

LOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA ALIMENTARIA Y SU VALOR AGREGADO PARA LA BIOENERGÍA. UN ENFOQUE INTEGRAL EN I+D+E+I+E



**Verónica Capdevila; Mauricio Arrastúa;
Cristina Gely; Ana M. Pagano**

Núcleo TECSE (Tecnologías de Semillas y Alimentos) -
Área de Procesos – Dep. de Ingeniería Química -
Facultad de Ingeniería - UNICEN. Olavarría, Argentina

INTRODUCCIÓN

La disposición final de los residuos de alimentos constituye el eje de estudio de diferentes investigaciones que buscan mitigar la contaminación ambiental generada. Sin embargo, es posible el aprovechamiento y agregado de valor a esos residuos orgánicos destinándolos a la producción de biocombustibles renovables –como el bioetanol- evitando el daño ambiental y contribuyendo a la generación de energías alternativas sustentables.

El bioetanol que se utiliza en el corte con la nafta se puede obtener a partir de la fermentación alcohólica de biomásas con alto contenido de azúcares y almidón, tales como cereales y caña de azúcar (denominado bioetanol de primera generación). Pero también es posible obtener bioetanol de segunda generación a partir de otras tecnologías sustentables que utilizan como biomasa residuos provenientes de la industria alimentaria (lactosuero, cascarillas, rastrojos u otros residuos lignocelulósicos), eliminando así la controversia entre destinar los alimentos para consumo humano o para la generación de energía.



El lactosuero proveniente de la elaboración de quesos es un residuo de la industria láctea que suele ocasionar un problema ambiental importante por los grandes volúmenes con elevada carga orgánica que se generan. Con frecuencia, se desecha de manera inadecuada, perjudicando la estructura física y química de los suelos, disminuyendo su productividad y causando serios problemas a las aguas residuales y ambientales, llevando a la destrucción de la fauna y flora acuática. Sin embargo, este residuo de la industria láctea ofrece muchas posibilidades de valorización, siendo una de ellas la producción de bioetanol.

La obtención de bioetanol de segunda generación a partir de residuos de producción de alimentos implica varias etapas, que se presentan en el esquema 1.

Durante el pre-tratamiento se adecúa la materia prima a utilizar, para luego llevar a cabo las etapas de hidrólisis y fermentación, que pueden desarrollarse en forma simultánea o por separado, dependiendo de la materia prima y la tecnología a utilizar. Para las biomásas lignocelulósicas o almidonosas se requiere la hidrólisis, en cambio si la biomasa tiene alto contenido de azúcar (como los residuos de remolacha azucarera, maíz, jugos cítricos, etc.) se realiza directamente la fermentación. La última etapa del proceso es la separación por destilación de la mezcla obtenida para obtener el bioetanol purificado.

ESQUEMA 1 – Etapas para la obtención de etanol de segunda generación



En el caso del lactosuero, es muy variable la cantidad y composición que se genera en la industria láctea, ya que depende del tipo de queso que se elabora, del tratamiento térmico de la cuajada, de la forma de coagulación, del cuajo empleado, entre otros. El azúcar presente en el lactosuero es la lactosa, un disacárido que cuando se somete al proceso de hidrólisis proporciona glucosa y galactosa. A partir de estos monosacáridos se obtiene bioetanol por fermentación. Conocer el contenido de lactosa en el lactosuero resulta necesario para determinar la cantidad de carbohidratos disponibles para los procesos fermentativos, ya que constituyen la fuente de carbono, hidrógeno y energía metabólica para el crecimiento de los microorganismos. Un contenido cercano al 5% es adecuado. Se considera que el suero de queso puede producir sólo un 2,5% de etanol en fermentación directa, lo que no es económicamente viable, ya que la baja cantidad de lactosa redundaría en baja concentración de etanol resultante (Kargi & Ozmihci, 2006).

Objetivos

Atendiendo a estos problemas, en la Facultad de Ingeniería-UNICEN se trabaja en la temática de revalorización de residuos de la industria de alimentos para la obtención de bionergía (bioetanol) con un enfoque integral I+D+E+i+e (Investigación y Desarrollo, Educación, innovación y emprendimiento), que busca fortalecer las capacidades del equipo de trabajo y afianzar los vínculos con los sectores académicos, sociales y productivos, a fin de contribuir al desarrollo común.

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

La línea de Investigación y Desarrollo sobre obtención de bioetanol de segunda generación se lleva adelante en el marco del Proyecto *“Estudio, modelado y simulación del procesamiento de productos de origen vegetal”* (Código 03/E171, acreditado por SPU-Secretaría de Políticas Universitarias, Ministerio de Educación de la Nación) con el objetivo aportar soluciones mediante el diseño, optimización e integración de procesos biotecnológicos sustentables en la producción de bioetanol, con una visión de integralidad que permite acercar los conocimientos a distintos niveles de educación y al entorno productivo regional.

Se estudian nuevas tecnologías de obtención de bioetanol en base al desarrollo de modelos de simulación, combinando diferentes alternativas tecnológicas y biomásas, evaluando la factibilidad técnica y exergo-económica de los procesos.

Este proyecto sobre bioetanol de segunda generación se desarrolla conjuntamente con investiga-



Dataloggers Wi-Fi testo Saveris 2

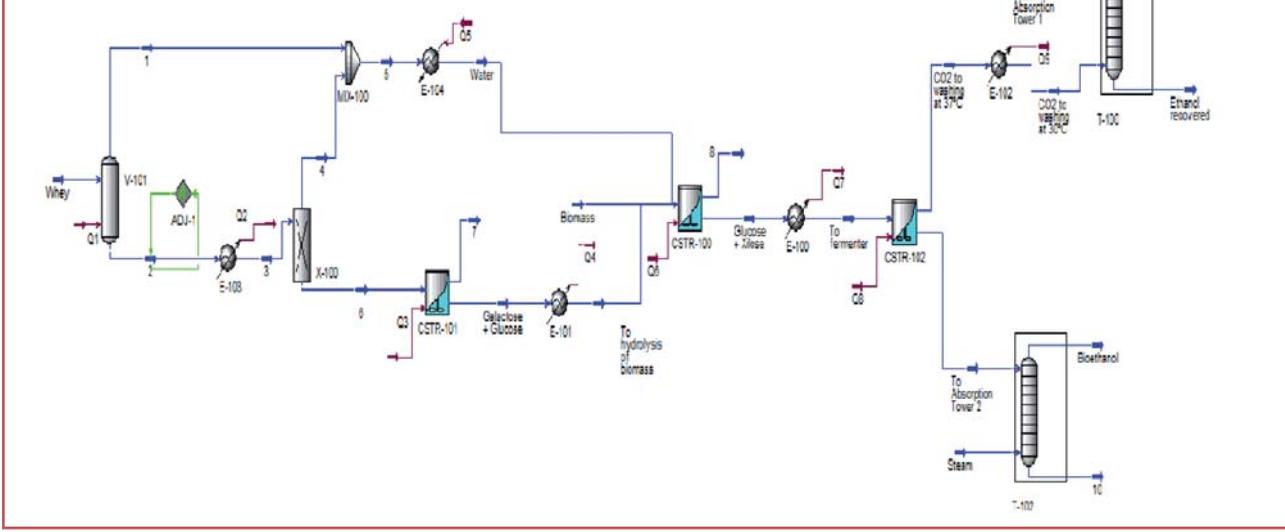
Supervisa y documenta todos los sitios de refrigeración automáticamente - para la más alta calidad de los alimentos.

- Mantenga sus datos siempre actualizados y disponibles desde cualquier sitio (PC - Tablet - Smartphone) gracias al almacenamiento de datos en línea.
- Alarmas por e-mail en valores límite.
- Temperatura - humedad y temperatura - sensores internos y/o externos.

www.testo.com.ar/saveris2

Yerbal 5266 - 4° piso (C1407EBN) - Buenos Aires - Argentina
Tel.: (011) 4683-5050 - Fax: (011) 4683-2020
info@testo.com.ar - www.testo.com.ar

FIGURA 1 – Diagrama de flujo de la producción del proceso de bioetanol a partir de cascarilla de arroz pretratada y lactosuero (Capdevila *et al.*, 2016b)



dores de instituciones extranjeras, como el Centro de Investigación y Desarrollo de la Universidad Industrial de Santander (CIDES-UIS, Bucaramanga, Colombia), formando parte además de una Red Interuniversitaria Internacional entre la UNICEN, la UTN-Regional Resistencia (Grupo QUIMOBÍ) y la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH, Morelia, México), financiada por el Programa REDES VIII de la SPU.

Con un marcado enfoque hacia la sustentabilidad de los procesos, actualmente se trabaja en el desarrollo de modelos de simulación en Aspen HYSYS para la obtención de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos (cascarilla de arroz) pretratados (Dagnino *et al.*, 2011, 2013) combinados con lactosuero en reemplazo del agua requerida para el tratamiento de la biomasa vegetal. El modelo de simulación del proceso involucra las etapas de hidrólisis, fermentación y separación de bioetanol generado.

La figura 1 presenta el diagrama de flujo (Flowsheet) de uno de los modelos desarrollados para el proceso de obtención de bioetanol a partir de cascarilla de arroz y lactosuero, donde pueden identificarse las etapas de hidrólisis, fermentación y separación. Mediante este proceso es posible obtener 7,57 t/h de bioetanol con una pureza del 91,9% a partir de 88 t/h de biomasa pretratada y de suero lácteo (Capdevila *et al.*, 2016b).

La correspondiente validación del modelo de simulación se basa en la modelización conceptual de las opera-

ciones, a través de balances, y en el análisis experimental de la cinética de reacción mediante ensayos a escala laboratorio (Arrastúa *et al.*, 2016) y referencias bibliográficas. A modo ilustrativo, la figura 2 muestra el ajuste de datos experimentales obtenidos para la reacción de hidrólisis ácida de la lactosa para el modelado del reactor cinético CSTR-101 del proceso.

Para la selección de las tecnologías más adecuadas que permitan lograr el objetivo de máxima producción de bioetanol con mínimo consumo de agua (un recurso natural escaso) se utilizan herramientas de optimización múltiple, como el software GAMS (Capdevila *et al.*, 2016a). Como base organizacional de análisis para el desarrollo del modelo de optimización

FIGURA 2 – Datos experimentales (●) y modelo matemático (—) obtenidos en el estudio de la cinética de hidrólisis de lactosa catalizada por ácido sulfúrico (1% v/v) (Arrastúa *et al.*, 2016) comparados con modelos de otros autores

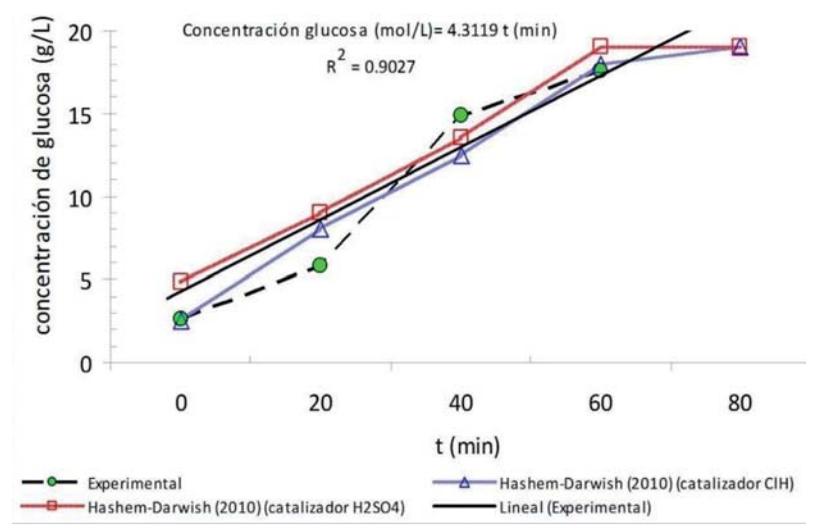
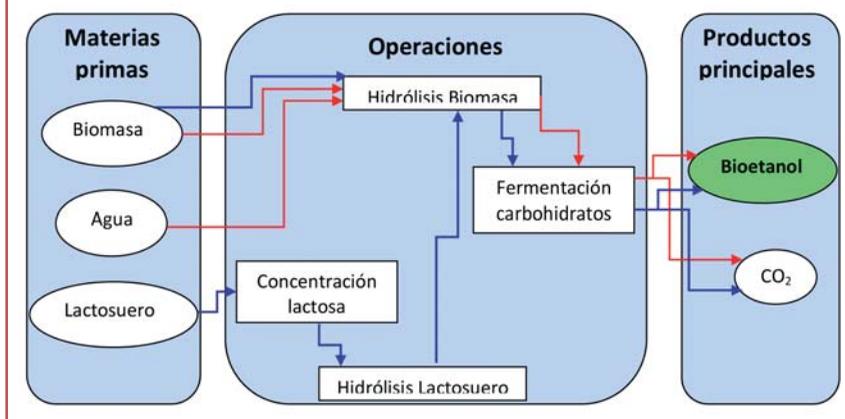


FIGURA 3 – Superestructura generada para las corrientes involucradas en los Procesos I (→) y II (→)



se trabaja con la construcción de “superestructuras” que se generan considerando todas las posibles corrientes que presentan las distintas alternativas tecnológicas de los procesos. A partir estas superestructuras se plantean todos los balances másicos totales y de componentes del modelo de optimización. Un ejemplo de estas superestructuras se presenta en la figura 3 para el caso donde se evalúan comparativamente dos alternativas tecnológicas diferentes para la producción de bioetanol de segunda generación: el Proceso I, que utiliza biomasa lignocelulósica pretratada y agua como materias primas, y el Proceso II, que parte de la combinación de biomasa lignocelulósica pretratada y lactosuero.

Mediante este modelo de optimización se ha podido verificar que la alternativa de utilizar cascarilla de arroz en combinación con lactosuero (Proceso II), a pesar de tener más etapas operativas, se convierte en una mejor opción frente a la otra (Proceso I) ya que produce mayor rendimiento en bioetanol con menor consumo de agua. El proceso óptimo es capaz de generar 392 kmol/h de bioetanol para una escala de proceso basada en un caudal alimentación de 88,43 kmol/h de biomasa lignocelulósica pretratada y de 4653 kmol/h de suero lácteo (Capdevila *et al.*, 2016a).

Educación

Paralelamente a las actividades I+D, el Proyecto Bioetanol Sustentable forma parte del Proyecto de Desarrollo Tecnológico y Social (PDTS) “Estrategia nacional de articulación entre la universidad y la escuela secundaria para la generación de vocaciones y fortalecimiento de la formación media en ingeniería y ciencias exactas y naturales” (Código PCTI-121), aprobado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación. En el marco de este proyecto, orientado a aprovechar oportunidades estratégicas y

necesidades sociales o de mercado, se llevan a cabo prácticas profesionalizantes para alumnos de las escuelas secundarias técnicas (Res. DGEyC-CGCyE 1763/10) sobre la temática “Bioetanol sustentable a partir de residuos de la industria de alimentos”. Su objetivo es ofrecer una alternativa didáctico-pedagógica de entrenamiento en trabajos experimentales y capacitar en técnicas específicas de laboratorio de procesos químicos a través de la interacción con alumnos y docentes de la Universidad, y así-

mismo lograr una articulación con el sector productivo local.

El trabajo experimental consiste en el estudio a escala laboratorio de la producción de bioetanol a partir del suero lácteo residual enriquecido con carbohidratos, el cual es llevado a tratamiento de hidrólisis y fermentación involucrando los pasos que se presentan en el esquema 2.

SU EMPRESA NO DEJARÁ DE CRECER, CON LAS MEJORES BANDAS Y CADENAS

Ofrecemos una completa gama de Bandas y Cadenas

CADENA DE TABLILLA PLÁSTICA Y METÁLICA - Table Top y Flex Top
BANDAS MODULARES - Rectas, Curvas, Acumulación y Elevación



VECMAR **COBRA**
SERVICIOS PARA INDUSTRIAS CADENAS TRANSPORTADORAS

DISTRIBUIDOR OFICIAL PARA ARGENTINA Y MERCOSUR
de COBRA CADENAS TRANSPORTADORAS LTDA.

Tel.: (+54 11) 4709 3365 / 4897 8565
vecmar@arnetbiz.com.ar; ventas_vecmar@arnetbiz.com.ar
www.vecmar.com.ar

ESQUEMA 2 – Pasos en la producción experimental de bioetanol a partir de suero lácteo enriquecido con carbohidratos



Las reacciones consideradas en las etapas de hidrólisis y fermentación del lactosuero son:

Reacción 1: Lactosuero (lactosa) + Agua
Glucosa + Galactosa

Reacción 2: Glucosa o galactosa
Etanol + Dióxido de carbono

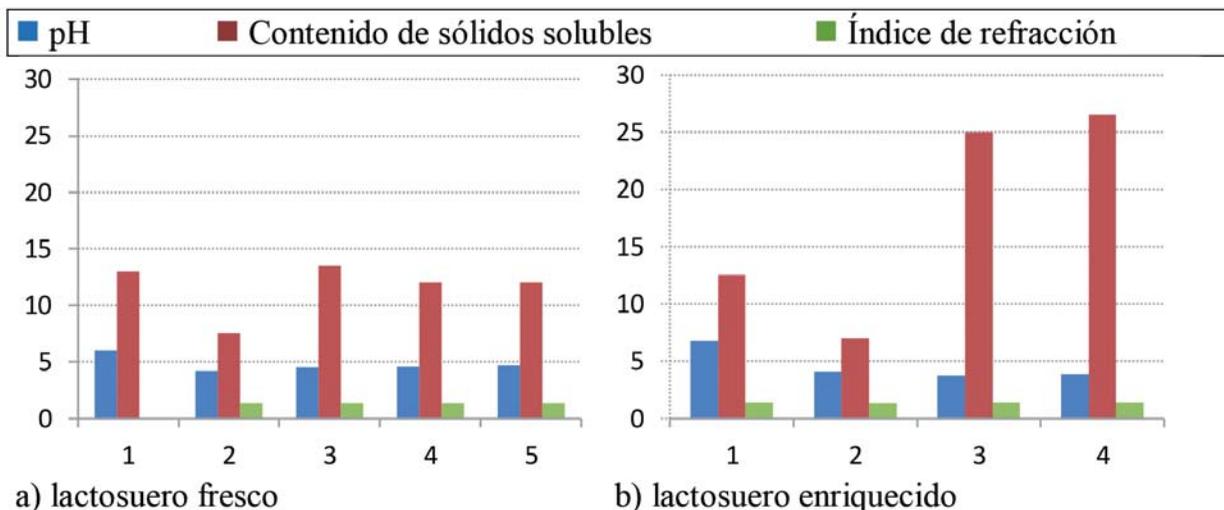
La figura 4 muestra la evolución de algunos resultados obtenidos para las variables de control pH, contenido de sólidos solubles e índice de refracción a distintos esta-

dios del proceso fermentativo de lactosuero fresco y enriquecido.

Comparativamente, en la fermentación de lactosuero enriquecido se obtuvo un potencial de etanol 1,5 veces mayor que el del lactosuero fresco, y una tendencia en el pH similar a la observada por Murari *et al.* (2012). Esto evidencia la ventaja de combinar el suero lácteo residual con biomasas con alto contenido de carbohidratos (como es el caso de la cascarilla de arroz) para aumentar la producción de bioetanol aprovechando desechos de la industria alimentaria y mejorar la eficiencia del proceso desde el punto de vista de la sostenibilidad.

FIGURA 4 – Variables de control durante la fermentación de carbohidratos

(1: Leche; 2: Suero; 3: Mezcla fermentativa (21 h); 4: Mezcla fermentativa (50 h), 5: Mezcla fermentativa (93 h)



Innovación y emprendimiento

Con respecto a la innovación y fomento del emprendimiento (i+e), este Proyecto Bioetanol ha sido aprobado y financiado por el programa “Universidad, Diseño y Desarrollo Productivo” (SPU) en 2015/16, permitiendo la articulación estratégica del grupo de trabajo de la UNICEN con el sistema productivo a través de la convocatoria de estudiantes, docentes e investigadores de carreras de ingeniería, ciencias aplicadas y tecnología para el desarrollo de procesos innovadores, que propongan soluciones productivas, particularmente atendiendo el caso de la generación de bioenergía de segunda generación. Este Programa de SPU busca “estimular en los estudiantes universitarios el desarrollo de capacidades innovadoras, especialmente vinculadas al desarrollo industrial”, promoviendo la aplicación de conocimientos a través de la generación de productos/procesos que puedan transferirse como prototipos industriales. La finalidad de estos productos/procesos debe ser *“atender ciertas necesidades de la comunidad, mejorar procesos de producción o solucionar problemáticas concretas”*. Bajo este enfoque, si se considera que:

- Para obtener bioetanol sustentable se pretende utilizar el 80% de la cascarilla de arroz producida anualmente en la región del Litoral de la Argentina (MINAGRI, 2014), es decir 28,89 t/h de biomasa lignocelulósica.
- El 95% de la producción lechera argentina (más de 11 millones de litros anuales) proviene de la Región Pampeana (MINAGRI, 2016), y se destina más del 40% a la industrialización de quesos (INTI, 2013), generando 1,1 millones de litros de suero por año sólo en la Provincia de Buenos Aires.

Es claro que el área de influencia de la UNICEN demanda acciones y soluciones concretas con respecto al destino de estos residuos de la industria de alimentos. En este sentido, pretendemos cooperar en la contribución generada desde la Universidad al avance del sistema productivo nacional y al aporte a las soluciones de problemáticas locales a través de estos Proyectos integrales I+D+E+i+e de revalorización de residuos alimenticios para la producción de bioenergía sustentable.

REFERENCIAS

- Arrastúa M., Capdevila V., Gely M.C., Pagano A.M. (2016). Bioetanol sustentable: estudio cinético y modelado de la hidrólisis de lactosuero como primera etapa del proceso productivo. *The Journal of The Argentine Chemical Society*, 103:1-2.
- Balat M. (2011). Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Conversion and Management*, 52(2): 858-875.
- Capdevila V., Gely M.C., Pagano A.M., Ponce-Ortega J.M. (2016a). Revalorizando residuos de industrias arroceras y lácteas para la producción de bioetanol: optimización sustentable. VI Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos de Córdoba (CICYTAC 2016), 1369: 8 págs.

- Capdevila V., Kafarov V., Gely M., Pagano A.M. (2015). Bioetanol de segunda generación a partir de residuos de la industria de alimentos. E-Book Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (GLICAP 2015), ISBN 978-987-575-119-4, Alicia Lucia Ordoñez [et al.] (Eds.), FCAI-UNCuyo, San Rafael de Mendoza, 1ª Edición, pp. 1005-1011.
- Capdevila V., Kafarov V., Gely M., Pagano A.M. (2016b). Valorization of waste food industry for producing second generation bioethanol. *Advanced Materials Research*, 1139: 3339.
- Dagnino E.P., Chamorro R.E., Romano D.S., Felissia F., Área M.C. (2011). Optimización de tratamiento ácido de biomasa lignocelulósica para la obtención de bioetanol, *Proceedings HYFUSEN*, 12-050.
- Dagnino E.P., Chamorro R.E., Romano D.S., Felissia F., Área M.C. (2013). Optimization of the acid pretreatment of rice hulls to obtain fermentable sugars for bioethanol production. *Industrial Crops and Products*, 42:363.
- Hashem C.N., Darwish S.M.I. (2010). Production of bioethanol and associated by-products from potato starch residue stream by *Saccharomyces cerevisiae*. *Biomass Bioenergy*, 34:953-959.
- INTI. (2013). Utilización actual del suero de quesería. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Ministerio de Industria, Presidencia de la Nación Argentina.
- Kargi F., Ozmihi S. (2006). Utilization of cheese whey power (CWP) for ethanol fermentations: Effects of operating parameters. *Enzyme and Microbial Technol.*, 38: 711-718.
- Megawati, W.B.S., Hary S., Musliikhin H. (2010). Pseudo-homogeneous kinetic of dilute-acid hydrolysis of rice husk for ethanol production: Effect of sugar degradation. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 4(8): 1282-1287.
- MINAGRI. (2016). Producción nacional (millones de litros por año 1970-2015). Ministerio de Agroindustria, Presidencia de la Nación Argentina, http://www.agroindustria.gov.ar/sitio/areas/ss_lecheria/estadisticas/_01_primaria/_archivos/PPV018.php. Acceso: 11/11/16.
- MINAGRI. (2014). Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. <http://www.minagri.gov.ar/site/>. Acceso 10/11/2015.
- Murari C.S., Moraes D.C., Aquino P.L.M., Bueno G.F., Del Bianchi V.L. (2012). Evaluación de la producción de etanol a partir del lactosuero por la levadura *Kluyveromyces marxianus* 229 en condiciones aerobias e anaerobias. VII Congreso Internacional de Ingeniería Bioquímica, Ixtapa-Zihuatanejo Guerrero, México.
- Oda Y., Nakamura K. (2009). Production of ethanol from the mixture of beet molasses and cheese whey by a 2-deoxyglucose-resistant mutant of *Kluyveromyces marxianus*, *FEMS Yeast Re.*, 9: 742-748.
- Ramírez-Navas J.S. (2013). Uso de la fermentación para el aprovechamiento del lactosuero. *Tecnología Láctea Latinoamericana*, 77: 52-61.

