

# Lactobiohidrógeno, una buena opción para el aprovechamiento de residuos en Chiapas

## *Biohydrogen from milk products, a good option for the use of residues in Chiapas*

LUIS ALBERTO BALLINAS-HERNÁNDEZ<sup>1\*</sup>, CARLOS M. GARCÍA-LARA<sup>2</sup> Y BRENDA GUADALUPE ALFARO-DOMÍNGUEZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Doctorado en Ciencias en Desarrollo Sustentable de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Libramiento Norte Poniente 1150, Col. Lajas Maciel, Tuxtla Gutiérrez, Chis.; México.

<sup>2</sup>Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Libramiento Norte Poniente 1150, Col. Lajas Maciel, Tuxtla Gutiérrez, Chis.; México.

\*Correo electrónico: luis.ballinas@unicach.mx

ENVIADO EL 20 DE OCTUBRE DE 2015/ ACEPTADO EL 10 DE NOVIEMBRE DE 2015

## RESUMEN

El presente trabajo constituye un esfuerzo por ubicar un residuo que se genere en el estado de Chiapas, que cumpla con las características apropiadas para la producción de biohidrógeno durante su tratamiento, tomando como base el principio de revalorización de los residuos.

El hidrógeno posee una aportación energética mayor a la de los combustibles fósiles, pero es solo un vector energético, por lo que el primer reto es producirlo en cantidades económicamente factibles. Una de las formas en las que este puede producirse es mediante la fermentación bacteriana de la materia orgánica, para lo cual se requiere de una cepa que genere hidrógeno y un sustrato que represente una buena fuente de nutrientes; si este sustrato es un residuo, el valor del proyecto es aún mayor. En el estado existen varios sectores industriales que generan residuos de manejo especial, como es el caso de los residuos y subproductos generados en la industria alimenticia, que pueden cumplir con las características deseables para el proyecto y ser usados como fuentes de energía.

Dentro de los residuos analizados tenemos las vinazas y bagazos de los dos ingenios azucareros del estado de Chiapas, uno ubicado en la ciudad de Huixtla y el otro en Pujilic; las descargas de los sustratos enriquecidos de las plantas de esterilización de moscas ubicadas en Chiapa de Corzo y Metapa, las aguas residuales de la empresa Nestlé ubicada en Chiapa de Corzo Chiapas, y las aguas residuales con lactosuero desechadas por las fábricas de queso existentes en el medio rural y urbanizado del estado.

Estas últimas son el mejor sustrato, ya que representan una buena fuente de C, H, O, N, P y K. El potencial de estas aguas es atractivo, ya que una empresa de tamaño promedio genera alrededor de 12 000 litros de suero con un promedio de 5,185% de lactosa; es decir, potencialmente puede generar hasta 40 kg de hidrógeno diarios. Cabe señalar que esta industria, al día de hoy, tiene un aporte de DBO equivalente 4,78 veces la generada en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

**Palabras clave:** Lactosuero, hidrógeno, residuos.

## INTRODUCCIÓN

Existe un consenso general que señala al hidrógeno como un excelente candidato para ser la energía alternativa que reemplace los combustibles fósiles, ya que ofrece grandes ventajas como el ser un combustible renovable y limpio, pues durante su combustión produce únicamente vapor de agua y energía, su manejo no está considerado como una actividad riesgosa

## ABSTRACT

The present work represents an effort to locate a residue that is generated in the state of Chiapas, which complies with the appropriate characteristics for the production of biohydrogen during their treatment, based on the principle of waste revalorization.

Hydrogen has a greater energy contribution than fossil fuels, but it is only an energy vector, so the first challenge is to produce it in economically viable quantities. One way in which biohydrogen can be produced is by bacterial fermentation of organic matter, for which it requires a strain that generates hydrogen and a substrate that represents a good source of nutrients; if such substrate is a residue, the value of the project is even greater. In the state of Chiapas there are several industries that generate waste that require special management, such as waste and by-products generated in the food industry; this type of waste can fulfill the desired characteristics for the project and be used as energy sources. Within residues that were analyzed we have the stillage and bagasse of the two sugar mills in the state of Chiapas, one located in the city of Huixtla and the other in Pujilic, the discharge of enriched substrates on sterilization plants of flies located in Chiapa de Corzo and Metapa, the wastewater of the Nestle company located in Chiapa de Corzo, and the whey wastewater discharged by the existing cheese factories in rural and urban areas of the state.

The latter seems to be the best substrate, as it represents a good source of C, H, O, N, P and K. The potential of these waters is attractive; one average-sized company produces nearly 12,000 liters of whey, with an average of 5,185 percent lactose which can potentially generate up to 40 kilograms of hydrogen per day. It is important to mention that this industry nowadays has a BOD contribution equivalent 4.78 times the amount generated in the city of Tuxtla Gutierrez.

**Key Words:** Whey, Hydrogen, Residues.

(como sí, el de algunos combustibles), otra de sus ventajas es que únicamente produce agua al oxidarse, posee un alto contenido energético por unidad de peso (122-142 kJ/g), 2,75 veces mayor que el de los hidrocarburos. (Dávila y Razo, 2008; Tsai, 2009; Elbeshbishy, 2011)

La obtención convencional de hidrógeno se caracteriza por los altos costos energéticos del proceso, entre estos métodos están: oxidación parcial no catalítica de combustibles, vapor reformante de metano, procesos de membra-

na, oxidación selectiva de metano, deshidrogenación oxidativa y procesos electroquímicos (Dolgykhet et al., 2006; Ni et al., 2006). Para el 2011 el 40% del gas hidrógeno se obtiene de la oxidación catalítica de gases naturales, el 30% de metales pesados y nafta, el 18% de carbón, el 4% de la electrólisis y cerca del 1% de biomasa. (Sinha y Pandey, 2011)

Sin embargo, los anteriores métodos no son los únicos para obtener hidrógeno, existe también la producción de hidrógeno a través de “tecnología verde” y no es más que su producción biológica, resultante de la conversión de compuestos por diversas especies celulares. Esta biotecnología incluye: biofotólisis directa, biofotólisis indirecta, reacción de intercambio gaseoso, fermentación oscura y foto-fermentación (Reith et al., 2003). La producción de hidrógeno biológico se ha enfocado principalmente en la biofotólisis del agua empleando algas y cianobacterias, la fotofermentación de compuestos orgánicos por bacterias fotosintéticas y la fermentación oscura de compuestos orgánicos ricos en carbohidratos mediante bacterias anaerobias. (Londono et al., 2012)

La economía del hidrógeno necesita tener un costo razonable para que se pueda implementar a nivel mundial; esto, a primera vista parece ser difícil. Al igual que la electricidad, el hidrógeno debe rendir más que la fuente de energía de la que se obtuvo. Por lo tanto, el hidrógeno va a costar más que los combustibles fósiles hasta que la energía alternativa (no fósil) sea más barata que los combustibles fósiles (Berry y Aveces, 2006). Aunque la producción biológica de hidrógeno para su uso, como un combustible que aspira a sustituir a los hidrocarburos, es aún excipiente, se tiene que, de concretarse los esfuerzos, tendría gran injerencia en la sociedad, ya que, al igual que cualquier otra fuente de energía que pretenda utilizarse en sustitución de los combustibles fósiles, necesariamente influirían sobre el orden mundial que en la actualidad gira alrededor del petróleo.

De tal forma, pese a las grandes ventajas que ofrece el hidrógeno, en la actualidad es posible dilucidar varios aspectos que no permiten masificarlo como un combustible que

pueda sustituir a los hidrocarburos, dentro de ellos visualizamos tres aspectos como los más importantes: el primero es el hecho de que se trata de un vector energético y no de un combustible que se halle en un confinamiento, es decir, no está disponible en forma natural y no se cuenta con una tecnología que permita generarlos en cantidades suficientes para masificarlo; el segundo aspecto es que no se cuenta con la infraestructura que permita ofrecer al usuario final en cantidades suficientes y, finalmente, no se cuenta con la tecnología masificada para usarlo en condiciones seguras.

De acuerdo con lo anterior, resulta indispensable identificar un residuo de manejo especial que cumpla con las características necesarias para ser usado como sustrato, así como una cepa bacteriana que permita la generación de un metabolito valioso para otro proceso tal y como lo es el hidrógeno, logrando de esta forma cumplir con el principio de valorización de los residuos, pilar dogmático investido de radical importancia en la política ambiental nacional actual. Dicha valorización tiene su génesis en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, e implica un principio y conjunto de acciones asociadas cuyo objetivo es recuperar el valor remanente o el poder calorífico de los materiales que componen los residuos mediante su reincorporación en procesos productivos, bajo criterios de responsabilidad compartida, manejo integral y eficiencia ambiental, tecnológica y económica.

Es del todo imperativo unificar esfuerzos para realizar un análisis minucioso que permita lograr ubicar un residuo de manejo especial que cuente con dos cualidades importantes: la primera, que se genere en la industria en cantidades significativas, tanto como para representar un problema para quien lo genera, ya sea por estar fuera de norma, representar un riesgo para el medio ambiente, la salud o el equilibrio ecológico; y en segundo lugar, que esas características que lo convierten en un problema le confieran un valor nutricional básico para generar cantidades adecuadas de hidrógeno, para lo cual deberá contener una carga preponderantemente rica en compues-

**Cuadro 1.** Características buscadas en los residuos RME en el estado de Chiapas

<b>CARACTERÍSTICAS DESEABLES EN EL RESIDUO DE MANEJO ESPECIAL (RME)</b>
1. Generación en cantidades abundantes.
2. Que represente un problema ambiental por ser desechado sin tratamiento alguno.
3. Buena fuente de C, H, O, N, P y K.
4. Generación en condiciones ambientales normales.
5. No ser reutilizado.

tos orgánicos que representen fuentes adecuadas de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y potasio, que faciliten la proliferación bacteriana.

Actualmente existe gran variedad de residuos que contienen sustratos con potencial para la producción de hidrógeno en el estado de Chiapas, dentro de los más significativos se tienen los residuos de la industria azucarera, de esterilización de moscas, de la industria láctea y de los rastros, entre otros. Cabe señalar que cobran importancia aquellos que poseen gran contenido de carbohidratos en forma de azúcares simples, almidón y celulosa que pueden ser utilizados en la producción de biocombustibles, (Bedoya et al., 2008)

Por esta razón, es imperativo conocer cuantitativa y cualitativamente estos residuos, tanto bromatológica como ambientalmente, con la finalidad de conocer los parámetros con los que se transfiere al medio ambiente, y de esta manera dimensionar el impacto ambiental que esté causando, y a su vez el potencial para la producción de biohidrógeno; así como implementar un sistema a nivel planta piloto que permita comparar los volúmenes de producción de biohidrógeno y la eficiencia máxima que puede lograrse en la remoción de la carga contaminante. Resalta el hecho de que lo ideal es disminuir la carga contaminante hasta lograr que el residuo de manejo especial cumpla con los parámetros que le permitan ser transferido de conformidad con la norma aplicable, y a su vez, la obtención de hidrógeno.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

De forma primigenia se realizó una revisión de las diferentes industrias del estado de Chiapas, buscando identificar aquellas que pudieran ge-

nerar residuos de manejo especial (RME), es decir residuos sin características de peligrosidad para ser residuos peligrosos y que se generen en volúmenes suficientes para no ser considerados como residuos municipales.

Dentro de los residuos que fueron analizados, en virtud de que cuentan con condiciones parecidas a las deseables, tenemos las vinazas y bagazos de los dos ingenios azucareros del estado de Chiapas, uno ubicado en la ciudad de Huixtla y el otro en Pujilic; las descargas de los sustratos enriquecidos de las plantas de esterilización de moscas ubicadas en Chiapa de Corzo y Metapa, las aguas residuales de la empresa Nestlé ubicada en Chiapa de Corzo, Chiapas y las aguas residuales de las fábricas de queso existentes en el medio rural y urbanizado del estado.

Una vez acotado el número de residuos susceptibles se procedió a analizar la composición teórica de cada uno, basándose en el conocimiento de cada sustancia y la naturaleza del proyecto que la genera. A partir de este análisis se seleccionó el residuo de manejo especial que se apejó más a los criterios previamente establecidos, se le realizó una caracterización fisicoquímica y bromatológica en laboratorio, para corroborar que las características y contenidos de nutrientes fuesen similares a los establecidos bibliográficamente. Posteriormente se realizó un balance de materia con objeto de conocer los nutrientes totales descargados al medio ambiente, y de esta forma poder dimensionar el impacto que causan al mismo, así como calcular el potencial de generación de hidrógeno a través de un balance de materia, con la finalidad de conocer la cantidad de nutrientes que son descargados al medio ambiente.

Finalmente, se implementó un sistema a nivel laboratorio y planta piloto para comparar los volúmenes de producción de biohidrógeno, teniendo como sustrato el residuo de manejo especial previamente seleccionado, caracterizado y dimensionado. La remoción de la carga contaminante se determinó a través de la diferenciación de carga orgánica obtenida antes y después del proceso de producción de hidrógeno.

## RESULTADOS

### Análisis de los residuos de la industria azucarera

De la revisión bibliográfica y visita a campo a los dos ingenios azucareros del estado, se tiene que los residuos de manejo especial, que se generan en estos, son principalmente dos: las vinazas y el bagazo de caña; sin embargo, el primero es utilizado como insumo para la producción de alcohol y alimento para ganado, y el segundo como material combustible para los hornos que surten el vapor al sistema, razón por la cual no son transferidos en cantidades significativas al medio ambiente. No pasa por desapercibido el hecho de que estos residuos presentan características bien definidas en su composición química, tales como un alto contenido de fracciones de pared celular, alta concentración de sacarosa y otros azúcares solubles (Berrocal, 2012); sin embargo, la caña es baja en proteínas y minerales, otorgándole de esta manera una desventaja grande para su utilización en el proceso de producción de hidrógeno, aunado a eso está su aprovechamiento para la obtención de alcohol y su uso como alimento para ganado. En el Cuadro 2 se muestra el resultado de la composición promedio, reportado por la bibliografía.

### Análisis de los residuos de las plantas de esterilización de moscas

De la visita a la planta en Metapa de Domínguez, se tiene que el elemento proteico enri-

quecido que se utiliza para las larvas en las plantas de esterilización de moscas, resultó ser bastante completo, pero también presentó diversas desventajas, entre ellas que reciben un tratamiento previo a su deshecho y que al momento de la realización de la investigación la planta generadora más cercana a la capital del estado estaba por desaparecer. En la Cuadro 3 se muestra la caracterización de harinas enriquecidas de las plantas de esterilización de moscas, reportada en la bibliografía.

### Análisis de los residuos de la industria láctea

Este residuo resulta ser muy atractivo para el fin que se persigue, ya que bibliográfica y técnicamente contiene varias de las características que se persiguen, mismas que a continuación se describen:

### Génesis del residuo

De la información recabada en campo se tiene que para llevar a cabo el proceso de elaboración de quesos, se emplean básicamente dos métodos: por medio del cuajo o acidificación en el punto isoeléctrico de la caseína (pH 4,6). Los pasos fundamentales para su elaboración incluyen la coagulación de la leche, el cortado del coágulo, la eliminación del suero, el salado, el prensado y la maduración. Hay quesos de los llamados “frescos”, que son los más consumidos en México, que no son madurados y se consumen solamente salados o sazonados con especias. (Badui S., 2006).

**Cuadro 2.** Caracterización de bagazo y vinazas producidas en ingenios azucareros

DESECHOS DE INGENIOS AZUCAREROS		
Componente (% de materia seca)	Bagazo	Vinazas
N	1,18	0,46
P2O5	1,97	0,24
K2O	0,31	3,06
CaO	3,11	1,18
MgO	0,56	0,53
SO4	3,54	2,67
C	35,67	---
M.O.	---	32,63
Humedad	77,32	---

Fuente: Berrocal (2012).

**Cuadro 3.** Caracterización de harinas enriquecidas de las plantas de esterilización de moscas

HARINAS DE MOSCAMED	
Componente	% en peso
Plantas secas de maíz	20,31
Salvado de trigo	10,15
Azúcar	12,41
Levadura torula	9,04
Ácido cítrico	1,91
Nipagín	0,23
Benzoato de sodio	0,34
Goma guar	0,06
Agua	45,55

Fuente: Senasica (2015).



La composición del lactosuero varía con la leche utilizada y con el tipo de queso a fabricar, además, depende del sistema de coagulación (Hernández, 2006), dentro de los más importantes en el estado de Chiapas tenemos los siguientes:

### Queso panela

La composición promedio del queso panela varía en los siguientes porcentajes: agua 50%, proteína 16-20% y grasas 19-29%. Este tipo de queso se obtiene de la separación del suero de la leche coagulada por acción del cuajo y/o enzimas específicas, lo que da lugar a una sustancia blanda denominada cuajada que, una vez sólida, se prensa y escurre para acabar de separar el suero lácteo. El queso resultante se moldea en la forma deseada y queda listo para consumirse. Dado su origen, se esperaría que cualquier queso panela tuviera solo componentes lácteos, con excepción, quizá, de cantidades pequeñas de sal, azúcar y algún conservador permitido. Por su proceso de fabricación, de entrada se espera que cualquier queso panela sea un producto con altos contenidos de humedad, rico en caseína (proteína propia de la leche) y en grasa butírica propia de la leche. (Profeco, 2007; Ramírez y Vélez, 2012)

En la Figura 1 se puede observar el proceso de elaboración de queso panela, con cada una de las etapas que implica.

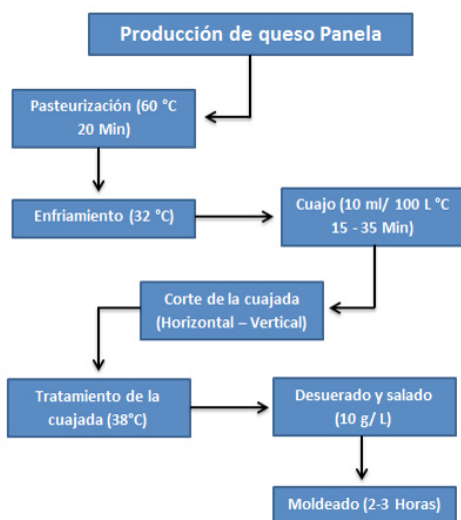


Figura 1. Diagrama del proceso de producción de queso panela (extraído de Profeco, 2007).

### Quesillo

El proceso para elaborar quesillo comprende también las consideraciones descritas para el queso panela. El proceso de recepción y medición de la calidad es el mismo; la diferencia radica en la manufactura del queso, como se muestra a continuación en la Figura 2. La composición promedio del quesillo varía dentro de los siguientes porcentajes: agua 81%, proteína 21,3%, grasas 22,4%, lactosa 0,1% y cenizas 3,6%. (Ramírez et al., 2010; Sagarpa, 2011)

### Queso crema

En todos los quesos, el proceso estrictamente necesario para su elaboración es el denominado cuajado de la leche, que consiste en separar el suero y la caseína (proteína principal de la leche), dando como resultado la masa sólida que después es procesada para darle los distintos sabores y texturas. Este tipo de quesos no se somete a ningún proceso de maduración, como en el caso del queso manchego, son quesos frescos, de consistencia suave. La composición del queso crema varía en los siguientes porcentajes: grasas 33,5%, agua 54% y proteínas 9,8% (Profeco, 2007). En la Figura 3 se observa el diagrama de las etapas de la elaboración de este tipo de queso.

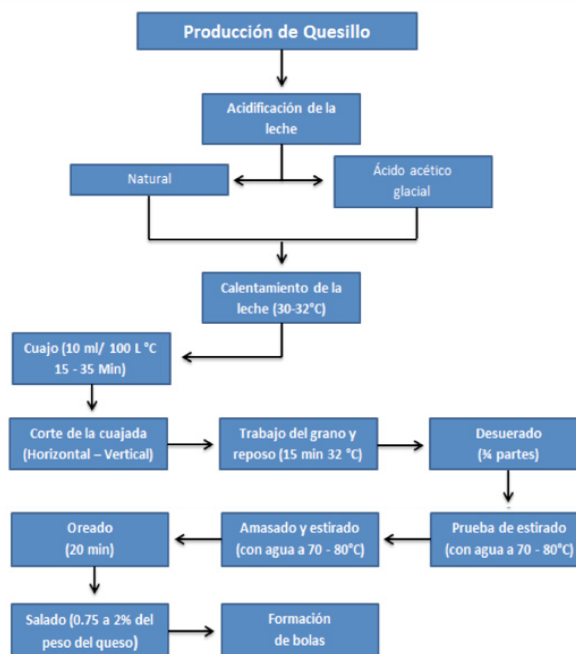


Figura 2. Diagrama del proceso de producción de quesillo (extraído de Sagarpa, 2011).

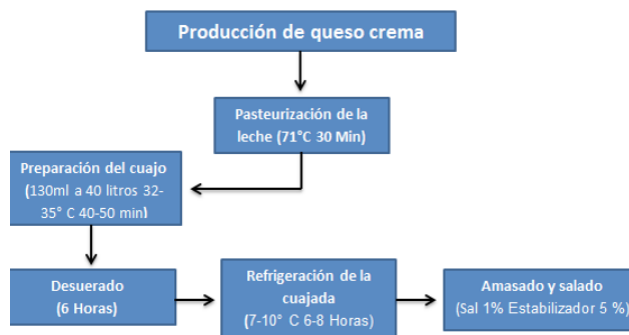


Figura 3. Diagrama del proceso de producción de queso crema (extraído de Profeco, 2007).

### Queso de sal

El queso de sal es elaborado con la cuajada de leche 100% de vaca, a partir de la adición de cuajo y otros elementos, como la sal, que dan origen a su sabor peculiar, que posee características propias que lo diferencian de otros quesos por ser elaborado a partir de un proceso artesanal y lo han posicionado en el gusto de los consumidores nacionales. Su proceso de elaboración se puede observar en la Figura 4 donde se describe el proceso por etapas. (Santos, 2006)

### Caracterización del residuo

Se tiene que, dependiendo del origen de la leche, el tipo de queso que se produce y las diferentes variaciones del proceso, el tipo de

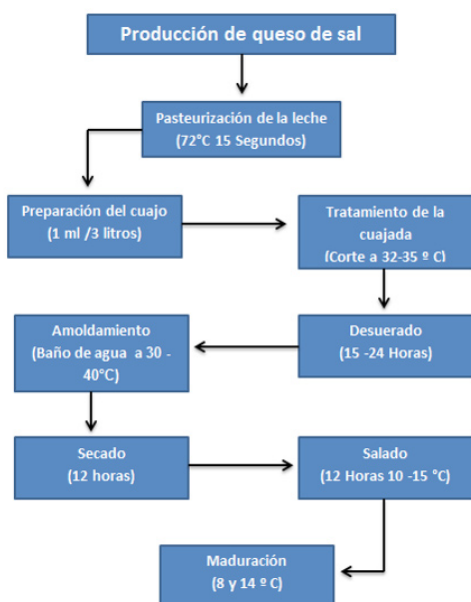


Figura 4. Diagrama del proceso de producción de queso de sal (extraído de García, 2006).

lactosuero será diferente como se muestra en la Cuadro 4. Una de las clasificaciones del suero viene en función de su acidez.

Sin embargo, con la finalidad de conocer la concentración con la que se descarga en el estado, se realizaron muestreos en la empresa “Blanquita”, ubicada en el municipio de Ocozacoautla, debido a la disponibilidad y ubicación del establecimiento. La empresa genera un promedio de 12 000 litros por día y la caracterización indica los siguientes resultados:

Los resultados indican que la carga contaminante es alta, pero a la vez el sustrato es atractivo para la proliferación bacteriana ya que, para un metro cúbico de suero en promedio, se estarían generando 9,4 kilogramos de grasas, 5,5 kilogramos de proteína y 51,87 kilogramos de lactosa, de acuerdo con lo siguiente:

### CENIZAS

La concentración de cenizas está muy por arriba de los datos reportados por la bibliografía, siendo los sueros ácidos los que presentan los valores más altos, llegando a representar el 0,55% en promedio. Esto puede ser causado por los procesos de elaboración de dichos quesos.

### GRASAS

De igual forma, los porcentajes de grasas obtenidos se encuentran por arriba de lo descrito por la bibliografía y en promedio puede decirse que por cada metro cúbico de suero se están generando 9,4 kilogramos de proteína diarios.

### PROTEÍNA

El porcentaje de proteína en los sueros se encuentra dentro de lo reportado en la literatura y, en promedio, puede decirse que por cada

Cuadro 4. Caracterización de las aguas residuales de fábricas de queso

AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA QUESERA		
Componente	Suero dulce (g/l)	Suero ácido (g/l)
Sólidos totales	63,0 - 70,0	63,0 - 70,0
Lactosa	46,0 - 52,0	44,0 - 46,0
Proteína	6,0 - 10,0	6,0 - 8,0
Calcio	0,4 - 0,6	1,2 - 1,6
Fosfatos	1,0 - 3,0	2,0 - 4,5
Lactato	2	6,4
Cloruros	1,1	1,1

Fuente: Panesar et al. (2007).

**Cuadro 5.** Caracterización de las aguas residuales de fábricas de queso

Parámetro	Método	Sueros ácidos		Sueros dulces		Promedio	Referencia bibliográfica	
		Quesillo	Crema	Sal	Panela		Guerrero W. et al. (2010) y Callejas et al. (2012)	Recinos, L. and Saz O. (2006)
Cenizas	Association of Official Analytical Chemistry (AOAC, 1995)	0,75	0,81	0,38	0,26	0,55	Sueros ácidos: 0,005 - 0,012% Sueros dulces: 0,004 - 0,006%	---
Grasas	Extracción Soxhlet	2,19	0,607	0,71	0,25	0,94	0,1 - 0,4%	---
Proteínas	Micro - Kjeldahl	0,43	0,48	0,55	0,586	0,511	Sueros ácidos: 0,2-1,1% Sueros dulces: 0,6 - 1,1%	---
Lactosa	NMX-F-103-1982	5,75	5	5	5	5,187	---	4,5 a 5,3%

metro cúbico de suero se están generando 5,5 kilogramos de proteína diarios.

### LACTOSA

Los porcentajes de lactosa en las diferentes muestras se encuentran dentro de lo reportado por la bibliografía, excepto los que provienen del quesillo y, en promedio, puede decirse que por cada metro cúbico de suero se están generando 51,87 kilogramos de proteína diarios.

Es decir, la carga contaminante es alta; pero, a la vez, el sustrato es atractivo para la proliferación bacteriana, ya que para un metro cúbico de suero en promedio se estarían generando 9,4 kilogramos de grasas, 5,5 kilogramos de proteína y 51,87 kilogramos de lactosa.

### Caracterización como agua residual

La caracterización del lactosuero, como descarga de agua residual, se describe en la Cuadro 6.

De los datos anteriores se tiene que todos los parámetros analizados rebasan los límites máximos permitidos por la NOM-001-SERMARNAT-1996 y NOM-002-SERMARNAT-1996, con excepción de la temperatura y los sólidos sedimentables del suero proveniente del quesillo, mismos que se encuentran dentro de lo establecido en dicha norma.

Los valores de pH obtenidos demuestran que los sueros pueden dividirse en ácidos (de quesillo y queso crema) y sueros alcalinos o dulces (del queso panela y de sal). Los nutrientes que posee podrían ser un medio apropiado para la proliferación de microorganismos. Cabe resaltar que dichos valores se encuentran dentro de lo reportado por la bibliografía (Guerrero et al., 2012), con valores para sueros dulces de 6,8 y sueros ácidos 5,18.

De acuerdo con los sólidos totales, se tiene que los sueros dulces contienen mayor canti-

**Cuadro 6.** Caracterización fisicoquímica del sustrato

PARÁMETRO	LACTOSUERO				UNIDAD	MÉTODO
	Quesillo	Queso crema	Queso de sal	Queso panela		
Temperatura	31	30	30	30	°C	NMX-AA-007-SCFI-2013
Grasas y aceites	21 900	6 071	5 519,2	2 515	m/gl	Association of Official Analytical Chemist (AOAC, 1995)
Sólidos sedimentables	0	6	1,65	1,55	m/gl	NMX-AA-004-SCFI-2013
Sólidos suspendidos totales	9 000	9 166	10 250	17 500	m/gl	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos totales	46 876,7	42 992	49 570	60 370	m/gl	NMX-AA-034-SCFI-2001
DBO	62 767	53 333,3	68 150	73 500	m/gl	NMX-AA-030-SCFI-2001
DQO	4 411,6	80 813	83 153	73 923	m/gl	NMX-AA-030-SCFI-2001
Nitrógeno total	713,3	771,1	883,07	938,3	m/gl	Association of Official Analytical Chemist (AOAC, 1995)
Fósforo total	333,5	411,9	392,3	522,2	m/gl	NMX-AA-029-SCFI-2001
pH	4,71	4,59	6,99	6,98	Unidad	NMX-AA-008-SCFI-2001
Acidez	4 750	5 706	2 667	2 025	C <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> mg/l	NMX-AA-036-SCFI-2001

dad de materia orgánica en comparación con los sueros ácidos. Estos resultados son similares a los de Guerrero et al. (2012), demostrando que podrían aportar un mayor rendimiento en un fermentador anaerobio.

La DQO y DBO obtenida se encuentra con valores altos, consistente en DQO de 72 600 mg/l DBO y entre 30 000-50 000 mg/l. (Guerrero et al., 2012; Parra, 2010, respectivamente)

Las grasas y aceites se encuentran por arriba de lo publicado (Guerrero et al., 2010), ya que las concentraciones que van de 1 000-4 000 mg/l, esta diferencia puede deberse a la variabilidad en la calidad de la leche utilizada y el proceso empleado en la elaboración.

Asimismo, se determina que en promedio las muestras de lactosuero poseen una carga orgánica alta, lo que implica que estas muestras tienen un índice de biodegradabilidad mayor a 0,65, lo que resulta ser un agua biodegradable.

Los resultados obtenidos en nitrógeno total se encuentran por debajo de los valores de Urribarrí et al. (2004), ya que se reporta 0,21% nitrógeno total tanto en sueros dulces como en sueros ácidos. El fósforo total se encuentra por debajo de lo encontrado por Miranda et al. (2009), quienes tienen cantidades de 2 190mg/L.

### Determinación del impacto que causa el residuo

Con datos obtenidos por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010); Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa); Secretaría de Economía (SE), Comisión Federal para la Protección Contra Riesgo Sanitario (Cofepris), y la caracterización bromatológica, se realizó un balance de materia: diagrama de caja bajo el esquema mostrado en la Figura 5.

Con la finalidad de dimensionar el impacto que estas aguas ocasionan al ambiente, la cantidad de agua residual y el contenido orgánico que genera una persona promedio, se tomaron datos oficiales de la Organización Mundial de la Salud (OMS), que señala que la generación per cápita de una persona es de 135 litros; por lo tanto, un habitante genera una carga orgánica de 133,166 mg/l DBO, y el lactosuero tiene

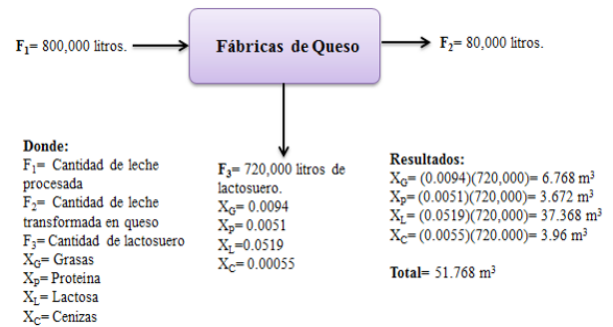


Figura 5. Balance de energía en los procesos de fábricas de queso.

una carga orgánica de 64 187 mg/l, valor determinado en la caracterización bromatológica. Entonces, tenemos que un litro de lactosuero equivale a la contaminación generada por 2 570 706 habitantes, esto implica que el 20% de la generación de lactosuero en el estado es equivalente a la contaminación que genera la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, considerando que se cuenta con 537 102 habitantes (INEGI, 2010).

### Pruebas de generación de hidrógeno

Una molécula de lactosa tiene una masa molar de 342,30 g/mol, debido a que se encuentra conformada por 12 átomos de carbono, 22 de hidrógeno y 11 de oxígeno ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ); se sabe que el lactosuero contiene 5,187% de lactosa y que una industria quesera en promedio genera al día 12 000 litros de lactosuero, por lo que se estima una generación diaria de 40 040 g/mol de hidrógeno, los cuales representan una generación total de 40,04 kg de hidrógeno a través de una vía metabólica funcionando al 100%.

Cuadro 7. Aportaciones de materia orgánica al día a través de las aguas residuales

	AGUA RESIDUAL		
	DOMÉSTICA	LACTOSUERO	UNIDAD
Concentración de la DBO promedio	133 166	64 187	mg/l
Generación per cápita diaria	135	720 000	l
Aportación diaria de materia orgánica	17 977	46 214 640 000	mg/día
Habitantes de Tuxtla	537 102	---	habitantes
Aporte de Tuxtla	9 655 702 866	---	mg/día
Número de veces el aporte de Tuxtla	5	1	



Por otra parte, se determinaron cuatro tipos diferentes de residuos de la industria quesera, a los que se denominaron: suero de queso, de queso panela, de queso de sal y de queso crema. De inicio se inocularon las bacterias en cada uno de los sueros con la finalidad de conocer la cepa con mayor producción de gas en cada suero de queso. Los sueros inoculados se mantuvieron en condiciones normales de presión, temperatura y sin presencia de luz, durante 24 horas.

Finalmente, se implementó un sistema a nivel planta piloto, el tipo de biorreactor con el que se experimentó es un reactor por lotes, por ser adecuado para establecer parámetros cinéticos de microorganismos. Las variables que se deben controlar para este proceso, que son críticas para el microorganismo, son la temperatura, pH y la concentración de sustrato, ya que estas afectan el crecimiento del microorganismo. El dispositivo implementado permite medir la temperatura, variable de mayor importancia para el proceso; proporciona ausencia de oxígeno, pues la *Citrobacter freundii* es una bacteria aerobia facultativa.

**Cuadro 8.** Selección del sustrato a partir de la producción de biogás

LACTOSUERO	BACTERIA	PRODUCCIÓN	
		PRODUJO	NO PRODUJO
Queso de sal	<i>E. coli</i>	X	
	<i>C. freundii</i>	X	
Queso panela	<i>E. coli</i>		X
	<i>C. freundii</i>		X
Queso crema	<i>E. coli</i>		X
	<i>C. freundii</i>		X
Quesillo	<i>E. coli</i>	X	
	<i>C. freundii</i>	X	

También se pueden determinar los parámetros cinéticos, como el tiempo de crecimiento de la *Citrobacter freundii*, el tiempo requerido para la fermentación y la producción de hidrógeno. Los biorreactores por lotes son ideales para volúmenes pequeños, por lo que se definió en volúmenes de 10, 12 y 15 L como volumen de llenado. No se utilizó material de revestimiento para evitar las pérdidas calóricas. De acuerdo con las condiciones a las que se expuso el microorganismo, se intuye que el oxígeno quedó atrapado en el reactor al momento de verter el lactosuero. No se detectó la presencia de gas metano.

Durante el monitoreo de los reactores se observó una mayor generación de gas en los reactores 2 y 3, lo cual se puede observar en la Figura 6, donde se tiene el volumen de biogás obtenido en relación con el tiempo; también se puede observar que en el día 3 alcanzaron el punto máximo de producción y posterior a ese día se presentó una generación estable y continua de biogás, hasta terminarse el sustrato.

De las pruebas de caracterización en el analizador de gases se encontró 40% de hidrógeno, 53% de dióxido de carbono, 1% de sulfuro de hidrógeno, 5,9% de monóxido de carbono y 6% de oxígeno, este último no fue producido por la bacteria. La Figura 7 es una gráfica donde se presenta el porcentaje de cada uno de los gases encontrados en el biogás producido en los reactores. El porcentaje de hidrógeno se determinó por diferenciación, el resto fueron datos directos obtenidos del analizador de gases.

Las aguas residuales de las fábricas de queso resultan ser idóneas para el proceso de producción de hidrógeno, tienen como única desven-

**Cuadro 9.** Parámetros fisicoquímicos y porcentaje de remoción de carga orgánica

VARIABLE	<i>E. coli</i> /SAL				<i>Citrobacter</i> /SAL				<i>E. coli</i> /QUESILLO				<i>Citrobacter</i> /QUESILLO			
	I	F	Cr	%R	F	Cr	%R	I	F	CR	%R	F	CR	%R		
Azúcar (%)	5	3,5	1,5	30	3,8	1,2	24	5,75	3,7	2,05	35,65	3,3	2,45	42,61		
Grasas (%)	0,71	0,6758	0,034	4,82	0,283	0,4273	60,18	2,19	0,3725	1,8175	82,99	0,2823	1,908	87,11		
Sólidos totales (%)	0,85	0,63	0,22	25,9	0,46	0,39	45,88	0,8	0,35	0,45	56,25	0,46	0,34	42,50		
Proteína (%)	0,55	0,51	0,04	7,27	0,49	0,06	10,91	0,43	0,41	0,02	4,65	0,4	0,03	6,98		
DQO (mg/l)	83 153	78 418	4 735	5,69	75 073	8 080	9,717	74 411	66 902	7 509	10,091	68 907	5 504	7,40		
DBO (mg/l)	68 150	60,624	7 526	11,04	53 074	15 076	22,122	62 767	55 396	7 371	11,74	48 638	14 129	22,51		

I = Inicial; F = Final; Cr = Cantidad removida; % R = Porcentaje de remoción

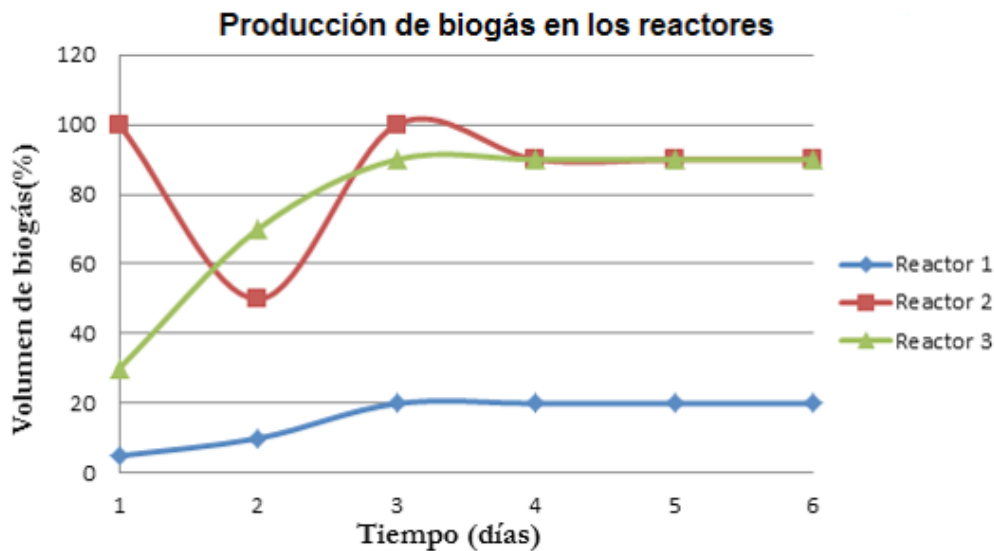


Figura 6. Porcentaje de producción de biogás producido en los reactores.

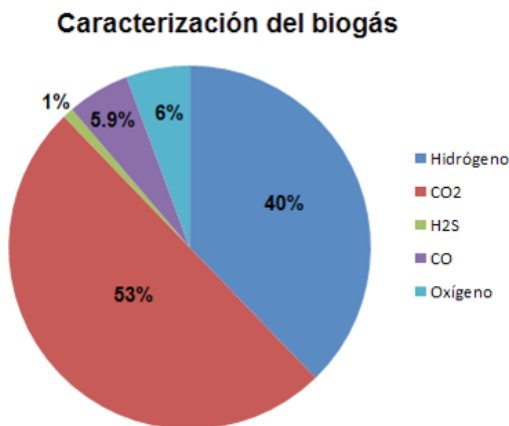


Figura 7. Caracterización del biogás producido en los reactores.

taja el que se emplean para la alimentación de cerdos; pero este uso difícilmente se pueda llegar a masificar, pues para ser redituable hasta el punto de que el contenido energético sea capaz de aumentar considerablemente el peso de los animales, debe ser suministrado de manera adicional con otros alimentos.

## CONCLUSIONES

Según los datos arrojados por la investigación de campo, laboratorio y bibliográfico, estos residuos resultan ser muy prometedores para la generación de hidrógeno, ya que presentan las características ideales para la producción de biohidrógeno, tales como:

1) La cantidad generada: se estima un padrón de empresas de aproximadamente 630 establecimientos en todo el estado de Chiapas, con una generación diaria de 720 000 litros de lactosuero, misma que está distribuida principalmente de la siguiente forma: Venustiano Carranza con 48, Pijijiapan 46, Tecpatán 63, Ocozocoautla 50, Copainalá 32, Villaflores 23, Mapastepec 23, y las 345 restantes se encuentran dispersas en el estado.

2) Composición del residuo: el residuo presenta una composición poco variada que depende del origen de la leche y el tipo de queso elaborado; pero, en general, el contenido es muy completo basado principalmente en azúcares, proteínas, minerales y grasas.

3) Composición de los nutrientes: la principal fuente de energía de este residuo es la lactosa, disacárido que al hidrolizarse se divide en glucosa y galactosa, mismas que son degradables por rutas metabólicas poco específicas y más bien generales.

4) Características en las que se transfiere: la generación es puntual y bien localizada, en empresas en las que pueden instalarse réplicas de sistemas de tratamiento específicas para este tipo de aguas, visualizándose un tratamiento que degrade la carga contaminante y permita la generación de hidrógeno para autoconsumo.

5) Tratamiento del residuo: en la mayoría de los casos, el residuo se genera diariamente y por lotes; en muy pocas ocasiones es tratado, más bien es arrojado al drenaje o a algún bien nacional sin previo tratamiento.

Las aguas residuales de la industria que-  
sera resultaron tener las características de-  
seables para la producción de hidrógeno, en  
especial las aguas que contienen lactosuero de  
quesillo y queso de sal, presentando una com-  
posición basada principalmente en azúcares,  
proteínas, minerales y grasas, que permiten el  
desarrollo bacteriano necesario para producir  
hidrógeno por la vía biológica.

Una forma de dimensionar los impactos  
ambientales que estas aguas residuales pue-  
dan causar es comparándolos con el impacto  
que causan las aguas residuales con carga  
orgánica alta, como es el caso del agua resi-  
dual urbana de origen doméstico, por lo que  
al aplicar dicho análisis se demuestra que las  
aguas residuales del lactosuero pueden repre-  
sentar dosificaciones altas de contaminantes  
que afectan principalmente en la DBO y DQO  
de dichas aguas.

La carga orgánica contaminante y el alto vo-  
lumen disponible pueden ser el factor más im-  
portante para que puedan ser reaprovechadas  
en la producción de metabolitos valiosos, tales  
como las moléculas combustibles que pueden  
generarse en la fermentación oscura, en la cual  
las moléculas ricas en carbono, hidrógeno, oxí-  
geno y nitrógeno pueden fermentarse para la  
producción de hidrógeno y metano.

## REFERENCIAS

Badui Dergal, S. (2006). Química de los alimentos. Pearson educación de México, Estado de México. pp. 603-629.

Bedoya, Andrea; Castrillón, Juan Camilo; Ramírez, Juan Esteban; Vásquez, Juan Esteban; Arias Zabala, Mario. (2008). Producción biológica de hidrógeno: una aproximación al estado del arte. *Dyna* 154. pp. 137-157.

Berrocal, M. (2012). Efecto de los residuos de la industria azúcar-alcoholera, bagazo, cachaza y vinaza, en la producción de caña y azúcar en un vertisol de Guanacaste. *Agronomía Costarricense* 12(2):147-153.

Berry, G.D.; Aceves, S.M. (2006). La economía del hidrógeno como solución al problema de la estabilización del clima mundial. *Acta Universitaria*. Universidad de Guanajuato. México, vol. 16 n° 1.

Dávila-Vázquez, G.; Razo-Flores, E. (2008). Producción biológica de hidrógeno por vía fermentativa: Fundamentos y perspectivas. División de Ciencias Ambientales. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT). San Luis Potosí, SLP, México. E-mail: gdv@ipicyt.edu.mx

Dolgykh, L.; Stolyarchuk, I.; Deynega, I.; Strizhak, P. (2006). *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 31, 1607-610. The use of industrial dehydrogenation catalysts for hydrogen production from bioethanol.

Elbeshbishy, Elsayed. (2011). Enhancement of Biohydrogen and Biomethane Production from Wastes Using Ultrasonication. Nova Science Publishers. pp. 9-58.

Hernández Preciado, B. (2006). "Filtración de lactosuero a diferentes concentraciones como pre tratamiento" (Tesis de Licenciatura). Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

LGP GIR. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

Londono Lanco, S. A.; Rodríguez Chaparro, T. (2012). Producción de biohidrógeno a partir de residuos mediante fermentación oscura: una revisión crítica (1993-2011). *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.* [online]. 2012.

Ni, M.; Leung, M.; Sumathy, K.; Leung, D. (2006). Potential of renewable hydrogen production for energy supply in Hong Kong. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 31, 1401-1412.

Panesar, P., J. Kennedy, D. Gandhi, K. Bunko. (2007). Bioutilisation of whey for lactic acid production. *Food Chemistry* 105: 1-14.

Profeco. Procuraduría Federal del Consumidor. (2007). "Queso crema y doble crema". *Revista del consumidor*. México. pp. 53-59.

Profeco. Procuraduría Federal del Consumidor. (2007). "Queso panela y sus imitaciones". *Revista del consumidor*. México. pp. 46-55.

Ramírez-López, C.; Vélez-Ruiz, J. F. (2012). Quesos frescos: Propiedades, métodos de determinación y factores que afectan su calidad. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*. Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental. Universidad de las Américas, Puebla, vol. 6-2. pp. 131-148.

Reith, J.; Wijffels, R.; Barten, H. (2003). Edit. Bio-methane & Biohydrogen status and perspectives of biological methane and hydrogen production. Dutch Biological Hydrogen Foundation.

Ruiz, R., R. Ruiz, G. Salgado, M. Beltrán. (2005). Relación entre la temperatura de la masa fermentativa, temperatura ambiental y el contenido de proteína cruda durante la elaboración de Saccharina rústica. I Congreso Internacional de Producción Animal. La Habana. pp. 272-279.

Sagarpa. (2011). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Elaboración de queso panela y Oaxaca. *Sistemas de Agronegocios Pecuarios*.

Santos Moreno, A. (2006). Elaboración a pequeña escala de quesos mexicanos con leche pasteurizada. Primer Simposio de Lácteos. Chihuahua, México.

Senasica. (2015). Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Planta de cría y esterilización de la mosca del Mediterráneo "Ing. Jorge Gutiérrez Samperio.

Sinha, P., Pandey, A. (2011). An evaluative report and challenges for fermentative biohydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, Issue 13, pp. 7460-7478.

Tsai, W-T., Lin, Ch-I. (2009). Overview analysis of bioenergy from livestock manure management in Taiwan. *Renewable and Suitable Energy Reviews* (13), pp. 2682-2688.

Valencia Denicia, E. (2009). La industria de la leche y la contaminación del agua. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. pp. 27-31.