría UV/Vis y procedimiento Harland-Ashworth. Tales métodos son aceptados por normas internacionales y nacionales [23, 49]. La espectrofotometría infrarroja (FTIR), como método vibracional, ha sido aplicada en un amplio rango de problemas reales en la industria alimentaria, por ejemplo, en cereales, carnes, mariscos, frutas y vegetales [39, 50]. La medición del espectro FTIR se llevó a cabo en una pastilla de KBr para minimizar el efecto del agua presente. En la figura 4 se muestra el espectro FTIR obtenido, dentro del cual la presencia de Pr y L pudo corroborarse. Se observa una banda centrada en 1 640 cm^{-1} y otra más pequeña en 1 540 cm^{-1} que se asocian a grupos

funcionales de amidas de las Pr; la banda que aparece entre 1 200 cm^{-1} -1 280 cm^{-1} (1 236 cm^{-1}) se asocia también al grupo amida. Estos valores están en correspondencia con los reportados en otro estudio [33]. Las bandas que aparecen en el rango entre 930 cm^{-1} y 1 190 cm^{-1} están asociadas a los contenidos de L, no obstante, para el rango 1 060 cm^{-1} a 1 110 cm^{-1} , la absorción también se asocia a la presencia de grupos fosfatos covalentemente unidos a las Pr (O=P-O) [39, 51].

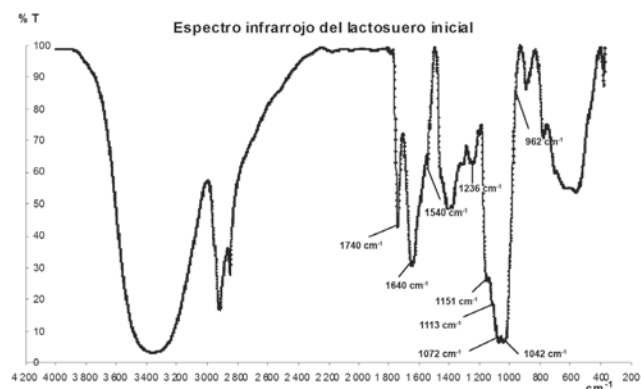


Figura 5. Espectro FTIR del lactosuero inicial.

Si los contenidos de L son lo suficientemente elevados (como es el caso, es decir, unas 20 veces más altos que los contenidos de fosfatos), se puede presentar el enmascaramiento de las señales de los grupos fosfatos. La banda que aparece en 1 740 cm^{-1} se atribuye al grupo funcional carbonilo de las G [39, 51]. De la misma manera, la banda ancha e intensa en la región que abarca 3 000 cm^{-1} -3 800 cm^{-1} es indicativa del agua.

Finalmente para los contenidos de fósforo en el lactosuero, expresados como fosfato, se preparó la curva de calibrado en la que se obtuvo una regresión $r^2=0,9998$. En la tabla 6 se observa que en promedio fue de 2,08 g/L, lo que hace interesante el estudio de recuperación de estos contenidos. El valor encontrado se encuentra en el rango que señalan algunos autores [4, 5].

Los resultados del proceso de electrocoagulación con base a los contenidos de DQO removidos y la eficiencia (%) se muestran en la figura 6. Como se observa, se logra remover un 84 % de la DQO y, aunque el proceso se hizo extensivo hasta las 24 horas, se estima que resultados similares se pueden alcanzar a partir de las 12 horas.

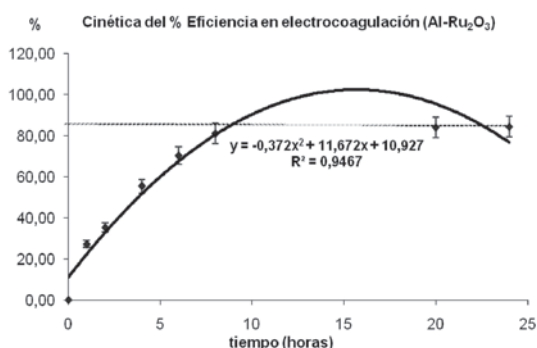


Figura 6. Cinética del proceso de depuración de lactosuero con base al % de eficiencia de remoción de la DQO.

Los datos obtenidos en la determinación de fosfatos en las fases residuales, resultantes del proceso de electrocoagulación, se muestran en la tabla 6. Los resultados de fosfato removido se corresponden con los obtenidos en forma de estruvita. La información de la fase sólida floculada se refiere al fosfato que se recuperó en fase líquida, luego de la digestión con HNO₃ concentrado de los lodos floculados.

Se observa que, de forma mayoritaria, el P en forma de PO₄³⁻ se recupera de la fase acuosa después del proceso de electrocoagulación (83,65 %). Solo 0,07 g/kg de PO₄³⁻ pasan ocultos en los lodos que sobrenadan en forma de floculos. Luego de ser digestados, se recuperan 0,05 g/kg de PO₄³⁻. En general, se logra la recuperación del 87 % del fósforo total.

Tabla 6. Resultados de las determinaciones de fosfatos y los porcentajes de remoción y recuperación.

| Fase líquida depurada de carga orgánica (desviación estándar) | | | | |
|---|---|---|--|---|
| Electrod | g/L PO ₄ ³⁻ Inicial | g/L PO ₄ ³⁻ reman | mg/L PO ₄ ³⁻ removido | % PO ₄ ³⁻ removido |
| AL/OX | 2,08 (0,18) | 0,34 (0,07) | 1,74 (0,08) | 83,65 (1,23) |
| Fase sólida floculada (desviación estándar) | | | | |
| Electrod | g/kg PO ₄ ³⁻ Inicial | g/kg PO ₄ ³⁻ reman | mg/L PO ₄ ³⁻ removido | % PO ₄ ³⁻ removido |
| AL/OX | 0,07 (0,01) | 0,02 (0,005) | 0,05 (0,005) | 71,43 (1,36) |

CONCLUSIONES

Se evaluó y caracterizó el lactosuero proveniente de la elaboración de queso de la planta productora de lácteos San Francisco, situada en el municipio de Santiago de Anaya, estado de Hidalgo. Se trata de un lactosuero ácido con un pH de 4,8, un pZ de -4,02 mV (cerca al punto isoeléctrico que corresponde a un pH de 4,67) y que presenta muy elevadas cargas orgánicas (niveles de DQO > 100 000 mg O₂/L), entre los que destacan los contenidos de lactosa (4,45g/dL), ácido láctico (0,27g/dL), grasas (0,83g/dL) y proteínas (1,08g/dL). Los contenidos de fósforo, expresados como iones fosfato en g/L (20,8 g/dL), indican un contenido

apreciable que hace interesante el trabajo de recuperar éstos del vertido. El proceso de electrocoagulación en las condiciones de los ensayos realizados permitió remover un 84 % de la DQO total del lactosuero y recuperar de la fase líquida depurada principalmente el 87 % del fósforo total en forma de estruvita.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Arteaga, M., Molina, L. H., Pinto, M., Brito, C., (2009). Caracterización de queso Chanco enriquecido con suero lácteo en polvo. *Rev Chil Nutr*, vol. 36, n° 1: pp. 53-62.
- [2] Miranda, O., Ponce, I., Fonseca, P. L., Cutido, M., Díaz, R. M., Cedeño, C., (2009). Características físico-químicas de sueros de queso dulce y ácido producidos en el combinado de quesos de Bayamo. *Rev Cub Aliment Nutr*, 19(1): pp. 21-25.
- [3] Aider, M., Halleux, D., Melnikova, I. (2009). Skim acidic milk whey cryoconcentration and assessment of its functional properties: Impact of processing conditions. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 10(3): pp. 334-341.
- [4] Parra, R. A., (2009). Lactosuero: importancia en la industria de alimentos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 62 (1). Medellín: pp. 4967-4982.
- [5] Abaigar, A., (2009). *El lactosuero en la alimentación del ganado porcino*. ITG Ganadero: pp. 13-17.
- [6] Clescerl, L. S., Eaton, A., (1992). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington: pp. 3-115.
- [7] APHA, American Public Health Association., (2009). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. American Water Work Association. Baltimore.
- [8] NMX-AA-030-SCFI-2001. Norma Mexicana., (2001). *Análisis de agua – Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*.
- [9] NMX-AA-034-SCFI-2001. Norma mexicana., (2001). *Análisis de agua – Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*.
- [10] ISO, 7027, (2001). *Water quality – Determination of turbidity*.
- [11] NMX-AA-038-SCFI-2001. Norma Oficial Mexicana., (2001). *Análisis de agua. Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*.
- [12] Raghukumar, C., Rivonkar, G., (2009). Decolorization of molasses spent wash by the white rot fungus *Flavodon flavus*, isolated from a marine habitat. *Appl. Microbiol. Biotechnol*, 55: pp. 510-514.
- [13] Krishna, R., Srivastava, S. N., (2008). Electrochemical degradation of distillery spent wash using catalytic anode: Factorial design of experiments. *Chemical Engineering Journal*. Doi:10.1016/j.cej.2008.05.008.
- [14] Arango, A., Garcés, L. F., (2001). Influencia de la conductividad eléctrica en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Producción + Limpia*, julio-diciembre, vol.4, n° 2: pp. 54-64.
- [15] NMX-AA-017-1980, (1980). Norma Mexicana. *Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Aguas – Determinación de color*.

- [16] NMX-AA-005-SCFI-2000, (2000). Norma Mexicana. *Análisis de agua – Determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba.*
- [17] Rodríguez J. B., Self J. R., Soltanpour, P. N., (1994). Optimal conditions for phosphorus analysis by the ascorbic acid-molybdenum blue method. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58: pp. 866-870.
- [18] Jiménez, P. L., Armada, M., (2002). Desarrollo de galleticas con lactosuero. *Información Tecnológica*, vol. 13(4): pp. 3-6.
- [19] Boschetti, G., Quintero, C., Diaz-Zorita, M., Barraco, M., (2003). Determinación del fósforo disponible en el suelo por el método de Bray. *Actividad del Comité de Química de la AACCS. Informaciones agronómicas del Cono Sur*, vol 17: pp. 43-49.
- [20] NMX-AA-029-SCFI-2001, (2001). Norma Mexicana. *Análisis de agua – Determinación de la demanda Química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba.*
- [21] NOM-185-SSA1-2002. Norma Oficial Mexicana, (2002). *Productos y servicios. Mantequilla, cremas, producto lácteo condensado azucarado, productos lácteos fermentados y acidificados, dulces a base de leche. Especificaciones sanitarias.*
- [22] NMX-F-509-1988, (1998). Norma Mexicana. *Alimentos. Determinación de lactosa en leche Reconstituida. Método de Lane y Eynon.*
- [23] NOM-155-SCFI-2003. Norma Oficial Mexicana, (2003). *Leche, fórmula láctea y producto lácteo combinado, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba.*
- [24] Parsons, S. A., Wall, F., Doyle J., Oldring, K., Churchley, J., (2001). Assessing the potential for struvite recovery at sewage treatment works. *Environmental Technology*, vol. 22: pp. 1279-1286.
- [25] Abbona, F., Calleri, M., Ivaldi, G., (1984). Synthetic struvite, $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$: correct polarity and surface features of some complementary forms. *ACTA Crystallographica Section b-Structural Science*, 40: pp. 223-227.
- [26] Münch E. V., Barr, K., (2001). Controlled struvite crystallization for removing phosphorus from anaerobic digester side-stream. *Water Res.*, 35: pp. 151-159.
- [27] Starful, I., Scrimshaw, M. D., Lester, J. N., (2001). Conditions influencing the precipitation of magnesium ammonium phosphate. *Water Res.*, 35: pp. 4191-4199.
- [28] Doyle J. D., Parsons, S. A., (2002). Struvite formation, control and recovery. *Water Res.*, 36(16): pp. 3925-3940.
- [29] Pastor, L., (2008). *Estudio de precipitación y recuperación del fósforo presente en las aguas residuales en forma de estruvita ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$)*. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.
- [30] Alais, Ch. (2003). *Ciencia de la leche. Principios de la técnica lechera*. Editorial Reverté. Barcelona, España: p. 132.
- [31] Jairo, J., Grass, J. F., (2008). *Valoración de la calidad higiénica de la leche cruda en la asociación de productores de leche de Solará-Asproleso, mediante las pruebas indirectas de resazurina y azul de metileno*. *Fac. Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cauca, Colombia*, vol. 6(2): pp. 57-66.
- [32] Calvo, M., (1991). *Microbiología de los alimentos*. Editorial Acribia. Zaragoza, España: pp.1-155.
- [33] Jay, J. M., (2002). *Microbiología moderna de los alimentos*. Editorial Acribia. Zaragoza, España: p. 315.
- [34] Calvo, M., (2004). La Ciencia y la Tecnología de los Alimentos. Algunas notas sobre su desarrollo histórico. *Alimentaria*, 41 (359): pp. 19-34.
- [35] Badui, S., (2061). *Química de los Alimentos*. Editorial: Pearson Addison Wesley. España: p. 137.
- [36] Méndez, M. E., Briceño, J. I., González, A., (2009). Oxidación electroquímica de compuestos orgánicos de un efluente proveniente de una planta procesadora de productos lácteos. *Rev. Fac. Ing.*, vol. 24, nº 2. Venezuela: pp. 79-86.
- [37] Parra, R. A., (2010). Digestión Anaerobia de Lactosuero: Efecto de Altas Cargas Puntuales. *Rev. Fac. Nal. Agr.*, 63(1). Medellín: pp. 5385-5394.
- [38] Panesar, P., Kennedy, J., Gandhi, D., Bunko, K., (2007). Bioutilisation of whey for lactic acid production. *Food Chemistry*, 105: pp. 1-14.
- [39] Teniza, O., (2008). *Estudio Del suero de queso de leche de vaca y propuesta para el reuso del mismo*. Tesis de Maestría en Tecnología. Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Biotecnología aplicada, Unidad Tlaxcala. México: pp. 62.
- [40] Ávila, R. M., Cárdenas, A., Medina, A., (2000). Tratamiento del lactosuero utilizando la técnica de electrodialisis. *Interciencia*, vol. 25(2): pp. 80-84.
- [41] Farías, J. F., Coromoto, A., Hernández, A., (2002). Efecto de la tecnología quesera sobre la composición del suero lacteo. *Multiciencias*, vol. 2(2). Universidad de Zulia. Venezuela: pp. 126-130.
- [42] Monsalve, J., González, D., (2005). Elaboración de un queso tipo Ricotta a partir de suero lácteo y leche fluida. *Rev. Cient. FCV-LUZ*, vol. XV, 6: pp. 543-550.
- [43] Cuartas, B., (2005). *Estudio del proceso de nanofiltración para la desmineralización del lactosuero*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Química y Nuclear. Valencia, España: p. 176.
- [44] Burhanettin, F., Bulent, K., Ergun, Y., Alper, N. (2004). Cheese whey treatment performance of an aerobic jet loop membrane bioreactor. *Process Biochemistry*, vol. 39(12): pp. 2283-2291.
- [45] Najafpour, G. D., Hashemiyeh, B. A., Asadi, M., Ghasemi, M. B., (2008). Biological Treatment of Dairy Wastewater in an Upflow Anaerobic. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 4(2): pp. 251-257.
- [46] Inda, A., (2000). *Optimización de Rendimiento y Aseguramiento de Inocuidad en la Industria de la Quesería. Capítulo IV. Opciones para darle valor agregado al lactosuero de quesería*. Editado por Organización de los Estados Americanos (OEA). División de Ciencia y Tecnología: pp. 63-93.
- [47] Fox, P. F., (1999). *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology: Major Cheese Groups*. Ed. Springer, vol. 2: p. 187.
- [48] Guerrero, W. J., Gómez, C. A., Castro, J. González, C. A., Santos, E. M., (2010). *Caracterización fisicoquímica del lactosuero en el Valle de Tulancingo*. *Memorias en extenso. XII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos*. Universidad Autónoma de Nuevo León. México: pp. LA321-LA328.
- [49] NOM-091-SSA1-1994. Norma Oficial Mexicana, (1994). *Bienes y servicios. Leche pasteurizada de vaca. Disposiciones y especificaciones sanitarias.*
- [50] Etzion, Y., Linker, R., Cogan, U., Shmulevich, I., (2004). Determination of protein concentration in raw milk by Mid-Infrared Fourier Transform Infrared/Attenuated total reflectance spectroscopy. *Journal Dairy Science*, 87: pp. 2779-2788.
- [51] Jung, C. (2000). Insight into structure and protein-ligand recognition by Fourier transform infrared spectroscopy. *J. Mol. Recognit.*, 13: pp. 325-351.