



Cuadernos de Investigación

**PROYECTOS DE GRADO
2008
Artículos**

**ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS
UNIVERSIDAD EAFIT**

ISSN 1692-0694. Medellín. Marzo de 2009. Documento 71- 032009

La Universidad EAFIT aspira a ser reconocida nacional e internacionalmente por sus logros académicos e investigativos.

Para ello desarrolla la capacidad intelectual de sus alumnos y profesores en todos los programas académicos, con la investigación como soporte básico.

-De la visión institucional-

Edición

Dirección de Investigación y Docencia
Universidad EAFIT
Medellín, Colombia

Director

Félix Londoño González

Los contenidos de este documento son responsabilidad de los autores.

Se autoriza la reproducción total o parcial de este material para fines educativos siempre y cuando se cite la fuente.

Serie Cuadernos de Investigación

Carrera 49 7 sur 50

Teléfono (574) 261 95 40

www.eafit.edu.co/investigacion

TABLA DE CONTENIDO

	Página
RESUMEN - ABSTRACT - AUTOR	5
PRESENTACIÓN	7
Desarrollo de un proceso para la obtención de un producto absorbedor de CO ₂ para aplicaciones anestésicas	9
Evaluación del contenido ruminal como suplemento alimenticio para el consumo de ganado bovino ensilándolo con lactobacillus casei	16
Obtención de un agente blanqueador, con base en percarbonato de sodio, a escala piloto	25
Diseño conceptual de un reactor batch para la producción de silicato de sodio a partir de la cascarilla de arroz	34
Tratamiento de aguas residuales por medio de un sistema acoplado de fotocátalisis-humedales	47
Obtención de biodiesel a partir del aceite extraído de la semilla de <i>jatropha curcas</i> I	53
Tratamiento de aguas por electro-oxidación	63
Desarrollo de un proceso a escala laboratorio para la extracción de colorante a partir de la flor del árbol de Majagua.	70
Selección e implementación de un sistema de filtración-ensado para 3 masillas de aplicación en la industria automotriz	77
Desarrollo de una formulación para la elaboración de bloques de resinas de poliuretano para maquinado de prototipos	87
Evaluación de la biodegradación como alternativa para el tratamiento de aguas residuales de una tintorería y lavandería	96
Desarrollo de un embutido crudo cárnico madurado, a partir de carne de ganado angus	107
Análisis del plan de manejo ambiental y de ciclo de vida de los insecticidas clorpirifos y bifentrina para la empresa Polyban Internacional S.A.	113
Micropropagación de <i>cattleya quadricolor</i>	122
Desarrollo de una formulación con base en rizobacterias para la promoción del crecimiento del banano	130

Evaluación de la producción de pectinasas a partir de <i>Aspergillus niger</i> por fermentación en estado semisólido	138
Rediseño de una central premezcladora de material pulverizado	151
Implementación y aplicación de la metodología Six Sigma para la disminución del scrap en la familia colapsibles de la planta de envasado Prebel S.A	167
Diseño conceptual de un proceso de obtención de hemoglobina bovina empleando secado por liofilización	179
Tratamiento de aguas residuales del proceso de desengrase de autopartes con fines de reuso	192
Optimización del proceso de obtención de biodiesel a partir de aceite de higuerilla y aceite de palma mil pesos	198
Diseño conceptual de una planta piloto para la producción de sales para la industria alimentaria	216
Alternativa para la detoxificación de tortas de <i>Jatropha curcas</i> . La escala laboratorio, para su empleo en alimentación animal	227
Estudio de factibilidad para la expansión de una microempresa productora de leche de soya	238
Diseño de un tambor perforado de mezcla para el proceso de compostaje aerobio realizado en la planta de beneficio de la Central Ganadera de Medellín	248

RESUMEN

Este documento contiene los artículos derivados de los trabajos de investigación que como Proyecto de Grado, fueron presentados por los alumnos de Ingeniería de Procesos que se graduaron en la Universidad EAFIT durante el año 2008.

En cada artículo, redactado según los criterios de cada grupo de investigadores, se resumen los aspectos fundamentales del desarrollo del proyecto y sus resultados.

Los informes finales de los trabajos de grado fueron evaluados por ingenieros competentes en cada una de las áreas de estudio, y la responsabilidad de toda la información y resultados consignados tanto en los artículos como en los documentos finales corresponde única y exclusivamente a los autores. Se espera que los resultados obtenidos puedan contribuir al desarrollo de la ciencia y la tecnología en el país.

ABSTRACT

This document is a compilation of articles written by the Process Engineering Students as part of the final works submitted as a requirement for their degrees.

Each article, prepared according to criteria of the different research groups, describes the fundamentals of the project development and its results.

The final reports of the work done by the students were evaluated by competent engineers in each area, but responsibility for all information and results therein corresponds solely to the authors. It's expected that these results will contribute to the development of science and technology in the country.

AUTOR

La recopilación de los artículos fue realizada por el Coordinador de Proyectos de Grado del programa de Ingeniería de Procesos de la Universidad EAFIT.

PRESENTACIÓN

La Ingeniería de Procesos, que es una generalización y extrapolación de las metodologías empleadas en otras ramas de la ingeniería, está orientada a la aplicación sistémica y creativa de los conocimientos en ciencia y tecnología, para el diseño, gestión e innovación de los procesos industriales, especialmente aquellos de naturaleza fisicoquímica y biotecnológica. Esta área de la ingeniería pretende aumentar la competitividad de las empresas de acuerdo con una ética que promueva la protección del ambiente y la seguridad industrial.

Para completar los requisitos necesarios para obtener el título de Ingeniero de Procesos, los alumnos de la Universidad EAFIT deben desarrollar un proyecto de investigación, que contribuya al desarrollo del país y en el cual se introduzca alguna innovación, por pequeña que ésta sea. Los resultados de este proyecto se deben presentar en público para ser evaluado por un Jurado, integrado por dos profesionales competentes en el área de estudio. Además del informe final se debe entregar un artículo para ser publicado en los Cuadernos de Investigación, como forma de divulgación del trabajo que se adelanta en el Departamento de Ingeniería de Procesos.

Como consecuencia de la gran variedad de procesos que puede considerar la Ingeniería de Procesos surge una diversidad de temas de estudio y cada uno se presenta según los criterios de los diferentes grupos de investigación y sus respectivos asesores.

Los informes finales reposan en la Biblioteca “Luis Echavarría Villegas” de la Universidad EAFIT y, además, pueden ser solicitados al Coordinador de los Proyectos de Grado, a la dirección electrónica jdevia@eafit.edu.co.

JORGE E. DEVIA P.

Coordinador de Proyectos de Grado

Departamento de Ingeniería de Procesos

DESARROLLO DE UN PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE UN PRODUCTO ABSORBEDOR DE CO₂ PARA APLICACIONES ANESTÉSICAS

Luisa Fernanda Martínez Moreno - Tatiana Sarmiento Calle

RESUMEN

En este estudio se desarrolla un proceso para la obtención de un producto absorbedor de CO₂ destinado al uso en aplicaciones anestésicas. Inicialmente se desarrolla un estudio de mercado, a partir del cual se pueda determinar principalmente la demanda mensual del producto dentro del mercado objetivo. Posteriormente se realiza un análisis químico y morfológico al producto de la marca ofrecida en el mercado colombiano mediante una Microscopía de barrido electrónico (SEM). Estos resultados, junto con la literatura, sirvieron como punto de partida para los experimentos preliminares; a partir de éstos, se estudia el comportamiento físico-químico y térmico del material en el tiempo, junto con la determinación de las principales características físicas y químicas. Se realiza un análisis comparativo de estos atributos con respecto a lo establecido por la literatura y por el producto comercial. Se determinan los mejores límites tanto de composición química como de condiciones de operación del proceso que van a ser usados dentro del diseño de experimentos. El proyecto incluye consideraciones de obtención y determinación de las cantidades requeridas de materias primas, su posterior mezclado, la producción por extrusión de la pasta obtenida, el proceso de secado, tamizado, la realización de pruebas de eficiencia de absorción de CO₂ del producto utilizando la capnografía y por último la caracterización del producto. En este proyecto se considera como etapa crítica del proceso el secado del absorbedor de CO₂ y como variable crítica dentro de la formulación química del producto, la cantidad de hidróxido de calcio dentro de la mezcla.

Palabras clave

Absorción, CO₂, hidróxido de calcio, sílice, capnografía.

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país que actualmente representa un mercado altamente competitivo en el sector de las cirugías, donde día a día se está presentando un elevado crecimiento del número de procedimientos tanto médicos como estéticos. Tan solo en el 2006 se realizaron en el país 230.000 procedimientos de cirugía estética. Durante estas intervenciones quirúrgicas, es de vital importancia el proceso de anestesia, el cual se define como la privación total o parcial de la sensibilidad provocada con finalidad médica.

Generalmente, durante estas cirugías se emplea la anestesia general, la cual requiere de un respirador que cuente con un sistema de alimentación de oxígeno y de gases anestésicos para mantener las funciones vitales durante la operación. Para economizar el gas fresco y mejorar la temperatura y humedad del gas inhalado, en la mayoría de los casos se emplean circuitos de anestesia cerrados, los cuales se dan con reinhalación del gas espirado y es necesario que cuenten con un sistema de absorción de CO₂, es decir un cilindro O "Canister" relleno del material absorbente de CO₂, el cual permite la reutilización de los gases anestésicos no captados por el paciente durante la anestesia. Actualmente existen varios absorbentes de

CO₂, siendo la soda lime o cal sodada el más empleado universalmente, pues éste ofrece las mejores y más favorables características y propiedades respecto a los demás, como costo, eficiencia y no toxicidad. Ninguno de estos absorbentes se realizan en nuestro país, obligando así a las clínicas y hospitales, a obtenerlos únicamente por importación. Por ello este proyecto representa una alternativa de producción novedosa en el país, la cual podría facilitar los procesos de compra de insumos para cirugías en las clínicas y hospitales de Colombia, al disminuir el período de entrega del producto y a la vez eliminar las medidas arancelarias que están ligadas a la importación del producto.

Debido a lo anterior, un grupo de inversionistas cuestionan la situación actual y manifiestan interés orientado hacia la necesidad de investigar y obtener inicialmente un producto similar absorbente de CO₂ desarrollado a nivel nacional, y posiblemente sustituto de los productos actualmente importados.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto fue desarrollado en los laboratorios de Fenómenos químicos de la Universidad EAFIT, ubicada en Medellín, Colombia.

1.1 Reactivos

Hidróxido de calcio, hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, sílice, agua destilada, fenolftaleína.

1.2 Análisis preliminar Químico y Morfológico del absorbente de CO₂ distribuido en mercado nacional

Se desarrolló un análisis químico y morfológico (SEM), a una muestra de una marca de absorbente de CO₂ que se distribuye en el mercado colombiano, para así conocer los compuestos químicos constituyentes del producto, y a la vez se obtiene la porosidad y morfología de las partículas.

1.3 Determinación de la densidad

La densidad fue medida calculando el peso y el volumen de una probeta en forma cilíndrica o cúbica.

1.4 Determinación del porcentaje de humedad: Peso seco

Se pesan 10 g de la muestra del absorbente de CO₂, para el Diseño de Experimentos. Se calienta la muestra en horno a una temperatura de 105°C durante 2 horas y se deja reposar dentro del deshumidificador durante 2 horas hasta alcanzar la temperatura ambiente. Pesar la muestra a temperatura ambiente y calcular el %Humedad a partir de la siguiente fórmula.

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{\text{Peso Inicial} - \text{Peso Final}}{\text{Peso Inicial}} \right) \times 100$$

(Adriani, 1962).

1.4 Determinación de la dureza: Escala de Mohs

Para la determinación de la dureza de las muestras, se realizan probetas de cada pasta específica a la cual se le determina la dureza al rayarla con varios materiales establecidos por la escala de Mohs.

1.5 Determinación del pH

Para determinar el pH de las partículas del absorbente de CO₂, se siguió un proceso establecido para la medición de pH de un material en polvo o granular: Determinación del pH del Carbón Activado (ICONTEC, 1998).

1.6 Determinación de la eficiencia de absorción

Se evaluó la eficiencia de absorción de las muestras del diseño de experimentos para 650gr, mediante un capnógrafo, equipo que mide la recirculación del CO₂ en el circuito de anestesia y contabilizando el tiempo de saturación de la muestra.

1.8 Prueba de porosidad del producto final: Inyección de nitrógeno gaseoso

Para la determinación de la porosidad del producto final, se emplea la inyección de N₂ gaseoso. La prueba consiste en generar la difusión del gas a través de los poros del material a analizarse. Por diferencia de presión se determina el tamaño de poro del absorbedor de CO₂.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 Química de la absorción

Según la bibliografía hallada y los resultados obtenidos del SEM, se determinaron los componentes del absorbedor de CO₂. Además, su función y las composiciones en peso seco conocidas, se describen a continuación:

Hidróxido de Calcio: Conforman el núcleo del gránulo y es el principal agente reactivo para la absorción química

Hidróxido de Potasio (1%): Forma una cubierta porosa y actúa como activador de la reacción.

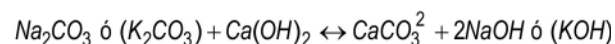
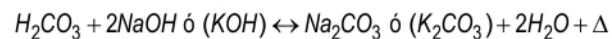
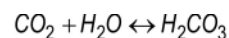
Hidróxido de Sodio (4%): Forma cubierta porosa y actúa como catalizador de la reacción, además incrementa la actividad, pues éste es más reactivo que el hidróxido de calcio.

Sílice: Imparte dureza y a su vez reduce la formación de polvo

Agua: Necesaria para la formación de la pasta y dar al material la humedad indicada.

La reacción de absorción del CO₂ se sabe que es una neutralización, debido a que éste produce ácido carbónico con la humedad presente en el sistema de re-inhalación. El ácido carbónico se disocia en hidrogeniones y la base en iones hidroxilo. La neutralización es la unión de iones de hidrógeno e hidroxilo para formar moléculas de agua, además de la formación de calor durante la reacción (Adriani, 1947).

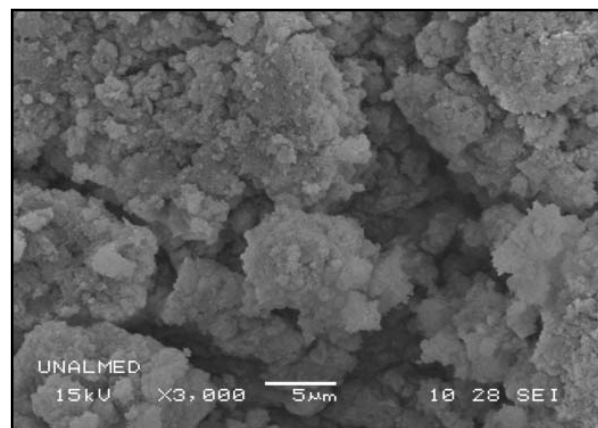
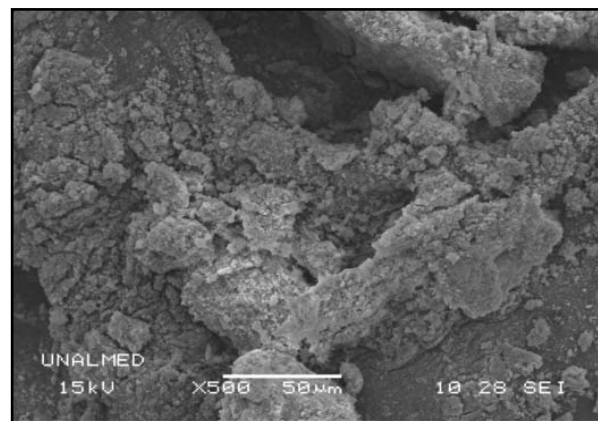
Reacción 1. Reacciones de absorción química del CO₂. (Adriani, 1947).



Análisis químico y morfológico (SEM), del absorbedor de CO₂ distribuido en el mercado nacional

Además de comprobar los compuestos químicos constituyentes del absorbedor, con este escaneo se determina que el material distribuido en el mercado no presenta macroporos, por lo cual se puede determinar que es un material de superficie lisa.

FIGURA 1
Microscopía Electrónica por Escaneo de una marca de absorbedor de CO₂ del mercado



2. Ensayos Preliminares

Para definir aquellas variables del proceso que no se conocían ó de las cuales no se tenía suficiente información, se realizaron inicialmente 3 Ensayos Preliminares, en los cuales se varió parámetros de composición, propiedades físicas y factores del proceso los cuales se observan en la Tabla 1, 2 y 3. De acuerdo a estos parámetros, se estudió como principal variable de respuesta el porcentaje de humedad de la muestra después del proceso de secado, para determinar cuál de los ensayos realizados genera el mejor porcentaje; y adicionalmente se estudió la formación de polvo de las muestras.

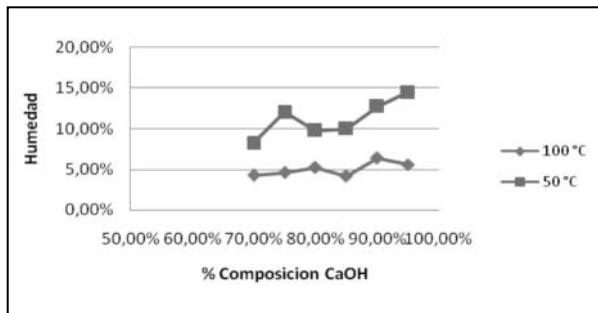
TABLA 1

Condiciones del primer ensayo preliminar

	COMPUESTO	% PESO SECO	
COMPOSICIÓN	Ca(OH) ₂	95	70
	Sílice	0	25
TIEMPO (min)	30 (Constante)		
TEMPERATURA (°C)	50, 100		

FIGURA 1

Humedad vs %Composición CaOH₂



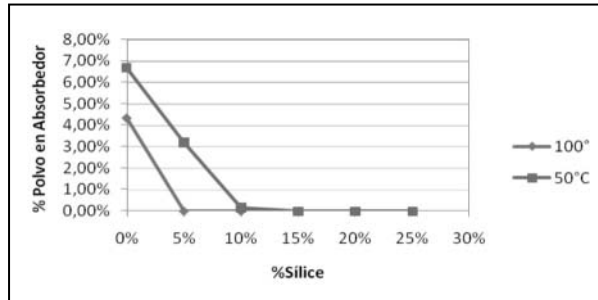
De la figura 1 se puede establecer que a mayor contenido de Ca(OH)₂ en la mezcla, es mayor el porcentaje de humedad en el producto final. En cuanto a la temperatura, a una mayor temperatura se obtiene un menor porcentaje de humedad.

Por lo tanto de esta gráfica se puede concluir que para generar un mejor porcentaje de humedad en la muestra, se requiere emplear una menor temperatura de secado de las partículas y un porcentaje de hidróxido de calcio alto y que

sea promediado con el requerido de sílice para generar la dureza del producto.

FIGURA 2

% Polvo en el absorbedor vs %Sílice



De la figura 2 se puede interpretar que a mayor temperatura se obtiene una mayor dureza del producto, y esto lleva por lo tanto a una menor formación de polvo. Además, en los casos en que no existe presencia de un compuesto endurecedor dentro de la mezcla del absorbedor, el material es realmente frágil y puede fragmentarse después de la etapa de secado, por lo tanto se concluye que es indispensable añadir un porcentaje de Sílice.

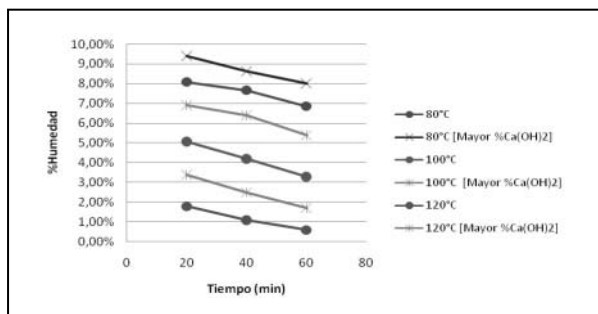
TABLA 2

Condiciones del segundo ensayo preliminar

	COMPUESTO	% PESO SECO	
COMPOSICIÓN	Ca(OH) ₂	90	70
	Sílice	5	25
TIEMPO (min)	20, 40, 60		
TEMPERATURA (°C)	80, 100, 120		

FIGURA 3

% Humedad vs Tiempo



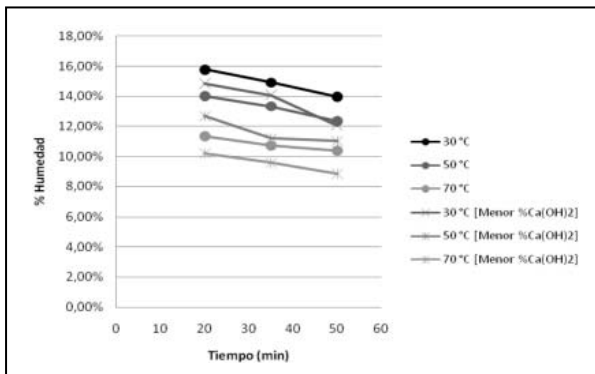
A partir de este segundo ensayo preliminar se determina que una mayor cantidad de hidróxido de calcio en el producto hace que la humedad sea mayor, y ambos valores a mayor presencia en el producto mejor es la eficiencia de absorción. En cuanto al tiempo y a la temperatura de secado, se concluye que a menor sean éstos, mayor es el porcentaje de humedad.

Por lo tanto, se debe trabajar con un porcentaje de hidróxido de calcio mayor a 70% en peso seco del producto, disminuir la temperatura de secado, menor a 80°C y variar el tiempo de secado entre 20 minutos y un valor por encima a éste.

TABLA 3
Condiciones del tercer ensayo preliminar

COMPOSICIÓN	COMPUESTO	% PESO SECO	
	Ca(OH) ₂	90	80
	Sílice	5	15
TIEMPO (min)	20, 35, 50		
TEMPERATURA (°C)	30, 50, 70		

FIGURA 4
%Humedad vs Tiempo



A partir de este tercer ensayo preliminar se determina que a mayor cantidad de hidróxido de calcio en el absorbedor mejor es el porcentaje de humedad del producto final. Mientras que a menor tiempo y temperatura de secado, mayor es el porcentaje de humedad en el producto final.

Por lo tanto, para el desarrollo del Diseño de Experimentos, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos, de acuerdo a los resultados obtenidos de los ensayos preliminares: evaluar la composición química del compuesto en un rango de hidróxido de calcio entre el 80% al 90% de peso seco, el tiempo de secado entre 20 y 50 minutos y la

temperatura de secado estudiarla dentro de un rango de 30°C y un valor menor a 70°C y mayor a 50°C.

2.4 Diseño de Experimentos

Basados en los ensayos preliminares y con el fin de buscar las condiciones óptimas de operación de los factores %Composición de Ca(OH)₂ (C), tiempo de secado(t) y temperatura de secado(T), los cuales afectan el resultado de la eficiencia de absorción de CO₂, se realizó un diseño de experimentos factorial 2³, con los niveles que se observan en la tabla 4. A partir de este diseño de experimentos se obtienen 8 ensayos los cuales se hicieron por duplicado.

TABLA 4
Factores y niveles del diseño de experimentos

		-1	1
C (%)	Si/CaOH ₂	5/90 = 0.06	15/80 = 0.19
t (min)	Tiempo	20	50
T (°C)	Temperatura	30	60

La respuesta óptima hallada se resume en la siguiente tabla:

TABLA 5
Condiciones óptimas de operación

Factor	Inferior	Mayor	Óptimo
Composición Sílice/Ca(OH)	5/90 = 0.06	15/80 = 0.19	5/90 = 0.06
Tiempo (min)	20	50	20
Temperatura (°C)	30	60	30

2.5 Proceso de producción a escala de laboratorio

La producción del absorbedor de CO₂ tanto para los ensayos preliminares como para el desarrollo del diseño de experimentos, se realizó mediante una secuencia de procesos, donde previamente se han seleccionado y pesado las materias primas.

Esta secuencia comienza con la mezcla manual de las materias primas, la extrusión y corte de la pasta, y luego el secado y tamizado de las partículas. Inmediatamente terminada la producción del absorbedor, éste debe ser debidamente empacado, preferiblemente al vacío para

evitar cambios en la humedad final del producto y la absorción del CO₂ del ambiente en el cual se encuentra.

Finalmente a cada ensayo desarrollado se le practicaron las pruebas de calidad, con los métodos anteriormente mencionados en el numeral 2.

Los resultados de estas pruebas junto con algunas características del absorbedor, la formulación, las Propiedades físico-químicas, el Índice de desempeño y los Factores de calidad del producto final obtenido, se muestran en la tabla 6.

TABLA 6
Resultados y descripción final del absorbedor de CO₂

Empaque	
Embalaje primario	Empacado en bolsas plásticas al vacío Contenido: 2.5Kg/bolsa
Formulación	
Componente	%Peso seco
Hidróxido de calcio	90
Hidróxido de Sodio	4
Hidróxido de potasio	1
Arena de Sílice	5
Propiedades Organolépticas	
Color	Blanco
Olor	Inodoro
Apariencia	Gránulos sólidos irregulares
Propiedades Físico Químicas	
%Humedad	17,93%
Tamaño de partícula	4-8 mesh
Densidad	1.316 g/cm ³
Dureza	Número1 (Escala de Mohs) 20Kg/mm ² (Dureza Knoop)
pH	12.04 (T=25,2°C)
Volumen de poro	0,000069 cm ³ /g-nm
Tamaño de poro	8nm (mesoporo)
%Polvo	0% +/-0,77%
Solubilidad en agua	Baja (formación de suspensiones acuosas alcalinas)
Índice de Desempeño	
Tiempo de Saturación	13,62h

CONCLUSIONES

En Colombia existe un mercado para la comercialización del absorbedor de CO₂, el cual le da mayor importancia a la calidad y funcionalidad del producto que a su precio de venta, debido a la necesidad de su uso durante los procedimientos quirúrgicos que requieran anestesia general. Sin embargo, en la actualidad, la oferta de las diferentes marcas del producto que se comercializan en el país es importada, lo cual indica que al existir un mercado

dispuesto a comprar el absorbedor en Colombia, la idea del desarrollo a nivel nacional de este producto, que cumpla con los índices de desempeño y factores de calidad mejores o iguales a las marcas actuales, se convierte en una oportunidad de negocio para diversos inversionistas.

Por lo tanto, el absorbedor de CO₂ desarrollado presenta: Excelente calidad y funcionalidad, empaque más ergonómico, mayor durabilidad, fácil acceso de obtención del producto, no es tóxico y un porcentaje de polvo despreciable. Para su producción se estable una secuencia de pasos que contempla: mezclado, extrusión, corte, secado y tamizado. Dentro de estos el control más importante para garantizar las propiedades físicas y químicas del producto debe estar en el proceso de secado.

Además, con este estudio se establecen las condiciones óptimas de operación para el proceso de obtención de un absorbedor de CO₂ a escala laboratorio: Tiempo de secado de 20 minutos, temperatura de secado a 30°C y una composición en peso seco con un 90% de Hidróxido de calcio, un 4% de Hidróxido de sodio, un 1% de Hidróxido de potasio y un 5% de Arena de sílice.

El estudio de la morfología del producto final, indica que éste es un material de superficie lisa, por lo tanto, se presentan fenómenos de superficie y no de difusión, lo que indica que el CO₂ es eliminado del circuito por una absorción química realizada por el producto desarrollado.

Bajo las condiciones de operación y producción anteriormente descritas, se podría intuir que el proceso de obtención de un producto absorbedor de CO₂ es un proyecto justificable desde el punto de vista económico.

REFERENCIAS

- AAKER D., KUMAR V., DAY G. 2001. Investigación de Mercados. México. Pág. 315.
- ADRIANI, J. 1947. Chemistry of anesthesia. M.D. Second printing. Springfield, Illinois, U.S.A. p.p. 72-73.
- ADRIANI, J. 1962. The Chemistry and Physics of anesthesia. Second printing. Editorial Charles C.

- ANÓNIMO1. 2007. Anestesia general. Disponible en: (pagina web). <http://www.google.com.co/search?hl=es&q=etapas+anestesia+general&meta=> (Consultado en Diciembre 15 de 2007).
- ASCANIO, A. 2007. "Conceptos sobre el tamaño de una muestra". Disponible en (página web): <http://alfredoascanio.blogspot.com/2007/01/conceptos-sobre-el-tamao-de-una.html>. (Consultado en Enero 15 del 2008).
- BADEN, W. 2002. Catálogo de productos químicos de la MERCK. Alemania.
- BRIGHAM, E. F. 2006. Fundamentos de administración financiera. Décima Edición. México: Editorial Thomsom. México.
- BUSH, P 2000. Técnicas de anestesia. México DF. p-p 25
- CHIN, D, 2005. Calcium hydroxide absorbent with rheology modifier and process involving same. United State Patent: US 6.867.165 B2.
- CLARKE, M. J. 2004. Carbon dioxide absorbent formulations. United States Patent 20040029730 Disponible en: (página Web). <http://www.freepatentsonline.com/20040029730.html> (Consultado el 16 de julio de 2007).
- D'ESTE, J. P. 2000. Circuitos anestésicos. Disponible en: (página Web). <http://www.academia.cat/societats/dolor/deste1.htm> (Consultado en junio 11 de 2007).
- DORSCH, J. A. y DORSCH, S. 1984. Understanding Anesthesia Equipment. Construction, care and complications. Second Edition. U.S.A.
- FLÓREZ, C.E. y SOTO, V.E. 2007. "Colombia. Avances y desafíos de la equidad en el sistema de salud colombiano. Fundación CORONA. Colombia. Disponible en (página web): <http://www.fundacioncorona.org.co/salud/publicaciones3.htm>. (Consultado en Enero 22 de 2008).
- HURLBUT, C. S, KLEIN, C. 1984. Manual de mineralogía de Dana. Edición 19. Barcelona: Ed. Reverté S. A.
- ICONTEC, 1998. Norma Técnica Colombiana. NTC4467. p.p. 9-10.
- JUNIOT, A (et, al.). 1999. Absorption du gaz carbonique. Paris: Elsevier. Paris. Vol 18
- KEITH, H, WONG S.C. 2005. Measurement of CO2 soil efflux using soda lime absorption: both qualitative and reliable. En: Soil biology & biochemistry. Vol 38 pp. 1121-1131
- KOTLER, P, LANE, K. 2006. Dirección de Marketing. Editorial PRENTICE HALL. España.
- MOSA GRAJALES, D. H. 2004. Introducción al estudio de los materiales no metálicos (polímeros, cerámicos y compuestos). Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.
- MURRIA, J M BEDI, A. 2000. Carbon Dioxide Absorption during Anesthesia. Scientific Principles of Anesthesia. Royal College of Anesthetists Newsletter January 2000, Issue No.50.
- PATIÑO M, W. 2000. Anestesiología. Fundamentos de Cirugía. Capítulo II El equipo de anestesia. Segunda edición. Medellín: Corporación para Investigaciones Biológicas
- PLANCHAR, F. 2006. "Cambio extremo en cirugía plástica estética". Disponible en (página web): <http://www.periodicoelpulso.com/html/dic06/debate/debate-01.htm>. (Consultado en Diciembre 10 del 2007).
- SAKATA. 1991. Acid gas absorbent and process for production thereof. Japan. United State Patent: US 5,030,610.
- TONO R, T.M. 2002. "Los hospitales colombianos en el contexto de Latinoamérica y el Caribe". Fundación CORONA. Colombia. Disponible en (página web). <http://www.fundacioncorona.org.co/salud/publicaciones3.htm>. (Consultado en Diciembre 22 de 2007).
- WEIERS, R.M. 1986. Investigación de Mercados. Primera edición. Editorial PRENTICE HALL. México.

EVALUACIÓN DEL CONTENIDO RUMINAL COMO SUPLEMENTO ALIMENTICIO PARA EL CONSUMO DE GANADO BOVINO ENSILÁNDOLO CON *Lactobacillus casei*

Diana Acevedo - Luisa Fernanda Buitrago - Valeska Villegas - Juan Manuel Cerón

RESUMEN

El contenido ruminal es un subproducto obtenido del sacrificio de ganado bovino y por tiempos ha sido arrojado a ríos y quebradas cercanas a los frigoríficos produciendo un alto impacto ambiental debido a la carga orgánica que este contiene. En esta investigación se evaluó otra alternativa de uso para la ruminaza, la cual consistía en ensilar este material con el fin de obtener un suplemento alimenticio para el ganado bovino y de esta forma aprovechar sus nutrientes. En el ensilaje se evaluaron diferentes formulaciones líquidas con *Lactobacillus casei* ATCC 7469 con base en agua, aceite y una emulsión agua – aceite. Después de obtener los resultados de este experimento se evaluó la formulación que arrojó los mejores resultados con diferentes dosificaciones en el ensilaje. Finalmente el contenido ruminal ensilado de este último ensayo se llevó a una finca lechera para realizar las pruebas de consumo en ganado bovino. En los procesos de ensilaje realizados se midió pH, olor, color y se elaboraron análisis bromatológicos donde se evaluaron diferentes parámetros nutricionales como porcentajes de materia seca, humedad, proteína, cenizas, fibra en detergente ácido (FDA), y fibra en detergente neutro (FDN). Aunque algunos de los parámetros a tener en cuenta en el proceso de ensilaje fueron óptimos como el pH, % FDA y % FDN, el contenido ruminal ensilado después de 35 días fue rechazado por el ganado bovino.

Palabras clave

Contenido ruminal, ensilaje, *Lactobacillus casei*, formulaciones líquidas.

INTRODUCCIÓN

El contenido ruminal también conocido como “ruminaza” es un subproducto originado del sacrificio de animales, se trata del primer estómago del bovino en el cual al momento del sacrificio contiene todo el material que no alcanzó a ser digerido. Posee una gran cantidad de flora y fauna microbiana y productos de la fermentación ruminal, por esto se puede decir que es una alternativa para la alimentación de rumiantes, pollos y cerdos de engorde por sus características químicas, biológicas, bromatológicas, microbiológicas y su amplia disponibilidad (Trillos *et al.*, 2007).

En la mayoría de las plantas de sacrificio del país, la producción del contenido ruminal alcanza anualmente unas 85,000 toneladas (Cadavid, 2001), éste es un índice alto de contaminación ya que se produce una alta carga orgánica en los efluentes que por su forma de depósito llegan a fosas sépticas, basureros municipales y aguas residuales fomentando la contaminación (Domínguez y Barajas, 1993; Ayala y Perea, 2000).

El ensilaje es una técnica que tiene como objetivo la preservación de los nutrientes originales de los forrajes, especialmente los componentes energéticos y proteínicos (Bernal y Chaverra, 2000). Este proceso tiene un valor agregado al convertir los forrajes en alimento para animales, que para los bovinos en crecimiento puede contener parte de los nutrientes necesarios para su desarrollo y puede economizar parcialmente el costo de los alimentos concentrados.

Con este proyecto se busca otra fuente de alimentación para el ganado diferente a los concentrados utilizando el ensilaje con *Lactobacillus casei*. En la planta de sacrificio de FrigoColanta no se le ha dado un tratamiento al contenido ruminal para convertirlo en un suplemento alimenticio para bovinos, esto podría representar un beneficio para la empresa ya que se reducen los costos por el consumo de alimento concentrado y se aprovecha un desperdicio generado en el proceso.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 Microorganismo

Para las formulaciones líquidas se utilizó *Lactobacillus casei* ATCC 7469 proveniente de "The Global Bioresource Center™". Este microorganismo fue conservado en crioviales a -4° C.

Se tomó una perla crioconservada y con un asa se extendió sobre medio MRS sólido en una caja Petri. La caja se incubó en el shaker durante 32 horas a 37° C. Este procedimiento se realizó por duplicado. Una vez finalizado este tiempo, se conservaron las cajas Petri a 4° C y se utilizaron como fuente de trabajo (Suárez, 2007).

1.2 MEDIO DE CULTIVO

El medio de cultivo sólido utilizado fue el agar MRS Man, Rogosa y Sharpe (1960): Glucosa (30 gr/L), extracto de levadura (10 g/L), KH_2PO_4 (0,5 g/L), K_2HPO_4 (0,5 g/L), Citrato de sodio (1 g/L), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,0005 g/L), $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (0,0031 g/L), $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,02 g/L), Acido ascórbico (0,005 g/L), Agar – Agar (13 g/L). Una vez preparado el medio de cultivo este fue esterilizado en una autoclave horizontal EASTERN modelo EA – 620 a 121°C, a 15 psig durante 20 minutos.

El medio de cultivo líquido para la producción de biomasa de *L. casei*, contenía la misma composición que el medio MRS, a excepción del agar-agar, y se le adicionó 15 g/L de CaCO_3 con el fin de controlar el pH (Suárez, 2007). El pH del medio de cultivo se ajustó a un valor de 5.5.

1.3 Producción de biomasa de *Lactobacillus casei*

El preinóculo se realizó adicionando tres asadas de la bacteria obtenida en caja Petri en 20 mL de medio MRS en un erlenmeyer de 100 mL y se incubó a 37° C, 150 rpm por 32 horas obteniéndose una densidad óptica de 2.07. Posteriormente, el preinóculo fue transferido a 180 mL de medio MRS en erlenmeyers de 500 mL y se cultivó bajo las mismas condiciones por 32 horas.

1.4 Desarrollo de formulaciones líquidas

Se desarrollaron tres formulaciones líquidas. La formulación en base agua contenía 3% de CMC grado alimenticio y farmacéutico (Química Amtex), con el fin de mantener las partículas de biomasa en suspensión, y se llevó a agitación en plancha a una velocidad de 1500 rpm durante 30 minutos. Todos los materiales fueron esterilizados previamente por separado a una temperatura de 121°C y 15 psig durante 20 minutos.

Para la formulación en aceite se utilizó como vehículo aceite de girasol Premier. Se agitó en plancha a una velocidad de 1500 rpm durante 40 minutos.

Para la preparación de la emulsión se utilizó un 70% de agua desionizada y un 30% de aceite de girasol. Para lograr la homogenización de los dos compuestos se adicionó goma xantana a una concentración del 0.3%, también se adicionó Tween 20 a una concentración del 1.2%. Una vez mezclados todos los reactivos se licuó la emulsión durante 10 minutos.

Para ello, el caldo de fermentación se distribuyó en tubos falcon de 15 mL previamente esterilizados, se adicionaron 12 mL en cada tubo y se centrifugaron a una velocidad de 4500 rpm durante 20 minutos. Posteriormente el sobrenadante fue descartado y el pellet fue resuspendido en 12 mL de su vehículo correspondiente, finalmente esta mezcla fue adicionada en un frasco esterilizado. Para cada frasco se utilizaron 42 tubos falcon hasta completar un volumen de 500 mL.

1.5 Viabilidad de las formulaciones líquidas

A las formulaciones líquidas que se desarrollaron en el laboratorio se les realizó una evaluación de UFC (Unidades formadoras de colonia) por mililitro cada mes durante cuatro meses por medio del método de dilución seriada en placa. Esta evaluación se realizó con el fin de determinar la viabilidad de las formulaciones en el tiempo (Moreno, 2005; Zúñiga, 2005).

La medición de unidades formadoras de colonia se realizó a las formulaciones desarrolladas con base en agua, aceite y emulsión de *L. casei* conservadas a 4 ° C y 25 ° C. Para ello se tomó 1 mL de la muestra y se disolvió en 9 mL de su vehículo respectivo. Posteriormente se realizaron diluciones seriadas hasta 10^{-7} y se platearon 100 μ L de las diluciones 10^{-5} a 10^{-7} por vaciado en superficie en agar MRS por triplicado. Las cajas Petri fueron incubadas a 28°C por 24 h para el conteo de unidades formadoras de colonia por mL (UFC/mL).

1.6 Diseño metodológico

En la planta de FrigoColanta se realizó el ensilaje del contenido ruminal proveniente del sacrificio del ganado bovino en bolsas de polietileno. Esta ruminaza fue transportada a un lugar aislado dentro de la planta con el fin de evitar el problema de contaminación cruzada.

Se realizó un primer ensilaje al cual se le realizó un diseño de experimentos unifactorial donde el factor a evaluar fue el tipo de formulación con cinco niveles por cuadruplicado. Las formulaciones líquidas fueron aquellas desarrolladas en el proyecto (agua, aceite, emulsión), adicionalmente se evaluaron el producto comercial Sill All y se realizó un control sin inoculación alguna.

El ensilaje se realizó en bolsas de polietileno, donde se introdujeron 52 Kg de ruminaza y 1 Kg la melaza como fuente de carbono. En cada bolsa se adicionaron las

diferentes dosis de cada formulación: 104 mL de agua, 104 mL del aceite, 104 mL de la emulsión y 104 mL del Sill All, respectivamente. Las bolsas se cerraron completamente con cabuya y se eliminó toda la cantidad de aire posible. Se almacenaron durante 30 días a una temperatura ambiente aproximada de 16°C en un cuarto techado.

Una vez finalizado el proceso de ensilaje, se tomaron muestras compuestas, cada una de 125 gramos y se mezclaron hasta completar 500 gramos. A las cinco muestras (formulación agua, aceite, emulsión, Sill All® y control) se les realizaron los siguientes análisis bromatológicos: % materia seca, % de humedad, % de proteína, % de cenizas, % de Fibra en detergente ácida (FDA) y % de fibra en detergente neutra (FDN). A las muestras compuestas también se les determinó el valor de pH con un pHmetro marca WTW, y cualitativamente se determinó su color y olor como variables cualitativas con un valor de 1 para olor a vino-fermentado y color naranja, hasta 5 para olor a estiércol y color negro.

Posteriormente se realizó un segundo ensilaje donde se variaron las dosis de la formulación que mejor resultado arrojó en el primer proceso de ensilaje, en este caso fue la emulsión aceite en agua, y se comparó con diferentes dosis del producto comercial Sill All® y un control negativo.

Para realizar la dosificación del Sill All®, se inoculó con un porcentaje del 25% por encima y por debajo del valor establecido por las UFC, para la emulsión se realizó el mismo procedimiento. En la tabla 3 se muestran las diferentes dosis aplicadas en el ensilaje.

TABLA 3
Porcentajes de inoculación para el producto comercial y la formulación líquida

% de inoculación	Sill All (mL)	Emulsión (mL)
1	78	40
2	104	55
3	130	70

Adicionalmente se realizó un análisis unifactorial para realizar una comparación entre el producto comercial, la emulsión y el control.

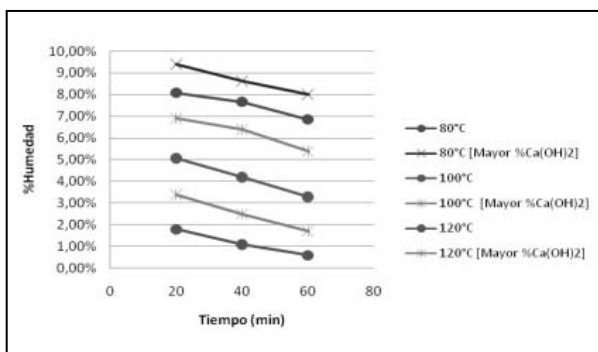
2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 Viabilidad de las formulaciones líquidas

La mayor concentración de biomasa que se obtuvo fue de 3.62 g/L \pm 0.03 a las 25 horas de la fermentación.

La determinación de la viabilidad de las formulaciones líquidas es de gran importancia a la hora de comercializar un producto y de cumplir con las normas técnicas ICA, según la resolución 0375 del 2004 por la cual se dictan las disposiciones sobre registro y control de los bioinsumos y los extractos vegetales de uso agrícola en Colombia. Para ello, se realiza periódicamente la evaluación de UFC/mL en el tiempo con el fin de garantizar la viabilidad del producto (Figura 3).

FIGURA 3
Viabilidad de *L. casei* en diferentes formulaciones



Las formulaciones líquidas conservadas a 4°C presentaron mejores resultados de viabilidad ya que a esta temperatura se da la gelificación de la membrana plasmática y el transporte se hace tan lento que no hay crecimiento del microorganismo (Madigan *et al.*, 2004), por lo tanto la bacteria se conserva adecuadamente en estas condiciones.

Las membranas contienen tanto proteínas como lípidos, la mayoría de ellos asociados a membranas son estructuralmente asimétricos, con extremos polares hidrofílicos y no polares hidrofóbicos. Esta propiedad de los lípidos les confiere la capacidad de formar membranas en bicapa (Prescott, 2002). El aceite mineral forma una capa

que protege el microorganismo, por lo tanto la transferencia de oxígeno entre el medio externo y el *L. casei* disminuye, y por esto el microorganismo se encuentra latente. Este fenómeno también podría estar ocurriendo con el aceite vegetal, y por esta razón se dio una mejor viabilidad de las células en la emulsión, que adicionalmente contiene un gelificante (goma xantana) y Tween 20 que puede hacer más compacta esta capa.

2.2 Ensilaje del contenido ruminal

Los resultados para el primer y segundo proceso de ensilaje con diseño de experimentos unifactorial se muestran en la tabla 3 y 4 respectivamente.

A continuación se muestran los valores reportados en la literatura para las variables de respuesta del ensilaje de contenido ruminal:

El rango óptimo establecido para el valor de pH en un ensilaje de buena calidad está entre 3.8 – 4.2 (Bernal y Chaverra, 2000). A medida que disminuye el pH se hace más eficiente el proceso del ensilaje ya que la acidez de los pH bajos contribuyen a la conservación del ensilaje evitando la descomposición del mismo (Trillos *et al.*, 2007).

Para el olor y el color, entre más cercano a uno sea el valor va a indicar una mejor calidad del ensilaje. Para realizar el ensilaje del contenido ruminal es necesario que no haya material de color negro que puede indicar una mala calidad del ensilaje (Colanta, 2007).

El contenido de materia seca aumenta la concentración de nutrientes, facilita los procesos fermentativos y disminuye la capacidad de acción de los clostridios (Soto *et al.* 2002). Según Bertoia, 2004, el rango óptimo de materia seca del ensilado debe estar entre 30 – 35% para ser considerado como un ensilaje de buena calidad.

El contenido de humedad óptimo en ensilaje de forrajes debe estar entre 60-70% según Bertoia, 2004. En un estudio realizado por Trillos *et al.*, 2007, se registran valores de humedad entre 37.08 – 42.97%, y un valor similar (43%) fue reportado por Sabogal *et al.* 1987. En ensilajes con un alto contenido de humedad se producen mayores cantidades de

efluentes que son responsables de la pérdida de nutrientes altamente digestibles (Soto *et al.* 2002).

Un alimento o una dieta debe contener aproximadamente un 7% de proteína para garantizar nitrógeno suficiente para una fermentación microbiana efectiva en el rúmen (Oramas y Vivas, 2007).

El contenido de cenizas representa la materia orgánica (o minerales) del alimento, así como los contaminantes orgánicos, tales como tierra y arena (García *et al.*, 2005). En la literatura se reportan valores del contenido de cenizas de 2.86 - 3.55% para un ensilaje de contenido ruminal y harina de sorgo (Trillos *et al.*, 2007). Estos bajos valores de ceniza obtenidos en este estudio indican que no hubo una alta presencia de contaminantes orgánicos en el ensilaje.

La fibra detergente neutra (FDN) está compuesta de hemicelulosa, celulosa y lignina. La celulosa y hemicelulosa de los forrajes son completamente digestibles, pero la lignina es casi indigerible y su presencia puede inhibir total o parcialmente la digestión de los otros constituyentes orgánicos (Bertoia, 2004). En la literatura se han reportado valores de 73.39% (Rivas *et al.*, 2006) y 47-60.9% (Nuñez *et al.*, 2005) para granos. Aunque los valores obtenidos están por debajo de los reportados, un bajo contenido de FDN puede garantizar un buen ensilaje, porque según Chalupa *et al.* (1996), la FDN estima la capacidad de los alimentos de ocupar volumen en el tracto gastrointestinal, por lo que generalmente se asocia con el llenado físico del animal, y al aumentar los valores de FDN, el consumo total de ensilado disminuye.

La fibra detergente ácida (FDA) incluye celulosa y lignina y como se mencionó anteriormente esta última es casi indigerible y su presencia puede inhibir total o parcialmente la digestión de los otros constituyentes orgánicos (Bertoia, 2004) Entre algunos de los datos reportados se encuentra Archila, 1989 que obtuvo 46.01% de FDA y Rivas *et al.* (2006) con 43.63% para granos. Los valores

obtenidos de FDA en este estudio están por debajo de los datos reportados, pero como la FDA se correlaciona negativamente con la disponibilidad de energía del forraje (Di Nucci *et al.*, 2004), se puede decir que bajos valores de FDA aumentan la digestibilidad del alimento y la energía que contendrá.

Los resultados obtenidos en cada parámetro evaluado son similares a los valores obtenidos con el control, esto indica que la dosis o la formulación aplicada no tiene un efecto significativo en el ensilaje ya que el contenido ruminal contiene una gran cantidad de microorganismos que pueden competir con el *Lactobacillus casei* e inhibir su crecimiento.

2.3 Pruebas de consumo

Al finalizar el tiempo de ensilaje del contenido ruminal, el material se llevó a una finca lechera donde se realizaron las pruebas de consumo. El contenido ruminal ensilado se dispuso en nueve comederos para 16 novillas Holstein y 4 novillas F1 Jersey x Holstein, de 18 a 24 meses de edad y con peso entre 300 y 350 Kg., a una hora a la cual acostumbran a consumir alimento concentrado. La alimentación básica del grupo de animales es forraje de pasto kikuyo fertilizado y gramas nativas, sal mineralizada del 4% de fósforo y agua a voluntad. Se les suministra 1 Kg. de alimento concentrado diariamente por cada animal.

Ante la prueba de consumo se encontró baja palatabilidad del contenido ruminal, este término se refiere al grado de aceptación del animal en cuanto al sabor, olor y textura del alimento. Las novillas evaluadas demostraron rechazo a las características organolépticas del contenido ruminal y no presentaron consumo del producto.

El contenido ruminal contiene un olor característico el cual no es muy agradable, después de la fermentación se obtuvo un ligero olor a fermentado. El color que se obtuvo fue marrón claro, pero dada la apariencia de este material no se logró que el producto fuera llamativo a las novillas y por lo tanto hubo un rechazo hacia este.

TABLA 4
Resultados de las características físicas y nutricionales del primer ensilaje

Formulación	pH	Olor	Color	% Materia Seca	% Humedad	% Proteína	% Cenizas	% FDA	% FDN
Agua (W)	4.75 (b)	3.33 (b)	3.33 (b)	22.49 (b)	77.51 (c)	4.6 (c)	3.40 (b)	8.21 (a)	11.93 (a)
Aceite (O)	4.34 (a)	3 (c)	3 (c)	27.59 (c)	72.38 (b)	2.46 (ab)	3.35 (b)	9.77 (c)	16.06 (c)
Emulsión (E)	4.11 (a)	1.5 (b)	1.5 (b)	28.49 (c)	71.51 (b)	3.42 (bc)	3.68 (b)	9.32 (bc)	13.83 (b)
Control (C)	4.29 (a)	2.33 (a)	2.33 (a)	31.24 (d)	68.76 (a)	2.80 (ab)	3.40 (b)	8.912 (b)	14.33 (b)
Sill All (S)	5.01 (c)	4.5 (c)	4.5 (c)	15.86 (a)	84.14 (d)	1.53 (a)	2.26 (a)	8.71 (ab)	11.55 (a)
VALOR p	0.0003	0.0097	0.0097	0.00	0.00	0.0398	0.01	0.0153	0.0029

TABLA 5
Resultados de las características físicas y nutricionales del segundo ensilaje
bajo un diseño de experimentos unifactorial

Formulación	pH	Olor	Color	% Materia Seca	% Humedad	% Proteína	% Cenizas	% FDA	% FDN
Emulsión I1 (E1)	4.51 (a)	1.67 (a)	1.67	21.33 (a)	78.67 (a)	1.585 (a)	3.285 (a)	7.87 (a)	11.32 (a)
Emulsión I2 (E2)	4.65 (a)	1.67 (a)	1.67	18.96 (a)	81.04 (a)	3.485 (a)	2.76 (a)	8.02 (a)	11.1 (a)
Emulsión I3 (E3)	4.80 (a)	2 (a)	2	22.24 (a)	77.765 (a)	3.67 (a)	3.115 (a)	7.98 (a)	12.21 (a)
Sill All I1 (SI1)	4.56 (a)	2.33 (a)	2.33	19.77 (a)	80.235 (a)	3.345 (a)	3.39 (a)	7.18 (a)	10.715 (a)
Sill All I2 (SI2)	4.86 (a)	2.67 (a)	2.67	18.12 (a)	81.885 (a)	2.64 (a)	2.81 (a)	6.325 (a)	9.99 (a)
Sill All I3 (SI3)	4.60 (a)	3.33 (a)	3.33	19.19 (a)	80.815 (a)	2.92 (a)	2.74 (a)	7.25 (a)	11.90 (a)
Control	4.69 (a)	2.67 (a)	2.67	22.80 (a)	77.21 (a)	3.10 (a)	3.26 (a)	7.71 (a)	11.995 (a)
VALOR p	0.1038	0.017	0.017	0.1205	0.1205	0	0.1129	0.0008	0.0008

* Los valores sombreados son los mejores resultados de cada ensayo.

* Letras diferentes representan diferencias significativas.

3. CONCLUSIONES

Las tres formulaciones desarrolladas con base en agua, aceite y emulsión aceite en agua presentaron condiciones fisicoquímicas adecuadas para mantener la viabilidad de *L. casei* por encima de 10^7 UFC/mL después de 4 meses de evaluación. En este caso, la emulsión aceite en agua presentó las mejores condiciones para el mantenimiento de la viabilidad de los microorganismos, logrando obtener después de 4 meses una concentración de $4,26 \cdot 10^8$ UFC/mL a 4°C.

De las formulaciones desarrolladas con base en *L. casei* e inoculadas en el contenido ruminal del ganado bovino, ninguna logró desempeñarse mejor que el control en cuanto a los análisis fisicoquímicos (pH, olor y color). Para los análisis bromatológicos del primer ensilaje, el agua presentó los mayores niveles de proteína, y los menores niveles de FDN y FDA; y el control los mayores niveles de materia seca correspondiente a los menores niveles de humedad.

La formulación líquida con base en *L. casei* más apropiada para el ensilaje del contenido ruminal fue la emulsión aceite en agua, ya que se obtuvo el valor de pH más bajo (4.11), y el mejor valor de olor y color, indicando una buena calidad del ensilaje y una buena fermentación ácido láctica.

El segundo ensilaje del contenido ruminal muestra que la mayoría de los resultados fisicoquímicos y bromatológicos dependen de la formulación mas no del nivel de dosificación de las formulaciones en las cantidades evaluadas.

El ensilaje del contenido ruminal del ganado bovino con *L. casei*, no generó los resultados obtenidos por otros investigadores con forrajes, ya que posiblemente la ruminaza posee una gran cantidad de flora y fauna microbiana que puede competir con este microorganismo bajo dichas condiciones ambientales.

El contenido ruminal ensilado es bajo en componentes nutricionales (proteína, FDA, FDN), por lo tanto no puede ser utilizado como un suplemento alimenticio para ganado bovino.

Las novillas Holstein y F1 Jersey x Holstein de 18 a 24 meses de edad rechazaron el contenido ruminal ensilado y la combinación de contenido ruminal ensilado- concentrado.

4. BIBLIOGRAFÍA

Archila, C. W. 1989. Evaluación nutritiva de maíz y sorgo forrajero ensilado con excreta y melaza. Tesis de MC. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. p. 113.

Ayala G.; Perea T.F. 2000. Reciclado de materiales orgánicos de desperdicio a escala industrial. Revista grupo ecológico. p. 200-209.

Bernal, J; Chaverra, H. 2000. El ensilaje en la alimentación del ganado vacuno. IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). Tercer Mundo Editores. p. 15,16, 43, 51.

Cadavid C. 2001. Diseño Tecnológico para el aprovechamiento de subproductos del beneficio de bovinos en el matadero frigorífico de Coolesar. Tesis de Grado para Optar al Título de Ingeniero Agroindustrial. Facultad de Ingeniería. Universidad Popular del Cesar. Valledupar. Cesar. Colombia.

Chalupa, W.; Galligand, D.; Ferguson, J. 1996. Animal nutrition in the XXI century. Animal Feed Science and Technology: 58. p. 1-18.

Domínguez C.J.E.; Barajas C.R. 1993. Utilización del contenido ruminal en dietas integrales para borregos de engorda. Memorias del XVIII congreso nacional de Buitría. México, D. F. p. 318-320.

Doran, P. 2002. Bioprocess Engineering Principles. Elsevier Academic Press. p. 277.

García, A.; Thiex, N.; Kalscheur, K.; Tjardes, K. 2005. Interpretación del análisis del ensilaje de maíz. College of Agriculture and Biological Sciences. South Dakota State University. p. 2.

Guoqiang, D.; Kaul, R.; Mattiasson, B. 1991. Evaluation of alginate immobilized *Lactobacillus casei* for lactate production. *Applied Microbiology Biotechnology* 36. p. 309-314.

Karlen, D.L.; Camp, C.R.; Zublena J.P. 1985. Plant density, distribution and fertilizer effects on yield and quality of irrigated corn silage. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 16. p. 16-55.

Luedeking, R. Piret, E. 2000. A kinetic study of the lactic acid fermentation. Batch process at controlled pH. *Biotechnology and Bioengineering*. Vol. 67. No. 6. p. 393 – 401.

Madigan, M.T.; Martinko, J.M.; Parker, O. 2004. *Biología de los microorganismos*. Prentice Hall. p. 151.

Núñez, H. G.; Faz, R.; González, F.; Peña, A. 2005. Madurez de híbridos de maíz a la cosecha para mejorar la producción y calidad del forraje. *Téc. Pec. Méx.* 43(1) p. 69-78.

Oramas, C.; Vivas, N.J. 2007. Evaluación de dos híbridos y una variedad de maíz (*Zea mays*) en monocultivo y en asociación con frijol (*Phaseolus vulgaris*), para ensilaje. *Facultad de ciencias agropecuarias*. Vol. 5. No. 1. p. 33-34.

Pelczar, J.M. 1984. *Elementos de microbiología*. Mc Graw Hill, México. p. 253-283.

Prescott, H.K. 2002. *Microbiología*. Quinta Edición. México: Mc Graw Hill. p. 49.

Sabogal, R.; Poveda, C.; Moncada, A. 1987. Alimentación de cerdos con ensilaje de contenido ruminal. Bogotá: Actualidades técnicas. ICA. Vol. 4.

Soto, P.; Jahn, E.; Arredondo, S. 2002. Población y fertilización nitrogenada en un híbrido de maíz para ensilaje en el valle central regado. *Agric. Téc. (Chile)* 62. pp. 255-265.

Suárez, D. 2007. Evaluación y simulación de la producción de ácido láctico con *Lactobacillus casei* ATCC 7469. De-

partamento de Ingeniería de Procesos. Universidad EAFIT. p. 45-47.

Vargas, E.M.; Gómez, C.J.; Parra, M.E.; Romero, M.A. 2004. Producción de microorganismos probióticos como aditivo para alimentos concentrados para ganado vacuno (primera parte). *Revista Facultad de Ingeniería*. Universidad de los Andes. p. 167-176.

5. CIBERGRAFÍA

Bertoia L. 2004. Algunos conceptos sobre ensilaje. *Facultad de ciencias agrarias*. Universidad Nacional de Lomas de Zamora. <http://mejorpasto.com.ar/UNLZ/2004/TX3.htm>

Di Nucci, E.; Díaz, M.G.; Pasinato, A. 2004. Producción de forraje y calidad de silaje de híbridos de maíz. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. http://www.inta.gov.ar/parana/info/documentos/produccion_vegetal/forrajes/otros_documentos/20410_051202_prod.htm

Moreno, N. 2005. Legislación y normativa sobre comercialización y control de calidad de inoculantes para la agricultura en Colombia. Instituto de biotecnología, Universidad Nacional de Colombia. p. 10. <http://www.biofag.org.ar/actividades/talleres/AbstractTaller2005.pdf>.

Rivas, M.A.; García, A.; Pérez, J., Rodríguez, J.; López, J.F. 2006. Rendimiento, contenido proteico y fibras ácida y neutra de ensilado de maíz, cosechado en dos estados de madurez. www.engormix.com/rendimiento_contenido_proteico_fibras_s_articulos_967_AGR.htm

Uriarte, M.E. 2004. Ensilaje echado a perder: ¿Se puede evitar?. NUTRIX S.A. http://www.oznet.kstate.edu/pr_silage/publications/CIGAL%202004%20%20Estela%20Uriarte%204-8-08.pdf

Trillos, G.L.; Plata, O.L.; Mestre, A.T.; Araujo, G.A. 2007. Análisis físico – químico de los contenidos ruminales frescos y ensilados de bovinos sacrificados en el Valle del César. *Facultad de Ingenierías*. Programa de Agroindustria.

Universidad Popular del César. Valledupar, César.
[http://www.engormix.com/analisis_fisico_quimicos_ contenidos_s_articulos_954_GDC.htm](http://www.engormix.com/analisis_fisico_quimicos_contenidos_s_articulos_954_GDC.htm).

Zúñiga, D. 2005. Legislación y normativa sobre comercialización y control de calidad de inoculantes para la agricultura en Perú. Departamento de

Biología, Universidad Nacional Agraria La Molina.
p. 14. [http://www.biofag.org.ar/actividades/talleres/ AbstractTaller2005.pdf](http://www.biofag.org.ar/actividades/talleres/AbstractTaller2005.pdf).

OBTENCIÓN DE UN AGENTE BLANQUEADOR, CON BASE EN PERCARBONATO DE SODIO, A ESCALA PILOTO

María Angélica Jiménez Franco - Sandra Milena Orrego López - Ana Lucía Orozco González

RESUMEN

La idea de producir un agente blanqueador con base en percarbonato de sodio surge de la falta de uso de dicho agente en las industrias colombianas debido a su alto costo. Por esta razón se decide hacer un estudio completo donde se evalúa la demanda del producto, la forma adecuada de obtenerlo a escala laboratorio y la factibilidad económica del mismo.

El estudio de mercado arroja como resultado una gran variabilidad tanto en demanda como en precio en el sector químico de los agentes blanqueadores, planteando diferentes retos para el proyecto. Además, se adquiere conocimiento sobre la posible competencia y las características y ventajas de cada uno de ellos, presentando al hipoclorito de sodio como el agente blanqueador más usado, el cual representa el 23%, seguido por el peróxido de hidrógeno con un valor del 15%.

Con el diseño de experimentos se establece la proporción óptima de cada componente participante en la mezcla, logrando un rendimiento máximo de la reacción del 52.062%, con respecto a la estequiometría. Finalmente se realiza un análisis financiero que determina este proyecto como viable.

Palabras clave

Percarbonato de sodio, blanqueador, detergentes, peróxido de hidrógeno, carbonato de sodio.

ABSTRACT

The idea of producing a bleaching agent based on sodium percarbonate, emerged from the non-use of this product in the Colombian industry due to its high cost. For this reason it was decided to do a full study to assess the demand of the product, the right way to obtain it at laboratory scale and its economic feasibility.

The market survey resulted in great variability in both demand and prices of the bleaching agents in the chemical sector, posing different challenges for the project. In addition, knowledge was acquired about the possible competition and the characteristics and advantages of each one, finding sodium hypochlorite as the bleaching agent most commonly used, represented by 23%, followed by hydrogen peroxide with a value of 15%.

With the design of experiments it was possible to establish the optimal proportion of each component in the reaction mixture, achieving a maximum yield of the reaction of 52.062% according to stoichiometry.

Finally, a financial analysis it was conducted showing that the project is financially viable and interesting for investors.

Key words

Sodium percarbonate, bleach, detergent, sodium carbonate, hydrogen peroxide

INTRODUCCIÓN

Con el creciente problema de contaminación que se presenta actualmente no sólo en Colombia sino en el mundo entero, las propuestas de ecología industrial, producción más limpia y cero emisiones se han hecho cada vez más evidentes. Es por esto que para los ingenieros de hoy, reemplazar sustancias contaminantes por otras que no representen mayor daño al ambiente y que a su vez generen un valor agregado al proceso, se ha convertido en uno de sus mayores retos.

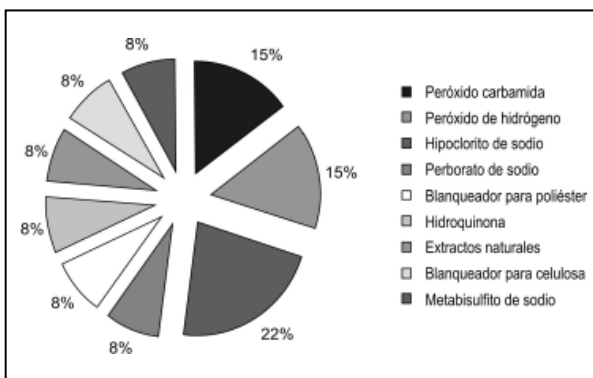
En la gama de blanqueadores, el perborato de sodio se constituye como una de las materias primas fundamentales. Además, tiene un precio favorable y con éste se logra obtener productos de buena calidad. Su principal defecto es que es un compuesto a base de boro y por lo tanto tiene efectos contaminantes, lo cual no sólo genera un costo extra a las empresas que tienen que pagar para verterlo a las fuentes de agua, sino que también perjudica el ambiente. El agente blanqueador con base en percarbonato de sodio surge como una alternativa a este problema, porque cumple con las características blanqueadoras necesarias para llevar a cabo su función y, adicionalmente, se descompone en sustancias naturales que no afectan el ambiente, constituyéndose así como el mejor reemplazo del perborato de sodio en la producción de blanqueadores y detergentes.

1. TENDENCIAS DE MERCADO

El percarbonato de sodio se emplea en Europa, Estados Unidos y México, entre otros. Este producto ha venido incrementando su participación en el mercado debido a su variedad de usos a nivel industrial y, por ser un ingrediente con menos impacto sobre el ambiente con relación a otros agentes blanqueadores empleados (como ejemplo, el perborato de sodio).

Se puede observar de la gráfica 1, como el hipoclorito de sodio es el agente blanqueador más usado en Colombia, seguido por el peróxido de hidrógeno y el peróxido de carbamida, que son los principales productos relacionados con el blanqueamiento dental.

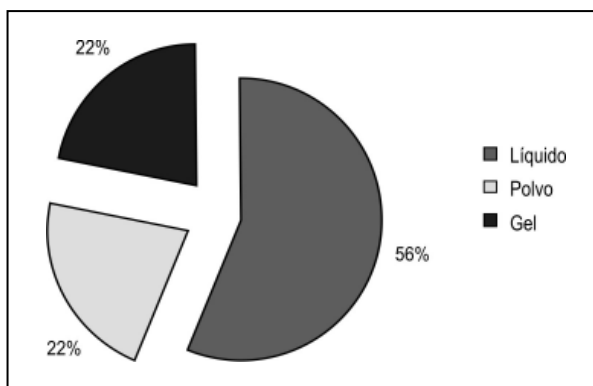
GRÁFICA 1
Agentes blanqueadores empleados en el mercado



El hecho de encontrar tantos agentes blanqueadores en el mercado es una oportunidad para el agente blanqueador con base en percarbonato de sodio, ya que cada uno de ellos representa un mercado potencial al que se puede llegar.

A su vez de la gráfica 2 se puede observar que la presentación del agente blanqueador en líquido es la más usada en el mercado, la cual representa el 56% del total de las empresas encuestadas, esto debido a que los blanqueadores más empleados (hipoclorito de sodio y peróxido de hidrógeno) vienen en esta presentación. Las presentaciones en polvo se emplean principalmente en detergentes y maquillaje y, las presentaciones en gel en aplicaciones dentales

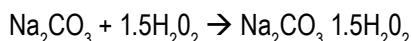
GRÁFICA 2
Presentaciones de agentes blanqueadores usados en el mercado



De la encuesta de mercado se derivan los factores de calidad, los cuales responden a las necesidades del cliente. Estos factores son: poder limpiador, densidad del sólido, pH, oxígeno activo, humedad y solubilidad

2. ALTERNATIVAS DEL PROCESO

La ruta química que se emplea para la obtención del agente blanqueador con base en percarbonato de sodio es una reacción de adición, entre el carbonato de sodio sólido y el peróxido de hidrógeno al 35%p. Esta reacción se describe a continuación:



Estequiométricamente, por medio de un balance global de materia, se puede decir que, con 2.5 moles de reactivos se obtiene 1 mol de producto. Para este proyecto se emplean 0.0266 moles de reactivos, obteniendo 0.0055 moles de producto. En teoría, las moles de producto obtenido deben ser 0.0106, teniendo un porcentaje de error del 47.93%. La diferencia entre estos dos valores se debe principalmente a factores externos como calidad y grado de pureza de la materia prima, condiciones del medio (humedad), entre otros.

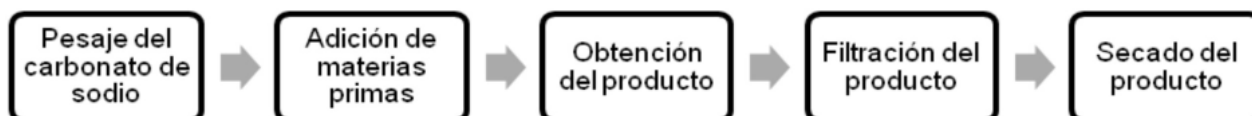
Para los ensayos preliminares fueron necesarias las siguientes materias primas y equipos:

- **Materias primas** - Peróxido de hidrógeno (35% peso).
 - Carbonato de sodio liviano. - Agua potable
- **Equipos de laboratorio**
 - Beakers.
 - Probetas.
 - Mezclador de vidrio
 - Plancha de agitación magnética. (marca: Corning).
 - Pipetas.
 - Papel filtro.
 - Embudo.
 - Termómetro.
- **Montaje experimental**

Para la realización de los ensayos preliminares, se llevan a cabo cinco etapas, cuyo diagrama de bloques se muestra en la figura 1.

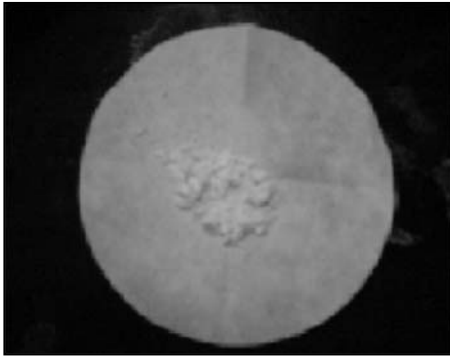
La temperatura a la cual se trabaja durante el proceso es de 23°C, exceptuando la etapa de secado, en la cual se establece, para el horno, una temperatura de 50°C. Este proceso se realiza a una presión atmosférica de 0.98 atm.

FIGURA 1
Diagrama de bloques del montaje experimental



El producto que se obtiene en la etapa de secado, se observa en la figura 2.

FIGURA 2
Producto obtenido después de la etapa de secado



Teniendo en cuenta los ensayos preliminares realizados, se encuentra que variables como pH y temperatura del proceso, no afectan significativamente la obtención del

agente blanqueador con base en percarbonato de sodio. La variable más influyente en este experimento es la relación entre los componentes que participan en la reacción.

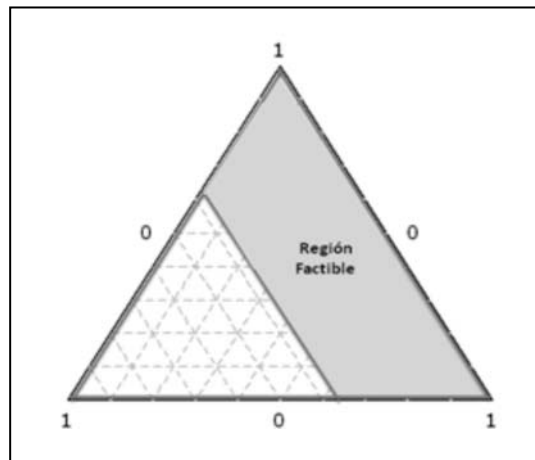
Se elige el diseño de experimentos de mezclas, en el cual los factores son los componentes o ingredientes de una mezcla y, las características de calidad van a depender de las proporciones relativas con las que participen los ingredientes y no de la cantidad absoluta de ellos. (Gutiérrez, 2008). El tipo de diseño de mezclas que se trabaja es el simplex-reticular {q,m} (simplex-lattice).

Para el desarrollo del diseño de experimentos es necesario tener en cuenta tres restricciones importantes, las cuales se encuentran especificadas en la tabla 1. Estas restricciones delimitan la región experimental factible a una zona o subregión del simplex (ver gráfica 3).

TABLA 1
Restricciones para el diseño de experimentos.

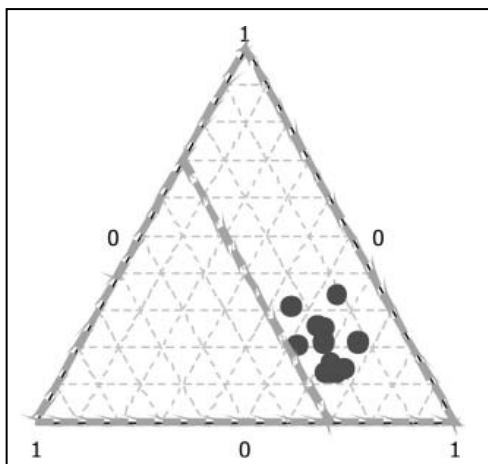
Componente	Restricción ($x=\%p$)	Motivo
Componente 1 Na_2CO_3	$0 < x_1 < 100$	El carbonato de sodio debe estar siempre presente en la mezcla (con presencia de los otros dos componentes) para que se pueda llevar a cabo la reacción.
Componente 2 H_2O_2	$0 < x_2 < 35$	El peróxido de hidrógeno con el cual se trabaja en el diseño de experimentos está al 35%p
Componente 3 $3 \text{H}_2\text{O}$	$0 < x_3 < 100$	El agua siempre debe estar presente en la mezcla para formar la solución con el carbonato de sodio y facilitar la reacción con el peróxido de hidrógeno.

GRÁFICA 3
Región factible para el diseño de experimentos



En la gráfica 4, se observan las 12 mezclas que se realizan para el diseño de experimentos, teniendo en cuenta las restricciones mencionadas.

GRÁFICA 4
Ubicación de las mezclas en la representación geométrica del diseño de experimentos



Con la ayuda del software MINITAB® se define la ecuación predictiva del modelo cuadrático:

$$Y_1 = 1.702 x_1 + 0.839 x_2 + 0.206 x_3 - 3.877 x_1 x_2 - 2.057 x_2 x_3$$

Donde:

- Y_1 : Rendimiento de la reacción.
- X_1 : Carbonato de sodio.
- x_2 : Peróxido de hidrógeno.
- x_3 : Agua.

Una vez encontrada la proporción óptima de cada componente en la mezcla, que maximiza el rendimiento de la reacción, se miden los factores de calidad para el producto final presentados en la tabla 2.

TABLA 2
Resumen de los factores de calidad del producto

CALIDAD DEL PRODUCTO	Agente blanqueador con base en percarbonato de sodio
DENSIDAD (g/cm ³)	0.7591
pH	10.26
HUMEDAD (%)	1.83
OXÍGENO ACTIVO (ml)	95.73
SOLUBILIDAD (, 100 gr de agua) (g/Lt)	189

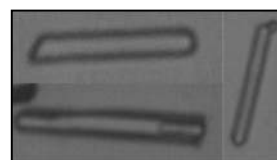
Al agente blanqueador con base en percarbonato de sodio se le realiza un análisis cualitativo en el cual se determina la estructura cristalina del producto (forma y tamaño de las partículas cristalinas y aglomerados) y se detectan las moléculas presentes en el producto por medio del análisis de espectro infrarrojo (transmitancia).

• Estructura cristalina

El agente blanqueador obtenido presenta una estructura cristalina acicular, es decir, los cristales tienen forma

de agujas, delgadas y alargadas; como se observa en la figura 3.

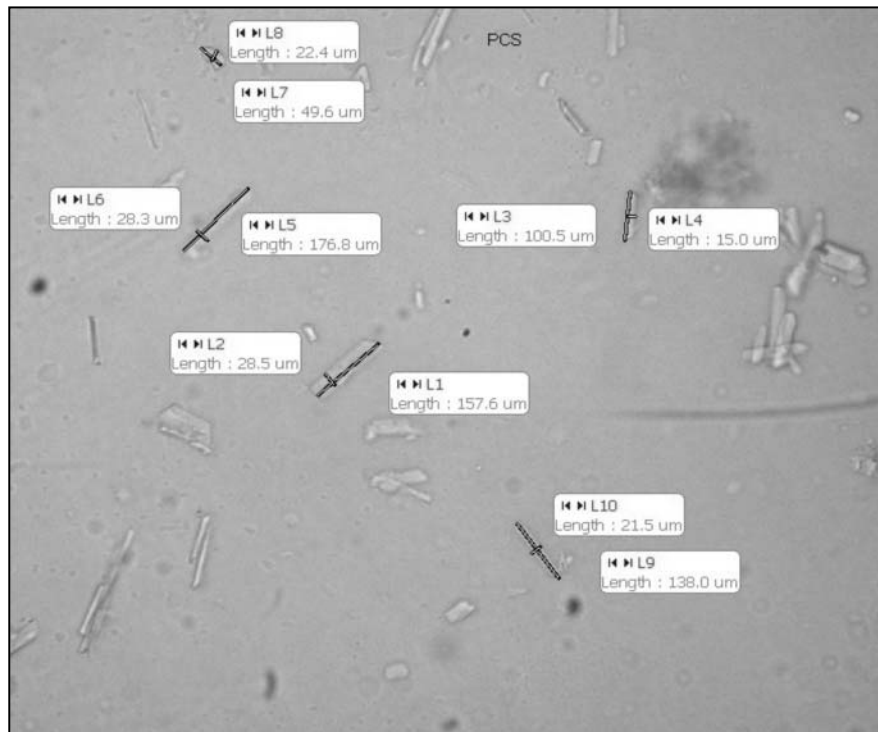
FIGURA 3
Estructura cristalina del producto



Para el producto obtenido, el tamaño promedio de los cristales es de 124.500 μm, y el tamaño promedio de las

partículas de los aglomerados es de 406.917 μm . En la figura 4, puede observarse la fotografía tomada, en el microscopio, de los cristales del producto.

FIGURA 4
Tamaño de los cristales del producto

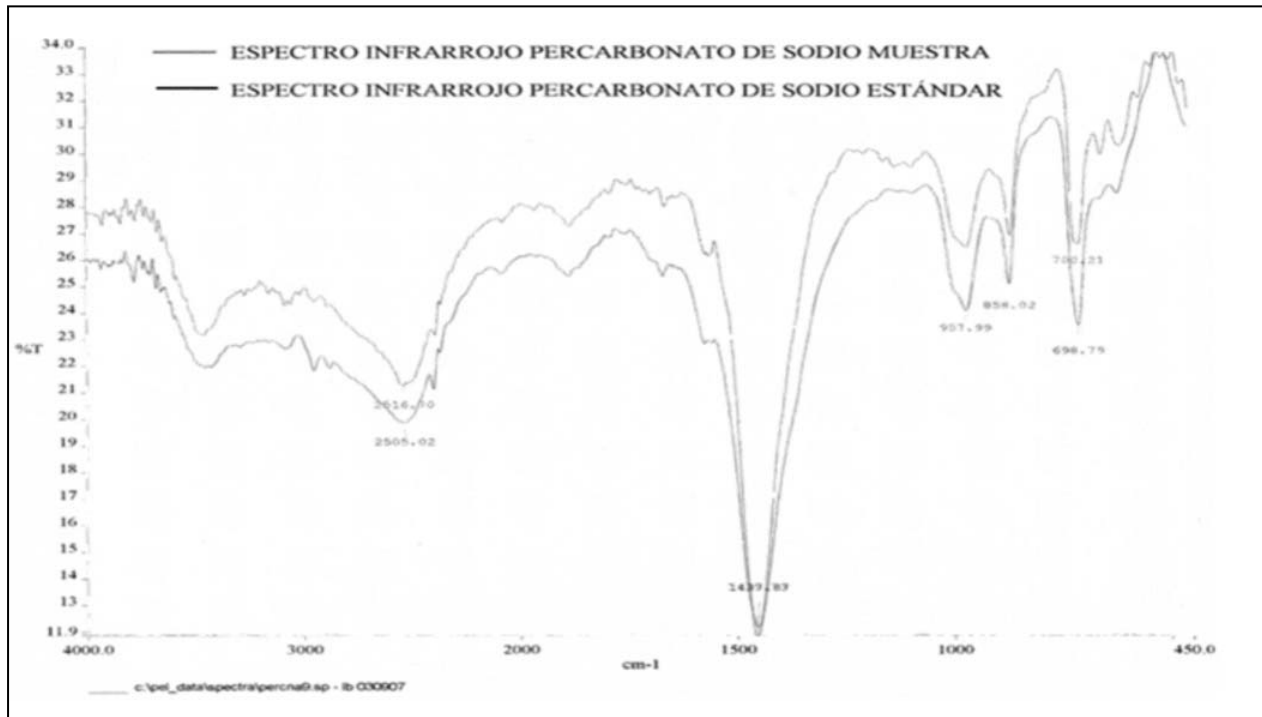


- **Espectro infrarrojo**

El análisis del espectro infrarrojo del agente blanqueador se realiza en el laboratorio de química instrumental de la Universidad EAFIT, allí se realiza la prueba de transmitancia tanto del producto obtenido como del percarbonato de sodio comercial.

Como se observa en la gráfica 5, el pico más representativo se encuentra en 1437.87 cm^{-1} , lo que indica que en el producto hay presencia del grupo carbonato. Esta gráfica se compara con la gráfica de transmitancia del percarbonato de sodio comercial, en la cual se observa que el pico más representativo se encuentra en 1439.73 cm^{-1} . Esto indica que el agente blanqueador obtenido en el laboratorio se asemeja al percarbonato de sodio comercial.

GRÁFICA 5
Espectro infrarrojo del percarbonato de sodio comercial y el espectro infrarrojo del agente blanqueador obtenido en el laboratorio



3. ANÁLISIS FINANCIERO

Para determinar la factibilidad económica del proyecto se realiza un estudio financiero obteniendo los resultados presentados en la tabla 3.

TABLA 3
Resumen financiero

TIR (Proyecto) (%)	45.80
TIR (Inversionista) (%)	55.93
VPN (Proyecto)	\$160,951,592
VPN (Inversionista)	\$ 41,595,497

Costo total (\$)	\$165,064,090
Producción (kg/año)	12,000
Costo unitario (\$)	\$13,755
Margen bruto ganancia (%)	50%
Precio (\$/kg)	\$ 20,633

Con los valores presentados se puede concluir que el proyecto es financieramente viable, tanto como proyecto en sí, como para el inversionista.

CONCLUSIONES

Con el estudio de mercado se establecen las principales características del agente blanqueador con base en percarbonato de sodio, las cuales cumplen con las exigencias de los clientes. Estas características son la calidad y pureza del producto, además de su bajo precio e impacto ambiental.

Con los ensayos preliminares de laboratorio se puede concluir que la variable más influyente en el proceso de obtención del agente blanqueador con base en percarbonato de sodio es la relación entre los componentes que participan en la reacción, y no existe influencia significativa de la temperatura y pH.

Para el desarrollo del diseño de experimentos de mezclas es necesario tener en cuenta tres restricciones del proceso, las cuales limitan la región factible experimental. Estas restricciones se establecen según las propiedades de las materias primas empleadas y las exigencias del proceso.

Con el fin de determinar la calidad del producto se realizan diferentes pruebas (prueba de blanqueo, densidad, pH, oxígeno activo, humedad, solubilidad), basados en los factores de calidad derivados del estudio de mercado.

La estructura cristalina del producto obtenido es acicular, en forma de agujas, delgadas y largas; con un tamaño promedio de los cristales de 124.500 μm , y un tamaño promedio de las partículas de los aglomerados de 406.917 μm .

La producción del agente blanqueador con base en percarbonato de sodio genera dióxido de carbono y vapor de agua, lo cuales participan en el efecto invernadero. Para esto, es necesario implementar tecnologías de final de tubo o producción más limpia, las cuales ayudan a disminuir o evitar la generación de estos agentes contaminantes.

El proyecto para la obtención del agente blanqueador con base en percarbonato de sodio es viable financieramente ya que se obtiene una tasa interna de retorno del 45.80%, siendo mayor que el costo promedio ponderado de capital (WACC), el cual tiene un valor de 28.5%.

BIBLIOGRAFÍA

BEWERSDORF M.; KLASSEN C.J.; LOOK-HERBER P.; BERTSCH-FRANK B.; LIESER T.; MULLER K. (1996). Method for production of granular sodium percarbonate. US patent N° 5,560,896.

BOSSOUTROT J.M.; GARCIA F. (2002). Sodium percarbonate and process for producing it. US Patent 6.340.452. Enero 22, 2002.

BROWN L.; ESCALONA GARCÍA; BURDGER.; BURSTEN. (2004). Química: La Ciencia Central. Editorial Pearson Prentice Hall; pp 885

DE RENZO, D. J.; MELLAN I. (1985). Corrosion Resistant Materials Handbook. William Andrew Inc., pp 627

DOETSCH W.; MATHES M.; HONIG H.; WASEM G. (2001). Method for producing Sodium Percarbonate, US Patent N° 6,248,701 B1

DOMKE T.; NUNN C.C.; GIUSEPPIN M.L.; MARTENS R.J.; SWARTHOFF T.; VERRIPS C.T. (1997). Enzymatic Bleach Composition. US Patent 5.601.750. Febrero 11, 1997.

DUGUA J. (1993). Sodium Perborate. US Patente 5.229.092. Julio 20, 1993.

ECHEVERRÍA J.J.; FUMAROLA J. (1994). El Manual de Odontología. Elsevier España, 1994. Página 694.

ELVERS B.; HAWKINS S y otros. (1989). Ullman's Enciclopedia of Industrial Chemistry. Editorial VCH New York, USA. Quinta Edición. Volumen 24.

FREUND; IRWIN; MARYLEES. (2000). Estadística matemática con aplicaciones. Editorial Pearson Educación.

GUTIERREZ H.; DE LA VARA R. (2008). Análisis y Diseño de Experimentos. Editorial McGraw Hill. Segunda Edición. 2008, pp 482-500

HILL W.; KOLB K. (2000). Química para el nuevo milenio. Editorial Prentice Hall. Octava Edición.

JAMES A.P.; HORNE G.R.; ROESLER R.; SIGNORINI L.; OWEN R.; PARVANEH S.; PARDINI R.; BIGINI M.M. (2001). Process for Producing Sodium Percarbonate. US Patent N° 6,231,828 B1.

JIMÉNEZ GUTIÉRREZ A. (2003). Diseño de Procesos de Ingeniería Química. Editorial Reverté S.A.

KHANMOHAMMADIA, M.; KARGOSHAB K. (2005). [Science Direct Base de datos]. Application of attenuated total reflectance Fourier transform infrared spectrometry to the determination of sodium percarbonate in washing powder detergent. En: Talanta. Vol.65, pp 825.

KIM S.R.; KWAG C.Y.; KEE H.H.; LEE J.P. (1998). Process for manufacturing granular sodium Percarbonate. US Patent N° 5.851.420

KOTOMIN A.; PETEL'SKII M.; ABRAMZON A.; PUNIN K.; YAKIMCHUK O. (2001).[Science Direct Base de datos]. Optimization of the Component Concentrations in Solutions of Synthetic Detergents. En: Russian Journal of Applied Chemistry, Vol. 74, (Dic, 2001), pp. 2098- 2102.

LAITINEN A.; HARRIS E. (1982). Análisis químico: Texto avanzado y de referencia. Editorial Reverté; pp115

MACINTYRE J.E.; CHAPMAN; HALL. (1992).Dictionary of inorganic compounds. CRC Press, pp 367.

MCKILLOP; SANDERSON. (1995) [Science Direct Base de datos]. Sodium perborate and sodium percarbonate: Cheap, safe and versatile oxidising agents for organic synthesis. En: Tetrahedron. Vol. 51; pp 6145-6166

DISEÑO CONCEPTUAL DE UN REACTOR BATCH PARA LA PRODUCCIÓN DE SILICATO DE SODIO A PARTIR DE LA CASCARILLA DE ARROZ

*Héctor Iván Cardona Acevedo, hcardon2@eafit.edu.co
Sergio Andrés Londoño Ochoa, slondon4@eafit.edu.co*

RESUMEN

En esta investigación se evaluó un proceso alternativo para la producción de silicato de sodio a partir de la CCA (Ceniza de la cascarilla de Arroz) y NaOH (hidróxido de sodio) en un reactor a baja presión. Este proyecto está compuesto de varias etapas en las que se analizaron las variables críticas del proceso, su diseño conceptual, y el planteamiento del proceso productivo con el estudio del mercado y los costos asociados. Se realizó un diseño de experimentos teniendo en cuenta factores como la presión de reacción, la relación molar ($\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$) y el tiempo de reacción, la variable de respuesta, se consideró, la conversión de sílice a silicato de sodio, el silicato de sodio obtenido, fue sometido a un análisis de DRX (Análisis de Difracción de Rayos X) en el que se comprobó la existencia del compuesto de interés; En este trabajo se obtuvo un porcentaje de conversión de silicato de sodio del 90.34% a una presión de 30 psi y una temperatura al interior del reactor de 405.37 °K, se halló una cinética de orden global de 4.6523, en donde, la concentración de NaOH tuvo mayor incidencia en la conversión de sílice a silicato de sodio con un orden de 3,9543..

Palabras clave

Silicato de sodio, cascarilla de arroz, ceniza de la cascarilla de arroz, diseño conceptual de un reactor batch

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la sociedad tiene grandes problemas con el manejo de los residuos industriales; el objetivo principal como ingenieros de procesos es obtener un valor agregado de los mismos, contribuyendo a la vez, con la disminución de la contaminación ambiental.

La cascarilla de Arroz es un componente que, por su naturaleza, es indeseable en empresas alimenticias y se convierte en un residuo molesto y una fuente de gastos para su eliminación; Este residuo, resulta después de la recolección y selección del grano, además, posee un alto contenido de cenizas ricas en sílice, carbón y otros compuestos, que podrían ser aprovechados para generar otros productos como el silicato de sodio. (FOLETTO, 2006)

2. MATERIALES

La cascarilla de arroz con que se trabajó en este proyecto fue donada por la empresa Molinos Catoto, ubicada al sur del Valle del Aburra, y por el profesor Marco Valencia, Docente de la Universidad EAFIT..

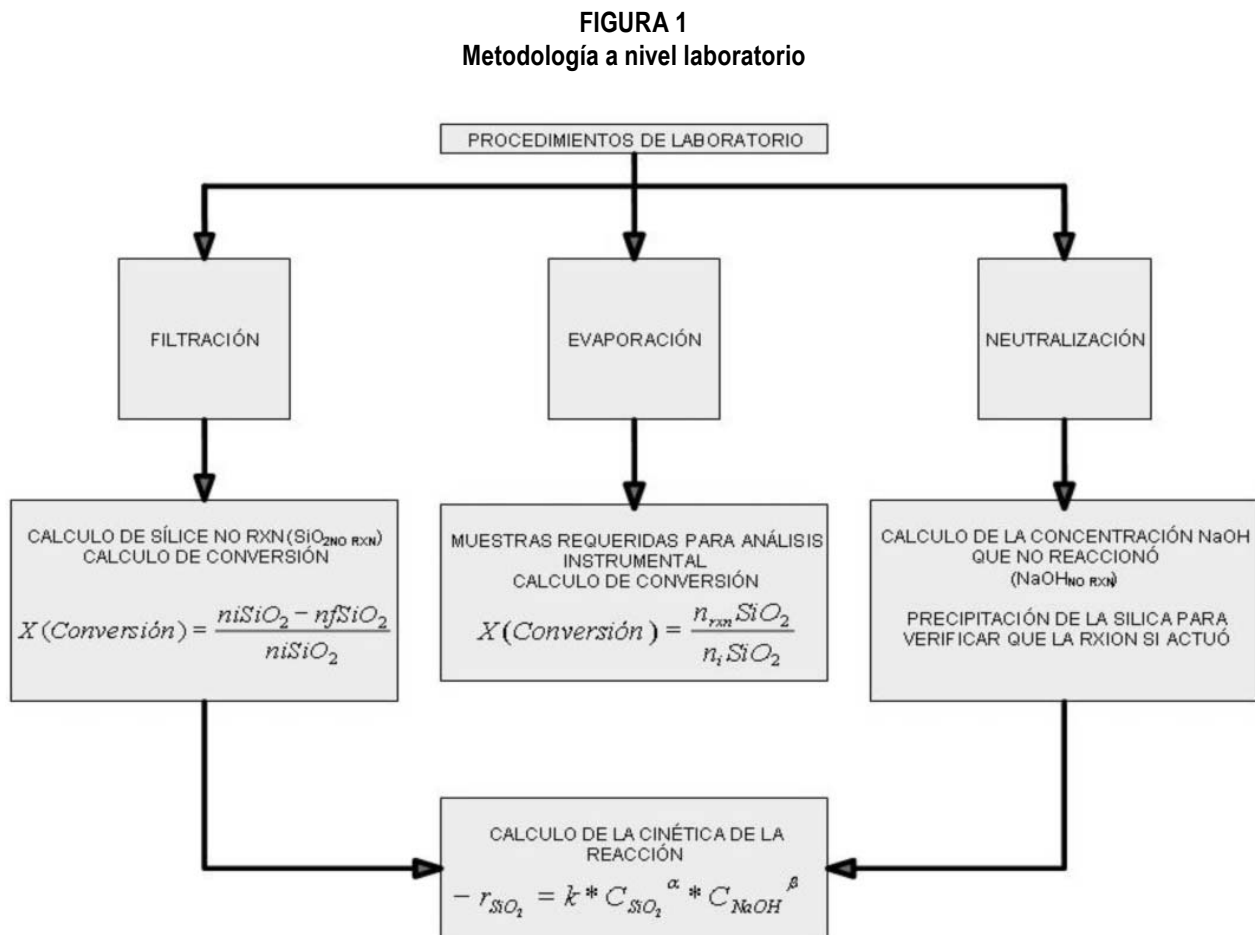
La cantidad de sílice en las cenizas, se calculó mediante la descomposición de material orgánico y demás óxidos con ácido perclórico. (FRITZ, James S, 2002.) y se encontró un valor de (%Porcentaje en peso): 92,17 (SiO_2), el porcentaje de carbón que aun quedó en el proceso de combustión

se calculó mediante una reacción de las cenizas con un exceso de NaOH, en un tiempo de dos (2) horas, para así garantizar que sólo el carbón permaneciera en los sólidos suspendidos, éste tuvo un valor de 4,39 % en peso. Los óxidos presentes en la ceniza se obtienen de la diferencia entre la peso total de las cenizas y el peso del carbón, correspondiendo a los siguientes compuestos: (Al_2O_3) , (K_2O) , (Na_2O) , (MnO) , (CaO) , (MgO) , y (Fe_2O) . Para la cuantificación de humedad presente en la ceniza, se tomó una muestra de 10 g de Ceniza CCA, y se introdujo en un Horno a 110 °C por 24 horas, posteriormente se reporto la diferencia de pesos.

Para la producción de silicato de sodio, se utilizó un reactor Batch con volumen de 250 cm³, construido en acero inoxidable 304, se empleo una manta de calentamiento marca P y P referencia MG 0250 con una potencia eléctrica de 400 W, y se midió la presión con un manómetro marca HI TECH

3. MÉTODOS

La metodología para la producción de silicato de sodio a nivel de laboratorio se presenta en la figura 1.



Análisis cualitativo del silicato de sodio (Espectro Infrarrojo)

Estos análisis fueron realizados en un equipo PERKIN-ELMER Spectrum. La muestra problema se conformó en pastillas con KBr, se realizó barrido desde 100 a 4000 cm⁻¹ y se compararon los espectros con una muestra comercial de silicato de sodio.

Análisis de Difracción de Rayos X (DRX)

Se realizó el análisis de difracción de rayos X mediante un equipo de marca RIGAKU Miniflex, con un ánodo de Cu. En una región 2θ ángulo de bragg entre 15 y 40, a una velocidad de 2°/min.

Selección del diseño experimental

El diseño de experimentos empleado es un diseño factorial 2x2x2 (3 factores con 2 niveles cada uno), que permite determinar la influencia de los factores críticos (entradas) y sus interacciones con la variable respuesta (salida). La variable respuesta es el porcentaje de conversión y las variables críticas son el tiempo de reacción, la presión y relación molar NaOH/SiO₂

Diseño conceptual del reactor

El diseño conceptual del reactor se realizó de acuerdo al código ASME y se tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

- Reactor batch
- La relación óptima entre diámetro y altura es igual a 3, (TURTON 2003).
- Configuración vertical
- El nivel del líquido en el tanque debe ser igual al diámetro interno del tanque por ser una reacción donde sólo hay evaporación de agua. (WALAS 1998).
- Arreglo toriesférico ya que un fondo con esta geometría requiere menos energía para el movimiento del fluido que uno plano.
- El material para la construcción del reactor es acero inoxidable 304, por ser un material resistente al calor y a la corrosión

Ecuaciones de diseño

Espesor del cuerpo cilíndrico (CHUSE et al,1993)

$$t = \frac{P * R}{S * E - 0.6 * P}$$

$$P = P_{op} + 25$$

P : Presión de diseño o presión máxima de trabajo permitida, lb/in²

S : Valor del esfuerzo del material, lb/in²

E : Eficiencia de la junta, in

R : Radio interior, in

t : Espesor de pared, in

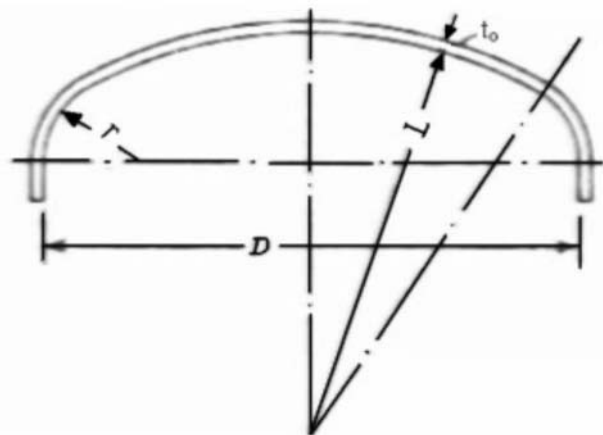
P_{op} : Presión de operación

Espesor de la cabeza (CHUSE et al,1993)

Para un arreglo toriesférico se debe cumplir que el radio del arco sea igual al diámetro del tanque, es decir L=D, (gráfico 1).

GRÁFICO 1
Cabeza con arreglo toriesférico

$$t = \frac{0.885 * P * L}{S * E - 0.1 * P}$$



Volumen del reactor

Los valores de presión en cabezas con conformación toriesférica (flanged an dished) puede incrementar por la disminución de la tensión local en la esquina interna de la cabeza, esto puede lograrse en la conformación de la cabeza de tal forma que el radio de nudillo (inside-corner radius icr) sea por lo menos tres veces el espesor del recipiente. De acuerdo al código ASME para la construcción de recipientes a presión, el radio de nudillo no puede ser menor al 6% del diámetro externo y el radio de plato debe ser igual o menor que el diámetro interno de la cabeza. (BROWNELL, 1959)

Altura de la tapa toriesférica (BROWNELL, 1959)

Las dimensiones en cabezas, con formación toriesférica (flanged and dished) están dadas por las siguientes relaciones:

$$a = \frac{ID}{2}$$

$$b = r - \sqrt{(BC)^2 - (AB)^2}$$

$$AB = a - (icr)$$

$$BC = r - (icr)$$

$$OA = t + b + sf$$

ID : Diámetro Interior (Inside Diameter) (in)

d : Profundidad del Plato (Depth of dish) (in)

sh : Reborde Directo (Straight flange) (in)

icr : Radio interior de la esquina (Inside-corner radius) (in)

t : Espesor de la cabeza (Head thickness) (in)

r : Radio del plato (Radius of dish) (in)

OA: Dimensiones generales (Overall dimension) (in).

Volumen de las tapas (WALAS, 1998)

$$S_h = 0.842 * D^2 \quad L = D$$

$$\frac{V_h}{0.0778 * D^3} \approx 2 * \left(\frac{L}{D}\right)^2 * \left(1.5 - \frac{L}{D}\right)$$

Sh : Área superficial de cabeza, m²

L : Altura de líquido, m

Vh : Volumen de toda la cabeza, m³

D : Diámetro interno del tanque, m

(BROWNELL,1959) El volumen de cabeza toriesférica donde se tiene un icr inside-corner radius igual al 6% de diámetro exterior (sin incluir la porción al reborde recto) es aproximadamente igual a:

$$V = 0.000049 * D^3$$

Volumen de cuerpo cilíndrico (WALAS, 1998)

$$V = \frac{\pi * D^2 * H}{4}$$

$$H = L_T - 2 * h_T$$

V : Volumen del cuerpo cilíndrico, m³

H : Longitud del cuerpo cilíndrico, m

LT : Longitud total del reactor, m

HT : Altura de la tapa toriesférica, (OA) m

Volumen total del tanque

El volumen ocupado por la mezcla se determina según la cantidad de producto manejado y su densidad. Este volumen representa el 80% del volumen total.

Diseño del proceso productivo

La secuencia de operaciones para desarrollar el diseño conceptual.

- Identificar las materias primas involucradas en el proceso de producción
- Determinar la secuencia de operaciones necesarias para la producción del silicato de sodio a partir de la cascarilla de arroz
- Representar el proceso por medio de un diagrama genérico de bloques (GBFD)
- Elaborar el diagrama de bloques del proceso (BFD)
- Realizar la descripción del proceso.
- Elaborar el diagrama de flujo del proceso (PFD) Determinar los tiempos de operación empleados en cada etapa del proceso
- Realizar balances de masa y energía
- Diseñar conceptualmente el reactor
- Seleccionar los otros equipos involucrados en el proceso

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Obtención Silicato de Sodio

Los resultados de conversión molar de sílice a silicato de sodio se presentan en la tabla 1.

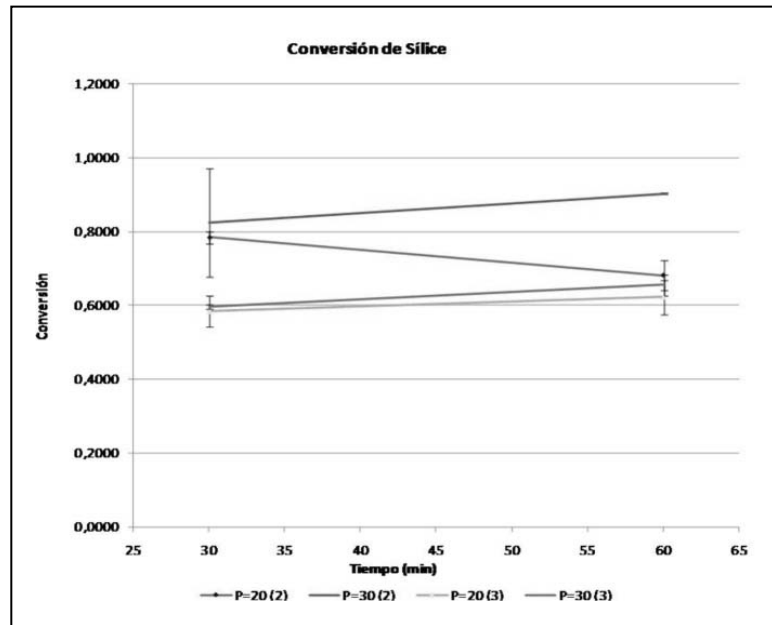
TABLA 1
Conversión molar de sílice en silicato de sodio

Muestra	Presión (psi)	Tiempo (min)	Relación molar	SiO ₂ :Na ₂ O (gr)	Conversión	Promedio	Desv. estándar	Error
1A	20	30	2	9,5391	0,8014	0,7847	0,0237	0,0168
2B	20	30	2	9,1400	0,7679			
3A	20.	60	2	8,5976	0,7223	0,6815	0,0578	0,0408
4B	20	60	2	7,6251	0,6406			
5A	20	30	3	6,8115	0,6258	0,5838	0,0594	0,0420
6B	20	30	3	5,8970	0,5418			
7A	20	60	3	7,2898	0,6697	0,6231	0,0660	0,0467
8B	20	60	3	6,2737	0,5764			
9A	30	30	2	11,5768	0,9726	0,8246	0,2094	0,1481
10B	30	30	2	8,0523	0,6765			
11A	30	60	2	10,7336	0,9018	0,9034	0,0023	0,0017
12B	30	60	2	10,7730	0,9051			
13A	30	30	3	6,5661	0,6032	0,5976	0,0080	0,0057
14B	30	30	3	6,4422	0,5919			
15A	30	60	3	7,4583	0,6852	0,6562	0,0410	0,0290
16B	30	60	3	6,8276	0,6273			

El gráfico muestra el comportamiento de la conversión en el tiempo para las diferentes condiciones de presión y se observa que la presión a una misma relación molar no

tiene gran influencia en la conversión y por el contrario el efecto de la relación molar a una misma presión mostró un cambio significativo

GRÁFICO 2
Variación de la Conversión molar en el tiempo



Análisis de varianza ANOVA

Para el análisis de los datos obtenidos en el diseño de experimentos se empleó el paquete estadístico STATGRAPHICS plus 5.0, configurado a un nivel de

confianza del 95 % de acuerdo con el modelo TUKEY. la Tabla 2, que permite identificar los efectos de las variables críticas sobre la variable respuesta.

TABLA 2. Análisis de varianza ANOVA

Analysis of Variance for CONVERSION - Type III Sums of Squares						
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value	
MAIN EFFECTS						
A: PRESION	0,0238471	1	0,0238471	3,33	0,1057	
B: RELACION MOLAR	0,134487	1	0,134487	18,76	0,0025	
C: TIEMPO	0,00135608	1	0,00135608	0,19	0,6751	
INTERACTIONS						
AB	0,0115509	1	0,0115509	1,61	0,2400	
AC	0,0101556	1	0,0101556	1,42	0,2681	
BC	0,00373627	1	0,00373627	0,52	0,4909	
ABC	0,00661376	1	0,00661376	0,92	0,3650	
RESIDUAL	0,0573621	8	0,00717026			
TOTAL (CORRECTED)	0,249109	15				

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Se puede observar que el factor bajo estudio que representa un efecto principal es la relación molar, éste aporta una diferencia estadística significativa en la variable respuesta por tener un P-value de 0.0025, mucho menor al 0.05 establecido al realizar el experimento, mientras que para la variable tiempo de reacción con P – value 0,6751 no tuvo una influencia significativa dentro de la conversión, lo corrobora el análisis del gráfico 1 donde las pendientes son aproximadamente cero, esto implica que la máxima conversión se presentó antes de los 30 minutos,

Análisis Infrarrojo

El análisis infrarrojo se realizó a las muestras que presentaron la mejor conversión a condiciones de presión y relación molar. Se tomaron para las muestras de 30 y 60 min con el fin de determinar el efecto de la conversión en el tiempo y determinar la validez de los datos para el cálculo de la cinética de la reacción

Las gráficas 3 y 4 muestran el análisis infrarrojo para el Silicato de Sodio estándar, y la muestra obtenida en el diseño de experimentos.

GRÁFICO 3. IR Estándar

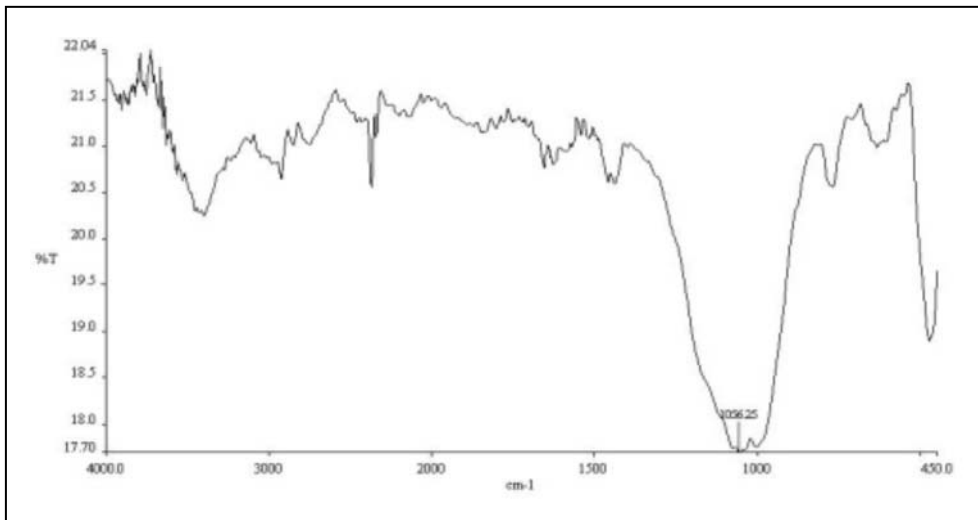
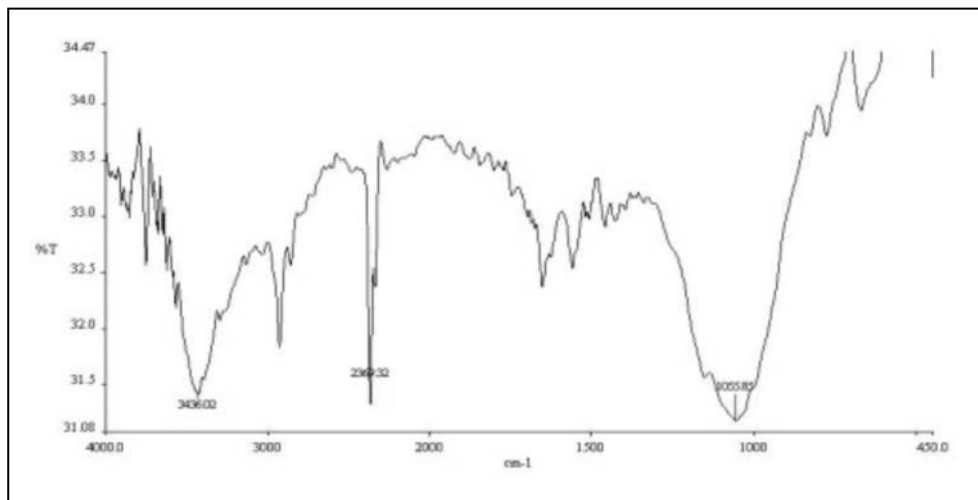


GRÁFICO 4. IR Muestra 12B



A la frecuencia de 3420 cm^{-1} Se presenta la franja de humedad que está presente en el compuesto.

Entre 2500 y 2900 cm^{-1} Se detectaron 3 picos característicos incluso en la muestra estándar en menor intensidad, y que son ajenos al componente de interés están determinados por 1500 cm^{-1} , 2368 cm^{-1} , 2850 cm^{-1}

Se encuentra la región principal de enlace Si – O en una frecuencia de 1000 a 1200 cm^{-1} según el reporte estándar.

Análisis de Difracción de rayos x (DRX)

Según las curvas presentadas en los gráficos 5 y 6, el punto característico entre las muestras se presenta en una región de 25.74° en 2θ lo más importante es la semejanza entre las gráficas tanto en la región de ángulo como en el nivel de intensidad con un pico máximo de 120. En el gráfico 7 se presenta la superposición de las gráficas, donde se observa que hay leves diferencias entre 10 y 15 en ángulo 2θ . Esto debido a la presencia de componentes ajenos a los compuestos de interés y que pudieron generar ruido en el análisis.

GRÁFICO 5. DRX Muestra 12B

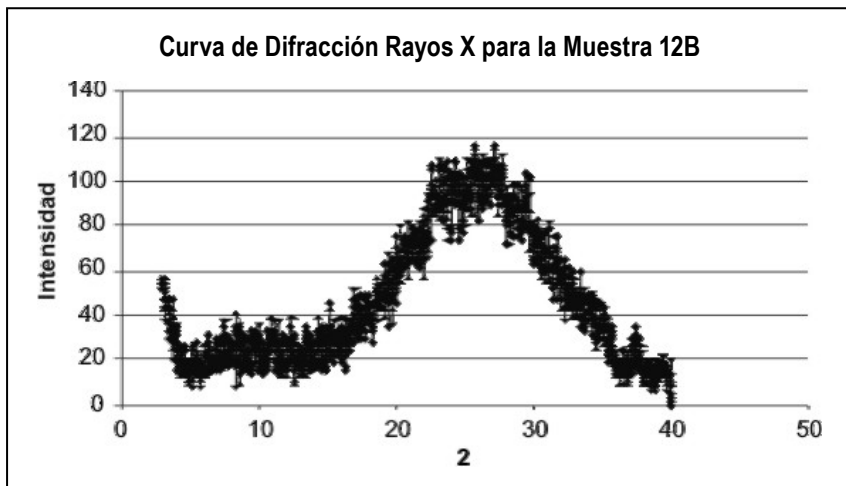


GRÁFICO 6. DRX Muestra Estándar

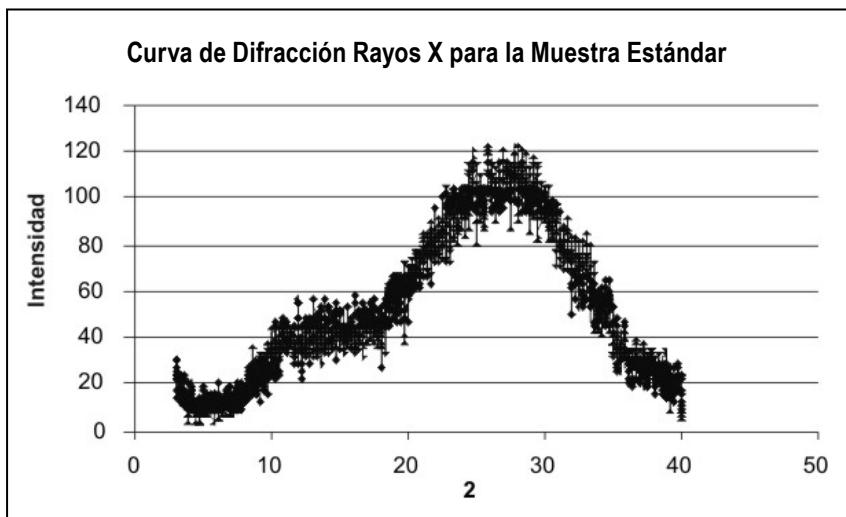
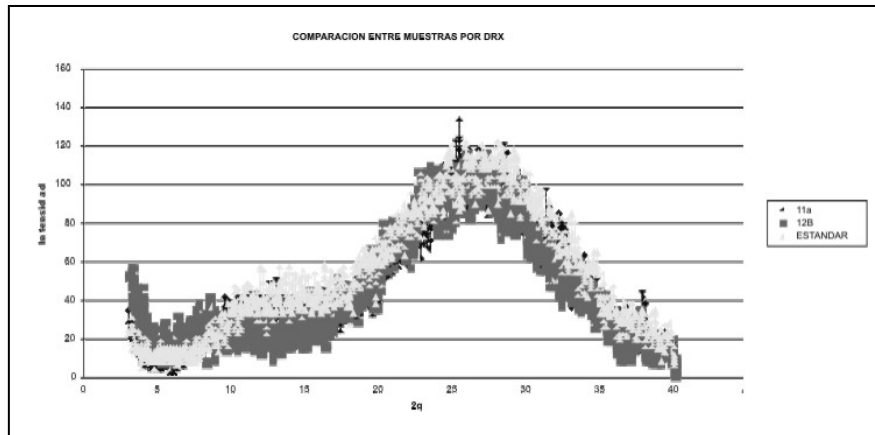


GRÁFICO 7. Superposición de curvas



Cinética de Reacción para Producción de Silicato de Sodio (FOGLER, 1999)

Para ello se tomaron las siguientes consideraciones:

- Sistema Cerrado
- Las condiciones para todos los montajes eran iguales, y el volumen no cambia con el tiempo.
- Agitación desde el inicio de la reacción y cada 5 min.
- Toma de muestras de 5 en 5 hasta 30 min y de 15 en 15 hasta 60 min.
- Toma de muestra en el tiempo cero, para cuantificar efectos de calentamiento.
- Los efectos de los óxidos fueron despreciados.
- Ensayos por duplicado.

Los datos de concentración en el tiempo se muestran en la tabla 2

TABLA 2
Datos cinéticos

t (min)	C _A (gr/ml)	C _B (gr/ml)
0	0,0168	0,0156
5	0,0145	0,0125
10	0,0130	0,0103
15	0,0123	0,0093
30	0,0115	0,0077
45	0,0113	0,0070
60	0,0111	0,0060

La cinética de reacción fue modelada en POLYMATH 6.1. Por medio de este programa, se obtuvieron las constantes y los órdenes de reacción, la expresión que modela la cinética de reacción para las condiciones de presión constante de 20 psi, relación molar 2 y un R² (ajuste) de 0.9513 es:

$$-r_A = 2.528E + 5 * C_A^{0.698} * C_B^{3.9543}$$

Es decir, la constante de reacción corresponde a 2.528E+5 y los órdenes de reacción para la sílice y el hidróxido de sodio son de 0,698 y 3,9543 respectivamente y para un orden global de reacción de 4.6523

Cálculo de la energía de Activación

Para determinar la energía de activación los datos cinéticos para unas condiciones de presión diferentes se presentan en la tabla 3.

TABLA 3
Datos cinéticos

t (min)	CA	CB
0	0.0470	0.0299
5	0.0326	0.0223
10	0.0234	0.0177
15	0.0193	0.0124
30	0.0131	0.0070
45	0.0125	0.0065
60	0.0120	0.0064

La ecuación que modela la cinética de reacción a una presión de 30 psi es la siguiente:

$$-r_A = 1.826E + 3 * C_A^{0.6979} * C_B^{3.9543}$$

Mediante la linealización de Arrhenius se obtuvieron la energía de activación $E = 145844,188$ kJ/ mol y un factor de frecuencia $k_0 = 1,565E+24$

Diseño conceptual del reactor

La tabla 4 muestra los parámetros para el espesor del reactor (SS 304) a escala piloto.

TABLA 4
Parámetros para el espesor del reactor

Espesor	
Esfuerzo del material lb/in ²	1.54E+04
Cuerpo cilíndrico	
Presión operación (psi)	42.37692
Presión de diseño (psi)	67.37692
Radio interior (in)	8.1144
Eficiencia de la junta	1
Espesor t (in)	3.56E-02
Cabeza	
Espesor t (in)	6.29E-02

La tabla 5 muestra las dimensiones calculadas para el reactor batch de acuerdo al código ASME

Dimensiones	
Diámetro Interno DI (in)	16.2287
Altura total LT (in)	22.4755
Altura Cilindro H (in)	13.5898
Altura del liquido L (in)	16.2287
Longitud Cabeza toriesférica	
Radio de Plato r (in)	16.2287
a (in)	8.1144
Radio de Nudillo r1 ó icr	0.9813
AB	7.1331
BC	15.2474
Profundidad de disco b (in)	2.7527
Altura en reborde recto sf (in)	1.6272
Altura cabeza toriesférica OA (in)	4.4429
Volumen Cabeza toriesférica	
Volumen (in ³)	336.8044
Volumen plato (in ³)	0.2094
Volumen Reborde recto (in ³)	336.5950
Área superficial (in ²)	221.7583
Volumen cuerpo cilíndrico	
Volumen cuerpo cilíndrico (in ³)	2811.0728
Volumen total Reactor	
Peso Mezcla (Kg.)	50.0000
Densidad Mezcla ρ_m (g/ml)	1.0945
Densidad Mezcla ρ_m (Kg/m ³)	1094.5000
Volumen mezcla (liquido) (in ³)	2787.7453
Volumen total Reactor (in ³)	3484.6816

Accesorios del tanque (WALAS, 1998)

Las dimensiones de los baffles se presentan en la tabla 5

TABLA 5
Dimensiones de los baffles

Baffles	
Ancho w (in)	1.35239203
Alto del baffle (in) con respecto al fondo hb	5.1190505
Distancia pared-baffle xb (in)	0.22539867
Longitud del baffle Lb (in)	11.5605

Diseño del proceso productivo

Se realizó un escalado geométrico del reactor con un factor de 20, para tener una aproximación del equipo en el proceso a escala industrial, este diseño se realizó para una capacidad de 1000kg.

El proceso para la producción por lote de Silicato de sodio a escala industrial está diseñado para producir 86.18 kg por

hora a partir de 449.91 Kg de cascarilla de arroz, 1000m³ de agua que pueden ser recirculados en el procesos, 2355,29 kg de ácido clorhídrico y 923,06 kg de hidróxido de sodio.

En la combustión de la cascarilla de arroz en el horno se producen aproximadamente 201,5363 Kg de vapor de agua, 617,3795 Kg de CO₂, 526,3536 Kg de NO₂ y 3,6954 Kg de SO₂, estas aproximaciones fueron calculadas mediante un balance por elementos. La tabla 6 muestra la composición típica (CHONS) de la ceniza de la cascarilla de arroz, producida en el departamento de Tolima, utilizada para esta investigación (VARON, 2004).

TABLA 6
Composición CHONS de la CCA

Elemento	% Peso	Moles	Fracción molar
C	39,1	3,2583	0,2924
H	5,2	5,2	0,4666
O	0,25	0,0156	0,0014
N	37,2	2,6571	0,2384
S	0,43	0,0134	0,0012

Diagrama BFD

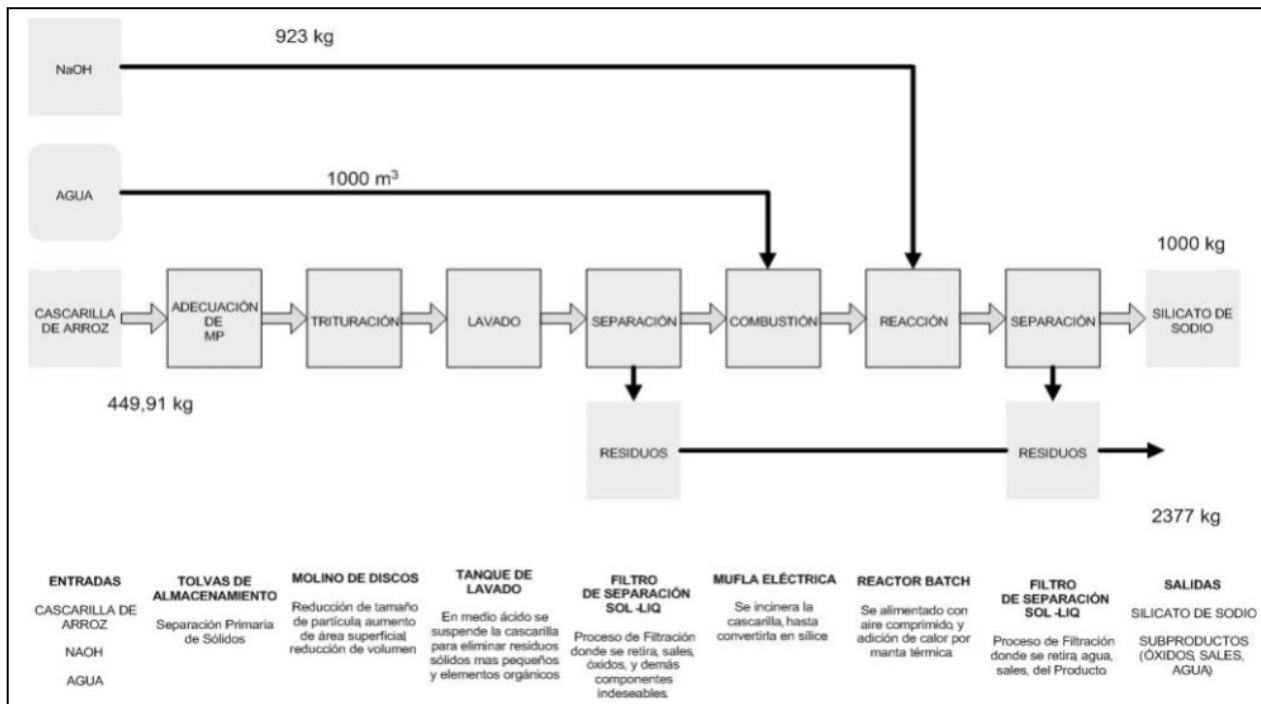
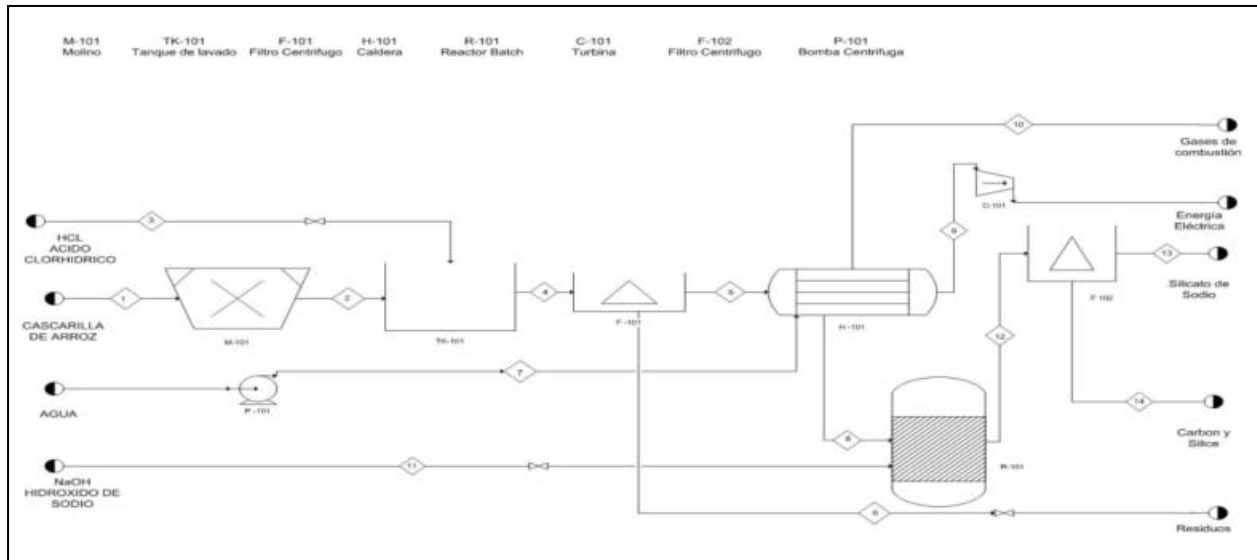


Diagrama PFD



CONCLUSIONES

Se garantiza que tanto el reactor como el proceso de Reacción tengan las mejores condiciones de seguridad y confianza para trabajar. (Normas ASME)

Las mejores condiciones presentadas fueron 30 psi, relación molar 2, y un tiempo de reacción de 60 minutos, para estas condiciones se obtuvo una conversión de 90.34 %.

Los contaminantes que estuvieron presentes y que posiblemente reaccionaron con el hidróxido de sodio, no fueron determinantes a la hora de observar el producto final.

El modelo cinético que mejor describe la reacción entre el Oxido de Silicio (Sílice) y el Hidróxido de sodio fue $2.528E+5$ y el orden global de la reacción fue de 4.6523. El orden de reacción para el NaOH es de 3,9565 en comparación al orden de la Sílice de 0,6979, lo que indica una mayor influencia en la reacción del hidróxido de sodio.

La construcción del reactor batch mediante la metodología de escalado geométrico desde nivel laboratorio a escala piloto fue determinante a la hora de evaluar las condiciones óptimas de operación.

REFERENCIAS

BROWNELL, Lloyd E; YOUNG, Edwin H., 1959. Process Equipment Design. John Wiley & Sons, Inc. New York. p 87-88

CHUSE, Robert; BRYCE E, Carson, 1993. Pressure Vessels: The ASME code simplified. McGraw-Hill, Inc. Seventh Edition.

FOGLER, S. (1999). Elements of chemical reaction engineering. 3 Ed. New Jersey: Prentice Hall

FOLETTO E, GRATIERI E, HADLICH L, JAHN S. Conversion of rice hull ash into soluble sodium silicate. Material Research. 2006; 3(9): 335-338.

FRITZ, James S, 2002. Química analítica cuantitativa. LIMUSA-NORIEGA EDITORES. MEXICO

Statistical Graphics Corp STATGRAPHICS Plus 5.0 1994 -2000

TURTON, R. et al. (1998). Analysis, synthesis, and design of chemical processes. New Jersey: Prentice Hall.

VARON, Javier; RESTREPO, Álvaro H, 2004. Caracterización Térmica y estequiométrica de la combustión de la cascarilla de arroz. Scientia Et Technica (Pereira). Vol 10 No. 24 Mayo. p 139-194

WALAS, S. M. (1998). Chemical Process Equipment: Selection and Design. New York: Butterworth-heimemann.

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR MEDIO DE UN SISTEMA ACOPLADO DE FOTOCATÁLISIS-HUMEDALES

Fabián Arroyave López - Gloria María Gutiérrez Rojas

RESUMEN

En este estudio se evaluó el acoplamiento entre fotocátalisis y humedales artificiales como tratamiento alternativo para aguas residuales provenientes del proceso de producción de resinas fenólicas. Los ensayos de fotodegradación se llevaron a cabo en un foto-reactor cilíndrico a escala laboratorio compuesto por 4 lámparas UV de 254 nm, con sistema de agitación y aireación, operando en modo batch. Se realizaron ensayos preliminares en fotocátalisis variando el tiempo de residencia, la cantidad de H_2O_2 , el tiempo de reinyección de H_2O_2 , el pH, y la cantidad de catalizador adicionada, para la fotocátalisis heterogénea la cantidad de TiO_2 y para foto-Fenton la cantidad $FeSO_4 \cdot 7H_2O$. Se encontró que el foto-Fenton ofrece los mejores resultados para la degradación de fenol, por lo tanto este se seleccionó como proceso de oxidación para la etapa inicial del sistema. Después de realizar un diseño de experimentos se encontró que las condiciones óptimas de operación son 175 mg/L de Fe^{+2} , 4 ml/L de H_2O_2 y la concentración más baja, dilución 1 (975.55 ppm). Para la segunda etapa del proceso se construyeron cuatro humedales artificiales, cada uno con un tipo de planta diferente, *Pistia stratiotes*, *Eichornia crassipes*, *Salvinia minima* y *Phragmites australis*, y se les realizó un proceso de adaptación con una concentración de fenol inicial de 60 ppm, después de 4 días de seguimiento solo sobrevivieron la *Eichornia crassipes* y la *Salvinia minima*, con las cuales se realizaron los ensayos finales para el sistema acoplado. Como resultado final se obtuvo un 100%, 99.53% y 89.86%

de degradación para fenol, DQO y DBO_5 , respectivamente, en el humedal con *Eichornia crassipes* y un 100%, 99.93% y 91.89% de degradación para fenol, DQO y DBO_5 , respectivamente, en el humedal con *Salvinia minima*. Los ensayos finales del sistema acoplado se llevaron a cabo utilizando muestras con la concentración original.

Palabras clave

foto-Fenton, humedales, fenol, peróxido de hidrógeno, hierro, degradación.

1. INTRODUCCIÓN

A pesar de los importantes logros en la búsqueda de una mayor eficiencia y productividad de los procesos químicos, el tratamiento de efluentes industriales que contienen contaminantes orgánicos es todavía un serio problema a ser resuelto. Los efluentes acuosos provenientes de una gran variedad de industrias químicas, petroquímicas y farmacéuticas contienen compuestos orgánicos como fenoles, bencenos, alcoholes, aminas, éteres y derivados aromáticos clorados en distintas concentraciones y combinaciones, que son tóxicos y peligrosos tanto para su descarga al medio ambiente como para su almacenamiento. En muchos casos estos efluentes son refractarios al tratamiento biológico, por lo que la biodegradación directa del efluente no constituye una verdadera alternativa y es necesario encontrar un tratamiento alternativo para su completa mineralización. El presente artículo tiene por

principal objetivo difundir la potencialidad del proceso acoplado fotocátalisis y humedales artificiales como método para tratar este tipo de aguas residuales, en especial las provenientes de las industrias de resinas fenólicas cuyos contenidos de fenol son elevados.

La fotocátalisis es una de las tecnologías avanzadas de oxidación donde por medio de la absorción de la luz por parte del catalizador se generan radicales libres con alta reactividad, los cuales reducen u oxidan las moléculas hasta convertirlas en compuestos menos complejos como el CO_2 y el H_2O (Arriaga *et al.*, 2007). Por otro lado los humedales son áreas saturadas por aguas superficiales o subterráneas que contienen vegetación. En estos se lleva a cabo actividad microbiana que facilita la degradación de los contaminantes (Lara, 1998).

El efluente tratado en este proyecto proviene del proceso de producción de resinas fenólicas de una empresa ubicada en el Valle de Aburrá (Antioquia-Colombia). Estas aguas residuales se caracterizan por su alto grado de contaminación, las principales sustancias que lo componen son residuos fenólicos y formaldehído entre otros compuestos altamente tóxicos. En la Tabla 1 se muestran las principales características del efluente bajo estudio.

TABLA 1
Características iniciales del efluente

Parámetro	Unidades	Valor
Fenol	(mg/L)	1648.06
DQO	(mg/L)	36271.69
DBO	(mg/L)	2378.82
COT	(mg/L)	10876.14
pH	-	4.31
Color	-	Transparente

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se llevó a cabo en los laboratorios de Fotocátalisis, Biotecnología, Fenómenos Químicos y Análisis Instrumental de la Universidad EAFIT en la ciudad de Medellín, Colombia.

2.1 Reactivos

Se utilizaron $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ y ácido sulfúrico grado analítico, H_2O_2 (35%) y TiO_2 Degussa para llevar a cabo los ensayos experimentales

Agua residual: El agua residual empleada provino de una planta de producción de resinas fenólicas del Valle del Aburra.

Plantas: Todas las plantas fueron adquiridas en estanques ubicados en el departamento de Antioquia.

2.2 Fotocátalisis

La unidad en que se llevaron a cabo los experimentos tanto en fotocátalisis homogénea como heterogénea, consistía en un reactor cilíndrico de 500 mL rodeado con cuatro lámparas ultravioleta (254 nm) Phillips TUV G8 T5 8W con un sistema de agitación y aireación constante.

2.3 Humedales artificiales

Se llevaron a cabo ensayos con cuatro especies diferentes de plantas acuáticas con el fin de buscar cual ofrecían mejores resultados en la degradación de fenol. Las plantas utilizaron fueron *Pistia stratiotes*, *Eichornia crassipes*, *Salvinia minima* y *Phragmites australis*.

2.4 Métodos analíticos

Con el fin de ver los resultados obtenidos durante la degradación de las aguas residuales se midieron la concentración de fenol, el DQO, DBO y COT mediante las técnicas de HPLC, método estándar de reflujo cerrado 5220B, método respirométrico y método APHA 5310 respectivamente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Ensayos preliminares

Con el fin de buscar la alternativa más conveniente para el proceso inicial del sistema acoplado se evaluaron los rendimientos en la degradación de fenol en fotocátalisis

heterogénea utilizando dióxido de titanio como catalizador y en la fotocátalisis homogénea utilizando el reactivo Fenton. Todas las muestras antes de ser sometidas al proceso de fotodegradación fueron ajustadas a un pH de 3 (utilizando H₂SO₄) para favorecer así estos procesos, especialmente el de foto-Fenton (Gernjak et al., 2003; Will et al., 2004; Núñez et al., 2007; Schwingel de Oliveira et al., 2007).

Se obtuvieron porcentajes de degradación dentro del rango de 0%-7% para la fotocátalisis heterogénea y de 10%-80% para el foto-Fenton lo cual concuerda con lo reportado por la literatura para este tipo de contaminantes (Spacek y Bauer, 1995; Oller, 2005), por lo tanto la fotocátalisis homogénea, utilizando como catalizador el reactivo Fenton fue la elegida para la etapa inicial del proceso acoplado.

Para la etapa final de humedales se construyeron cinco sistemas diferentes, cuatro utilizando diferentes tipos de plantas, *Pistia stratiotes*, *Eichornia crassipes*, *Salvinia minima* y *Phragmites australis* y uno sin ninguna planta para analizar el fenómeno de la evaporación. Los resultados obtenidos fueron 18.42%, 29.44%, 74.35%, 23.84% y 6.32% para cada uno de los humedales anteriores, resultados que muestran que con la presencia de alguna de las plantas se obtiene un porcentaje de degradación mayor del contaminante en comparación al humedal sin ningún tipo de planta, justificando así la presencia de estas. No obstante se obtuvieron porcentajes de degradación importante en las cuatro plantas solo la *Eichornia crassipes* y la *Salvinia minima* conservaban un buen aspecto después del período de adaptación, razón por la cual estas fueron las elegidas para el sistema acoplado con el proceso de foto-Fenton.

3.2 Diseño de experimentos

Para buscar las condiciones óptimas de operación de los factores que afectan el resultado de la degradación para la etapa inicial de foto-Fenton se realizó un diseño de experimentos. La metodología utilizada para realizarlo fue la de superficie de respuesta, diseño de experimentos de Box-Behnken. Cada una de las variables de estudio se analizó a tres niveles (Tabla 2) y como variable de respuesta se tomó el porcentaje de degradación de fenol.

Los ensayos se realizaron por duplicado, manteniendo constante el pH=3, el volumen de la muestra 150 mL, el tiempo de reacción 2 horas y la longitud de onda de la fuente de radiación 254 nm.

TABLA 2

Niveles de las variables del diseño de experimentos

Variable	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Fe ⁺² (mg/L)	100	175	250
H ₂ O ₂ (ml/L)	2	3	4
Dilución (ppm)	975.55	1231.44	1648.06

Los resultados obtenidos para una óptima degradación del fenol por el método de foto-fenton son 222.12 mg/l de Fe⁺², 4 ml/l de H₂O₂ y concentración inicial de 975.55 ppm con estas condiciones de operación se obtienen degradaciones del orden de 99.69%, 69.09% y 74.09% para fenol, DQO y COT respectivamente.

3.3 Descripción del sistema Acoplado

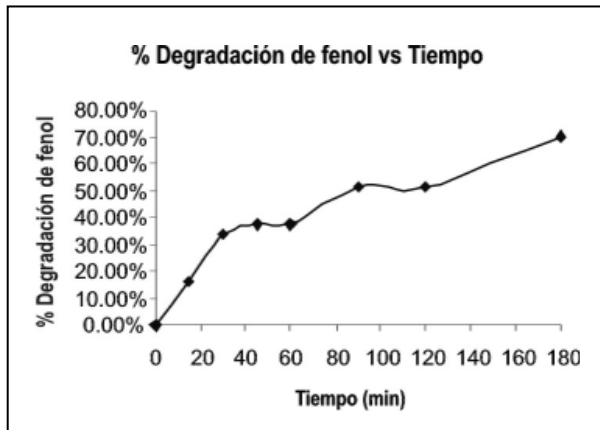
Para el sistema acoplado se utilizaron los datos óptimos de cantidad de hierro y peróxido de hidrógeno, sin embargo no se utilizó la muestra más diluida y si la más concentrada ya que ésta fue la que presentó un porcentaje de degradación menor, lo que hace propicio el uso de la segunda etapa del proceso.

Con el fin de garantizar la presencia de radicales hidroxilo durante toda la reacción se realizaron reinyecciones de H₂O₂ a los 15, 60 y 120 minutos (Antoniadis et al., 2007; Núñez et al., 2007).

En la etapa de los humedales artificiales se utilizaron *Eichornia crassipes* y la *Salvinia minima* las cuales superaron la etapa de adaptación al fenol sin ningún inconveniente.

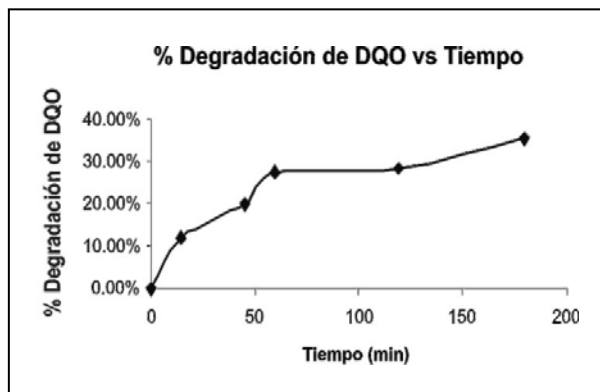
Para la etapa inicial del proceso acoplado se obtuvo un 70.28 % en la degradación de fenol (Gráfica 1), un 35.57% en la reducción del DQO (Gráfica 2) y un 39.70% en la reducción del COT. (Gráfica 3).

GRÁFICA 1
Remoción de fenol muestra concentrada



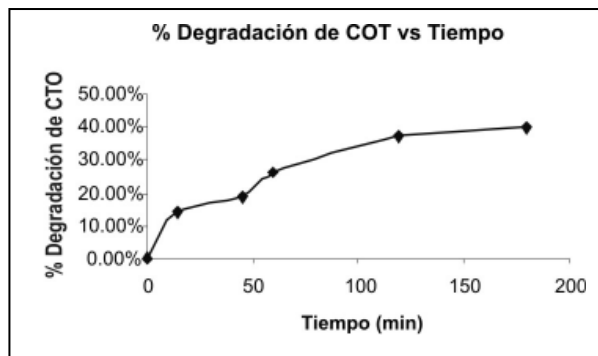
En la gráfica 1 se vea como en el minuto 15 se alcanza un porcentaje de degradación de 16%, al adicionar la segunda dosis de H₂O₂ se alcanza un porcentaje de degradación de 37.79% en el minuto 60. finalmente y después de 3 horas de reacción, se obtiene un porcentaje máximo de degradación de 70.28%.

GRÁFICA 2
Reducción de DQO para la muestra concentrada



En la gráfica 2 se ve como el porcentaje máximo alcanzado no corresponde al porcentaje alcanzado en la remoción de fenol esto se debe a que inicialmente el fenol se oxida a compuestos intermedios y después va alcanzando la oxidación total hasta convertirse en CO₂ (Kavitha y Palanivelu, 2004)

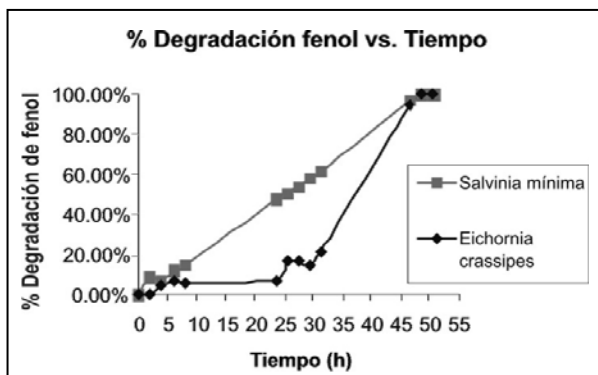
GRÁFICA 3
Reducción de COT para la muestra concentrada



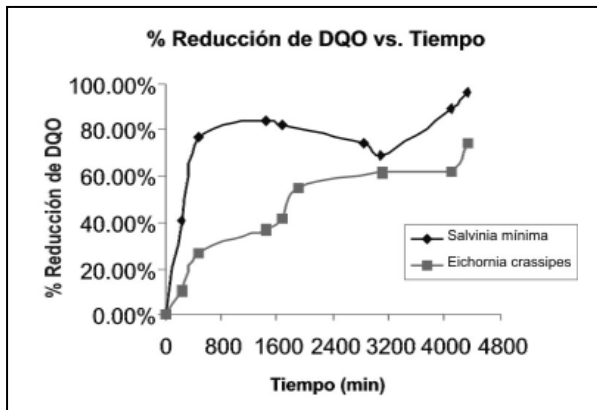
En la reducción de COT al igual que en la de DQO se presenta una diferencia entre los porcentajes obtenidos con respecto a los obtenidos para la degradación de fenol, lo cual es debido a la aparición de compuestos intermedios debido a la oxidación del fenol (Kavitha y Palanivelu, 2004).

Una vez culminado el proceso de tres horas en la etapa inicial de foto-Fenton se pasa a la etapa de los humedales artificiales en los cuales partiendo de una concentración de fenol de 19-35 ppm, la cual se obtiene por la dilución del agua proveniente de la primera etapa en el agua del humedal, y durante un proceso de dos días se obtiene una degradación total del fenol presente en las aguas para los dos humedales trabajados (Gráfica 4), Adicionalmente y con un tiempo de residencia de tres días se logró obtener una reducción importante del DQO en ambos humedales siendo mayor la obtenida por la *Salvinia minima* (Gráfica 5).

GRÁFICA 4
Degradación de fenol en humedales



GRÁFICA 5
Reducción de DQO en humedales artificiales



Como se puede observar en la gráfica 4, para la *Eichornia crassipes*, durante las primeras veinte horas, aproximadamente, el porcentaje de fenol permaneció constante, esto debido a que los microorganismos se encontraban en estado de latencia por el cambio que se presentó en el medio en el que se encontraban; sin embargo, después de este tiempo de aclimatación de los microorganismos la velocidad de degradación aumentó exponencialmente obteniendo una mineralización total del fenol en dos días.

Para la *Salvinia minima*, a diferencia de la *Eichornia crassipes*, para esta no se presenta un estado de latencia y por el contrario, la degradación comienza desde las primeras horas de manera constante, por lo tanto se puede decir entonces, que los microorganismos comenzaron su cinética de crecimiento en el medio con la fase exponencial y se suprimió la fase lag de su comportamiento.

3.4 Resultados sistema acoplado

De los resultado del sistema acoplado para ambas plantas (Tabla 3, Tabla 4) se puede ver que se alcanza una degradación total del fenol en ambos sistemas, sin embargo, no se pueden alcanzar la mineralización total de las aguas ya que no se alcanza una reducción del 100 % en el DQO, con ninguna de las plantas utilizadas, lo que indica la presencia de productos intermedios de la oxidación del fenol o productos propios de la muestra original; sin embargo, es de esperarse una mineralización total de las

aguas por los mecanismos naturales debido al aumento que se presenta en los índices de biodegradabilidad de estas para ambas plantas.

TABLA 3
Eficiencia para el tratamiento acoplado foto-Fenton-*Eichornia crassipes*

MEDICIÓN	FENOL PPM	DQO MG/L	DBO MG/L
Inicial	1648.1	36271.69	2378.82
Final	0	168.75	241.1
% Reducción	100%	99.53%	89.86%

TABLA 4
Eficiencia para el tratamiento acoplado foto-Fenton-*Salvinia minima*

	FENOL PPM	DQO MG/L	DBO MG/L
Inicial	1648.1	36271.69	2378.82
Final	0	25.5849	192.9
% Reducción	100%	99.93%	91.89%

4. CONCLUSIONES

La fotocatalisis homogénea, en este caso el foto-Fenton, resulta ser el tipo de proceso avanzado de oxidación más apropiado y que arroja mejor resultados en cuanto a la degradación de fenol en aguas residuales industriales.

El foto-Fenton por si solo puede constituir una aplicación útil para la degradación de fenol de aguas residuales industriales cuando las concentraciones son relativamente bajas (< 975 ppm.) ya que se obtienen degradaciones del orden de 99.69%, 69.09% y 74.09% para fenol, DQO y COT, respectivamente.

Por medio del proceso acoplado foto-Fenton y humedales artificiales para tratar aguas residuales industriales con un

alto contenido de fenol, es posible alcanzar degradaciones de fenol y DQO de 100 % y 99.5 % y así cumplir con la legislación colombiana en lo que respecta a vertimientos líquidos.

Las plantas que ofrecen mejores resultados para la degradación de fenol son *Eichornia crassipes* y *Salvinia minima* con las cuales se obtiene una degradación del 100 % del fenol con el sistema acoplado, sin embargo, la segunda ofrece unos resultados levemente mayores en lo que se refiere a la reducción del DQO, 99.93% y a la de DBO, 91.89% comparada con 99.53 % y 89.86% respectivamente.

A la hora de realizar un análisis financiero hay que tener en cuenta que este es un tipo de proceso que se enfoca más en la parte ambiental que en la parte financiera.

5. REFERENCIAS

- ANTONIADIS, A; Takavakoglou, V; Zalidis, G; Poullos, I. "Development and evaluation of an alternative method for municipal wastewater treatment using homogeneous photocatalysis and constructed wetlands" *Catalysis Today*. Vol 124. pp. 260-265. 2007
- ARRIAGA, Maria de la Luz; Sandoval, G; García, R; Ramos, C.R. "Degradación de clorofenoles por fotocatalisis". [Online]. [Citado 25 de enero de 2007].
- GERNJAK, Wolfgang; Krutzler, Thomas; Glaser, Andreas; Malato, Sixto; Cáceres, Julia; Bauer, Rupert; Fernández-Alba, A.R. "Photo-Fenton treatment of water containing natural phenolic pollutants" *Chemosphere*. Vol 50. pp 71-78. 2003.
- KAVITHA V; Palanivelu K. "The role of ferrous ion in Fenton and photo-Fenton processes for the degradation of phenol" *Chemosphere*. Vol. 55. pp 1235-1243. 2004.
- LARA B, Jaime Andrés. "Depuración de aguas residuales municipales con humedales municipales" Trabajo final, Master en ingeniería y gestión ambiental, Universidad politécnica de Cataluña, 1998.
- NUÑEZ LI; García-Hortal J.A; Torrades F. "Study of kinetic parameters related to the decolorization and mineralization of reactive dyes from textile dyeing using Fenton and photo-Fenton processes" *Dyes and Pigments*. Vol. 75. pp 647-652. 2007.
- OLLER, Isabel. "Degradación y detoxificación mediante fotocatalisis solar de sustancias consideradas contaminantes prioritarios por la unión Europea". [online] [Citado 12 de enero de 2008]
- SCHWINGEL de OLIVEIRA, Isadora; Viana, Lilian; Verona, Cenira; Vargas Fallavena, Vera Lúcia; Nunes Azevedo, Carla Maria; Pires, Marcal. "Alkydic resin wastewaters treatment by Fenton and photo-Fenton processes." *Journal of Hazardous Materials*. Vol 146. pp. 564-568. 2007.
- SPACEK, W. and Bauer, R. "Heterogeneous and homogeneous wastewater treatment-comparison between photodegradation with TiO₂ and the photo-fenton reaction" *Chemosphere*. Vol. 30. pp.477-484. 1995.
- WILL, I.B.S.; Moraes, J.E.F.; Teixeira, A.C.S.C.; Guardani, R.; Nascimento, C.A.O. "Photo-Fenton degradation of wastewater containing organic compounds in solar reactors." *Separation and Purification Technology*. Vol 34. pp. 51-57. 2004.

OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DEL ACEITE EXTRAIDO DE LA SEMILLA DE *Jatropha curcas* L.

Carolina Alzate Montoya - Diana Marcela Franco Ceballos - Catalina Hincapié Vargas

ABSTRACT

This project was developed in the lab, starting from a dry seed called *Jatropha curcas* L. until obtaining the final product, the biodiesel. First, the selection of the best *Jatropha* type was made. Evaluating between five seeds, the CPB2 was selected to continue with the extraction improvement tests, because it shows the best combination of crop growing productivity and high performance of oil. The extraction was made by mechanic means, with preheated material and using a hydraulic press. The test design evaluated the incidence of three factors on the extraction: pressure applied, temperature, and preheating time of the seeds. The interactions between these factors were not significant and the effect of the pressure was the only significant on the performance.

The extracted oil was refined and its characterization followed the procedures described by the Colombian technical standards (NTC) for oil and fat characterization. The oil was used to obtain biodiesel by methanolysis, employing NaOH and KOH as catalysts. Besides the catalyst, the transesterification test design studied another three factors: molar concentration alcohol:oil, catalyst ratio, and reaction temperature. The results said that the catalyst effect and the molar concentration alcohol:oil, are significant on the performance of the reaction. The

biodiesel obtained, was also refined and its cinematic viscosity API gravity, cetane index, heating power, cloud point, inflammation point and copper plate corrosion characteristics was evaluated; it was compared with diesel and biodiesel theoretical information obtained from other oleaginous vegetables, leading to identify advantages and disadvantages. Finally, a preliminary costs analysis was developed, and it was found that a laboratory scale, the biodiesel production using *Jatropha* was not feasible, however, if taken to an industrial scale is possible that the production costs decreases, making the project feasible.

RESUMEN

Este proyecto fue desarrollado a escala de laboratorio, partiendo desde la semilla seca de *Jatropha curcas* L., hasta la obtención del biodiesel. En primer lugar se realizó la selección del mejor material¹, de cinco evaluados, optando por el material CPB2², para continuar con los ensayos de

1 Material, se refiere a la semilla seca de *Jatropha curcas*, proveniente de diferentes lugares.

2 CPB2, material brasileiro, segundo en ser cultivado en el país por Colombiana de Biocombustibles S. A, empresa proveedora de todas las semillas para la ejecución del proyecto. También están los materiales CPB1, CPB3, CPB4 y CPB5, donde el número indica el orden de llegada al país, la B es de material brasileiro y la I de material Hindú.

mejoramiento en la extracción, dado que presenta la mejor combinación de factores, en cuanto a la productividad en el cultivo y alto rendimiento de aceite, a pesar de no ser el mayor. Durante los ensayos de extracción de aceite se varió presión hidráulica, temperatura y tiempo de precalentamiento de las semillas, con el mejor resultado en cuanto a rendimiento de aceite, se procedió con la refinación y caracterización del mismo, basándose en las Normas Técnicas Colombianas para la caracterización de aceites y grasas, específicamente índice de yodo, de saponificación, de acidez, de refracción y densidad. Posteriormente se realizó la reacción de metanólisis, con catálisis alcalina para obtener el biodiesel, el cual fue también refinado y caracterizado mediante pruebas de viscosidad cinemática, gravedad API, índice de cetano, poder calorífico, punto de nube, punto de inflamación y corrosión por lamina de cobre, y se comparó con información teórica del diesel y del biodiesel obtenido a partir de otros aceites vegetales.

Palabras clave

Biodiesel, *Jatropha curcas* L., Aceite vegetal, Zonas no interconectadas, Extracción mecánica.

1. INTRODUCCIÓN

La ausencia de energía en algunas zonas no interconectadas del territorio Colombiano (ZNI), impide el desarrollo económico y social de estas comunidades. En Colombia el 66% es considerado ZNI, gran parte de este territorio posee energía proveniente de combustibles fósiles y algunas zonas no cuentan con ningún tipo de energía. (IPSE, 2007)

Ante esta problemática, se busca desarrollar un biocombustible (Biodiesel) a partir del aceite de la *Jatropha curcas* L. que pueda ser implementado en plantas generadoras de energía, y cuyas características garanticen la viabilidad técnica para su implementación como solución no sólo por el origen renovable de sus materias primas, sino por sus menores efectos sobre el medio ambiente.

Como materia prima en la Industria del biodiesel, la *Jatropha curcas* L. es una planta que presenta ventajas competitivas frente a otras oleaginosas, tales como sus bajas exigencias a nivel agronómico, pudiendo ser sembrada en suelos degradados y aportando a su recuperación; así mismo, es compatible con otro tipo de cultivos. A nivel comercial, no afecta el mercado alimenticio por ser un producto tóxico que no puede ser consumido por seres humanos, ni animales y su cosecha puede ser recolectada manualmente, proporcionando así posibilidades de empleo para las regiones.

Las preguntas de investigación que se desarrollan en el artículo son: ¿Cuáles son las condiciones óptimas de las evaluadas para la extracción mecánica del aceite de *Jatropha*?, ¿Cuáles son las mejores condiciones para la obtención de un biocombustible mediante la metanólisis del aceite extraído de la semilla de *Jatropha curcas* L. de las analizadas en el laboratorio?, ¿Es posible obtener un biocombustible a partir del aceite extraído de la semilla de *Jatropha curcas* L., que sea competitivo en el mercado del biodiesel?.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El proyecto se llevó a cabo mediante ensayos a escala laboratorio, tanto para la extracción mecánica, como para la obtención del biodiesel, realizando un diseño de experimentos de efectos fijos.

2.1 Selección del Material

La selección del material de *Jatropha curcas* L. para el estudio, se realizó evaluando el contenido de aceite y rendimiento en cultivo de cada uno de los cinco materiales suministrados por Colombiana de Biocombustibles S.A. El contenido de aceite se determinó mediante extracción mecánica con prensa hidráulica, manteniendo condiciones fijas de temperatura y tiempo de precalentamiento, presión

aplicada en la prensa hidráulica, tiempo de prensado y humedad de la semilla. Además, se realizó la clasificación de la semilla donde se tomó el peso, la altura, el ancho y el largo para un promedio de 30 semillas de cada uno de los materiales.

2.2 Extracción del aceite

La extracción del aceite se realizó de forma mecánica, empleando una prensa hidráulica marca ELE, modelo 9934.1055, con adaptación de un sistema de vacío, ambos equipos disponibles en el Laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Universidad EAFIT. Antes de aplicar presión, la semilla se precalentó al igual que el contenedor, el cual fue llevado a una temperatura cercana a la del material. El cilindro empleado es de acero inoxidable, fue diseñado por el laboratorio de Modelos y construido por el Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Universidad EAFIT.

Con el material de *Jatropha* seleccionado se realizó un diseño de experimentos multifactorial (Tabla 1.) dando lugar a 8 ensayos con sus respectivas réplicas. A partir del diseño de experimentos se determinaron las condiciones más apropiadas para la extracción eficiente del aceite, y se realizó el análisis estadístico de los resultados para verificar la incidencia de las variables evaluadas, en el rendimiento final de la extracción.

TABLA 7
Factores y niveles evaluados en la extracción del aceite

Factores tratamiento	Niveles	
Temperatura de precalentamiento (°C)	110	120
Tiempo de precalentamiento (min)	10	20
Presión (Kgf/cm ²)	227.132	305.059

2.3 Refinación del aceite

El aceite extraído se refinó con el fin de eliminar la mayor cantidad de impurezas como agua, gomas o partículas sólidas contaminantes, presentes en el aceite que pudieran afectar el biodiesel producido. Las etapas que se llevaron a cabo fueron: filtración, para la retención de partículas sólidas de mayor tamaño, el desgomado, para la reducción de material insaponificable y desacidificación con el cual se neutralizó los ácidos grasos libres presentes en el aceite.

2.4 Caracterización del aceite

El aceite fue caracterizado mediante métodos instrumentales y fisicoquímicos siguiendo los procedimientos del Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC. Se determinaron propiedades como Densidad (NTC 336), Índice de Refracción (NTC 289), Índice de Acidez (NTC 218), Índice de Yodo (NTC 283) e Índice de Saponificación (NTC 335).

Las valoraciones de los índices de acidez, saponificación e índice de yodo, se realizaron tanto para el aceite crudo como para el aceite refinado, con el fin de verificar los efectos de la refinación y su utilidad en el mejoramiento de las condiciones del aceite para la transesterificación.

De igual forma, el aceite extraído fue analizado por cromatografía de gases para la identificación de los ácidos grasos constituyentes. La prueba fue realizada por el Grupo interdisciplinario de estudios moleculares de la Universidad de Antioquia.

2.5 Obtención de biodiesel

El biodiesel se obtuvo mediante transesterificación con metanol, empleando catálisis básica. Para este proceso se consideraron condiciones como el tipo y cantidad de catalizador, la temperatura, presión y tiempo de reacción, la relación molar alcohol: aceite, y la agitación.

Se efectuó un diseño de experimentos con el fin de identificar las condiciones que permitieran un mejor rendimiento de la transesterificación, en términos de conversión de aceite en biodiesel. Los factores y niveles que se determinaron se muestran en la tabla 2. De esta forma se obtuvieron 16 tratamientos, cada uno con su respectiva réplica, para un total de 32 ensayos.

El procedimiento implementado en el laboratorio consistió en primera instancia en la mezcla del catalizador con el alcohol para la formación del metóxido; después de homogenizada la mezcla, se precalentó el aceite a la temperatura de reacción y se adicionó el metóxido, al tiempo que se mantenía agitación a 1150 rpm, con el fin de minimizar las limitaciones de transferencia de masa. El tiempo de reacción fue de 30 minutos, después de los cuales se suspendió la agitación.

TABLA 2
Factores y niveles para la obtención de biodiesel

Factores tratamiento	Niveles	
Catalizador	NaOH	KOH
Cantidad de Catalizador	0.50%	1%
Relación molar alcohol:Aceite	3:1	6:1
Temperatura (°C)	25	60
Restricciones o factores bloque	Agitación (rpm)	1150
	Tiempo de reacción (min)	30
	Presión (atm)	0.96

Una vez superada la etapa de reacción, se llevó a embudos

de separación durante 14 horas, con el fin de dar el tiempo suficiente para la división en dos fases del producto (glicerina y metilésteres). El biodiesel obtenido se llevó a un proceso de refinación en el cual se eliminaron residuos de jabón, restos de glicerina y metanol, mediante las etapas de separación, lavado y secado.

2.6 Caracterización del biodiesel

El biodiesel obtenido se caracterizó para determinar la calidad del combustible y las impurezas remanentes en el proceso. Los análisis de caracterización fueron realizados en la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, en el Laboratorio de crudos y derivados. Las pruebas se rigieron por la norma ASMT D 6751 para el biodiesel (B100) grado S15. Para el producto obtenido, se analizaron: viscosidad cinemática, gravedad API, índice de cetano poder calorífico, punto de nube, punto de inflamación y corrosión por lámina de cobre; para compararlo con información teórica del diesel convencional y del biodiesel obtenido a partir de otros aceites vegetales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Selección de material y extracción del aceite

TABLA 3
Selección del material

Tipo de semilla	Ensayo 1			Ensayo 2		
	% Aceite extraído, según la torta (P/P)	% Aceite extraído, según el aceite (P/P)	% pérdidas de aceite en el proceso	% Aceite extraído, según la torta (P/P)	% Aceite extraído, según el aceite (P/P)	% pérdidas de aceite en el proceso
CPI5	11,25	10,54	0,72	12,56	11,43	1,13
CPB1	15,09	11,67	3,42	-	-	-
CPB2	14,89	13,32	1,57	15,41	14,80	0,60
CPB3	16,16	14,79	1,37	15,92	15,02	0,89
CPB4	14,67	13,53	1,14	12,51	11,62	0,89

Después de haber efectuado cinco ensayos por duplicado se puede observar en la tabla 3, que con excepción del material CPB1, al cual no se le hizo replica por escasez del mismo, se encontró que es CPB3 produjo un 1% más de aceite que los otros materiales, siendo este un valor poco representativo se revisó la ficha técnica de producción en cultivo para cada uno de los materiales proporcionada por Colombiana de Biocombustibles S.A. donde se especifica que todos fueron sembradas bajo las mismas condiciones de suelo, agua y sol, se encuentra que la planta de mayor rendimiento en peso y en número de granos a nivel de cultivo, es la CPB2, capaz de producir hasta 1070g y 1220 granos por planta. Por estas razones, los ensayos para la optimización en el proceso de la extracción del aceite se trabajaron con CPB2.

En los resultados obtenidos, se encontró que los efectos de las interacciones entre los factores no son significativos en el porcentaje de aceite extraído. Respecto a los efectos principales de los factores individuales, se encuentra que temperatura y tiempo de precalentamiento no tienen un efecto considerable sobre la variable respuesta. Aunque a mayor temperatura y tiempo de precalentamiento se obtiene mayor rendimiento, la cantidad no es tan significativa como

para decir que esta es la mejor condición, es necesario hacer un análisis económico, para que en este caso la decisión sea tomada por costos y no por rendimiento. Todo lo contrario ocurre con la variable presión de la prensa, cuyo aumento es proporcional al aumento del porcentaje de aceite extraído y su efecto resulta significativo de acuerdo con el análisis estadístico.

3.2 Caracterización del aceite

Los valores de las diferentes propiedades obtenidos experimentalmente para el aceite de *Jatropha curcas* L. fueron confrontados con los reportados en la literatura y con las propiedades teóricas de otros aceites considerados de gran potencial en la producción de biodiesel.

Considerando que una de las desventajas del uso de los aceites vegetales sin transformar como combustible es que su densidad es superior a la del diesel convencional (0.83 gr/cm³), el valor de 0.91 gr/cm³ obtenido para el aceite de *Jatropha* plantea similitudes en esta propiedad respecto al aceite de palma y ventajas frente a otros aceites como el de girasol o higuera cuyas densidades reportadas son 0.92 y 0.96 g/cm³ respectivamente.

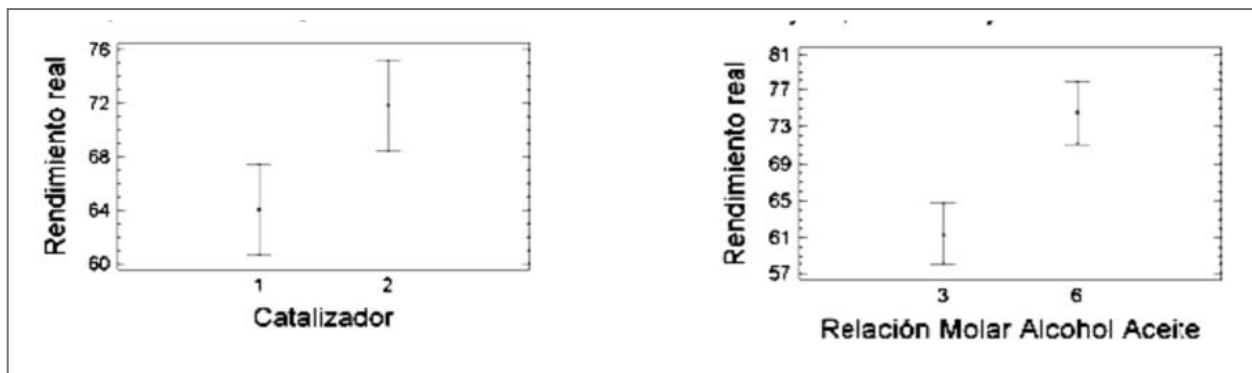
En cuanto al índice de yodo, relacionado con las insaturaciones presentes en el aceite, la literatura reporta valores muy superiores para el aceite de *Jatropha* (97 – 101.7) frente al de otras oleaginosas como palma (37.8) o higuera (20.74). Los valores obtenidos experimentalmente (172.36 para el aceite crudo y 144.69 para el aceite refinado) fueron superiores a los reportados en la literatura (101.7 para el aceite refinado). (Mattana et al., 2005); la mayor insaturación en el aceite de *Jatropha* frente al de palma, también se demuestra con la composición porcentual relativa de los ácidos grasos, ya que aunque el contenido de ácido oléico es similar (aprox. 38% para ambos aceites), el aceite de *Jatropha* contiene cerca del 27% del ácido linoléico que el aceite de palma, lo cual explica su mayor índice de yodo. Sin embargo, Aunque la mayor insaturación representa una ventaja frente a aceites provenientes de otras oleaginosas, dado que ésta incide positivamente en la reducción de la viscosidad, podría reducir la estabilidad a la oxidación, haciéndolo vulnerable a la formación de peróxidos. De igual forma, una mayor insaturación reduce el número de cetano del biodiesel, propiedad de gran importancia en la calidad de combustión en el motor (Castro, 2004).

El índice de acidez experimental para el aceite de *Jatropha* (0.37%) indica buenas condiciones para la transesterificación alcalina, dado que limita la formación de jabones. Incluso, el aceite crudo presenta un índice de acidez aceptable (0.5%) para el trabajo con este tipo de catalizadores (Mattana et al, 2005), lo cual representa una ventaja frente a otros aceites cuyo índice de acidez es superior.

3.3 Obtención del biodiesel

El análisis estadístico realizado a los resultados de los ensayos de obtención de biodiesel, muestra que el efecto más significativo corresponde al tipo de catalizador, arrojando como mejor resultado el KOH (número 2 en la figura 1) y a la relación molar alcohol: aceite, donde se encuentra que la recomendada es de 6:1; el porcentaje de catalizador que mejor se acomoda a las pruebas desarrolladas en el laboratorio es de 0,5%. Sin embargo este factor no presentó un efecto estadísticamente significativo.

FIGURA 1
Rendimiento real versus catalizador, rendimiento real versus relación molar alcohol aceite



3.4 Caracterización del biodiesel

La viscosidad cinemática para el biodiesel a partir del aceite de *Jatropha curcas* L. (5.9 cSt) se encuentra dentro de los rangos estipulados por la norma (1,9-6 cSt), su valor es cercano al producido a partir de palma y presenta ventajas considerables frente al de higuera, (14,89 cSt), ya que este se desvía de los parámetros de calidad. La ventaja radica en que a menor viscosidad del aceite mejor es la fluidez y por ende se evita la formación de depósitos o pérdida de potencia en los motores, dando así características de lubricidad al sistema de combustión. (Knothe, 2005)

El índice de cetano (45.1) encontrado para la muestra evaluada no cumple con los requerimientos de la norma, siendo incluso inferior al del diesel convencional; lo que hace que se presente un mayor retraso en la ignición y por lo tanto, mayores dificultades en el arranque y aumento en las emisiones de humo. (Castro, 2007); el poder calorífico obtenido para el biodiesel, indica que aunque el contenido energético del biodiesel de *Jatropha curcas* L. no supera el del diesel, si es mayor comparado con los biodiesel a partir de otras materias primas como palma e higuera. Estos resultados explican la disminución que se presenta en la potencia de los motores cuando trabajan con biodiesel en lugar del diesel a partir del petróleo.

Basados en los resultados para punto de fluidez y punto de nube, se encuentra una desventaja para el biodiesel de *Jatropha curcas* L. cuyo punto de cristalización es de 6°C, mientras que el punto de cristalización de los motores que utilizan diesel les permite trabajar a temperaturas muy bajas (-14°C). (Cortés, 2007)

El punto de inflamación obtenido para el biodiesel de *Jatropha curcas* L. (64°C) es superior al mínimo reportado para el diesel convencional, sin embargo, se aleja de los valores requeridos por la norma ASTM (130°C min.). El valor encontrado, indica que aun hay presencia de metanol en el producto siendo necesario mejorar los procesos de

refinación y transesterificación para garantizar la mayor conversión y una calidad superior que otorgue ventajas y mayor seguridad para su manejo.

El parámetro residuo de carbón está por encima de los límites estipulados, reflejando que la transesterificación no fue completa y por tanto puede haber presencia de mono, di y triglicéridos.

4. ANÁLISIS DE COSTOS PRELIMINAR

4.1 Inversión inicial

Se realizó un análisis de costos preliminar, donde se evaluó el requerimiento de capital inicial para la producción de biodiesel a escala de laboratorio, en este no se tuvo en cuenta el costo de la mano de obra, ni terrenos, ni gastos de montaje y adecuaciones. El costo de los equipos fue calculado para una capacidad de planta de 1,43 galones de biodiesel diarios, es decir 5.42 litros de biodiesel día, teniendo en cuenta un día laboral de dos turnos (16 horas). En este cálculo también se precisó el cuello de botella del proceso que es la prensa hidráulica, capaz de producir 7.08 litros de aceite diarios. El costo de algunos equipos fue hallado trayendo al presente el valor empleando los CEPCI³ (Turton, 2003).

4.2 Materias primas

Los costos de las materias primas fueron tomados de la base de datos legiscomex, el valor de la materia prima fue dado por la empresa Colombiana de biocombustibles S.A.

³ CEPCI: Chemical Engineering Plant Cost Index (Turton, 2003)

TABLA 1
Costo de las materias primas por Litro de biodiesel

		Unidad	Costo (\$/un)	Densidad (kg/Lt)	Peso molecular	DATOS EXPERIMENTALES		DATOS TEÓRICOS	
						Cantidad (Kg MP/Lt de biodiesel)	Costo (\$/año)	Cantidad (Kg/año)	Costo (\$/año)
Extracción	Jatropha	Kg	\$ 600,0	-	-	5,3150	\$ 3.189,00	2,8169	\$ 1.690,12
Refinación aceite	Cal	Kg	\$ 10.000,0	-		0,0000	\$ 0,01	0,0000	\$ 0,01
	Acido Fosfórico puro	Kg	\$ 7.072,4	1,685		0,0029	\$ 20,31	0,0021	\$ 14,88
Biodiesel	Metanol (grado reactivo para biodiesel)	Kg	\$ 908,8	0,791	32,04	0,2539	\$ 230,75	0,2122	\$ 192,85
	Hidróxido de Potasio	Kg	\$ 4.000,0	-	-	0,0056	\$ 22,46	0,0047	\$ 18,77
Total							\$ 3.462,54		\$ 1.916,63

4.3 Costos energéticos

Se señala el consumo energético de cada uno de los equipos, de los diferentes procesos según su tiempo de uso. Tomando un valor de la energía de 225.6 \$/KW precio de los servicios públicos en el sector industrial, en Medellín.

TABLA 2
Costos energéticos de la producción de biodiesel a escala de laboratorio

		COSTO ENERGÉTICO A ESCALA LABORATORIO					
		DATOS EXPERIMENTALES			DATOS TEÓRICOS		
		Tiempo uso (h)	Energía consumida - potencia (KW)	Valor Total (\$)	Tiempo uso (h)	Energía consumida - potencia (KW)	Valor Total (\$)
Extracción Aceite	Horno	1,969	1,270	564,0	1,043	1,270	298,9
	Prensa hidráulica	1,969	0,792	351,7	1,043	0,792	186,4
	Bomba de vacío	1,280	0,120	34,6	0,678	0,120	18,4
Refinación Aceite	Plancha de calentamiento	0,500	0,698	78,7	0,500	0,698	78,7
	Centrifuga	0,898	0,350	70,9	0,657	0,350	51,9
	Plancha de agitación	0,167	0,698	26,2	0,167	0,698	26,2
	Centrifuga	0,898	0,350	70,9	0,657	0,350	51,9
Obtención Biodiesel	Plancha de agitación	0,500	0,698	78,7	0,500	0,698	78,7
Refinación biodiesel	Plancha de calentamiento y agitación	0,250	0,698	39,4	0,250	0,698	39,4
TOTAL				1315,20			830,59

Nota: la potencia fue tomada de las hojas de registro de cada equipo.

Como se puede observar los equipos que mayor requerimiento de energía tienen son la prensa hidráulica y la estufa de secado, con un valor 0.792 y 1.270 KW respectivamente.

4.4 Análisis de resultados de costos

El costo total a escala laboratorio sin incluir la inversión inicial en equipos, ni en mano de obra, o montaje, se muestra en la tabla 3.

TABLA 3
Costo total de producción de biodiesel a escala laboratorio

	DATOS EXPERIMENTALES	DATOS TEÓRICOS
Materia Prima	3462,54	1916,63
Consumo energético	1315,20	830,59
TOTAL (\$/Lt de biodiesel)	4777,74	2747,22
TOTAL (\$/gal de biodiesel)	18112,40	10412,70

Los datos muestran que se requiere tener un mayor rendimiento en cada uno de los procesos, ya que, tanto el costo teórico como el experimental superan al del mercado que es de 7502.00 pesos por galón (fijado por el Ministerio de minas y energía) en un 141% y 39% respectivamente. Un proyecto de esta índole, a escala industrial podría ser posible, si se lleva a cabo en lugares donde los combustibles fósiles no llegan y permitiendo a la vez una disminución en los costos por la economía de escalas.

5. POSIBILIDADES ZERI

En el momento en el cual se desarrolla un nuevo producto es necesario estudiar todas las corrientes del proceso, incluso aquellas que no hacen parte del producto principal. Tanto en el proceso de extracción de aceite de *Jatropha curcas* L. como en el proceso de obtención de biodiesel se generan otros productos derivados que pueden ser usados en diferentes áreas de la industria, por lo cual se buscaron opciones que permitieran implementar la metodología ZERI para aprovechar los residuos generados en este proceso.

Las posibilidades ZERI encontradas en el proceso de obtención de biodiesel incluye: la torta obtenida durante la extracción, puede ser empleada en la producción de

biogas al igual que la cáscara, como fertilizante y luego de un proceso de detoxificación como alimento para animales; en la planta, el tallo y las hojas tienen propiedades medicinales, y esta última puede ser usada también como colorante. Finalmente del aceite de la *Jatropha* se obtienen el biodiesel y la glicerina, la cual es empleada en el mercado farmacéutico y cosmético, y ya se están realizando estudios para usarla como combustible. (Palacio, 2008).

6. CONCLUSIONES

Después de las comparaciones realizadas con otro tipo de materias primas vegetales para la producción de biodiesel se considera la *Jatropha curcas* L. como un cultivo de gran potencial, por sus ventajas competitivas tanto a nivel agronómico y forestal como económico.

Para el proceso de extracción del aceite es importante tener un dispositivo de calentamiento en la extractora o darle un precalentamiento a las semillas y si es posible, a su portador con el fin de extraer mayor cantidad de aceite.

La refinación del aceite se hace indispensable para que el porcentaje de conversión obtenido sea mayor, ya que durante este proceso se eliminan gomas, impurezas y se

inhibe el aumento de ácidos grasos libres, facilitando así el trabajo de los catalizadores básicos en la reacción.

El aceite de *Jatropha curcas* L. presenta un valor alto de índice de yodo, puesto que posee gran porcentaje de los ácidos grasos oléico y linoléico que hacen del aceite un compuesto muy insaturado.

La caracterización del biodiesel producido a partir del aceite de *Jatropha curcas* L., arrojó resultados ajustados a los requerimientos de la Norma ASTM 6751 para las propiedades de viscosidad cinemática y corrosión por lámina de cobre. Los valores obtenidos para gravedad API, poder calorífico, punto de nube y punto de fluidez dieron resultados coherentes con los reportados por la literatura para biodiesel a partir de otras materias primas.

REFERENCIAS

Agudelo, J.; Benjumea, P. Biodiesel de aceite crudo de palma colombiano: Aspectos de su obtención y utilización. Medellín, Colombia. Ed: Universidad de Antioquia. ISBN: 9586558207

Castro, P; et al (2007) Biodiesel en Perú: Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú. http://www.minem.gob.pe/archivos/org/publicaciones/_biodiesel.pdf/ (22 feb. 2008)

IPSE Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas. Estrategia para la Implementación del Mecanismo de Desarrollo Limpio en Zonas No Interconectadas. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2007.

Knothe, G; Krahl, J; Van Gerpen, J. The Biodiesel Handbook. 2005. Ed. AOCs PRESS. 302p.

Mattanna, H; et al. Cultura do pinhao manso. En: Informe agropecuario. V26 n.229; (2005); p. 44-78
PTA, Parque Tecnológico de Antioquia. Programa de Biodiesel Sostenible para Antioquia. 2007.

Palacio, Carlos. Entrevista Director del departamento técnico de Colombiana de Biocombustibles. 2008.

TRATAMIENTO DE AGUAS POR ELECTRO-OXIDACIÓN

Mónica Lucía Angulo Bedoya - Alejandra Victoria Betancourt Latorre
Edison GilPavas (Asesor del Proyecto)

RESUMEN

En este estudio se evaluó la electro-oxidación como tratamiento para aguas residuales provenientes del proceso de producción de resinas fenólicas. Los experimentos se llevaron a cabo en un reactor tipo batch a escala laboratorio con una configuración monopolar con electrodos de grafito y titanio. Mediante un diseño de experimentos de superficie de respuesta se evaluó la concentración inicial de la muestra, la conductividad y el pH. Las condiciones óptimas obtenidas a partir del análisis estadístico fueron concentración inicial de fenol de 986 ppm, pH 9.3 y conductividad de 6 mS/cm. Con las condiciones óptimas obtenidas se realizó la cinética de degradación de fenol, DQO y COT, además de la DBO_5 para antes y después del tratamiento. Se trató un volumen de 200 ml de solución durante un tiempo de reacción de 240 minutos. Bajo estas condiciones se obtuvo una degradación de fenol 88.1%, degradación de DQO del 51.52%, degradación de COT del 37.93% y se alcanzó una relación DBO_5/DQO de 0.328 con respecto a la inicial que fue de DBO_5/DQO de 0.29. Se identificaron los compuestos intermedios que se generan en el proceso de degradación de fenol por medio de la técnica instrumental de HPLC. En esta degradación se formaron compuestos como los ácidos oxálico, acrílico, fumárico, y acético, catecol e hidroquinona. El compuesto al que se degradó la mayor cantidad de fenol fue el ácido oxálico.

Palabras clave

Electro-oxidación, electro-oxidación indirecta, fenol, grafito, titanio, compuestos fenólicos.

ABSTRACT

This study evaluated the electro-oxidation of phenolic resins production wastewater treatment. The experiments were carried out in a laboratory scale batch reactor with a monopolar configuration was built with graphite (anode) and titanium (cathode) electrodes. Preliminary tests were carried out with a sample volume of 200 ml, a submerged area of 25.13 cm² for the graphite electrode and 40 cm² for the titanium electrode and 240 minutes as a residence time, voltage of 15 V and an agitation value of 200 rpm. In the design of experiments, using the surface response analysis; initial concentration of the sample was evaluated, as well the conductivity and the pH. The optimal conditions obtained after the statistical analysis were a initial concentration of 986 ppm, a conductivity of 6 mS/cm and a pH of 9.3 the kinetics was also carried out to achieve the degradation of phenol and to induce the degradation of COD, TOC and BOD₅ before and after the treatment. A volume of 200 ml was treated during a 240 minutes period of reaction. Under this conditions these were the results obtained a phenol degradation of 88.1%, COQ degradation of 51.52%, a TOC degradation of 37.93%, and a biodegradability increase of 13.1% in the water. With the aim of improving the degradation process several studies of kinetic with indirect electro-oxidation with the addition of three oxidizing agents were conducted (Reagent Fenton, potassium permanganate and sodium persulphate) to determine their effect on the process, resulting in that improved greatly measure the efficiency of the reaction, significantly increasing the percentage of degradation of phenol. The following compounds were found in this degradation process, oxalic acid, acrylic acid, fumaric acid

and acetic acid, cathecol and hidroquinone. The simplest compound that was achieved was the oxalic acid.

Key words

Electro-oxidation, indirect electro-oxidation, phenol, graphite, titanium, phenolic wastewaters.

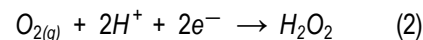
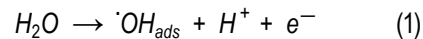
1. INTRODUCCIÓN

El fenol y sus derivados son considerados como un grupo de contaminantes orgánicos peligrosos y de difícil eliminación cuando están presentes en altas concentraciones. Estas sustancias, incluyendo el fenol, cresol y otros compuestos fenólicos sustitutos son la materia prima para una de las más antiguas industrias, la de producción de resinas sintéticas (resinas fenol-formaldehído). (Araña et al, 2001). Los vertidos de las aguas fenólicas se tratan por lagunas, extracción de fenol e incineración térmica, así como por diferentes tratamientos químicos y, también se vierten a las plantas municipales de tratamiento de aguas. Se necesitan sistemas innovadores, económicos y con métodos efectivos para la purificación del agua, ya sea para el

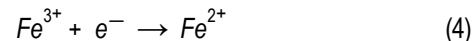
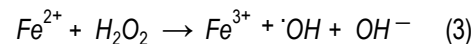
consumo humano o para poder limpiar las aguas residuales de los efluentes industriales antes de ser descargadas a un sistema de abastecimiento. Las técnicas electroquímicas como electro-flotación, electro-decantación, electro-coagulación, remediación electrocinética (para suelo contaminado), electro-oxidación entre otras, ofrecen la posibilidad de ser distribuidas fácilmente, y requieren una mínima cantidad y número de productos químicos (Mollah et al, 2004).

La electro-oxidación es uno de los métodos electroquímicos de oxidación avanzada utilizado para el tratamiento de contaminantes orgánicos en donde, por medio de la oxidación aniónica, se generan radicales hidroxilo, los cuales son altamente oxidantes y a su vez estos reaccionan con los compuesto orgánicos, los cuales son reducidos u oxidados en compuestos menos complejos como CO_2 , H_2O e iones inorgánicos (Oturán y Brillas, 2007).

En la oxidación aniónica estos radicales son formados de la oxidación del agua (reacción 1) en el ánodo tal como un electrodo de Pt ó PbO_2 . El método electro Fenton (EF), es una técnica de electro-oxidación indirecta con un poder de oxidación más alto que la oxidación aniónica para remediación de agua. Es un proceso electroquímico de oxidación avanzada, basado en el continuo suministro de peróxido de hidrogeno formado de la reducción de dos electrones del gas oxígeno a una solución acuosa ácida contaminada. (Reacción (2)).



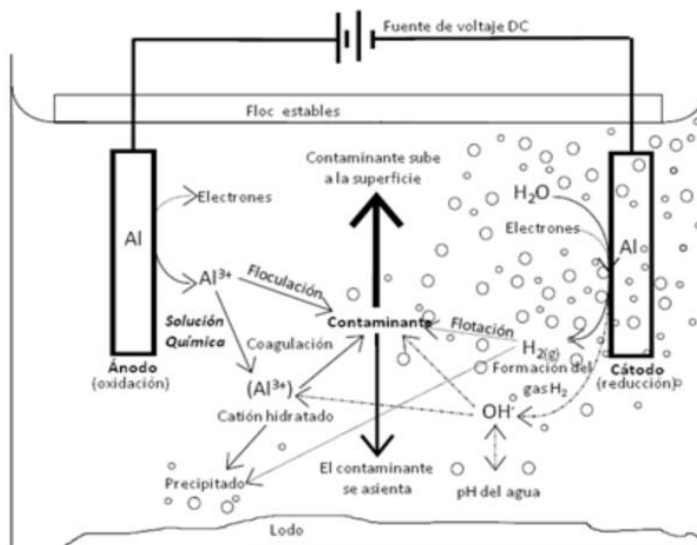
Una pequeña cantidad de iones de Fe^{2+} o Fe^{3+} es luego adicionada a la solución para incrementar fuertemente el poder de oxidación del H_2O_2 electro generado. Una ventaja del proceso EF es el comportamiento catalítico del sistema $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$: Fe^{2+} es oxidado por el H_2O_2 de la reacción (3) Fenton dando lugar al radical hidroxilo y Fe^{3+} , mientras que el Fe^{3+} así obtenido o inicialmente adicionado a la solución es continuamente reducido a Fe^{2+} de la reacción (4) (catálisis electroquímica). (Oturán y Brillas, 2007):



En la figura 1, se puede apreciar como es la interacción de las reacciones que ocurren en una celda electroquímica y sus resultados.

El sistema planteado en este proyecto, consiste en aplicar la tecnología de electro-oxidación en la cual se busca disminuir la concentración de fenol, los niveles de COT, DQO y DBO5, y aumentar la biodegradabilidad de las aguas residuales. También se pretende plantear un sistema de electro-oxidación para el tratamiento de estos vertimientos y de esta manera no solo ayudar al cuidado del medio ambiente sino también lograr alcanzar los estándares colombianos para vertimientos.

FIGURA 1
Esquema de una celda electroquímica (Mollah et al, 2004)



2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Muestra

El efluente tratado en este proyecto proviene del proceso de producción de resinas fenólicas de una empresa ubicada en el Valle de Aburrá. Estas aguas residuales se caracterizan por su alto grado de contaminación; las principales sustancias que las componen son residuos fenólicos que contienen entre 600-2000 ppm de fenol y formaldehído entre 500-1300 ppm, entre otros compuestos.

Las principales características de esta muestra se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1
Características principales del efluente

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR
FENOL	(mg/L)	1138.9
DQO	(mg/L)	3300
DBO ₅	(mg/L)	957
DBO ₅ /DQO	-	0.29
COT	(mg/L)	1450
pH	-	3.69
DENSIDAD	(g/cm ³)	1.0017
VISCOSIDAD	(cp)	0.9384
COLOR	-	Transparente
CONDUCTIVIDAD	(mS/cm)	2.120

2.2 Celda de electro-oxidación

Se empleó un recipiente de acrílico con capacidad de 0.20 litros para todos los experimentos. Configuración monopolar con un electrodo (placa plana) de titanio de área total 55 cm² y con un área efectiva de reacción 40 cm². También con un electrodo (cilíndrico) de grafito de área total 34.55 cm² y con un área efectiva de reacción de 25.13 cm². El sistema contaba con un sistema de agitación

con una plancha magnética Corning, así mismo, una fuente de voltaje BK-Precision y un sistema de enfriamiento de flujo continuo conectado a un baño criogénico Polyscience 712, con el fin de mantener la temperatura de operación constante (30°C).

2.3 Experimentación

Las aguas residuales procedentes de la industria de resinas fenólicas fueron refrigeradas para evitar la degradación de alguno de sus componentes a temperatura ambiente; con estas aguas se prepararon tres diluciones para obtener las concentraciones iniciales para el desarrollo del diseño de experimentos. De las diluciones preparadas se tomó 200 ml de muestra para tratarla por el proceso de electro-oxidación (figura 6). Para la realización del mismo se tuvo en cuenta la posición del ánodo (grafito) y el cátodo (titanio), la distancia entre ellos, el voltaje (15 V), la agitación (200 rpm) y el tiempo de reacción (4 horas), luego del cual se tomó la muestra final. A partir de esta muestra, se evaluó la eficiencia del método midiendo la degradación de fenol alcanzada durante el tiempo de reacción.

FIGURA 2
Sistema de electro-oxidación empleado



El proceso de electro-oxidación está directamente afectado por un gran número de variables; con el objetivo de disminuir el número de ensayos experimentales y mejorar el diseño de la celda de electro-oxidación, se realizaron ensayos preliminares para determinar el tiempo de residencia en el cual se alcanza la máxima degradación de fenol, para así determinar cuáles variables serían las evaluadas

por medio del diseño de experimentos. Se debe tener en cuenta que los valores de voltaje, distancia entre los electrodos, volumen de muestra y agitación permanecieron constantes durante los experimentos, valores definidos en ensayos preliminares; y se definieron como variables la concentración inicial, el pH y la conductividad, así mismo, se determinó el intervalo en el cual fueron evaluadas estas variables que se analizaron en el ensayo experimental.

Con el fin de evaluar el efecto que tienen algunas de estas variables como lo son concentración inicial, pH y conductividad en el porcentaje de degradación de fenol, DQO y COT; se realizó un diseño de experimentos de superficie de respuesta, ya que éste permite conocer por medio de un modelo matemático, que valores de los factores presentan la mejor respuesta de acuerdo a los criterios establecidos. Además, estima la superficie de respuesta en la vecindad del máximo (o mínimo) local para poder comprender los efectos de los factores en la respuesta obtenida (Dean y Voss, 1999; Montgomery, 2005).

Finalmente se evaluaron las cinéticas de degradación de fenol, DQO, DBO5 y COT, mediante la aplicación de las condiciones óptimas encontradas para cada una de las variables evaluadas.

2.3.1 Medición de fenol

La concentración de fenol de las aguas residuales tratadas fue medida utilizando la técnica de cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). Se utilizó un Cromatógrafo Líquido de Alta Resolución (HPLC-UV), AGILENT, con un rango de longitud de onda de 190-950 nm, fase móvil acetonitrilo-agua-ácido acético, (36-60-4) flujo 0.8 ml/min, lámpara de tungsteno y deuterio y columna ECLIPSE X DB C18 5 μ m y un tiempo de retención de 10 minutos.

2.3.2 Medición de la DQO (Demanda Química de Oxígeno)

La medición del DQO es un parámetro secundario utilizado para evaluar la efectividad de la electro-oxidación como tratamiento de aguas residuales, fue utilizado en la

caracterización de la muestra, en el diseño preliminar y en las cinéticas. El procedimiento empleado para medir el DQO fue el método estándar de reflujo cerrado, con medición colorimétrica 5220D (Standar Methods, 2005).

2.3.3 Medición de la COT (Carbono Orgánico Total)

El Carbono Orgánico Total (COT), es una de las variables más utilizadas, como una medida de la mineralización o degradación de la materia orgánica de las muestras tratadas en éste trabajo. El valor del COT, se obtiene por diferencia entre el Carbono Total (CT) y el Carbono Inorgánico (CI) contenido en una muestra líquida cualquiera ($COT = CT - CI$). El procedimiento empleado para medir el COT fue el método estándar de oxidación húmeda, con medición colorimétrica 5310D (Standar Methods, 2005)

2.3.4 Medición de la DBO (Demanda Biológica de Oxígeno)

El método para la medición de la DBO5 es el método respirométrico (Dr. CALDERÓN, 2007).

2.4 Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se realizó por medio de Statgraphics 5.1 mediante un diseño de experimentos de Superficie de Respuesta, que permite obtener buenos resultados a partir de un menor número de ensayos, utilizando herramientas como: la Tabla ANOVA, Diagrama de Pareto, Gráfica de Superficie de Respuesta y la correlación de los mismos, con el fin de determinar el valor de las variables para una óptima remoción de cromo, por ser este el objetivo principal del proceso.

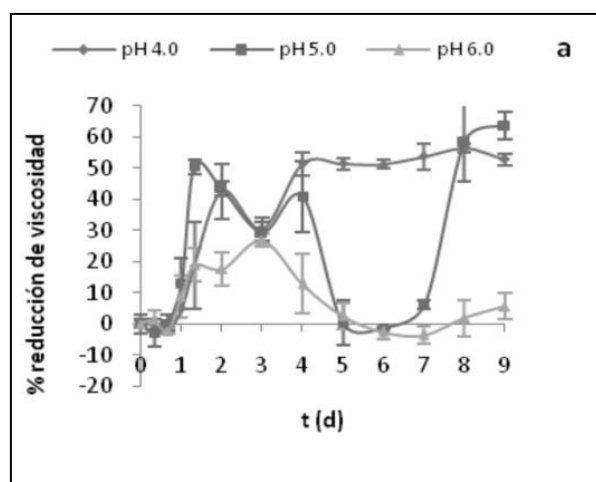
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Efectos principales para la variable respuesta

La Figura 3 muestra cómo afectan el porcentaje de degradación de fenol, la conductividad, la concentración inicial de fenol y el pH. Así para un valor de conductividad

de aproximadamente 6 mS/cm, se obtiene la mayor degradación de fenol; a medida que aumenta la concentración disminuye la degradación porque se reduce el espacio intermolecular para el paso de los iones de la sal que transportan la carga eléctrica y, para el pH se puede apreciar que en el intervalo de 7 a 9.5 aumenta el porcentaje de degradación, pero no significativamente ya que el sustrato es la especie propiamente electroactiva (Bagotsky, 2006; Brown, 1998).

FIGURA 3
Efectos principales para la degradación de fenol
(Statgraphics 5.1c)



La conductividad es una variable que afecta positivamente el proceso de electro-oxidación y, en la figura 14 se demuestra que en el intervalo evaluado (2-6 mS/cm) se alcanza un mayor porcentaje de degradación de fenol entre 4 y 6 mS/cm, esto se da debido a que a mayores valores de conductividad hay una mayor transferencia de corriente en el medio debido a la alta movilidad de los iones en la solución. De la misma forma se puede apreciar que el pH no afecta en gran medida el porcentaje de degradación en el intervalo evaluado, debido a que cuando hay altos valores de conductividad el pH no afecta significativamente la degradación del fenol debido a que la concentración de los iones H^+ y OH^- , es menor que la concentración de los iones Na^+ y Cl^- por lo cual no existe suficiente espacio intermolecular para que los primeros sean atraídos por los extremos opuestos del H_2O . Con la concentración inicial ocurre todo lo contrario, esta, cuando se encuentre en altos valores desfavorece el proceso de electro-oxidación debido

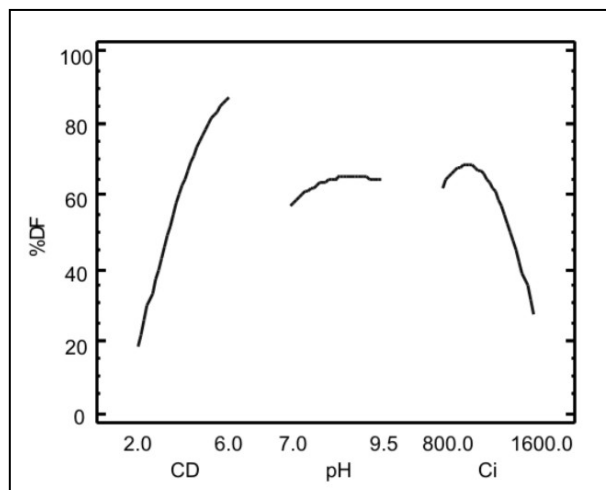
a que la solución está sobresaturada del contaminante y los iones no alcanzan a adherirse completamente, pero no se puede apreciar en la figura que existe un intervalo entre 950 ppm – 1100 ppm en el cual se alcanza un mayor porcentaje de degradación (76% aproximadamente) (Gao et al, 2004; Bagotsky, 2006).

3.2 Cinéticas de degradación

Con el fin de evaluar las cinéticas de degradación de fenol se utilizaron las condiciones óptimas calculadas por el software estadístico, manteniendo constante el volumen de muestra en 200 ml, distancia entre electrodos de 0.5 cm, agitación de 200 rpm, 15 voltios, tiempo de reacción 4 horas y la relación área/volumen. Variando la concentración inicial de fenol a 1189.8 ppm. También se evaluaron las cinéticas de degradación de DQO, DBO5 y COT para el proceso de electro-oxidación directa.

3.2.1 Cinéticas de degradación de fenol por el tratamiento de electro-oxidación directa

En la Figura 4 se observan las cinéticas de degradación de: a) fenol, b) DQO y c) COT .



La Figura 4a muestra como a medida que transcurre el tiempo, se obtiene un mayor porcentaje de degradación de fenol, hasta alcanzar un porcentaje máximo de degradación

del 88.10% a los 180 minutos, permaneciendo constante hasta los 240. Se puede observar que se presenta un alto porcentaje de degradación durante la primera hora de reacción, comparado con los otros tiempos, en los cuales el porcentaje de degradación aumenta de manera menos acelerada, esto se debe a que, durante los primeros 60 minutos, se da la disolución del ánodo y la formación de radicales hidroxilo los cuales son altamente oxidantes reaccionando con el fenol, bajo unas condiciones de transporte de masa y transferencia de electrones, alcanzando una degradación del 1.76%, pero a medida que transcurre el tiempo de reacción se acumulan burbujas de O₂ e H₂ en los electrodos, las cuales incrementan la resistencia de la solución haciendo que la degradación sea un poco más lenta (Mollah, 2001; Mollah, 2004; Holt, 2005; Zumdahl, 2000; Hurley y Masterton, 1997). En la Figura 4b, se puede apreciar cómo, a medida que transcurre el tiempo, se obtiene un mayor porcentaje de degradación de la demanda química de oxígeno, hasta llegar a un porcentaje máximo de degradación de 51.52% a las cuatro horas de tratamiento. En la figura 4c se puede apreciar como disminuye en el tiempo la concentración de COT en el agua residual tratada, llegando a un porcentaje máximo de degradación del 37.93% a los 240 minutos. Los porcentajes de degradación mayores se dan en los primeros 120 minutos de reacción, a partir de este tiempo disminuye la velocidad de degradación, esto puede ocurrir debido al tipo de electrodo utilizado (grafito) el cual estaría promoviendo la formación de productos intermedios y por la disminución en la producción de radicales hidroxilo que son los responsables de la reacción (Feng y Li, 2003).

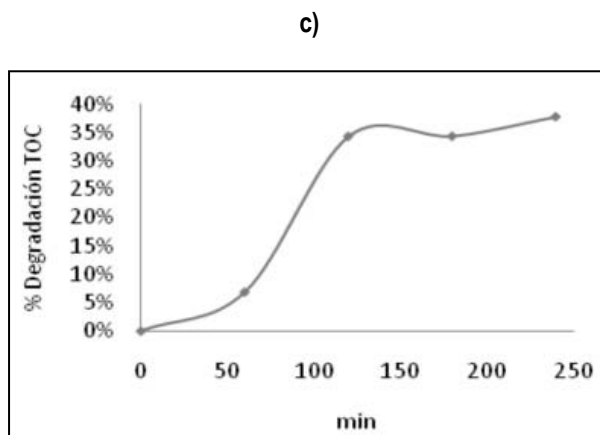
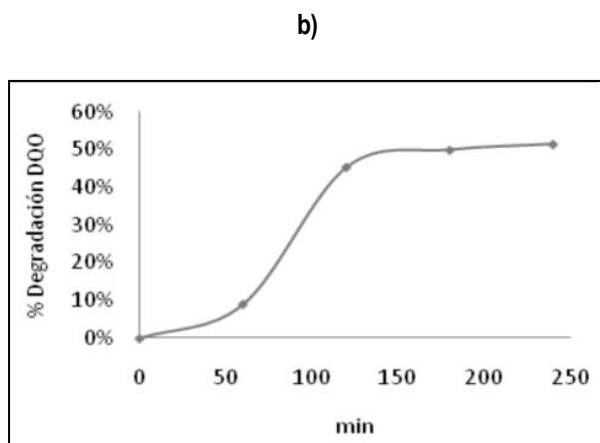
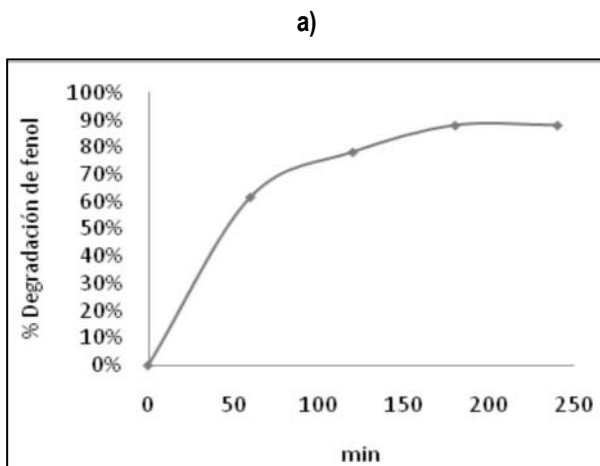
En la Tabla 2. se muestra la fracción de biodegradabilidad de la solución antes y después de 240 minutos de tratamiento, lo que indica que la biodegradabilidad de la muestra aumenta un 13.1% con respecto a la muestra inicial, aunque este valor (0.328) no está dentro del intervalo donde las aguas residuales pueden ser tratadas por medios biológicos.

TABLA 2
Datos de biodegradabilidad de la muestra

Tiempo (min)	DQO	DBO ₅	DBO ₅ /DQO
0	3300	957	0.290
240	1600	525	0.328

FIGURA 4

Cinéticas de degradación de: a) fenol, b) DQO y c) COT para el proceso de electro-oxidación directa



CONCLUSIONES

El proceso de electro-oxidación directa es un método efectivo para la degradación de fenol realizando las cinéticas a las condiciones óptimas de operación alcanzadas (Conductividad 6 mS/cm, pH 8.3 y concentración inicial de 986 ppm), donde se obtienen valores de 88%, 54.55%, 37.93% y 38.13% para fenol y materia orgánica, DQO, COT y DBO5, respectivamente;

aunque en este proceso no se alcanza que el agua residual sea biodegradable con un valor de biodegradabilidad es muy bajo (0.328) lo que conllevaría a realizar tratamientos biológicos con microorganismos adaptados, siendo esto económicamente inviable después de haber realizado el tratamiento de estas aguas por electro-oxidación.

BIBLIOGRAFÍA

ARAÑA, J; Tello, E; Doña, J.M; Herrera, J.A; González, O; Perez, J. Highly concentrated phenolic wastewater treatment by the Photo-Fenton reaction, mechanism study by FTIR-ATR. En: Chemosphere 2001. Vol. 44; p 1017-1023.

BAGOTSKY V.S. Fundamentals of electrochemistry, Second edition. Editorial Wiley Interscience 2006. Moscú. ISBN: 100-47170058-4

Desarrollo de un proceso a escala laboratorio para la extracción de colorante a partir de la flor del árbol de Majagua

Astrid Eliana Jiménez R.

RESUMEN

Para desarrollar un colorante en polvo, debe realizarse en primera instancia un estudio de mercado preliminar, donde se analizaron los diferentes requerimientos que la industria de colorantes para alimentos está demandando en la actualidad.

En esta investigación se tomaron en consideración diferentes variables, las cuales permitieron determinar las mejores condiciones, para la operación más crítica de este proceso: la extracción sólido líquido.

La determinación de estas variables es crítica, entre ellas se encuentran: el pH de la extracción, la concentración alcohólica en el solvente, la relación sólido solvente, la temperatura del proceso y el tiempo de extracción. Para encontrar la relevancia de estas variables, se realizó un diseño de experimentos factorial, para el cual se utilizó como variable de respuesta la absorbancia, debido a que ésta reporta cualitativamente la concentración del color en una mezcla.

Una vez que se determinaron las condiciones óptimas del proceso a partir del diseño de experimentos, se procedió a realizar la adición del colorante con las sustancias necesarias para evitar la degradación del mismo durante el proceso de secado en el spray dryer.

Palabras clave

Colorante, natural, antocianinas, spray dryer.

ABSTRACT

For develop a powder colorant, in first place it should realize a market study to analyze the different requirements that the food colorant industry is demanding actually.

On this research, it takes in consideration different variables that allow determining the best conditions for the most critic stage of the process: the solid – liquid extraction.

Determine these variables, is a critic procedure. These are, the Ph of the extraction, the alcohol concentration in the solvent, the temperature and the time of the extraction.

For find the relevance of these variables, it was realized a factorial design of experiments, for which used like answer variable the absorbance, because that reports qualitatively the color concentration of the extraction.

After that, the optimum conditions of the process were determined by the design of experiments. Then the colorant was added with the substances necessities for the spray drying operation.

Key words

Color, natural, anthocyanin, spray dryer

INTRODUCCIÓN

El mercado de la industria de alimentos ha venido cambiando y buscando nuevas tendencias inclinadas hacia el mayor uso de productos naturales. Un importante segmento es ocupado por los productos con propiedades antioxidantes, otro busca sustituir productos de alta tendencia tóxica o alergénica, además está el segmento en desarrollo de los colorantes naturales.

Los colorantes en alimentos han sido ampliamente utilizados con el fin de mejorar la apariencia física del producto, hacerlo mucho más atractivo para el consumidor y resaltar sus propiedades. Las declaraciones hechas por estudios en cuanto a los efectos de muchos aditivos alimentarios sintéticos han generado una tendencia hacia la sustitución de éstos por sustancias naturales.

Se investiga en este momento en el mundo sobre clorofilas, antocianinas y pigmentos terpenoides como los carotenos y el licopeno, tratando de obtenerlos a partir de fuentes naturales como hojas, flores y frutas.

Por ello, para este trabajo se buscó aprovechar la gran biodiversidad Colombiana para la obtención de un colorante natural que sea inocuo, que no altere las propiedades organolépticas del producto al que va a ser incorporado, y de buen rendimiento para llevarlo a la industria de alimentos que es bastante exigente en cuanto a los parámetros de calidad.

Con la anterior investigación se dio uso a un recurso natural que en Colombia se explota de forma muy artesanal (sólo las fibras), y es el árbol de Majagua. Extraer el colorante de sus flores no generará ningún daño en el árbol como tal, ya que las flores se pueden recolectar del piso o tomar las que se han terminado de desarrollar adecuadamente de la copa de los árboles. Además, se generará empleo en el momento en que deban recogerse, ya sea porque se trate de tomarlas de un cultivo o que se recojan de los árboles que se encuentran distribuidos por todo Medellín.

En ensayos preliminares de extracción de colorante, se obtuvieron dos colorantes diferentes, según el color de la flor: uno rojo y uno amarillo. Con ambos se espera poder generar dos nuevos colores que satisfagan las necesidades del mercado.

En este momento el colorante artificial de mayor importancia es el amarillo No. 5, ya que en la industria de alimentos enfrenta una crisis debido a la resolución No. 00580 de 1996, la cual hace hincapié en los efectos alergénicos de la tartrazina. Además, durante el año 2007 el INVIMA emitió un comunicado en el cual obliga a las empresas que elaboren alimentos o cosméticos que contengan amarillo No. 5 a cambiar el registro sanitario actual y a incluir en la etiqueta de los productos la siguiente expresión: "Contiene TARTRAZINA que puede producir reacciones alérgicas, tipo angioderma, asma, urticaria y shock anafiláctico". Lo anterior, teniendo en cuenta las disposiciones expuestas por la Sala Especializada de Medicamentos y Productos Biológicos de la Comisión Revisora dentro del concepto emitido en el Acta No. 1 de 2007.

A partir del 3 de septiembre de 2007, los productos cuyos titulares hagan caso omiso a las recomendaciones de la Sala serán llamados a Revisión Oficiosa y se tomarán las medidas a que haya lugar. (INVIMA).

Sin embargo, hay una realidad que debe asumirse cuando se desea reemplazar compuestos artificiales o sintéticos por los naturales, y es la estabilidad de éstos últimos ante los cambios de pH, la temperatura e iluminación y el hecho que la mayoría deben dosificarse en cantidades mayores, lo que implica una posible alteración de otras propiedades organolépticas del alimento como el aroma, la textura y el sabor; por eso se busca que en convenio con algunas empresas del sector alimenticio y con la Universidad de La Salle, se realice la evaluación de estas propiedades, y mejor aún considerar para proyectos posteriores la aplicación del colorante en productos alimenticios, lo que permitirá el fortalecimiento de las relaciones entre universidades y universidad - empresa.

ESTADO DEL ARTE

Extracción sólido – líquido

La extracción sólido – líquido consiste en la disolución preferente de uno o más componentes presentes en una fase sólida por contacto con un solvente líquido. Esta operación unitaria es una de las más comunes y antiguas en la industria química tradicional y ha recibido muchos nombres según la tecnología o complejidad de las operaciones que la componen.

Gran cantidad de productos orgánicos se obtienen por extracción sólido – líquido a partir de las matrices sólidas que los contienen. Entre los ejemplos más comunes se encuentran la obtención del azúcar de la remolacha por medio de extracción con agua caliente, la obtención de aceites de algodón y soya por medio de disolventes orgánicos y la obtención de colorantes naturales con soluciones acuosas a diferentes valores de pH.

Características de la Majagua

La Majagua es una planta originaria de Jamaica y Cuba; su nombre científico es *Hibiscus elatus sw* y pertenece a la familia *Malvaceae* (Árboles ornamentales).

También se le conoce como Majagua azul o Blue majoe, es un árbol siempreverde de tamaño mediano que puede alcanzar más de 25m de alto con un tronco recto de 35 cm o más de diámetro. Se le puede identificar por sus hojas de forma acorazonada y con unos pecíolos largos, a la vez que por sus típicas flores en forma de embudo. La madera del majó es de alta calidad y muy atractiva, con matices purpúreos, azul metálicos y verde oliva y tiene una variedad de usos, especialmente la manufactura de muebles finos.

Las flores aparecen de una a tres a la vez en pedúnculos verdes y robustos en la base de las hojas al final de las ramitas. El cáliz es de un color verde claro y la corola, que

consiste de cinco pétalos elípticos y esparcidos, es amarilla, anaranjada o de un rojo bronceado y se oscurece a medida que envejece. Se pueden encontrar muchos estambres montados en una columna de color rosado con la corola en la base. El pistilo dentro de la columna contiene un ovario de 5 células, un estilo largo y cinco estigmas redondeados. La florescencia ocurre de manera irregular a través de todo el año.

Obtención de productos naturales

En general, el proceso de obtención de productos naturales a partir de plantas, está dividido en los siguientes procesos básicos: secado, molienda, extracción, purificación y secado del producto final. Las variaciones de estas etapas, dependen de la planta con la que se esté trabajando y el tipo de producto natural que se desea obtener.

Materias primas

Los productos obtenidos de forma natural, presentan diferencias en su composición química. Por lo que puede decirse que están definidos por su proceso de extracción y por consiguiente, por la calidad de la materia prima y el solvente utilizado para este proceso.

Otro factor determinante, es el hecho de que la composición de sustancias activas en las plantas puede variar por diferentes razones: el tipo de cultivo, el clima, el suelo, las condiciones de cultivo, etc. Por ello es muy importante controlar en la medida de lo posible, las condiciones de cultivo, recolección, almacenamiento y manipulación de la materia prima.

La literatura recomienda tener plantas de diferentes lotes, de diferentes áreas y mezclarlas, para garantizar la homogeneidad del producto que se desea obtener. (Wijesekera, 1991).

Cultivo de las plantas

En el cultivo de plantas con fines de obtención de productos naturales, es muy importante el proceso de cultivo de las mismas, ya que de este depende en gran medida el contenido que la planta pueda tener del principio activo que se desea obtener.

Existen tres factores primordiales en el cultivo de plantas, para la obtención de los principios activos, estos son, los factores genéticos; debido a que los principios activos en las plantas son producto de su metabolismo secundario relacionado estrechamente con su mapa genético; factores ontogenéticos; ya que los principios activos pueden variar según la edad y el desarrollo de la planta y por último los factores ambientales; ya que influyen directamente en la expresión de los genes y por tanto en la producción de metabolitos secundarios. (Wijesekera, 1991).

Recolección

Según la parte de la planta de donde se desea obtener el extracto, existe un tiempo más adecuado para su recolección. Sin embargo, existen unos principios básicos que pueden aplicarse si no se conoce con exactitud cuáles son sus principios activos.

Las sumidades floridas deben ser recogidas durante su floración y preferiblemente antes de la formación de sus semillas. Las flores deben ser cortadas antes de que abran completamente, aunque en ocasiones pueden ser recolectadas con sus inflorescencias abiertas.

Otro factor importante es la hora de recolección, ya que la cantidad de principios activos varía durante el día. En el caso de la majagua, lo ideal es recolectar las flores durante las horas de la mañana, debido a su alto contenido de glicósidos. (Sharapin, 2000)

MATERIALES Y MÉTODOS

Ensayos preliminares

En ensayos de laboratorio previos, se probaron diferentes tipos de solventes para verificar cuál era más afín al colorante. Entre ellos estuvieron ácido clorhídrico, hidróxido de sodio, cloroformo, acetona, acetato de etilo, agua, etanol puro, n- butanol y ácido acético. A partir de estos ensayos se encontró que los solventes más afines al colorante eran el agua y el etanol, lo cual era notorio al observar el color de los extractos una vez filtrados. Estos presentaban un color café para el que se extraía solo con agua y un rojo cereza para el que era solo etanol acidificado. El ensayo de solo agua se descartó debido a que presentaba un color más verdoso, el cual da indicio de una mayor extracción de clorofilas.

Una vez obtenidos estos resultados, se consultó en la literatura qué mezclas de etanol y agua eran las más adecuadas para iniciar el diseño de los experimentos. En este punto la literatura sugería diferentes mezclas. Para este caso se optó por realizar el diseño de experimentos con mezclas 50% de etanol, 70% de etanol y 100% etanol.

El siguiente paso fue filtrar la solución coloreada obtenida por la lixiviación y realizar un primer secado en estufa, el cual generó un polvo pegajoso, acaramelado y muy complicado de manejar. A raíz de esto, se optó por realizar una concentración de la solución y un posterior secado en spray dryer. No se decidió realizar el secado por liofilización, debido a que si este proceso se lleva a gran escala, resulta bastante costoso.

PROCESO DE EXTRACCIÓN

Selección de materias primas

La materia prima debe recogerse fresca, preferiblemente en las horas de la tarde. Se deben seleccionar las que se encuentren más frescas y saludables, para luego someterlas a un control visual de calidad inicial, donde se remueven las impurezas manualmente.

Una vez estén seleccionadas las flores, deben lavarse con agua endurecida (Sharapin, 2000), ya que las que se recogen del suelo, pueden contener restos de arena, polvo y algunos insectos que complican las etapas posteriores del proceso.

Secado

Luego de lavarse las flores se deben poner a secar en estufa a 40°C durante unas 8 horas aproximadamente. Esto con el fin de disminuir el porcentaje de humedad, la extracción de clorofilas y sustancias indeseadas durante el proceso de lixiviación. En esta etapa se elimina aproximadamente el 85% de humedad.

Molienda

Una vez esté seca la materia prima se debe proceder con la molienda del material, la cual se realizó en una licuadora. Las flores deben llevarse hasta una malla 30, lo que facilitará el proceso extractivo del colorante, permitiendo una mayor área de contacto entre el solvente y el material vegetal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Extracción

Este es el proceso más crítico de la obtención del colorante. En este intervienen varias variables, las cuales determinan la eficiencia de la extracción realizada. Entre ellas se encuentran:

- El pH, el cual debe mantenerse entre 2 y 4 para el colorante rojo y entre 4 y 5 para el amarillo.
- La relación sólido solvente es 1:10, ya que esta facilita un mejor contacto entre el solvente y el material vegetal pulverizado.
- El solvente seleccionado, en este caso la solución 50% de etanol agua.
- La agitación
- La temperatura de extracción
- La relación sólido solvente

Durante los experimentos preliminares se encontró que el mejor solvente es una mezcla 50: 50 de etanol – agua, ya que es la que extrae una mayor cantidad de colorante. Esto se pudo determinar realizando un barrido espectral para determinar la absorbancia de tres mezclas distintas: etanol puro, 70: 30 de etanol agua y 50: 50 de etanol agua. Para este efecto, se verificó en primera instancia que el colorante cumpliera la ley de Beer.

También se pudo determinar que la mejor temperatura a la que debe realizarse la extracción es a 25°C para la flor amarilla y para la roja. Durante los experimentos preliminares, también se analizó la extracción del colorante en el tiempo. En esta etapa se obtuvo que para la majagua amarilla se requiere un tiempo de extracción del colorante de aproximadamente 1 hora, mientras que para la majagua roja el tiempo requerido es de 40 minutos.

Para verificar la idoneidad de estos resultados, se realizó un diseño de experimentos factorial, con el cual se corroboró que efectivamente los resultados obtenidos en los ensayos preliminares eran los adecuados.

Luego del secado, se determinó que el rendimiento obtenido fue del 4.0-5.0%, un valor bastante alto para un producto natural.

También se realizó una evaluación económica del proyecto, tomando como base una producción a escala industrial pequeña, lo que equivaldría a producir unas 15 toneladas por año.

Mediante el análisis de la TIR y el VPN, se encontró que para el proyecto los valores corresponden a un 45% y 45.792.000 respectivamente. El valor positivo de estos valores es un indicio de la viabilidad del proyecto.

Cabe anotar que a pesar de los buenos resultados obtenidos en el secado y en la extracción del producto, el proceso presenta un gran inconveniente y es la recolección de las materias primas, ya que en este momento no se cuentan con cultivos industriales establecidos; la implementación de éstos puede llevar un tiempo considerable, por tratarse de árboles de más de 1m de altura.

Otro factor que posiblemente afecte el posterior desarrollo del colorante es la inconveniencia de recoger las flores de la calle, ya que es casi imposible garantizar que en caso de que la demanda crezca más allá de lo calculado, sino existen cultivos comerciales, será muy difícil tener el abastecimiento de materia prima que se requiere.

Por lo pronto, se espera poder continuar con el desarrollo de la formulación del colorante y las realización de pruebas citotóxicas, genotóxicas, de estabilidad, organolépticas, etc; que permitan identificar exactamente el colorante y una posterior estandarización del proceso.

CONCLUSIONES

Las tendencias en el mercado mundial de colorantes son hacia el uso de colorantes naturales, que sustituyan total o parcialmente los artificiales. Una de las industrias que más demanda este tipo de productos es la de alimentos; esta industria requiere productos económicos, pero de alto poder de tinción y que cumplan con los estándares internacionales de calidad, tales como Color Index, definición de componentes activos, comportamiento ante variaciones de pH, resistencia a la temperatura y a la luz, etc.

El proceso más usado tanto a nivel laboratorio como industrial, para obtener extractos de productos naturales es la lixiviación. De acuerdo a la tecnología que se utilice, esta operación puede recibir nombres diferentes. Para el caso de la extracción del colorante de la majagua amarilla y de la roja, se seleccionó la percolación, debido a que este proceso, permite un mayor aprovechamiento del material vegetal y de los solventes, por lo que se considera un proceso más económico.

Se encontró que de acuerdo al color de la flor se obtenían distintas condiciones para la obtención del colorante. Acorde con el diseño de experimentos y el ANOVA se determinó que ambos colorantes se pueden extraer eficientemente a 25°C y con una concentración de solución extractora de 50% etanol y 50% de agua. La variación en el proceso extractivo para ambas flores, radicó en el factor tiempo. El análisis arrojó que para la majagua roja

se requieren 40 minutos para la extracción, en cuanto que la amarilla necesita 1 hora. Hay que anotar que el pH es un factor muy importante en este caso, ya que se trata de una antocianina, fue posible observar cambios en el color de ambos colorantes por esta causa. Se determinó que el pH ideal para el colorante rojo es entre 2 y 4; en cambio para el amarillo debe mantenerse entre 4 y 5.

Respecto a los factores de calidad, se encontró que estos dependen mucho del mercado. A nivel internacional y nacional, la legislación requiere el Color Index, la identificación de los principales compuestos químicos presentes en el colorante, el pH al que es más estable el colorante y la generación de estándares. Para el caso de la majagua y por tratarse apenas de la primera etapa de desarrollo de los colores, se determinó el pH de mayor estabilidad, los colores permanecen estables a la intemperie por lo menos una semana y se dieron los primeros pasos para la definición de un estándar. De acuerdo a las categorías internacionales, estos colorantes pueden clasificarse como C-II.

Según el análisis financiero y técnico este resulta ser un proyecto financieramente justificable.

Este diseño preliminar para producir colorantes es flexible, ya que permitiría la extracción de otros colorantes adicionales al de la Majagua.

BIBLIOGRAFÍA

Arango, C. (2004). *Diseño del proceso de extracción de colorante a partir del maíz morado (Zea mays L): trabajo de grado (ingeniera de procesos)*. Medellín: Universidad EAFIT. Escuela de ingeniería. Departamento de ingeniería de procesos.

Badui, S. (2006). *Química de los Alimentos. 4 ed.* México: Pearson Educación.

Beyra, Á., & León, M. d. (2004). *Estudios etnobotánicos de plantas en la provincia de Camagüey (Cuba). Vol. 61. No.2*. Madrid: Anales del jardín botánico de Madrid.

Cáceres J. Jiménez J. Castañeda M. Et al. *Estudio del mercado nacional de tintes, colorantes y pigmentos naturales. Programa biocomercio sostenible. Cali 2004.* Recuperado el 3 de marzo de 2008, de http://www.humboldt.org.co/obio/simbio/layoutBio.jsp?accion=categoriasProducto¶metrosJsp=idCategoria=4*nombreCategoria=Colorantes%20naturales

Echeverry, J., & Salazar, D. (2003). *Adaptación tecnológica de un proceso en escala planta piloto para obtener el colorante de la jagua (Genipa Americana): trabajo de grado (Ingeniero de procesos).* Medellín: Universidad EAFIT. Escuela de Ingeniería. Departamento de ingeniería de procesos.

Londoño A. (2001). *Proceso de selección de los componentes y del sistema de control de una planta escala banco de secado por atomización: Trabajo de grados (Ingeniero de Procesos).* Medellín. Universidad EAFIT. Departamento de Ingeniería de Procesos.

Lopera, S. (2003). *Proceso de extracción de colorante natural a partir del repollo morado (Brassica Oleracea var. Rubra): trabajo de grado (Ingeniero de procesos).* Medellín: Universidad EAFIT. Escuela de ingeniería. Departamento de ingeniería de procesos.

López O. (2006). Influencia del uso de aditivos sobre el rendimiento del proceso de secado por aspersión de extracto acuoso de Calendula officinalis L. *Rev Cubana Plant Med.* [online]. ene.-abr. 2006, vol.11, no.1. Recuperado el 20 de febrero del 2008. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1028-47962006000100008&lng=es&nrm=iso ISSN 1028-4796.

Lugo, E. d. (s.f.). *Colorantes naturales, usos y perspectivas.* ÉNFASIS ALIMENTARIO No. 2. ABRIL/MAYO 2003. Recuperado el 17 de Septiembre de 2007, de http://www.enfasispackaging.com/bofinal/fotos/Pdf_24.pdf

Márquez, I., & Cuellar, A. (Mayo – Agosto 1999). Estudio fitoquímico de la especie Hibiscus elatus sw. Vol 33 No: 2. *Revista Cubana de farmacia* .

Milanés, R., Rodríguez, A., & González, D. (s.f.). *Farmacognosia de la droga «Flores de Majagua» (Hibiscus Elatus sw., Familia Malvaceae).* Recuperado el 20 de Agosto de 2007, de I: Farmacogeografía, farmacotimología, farmacoergasia y farmacoetnología.: *Rev Cubana Plant Med.* [online]. sep.-dic. 1999, vol.4, no.3 p.98-101 http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1028-47961999000300003&lng=es&nrm=iso ISSN 1028-4796

MINCOMEX. *Base de datos de productores.* Recuperado el 10 de Marzo de 2008, de <http://200.75.48.202/cgi-bin/pronal.cgi.sh/pnaweb86.html>

MINISTERIO DE SALUD, C. (1985). *Resolución 10593 (Julio 16 de 1985).* . Bogotá: El Ministerio.

Proexport. (s.f.). *Plan estratégico exportador a la unión europea.* Recuperado el 20 de Septiembre de 2007, de www.proexport.gov.co/intelelexport

Sharapin, N. (2000). *Fundamentos de tecnología de los productos fitoterapéuticos. Programa Iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo.* . Bogotá.

Treybal, R. E. (2000). *Operaciones de transferencia de masa 2da edición.* México: McGraw-Hill. 2000. págs. 792-795.

Weaber, P., & Francis, J. *Hibiscus elatus Sw. Mahoe. SO-ITF-SM-14.* . New Orleans, LA: U.S.: Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 7 p.

Wijesekera, R. (1991). *The medicinal plant industry.* . Ed. CRC Press. Estados Unidos. p.p 269.

SELECCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE FILTRACIÓN-ENVASADO PARA 3 MASILLAS DE APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Diana Lucia Monroy

RESUMEN

Se seleccionó e implementó un sistema de bomba de tornillo para realizar el proceso de filtrado-ensado en la fabricación de 3 masillas de la industria automotriz: Masilla de Extrusión, Aspersión e Insonorización, teniendo en cuenta criterios de selección como el material de construcción, flujo de operación, viscosidades a manejar, medios filtrantes requeridos, costos y posibilidad de operar con los 3 productos. Se evaluaron 2 presiones de operación y 3 tamaños de malla, encontrando que las condiciones más adecuadas de operación fueron 8 bares de presión y un tamaño de malla del elemento filtrante de 300 μm . Con la implementación del sistema se redujeron los tiempos de filtración en un 88%, sin afectar la limpieza del producto final, y se generó un ahorro aproximado de \$4'000.000 mensuales.

Palabras clave

Masillas, Filtrado-ensado, Limpieza del producto, Tiempo de filtración, Bomba.

ABSTRACT

A system of screw pump was selected and implemented to realize the filter-filling process in the manufacturing of 3 putties of the automotive industry: Extrusión Putty, Aspersión and Insonorización, considering selection criteria like: construction material, operation flow, operation viscosity, filtering medium required, cost and operating possibility with the 3 products. 2 operation pressures and 3 mesh sizes were evaluated, finding that the best suitable operation conditions were 8 bars of pressure and 300 μm mesh size of the filter element. With the system implementation, the filtration times were reduced in an 88%, without affecting the cleaning of the final product, and generated a monthly saving of approximately \$ 4'000.000.

Key words

Putties, Filter-filling, Cleaning, Filtration time, Pump.

1. INTRODUCCIÓN

Las masillas para la industria automotriz se utilizan en las etapas iniciales del proceso de ensamble. Su aplicación implica impulsar el producto con una bomba que lo envía a través de una red de tubería hasta llegar a una pistola con la que se aplica sobre las diferentes superficies (SOFASA, 2006). Con el fin de retener las impurezas que pueda tener el producto, las ensambladoras han implementado filtros ubicados antes de las pistolas de aplicación. Sin embargo, cuando el producto está contaminado, el filtro puede saturarse e impedir su flujo a la pistola. Para evitar que esto ocurra, en la planta fabricante de masillas se incorporaron a su proceso operaciones como el Tamizado y el Filtrado por bomba, cuyo objetivo es la retención de contaminantes. Sin embargo, debido al aumento de la producción en un 30% del año 2004 al 2005, a la fabricación de 2 nuevos productos a partir del año 2005: masilla de extrusión y masilla de aspersion, con características diferentes y mayores tiempos de proceso que las otras masillas fabricadas, y a que se encontró que el producto envasado presentaba deficiencias de limpieza, dichas operaciones se convirtieron en el cuello de botella del proceso productivo (Planta Masillas, 2004).

El proceso de tamizado, representa del 30 al 83% del tiempo total de fabricación, el filtrado por bomba representa del 38 al 75% del tiempo de fabricación. Adicionalmente, el uso de estos dos sistemas de filtrado genera averías continuas en los equipos empleados debido a que trabajan forzados por las altas viscosidades de 3 de los principales productos fabricados: Masillas de Extrusión, Aspersion e Insonorización. Esto indica que dichas operaciones tienen características inadecuadas para los productos en mención, lo que impide cumplir con los altos estándares exigidos por las ensambladoras. Además, otras empresas que manejan

productos similares, emplean otro tipo de bombas, lo que reafirma esta hipótesis. Por ejemplo, en el caso de las ensambladoras de vehículos, donde se aplican las masillas fabricadas por la empresa, manejan bombas de pistón para transportar el producto (Martínez, 2006; Nieto, 2006); en el caso de la casa matriz de la empresa, de donde se trae la formulación de los productos, se utilizan bombas de tornillo para transportar y filtrar el producto (Maron, 2006). Incluso, empresas productoras de chocolates, tienen incorporados a su proceso equipos como bombas de piñones y de tornillo (Planta Chocolates, 2005).

De acuerdo con lo anterior, se hace necesario implementar un sistema de filtrado-ensado que se adapte mejor a las características de los productos y a los altos estándares de calidad exigidos por los clientes; de esta forma, se busca hacer un aporte a la empresa de masillas, contribuyendo además del aspecto técnico, en el aspecto económico, ya que a pesar de la inversión inicial por la compra de un nuevo equipo, con la reducción esperada del 50% en el tiempo de filtración para las 3 masillas, se logra hacer el proceso más eficiente y permite aumentar la capacidad de producción de la planta.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Etapa experimental

2.1.1 Medición de las características del producto

Los datos de características del producto: viscosidad, densidad, fineza de grano y limpieza del producto, fueron el resultado de los chequeos de control calidad, para los 15 lotes de cada masilla.

TABLA 1
Características del producto

CARACTERÍSTICA	EQUIPO DE MEDICIÓN
Viscosidad de las M. Extrusión y Aspersión	Viscosímetro Severs, utilizando una copa Ford No 3
Viscosidad de la M. Insonorización	Reómetro
Viscosidad en reposo: medida después de 2 días de reposo para simular los mayores tiempos de paro del proceso	Viscosímetro Severs para las M. Extrusión y Aspersión y, Reómetro, para la M. Insonorización
Densidad	Copa para densidad del laboratorio de control calidad
Fineza de grano (molienda)	Piedra de molienda Hegmann de 0 - 100 μm
Limpieza del producto	Valoración de 1 a 7 al comparar la contaminación del producto con un "patrón de aprobación de limpieza"

2.1.2 Medición de las características del proceso

Los datos de las características de proceso: tiempo de operación y consumo de telas filtrantes, fueron medidos durante la fabricación 15 lotes de cada masilla.

TABLA 2
Características del proceso

CARACTERÍSTICA	EQUIPO DE MEDICIÓN
Tiempo de tamizado de las M. Extrusión y Aspersión	Cronómetro
Tiempo de filtrado por bomba de la M. Insonorización	Cronómetro
Consumo de tela filtrante de las M. Extrusión y Aspersión	Conteo del número de veces que se cambia el filtro en 1 lote

2.2 Etapa de búsqueda de sistemas existentes en el mercado

Se realizó una búsqueda de información de los sistemas de filtración de masillas, en ensambladoras de vehículos, en la casa matriz de la empresa, catálogos, Internet y en documentos internos de la empresa.

2.3 Etapa de análisis y decisión

Con las características del proceso y del producto, y los datos técnicos obtenidos, se realizaron cotizaciones de diferentes sistemas y se estudió cada alternativa con base en los siguientes criterios de selección: Materiales de construcción, flujos y viscosidades de operación, filtros que maneja y costos.

2.4 Etapa de Implementación

Se realizó un diseño de experimentos factorial, por duplicado, para encontrar la presión de operación y tamaño de malla más adecuado para el filtro, en las 3 masillas de interés. Se evaluó una presión de operación de 2 y 8 bares, correspondientes al rango de presión recomendado por el proveedor para el sistema seleccionado. Para el tamaño de malla se evaluaron 3 valores: 150 μm por ser el tamaño de malla tradicionalmente utilizado por la empresa, 300 μm por ser el tamaño utilizado por su casa matriz y 200 μm por ser un tamaño intermedio entre ambos y por haber disponibilidad en el mercado.

Como variables de respuesta se midieron el tiempo de proceso y la limpieza del producto.

Se realizó un análisis estadístico de análisis de varianza y test de rangos múltiples por el método Tukey, con un nivel de confianza del 95%, empleando el software StatGraphics Plus versión 5.0.

3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

3.1 Preselección de 3 de los sistemas de filtrado-ensado cotizados

Con la información inicial del proceso y del producto, y los criterios de selección definidos, se realizaron cotizaciones con diferentes proveedores. Entre las 5 cotizaciones seleccionadas inicialmente, se preseleccionaron las 3 más

adecuadas, correspondientes a una bomba de diafragma marca y dos bombas de tornillos.

Una de las dos cotizaciones descartadas corresponde a una bomba de diafragma marca VORTI-SIV. No es ideal ya que su sistema está formado por filtros metálicos que tienen rendijas en lugar de poros, lo que no se garantiza la retención de un tamaño de partícula uniforme. La segunda cotización que fue descartada corresponde a una bomba de pistón marca GRACO que, aunque es el mismo tipo y marca de bomba utilizada por las principales ensambladoras de vehículos, su diseño no es adaptable a los recipientes rectangulares con capacidad para 300 galones, con las bombas de pistón, solo es posible bombear el producto desde tambores cilíndricos con capacidad para 55 galones.

TABLA 3
Preselección de 3 sistemas

EQUIPO	Estación de bombeo Modelo EF502 Serie 26400/A50/ESAu-tolimpiante 	Bomba Kiber Helicoidal Sanitaria K295ST – 100. Versión eje libre 	Bomba "NEMO" Modelo NM038SO01L08B. con tolva 
MARCA / PROVEEDOR	RUSSELL FINEX INC. / MA-QFA LTDA.	INOXPA / INOXPHAL Suministros y montajes Ltda.	NETZSCH / SIMSA Ltda.
TIPO DE BOMBA	Diafragma	Tornillo	Tornillo

3.2 Ensayo con bomba de tornillo en demostración

El proveedor SIMSA Ltda, ofreció la opción de probar una bomba en demostración, por lo que se realizó un ensayo con 1 lote de las Masillas de Extrusión e Insonorización y 2 lotes de Masilla de Aspersión. Para el ensayo se empleó la bomba "NEMO" Modelo NM021SO01L06B, con tolva (Netzsch, 2004).

FIGURA 1
Bomba de tornillo ensayada



3.2.1 Características del proceso

El tiempo del proceso de filtración se redujo en un 78% para la Masilla de Extrusión, en 57,5% para la de Aspersión y en un 85% para la de Insonorización. La reducción en el tiempo generó casi 559 horas disponibles al mes, lo que hace posible aumentar la capacidad de producción mensual en un 27%.

A pesar que se requirió 1 operario adicional para la filtración, la reducción en tiempo genera un ahorro mensual aproximado de \$1'525.069 por mano de obra.

3.2.2 Características del producto

Para la limpieza del producto se presentó mejoría para las Masillas de Aspersión e Insonorización pasando de un estándar de casi 4 a un estándar 3 y 2, respectivamente; la Masilla de Extrusión permaneció en un estándar 4 de limpieza.

Se encontró que el valor de la fineza de grano se reduce para las 3 masillas y, está más alejado del valor máximo permisible para la empresa ($\leq 90 \mu\text{m}$ para las masillas de Extrusión y Aspersión, $\leq 70 \mu\text{m}$ para la masilla de insonorización). Esto es positivo para el producto debido a que se obtiene un menor tamaño de partícula y, por lo tanto, reduce el riesgo de taponamiento de las boquillas de aplicación en las ensambladoras de vehículos. Para las características de viscosidad y densidad, las variaciones obtenidas no se consideran significativas debido a que siguen estando dentro del rango de aceptación.

3.3 Elección de la mejor alternativa entre los sistemas preseleccionados

Después de haber realizando un análisis de los beneficios que se obtendrían con los 3 sistemas preseleccionados, y de haber estudiado los resultados del ensayo con la bomba de tornillo en demostración, se eligió como mejor alternativa la bomba de tornillo marca NETZSCH que corresponde al mismo tipo de bomba ensayada pero de una mayor capacidad: Modelo NM038SO01L08B con tolva, 8 bares de presión de operación y flujo del fluido de 1955 Gal/h.

FIGURA 2
Bomba de tornillo seleccionada



3.4 Diseño de experimentos

En el diseño de experimentos factorial realizado (Figura 3) se midieron las variables de respuesta: tiempo de proceso y la limpieza del producto. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 4 a 9.

FIGURA 3
Valores de cada nivel del diseño de experimentos

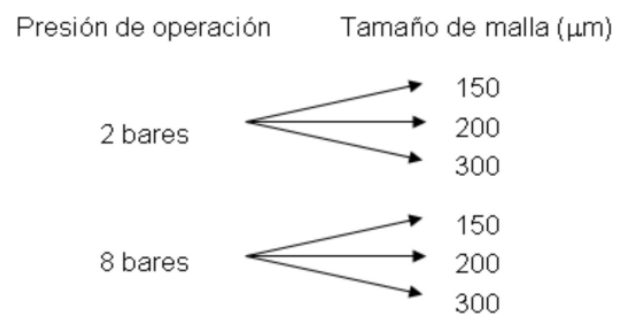


FIGURA 4
Comportamiento del Tiempo de filtrado,
Masilla de Extrusión

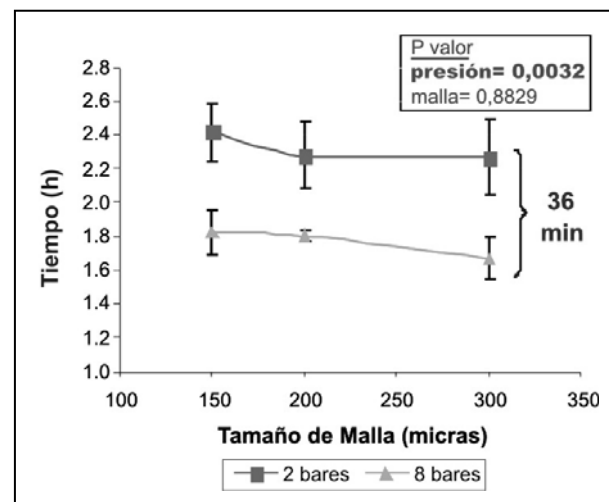


FIGURA 5
Comportamiento del Tiempo de filtrado,
Masilla de Aspe

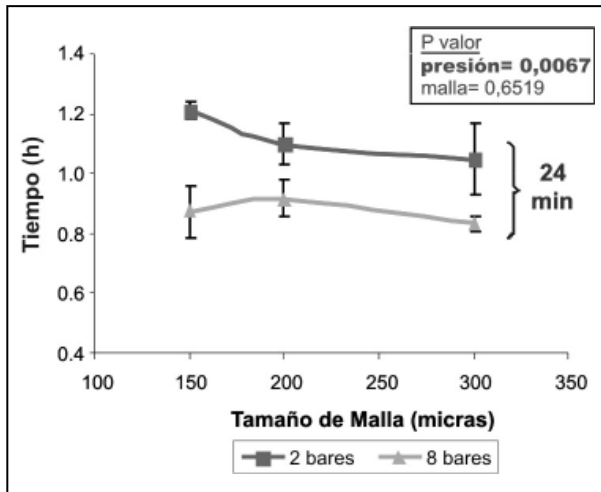
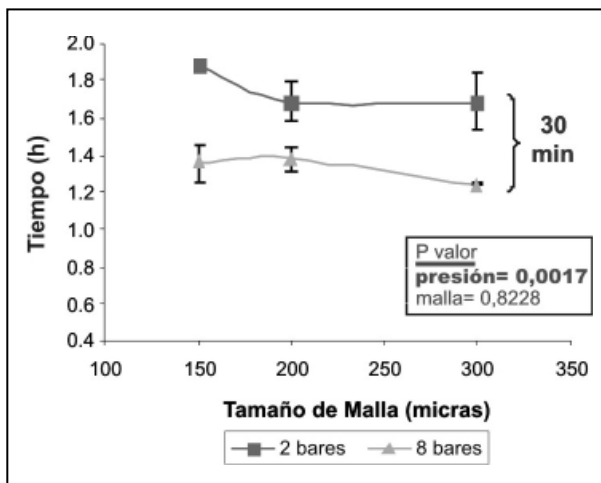


FIGURA 6
Comportamiento del Tiempo de filtrado,
Masilla de Insonorización



Para las 3 masillas se observa una tendencia a la reducción del tiempo de filtración a medida que se utiliza un mayor tamaño de malla y una mayor presión, ya que un poro más abierto opone menor resistencia al paso del producto. Sin embargo, la variación en los valores de presión tienen mayor incidencia sobre el tiempo. Esto se corrobora con los P-valores ya que para la presión son menores que 0,05, lo que indica hay diferencia estadísticamente significativa;

para el tamaño de malla los P-valores son mayores o iguales a 0,05, indicando que no hay diferencia estadísticamente significativa.

FIGURA 7
Comportamiento de la Limpieza del producto,
Masilla de Extrusión

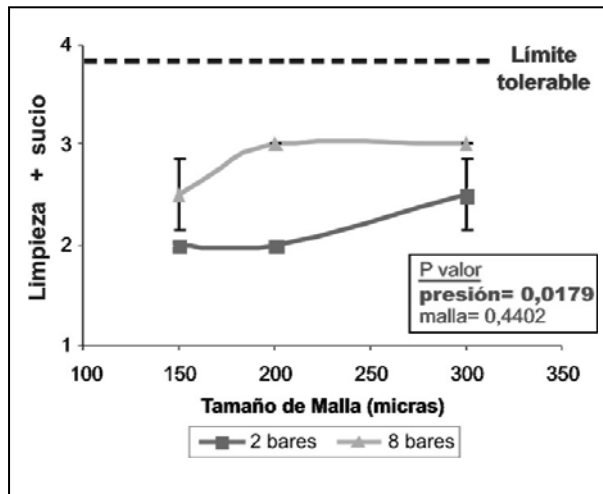


FIGURA 8
Comportamiento de la Limpieza del producto,
Masilla de Aspersión

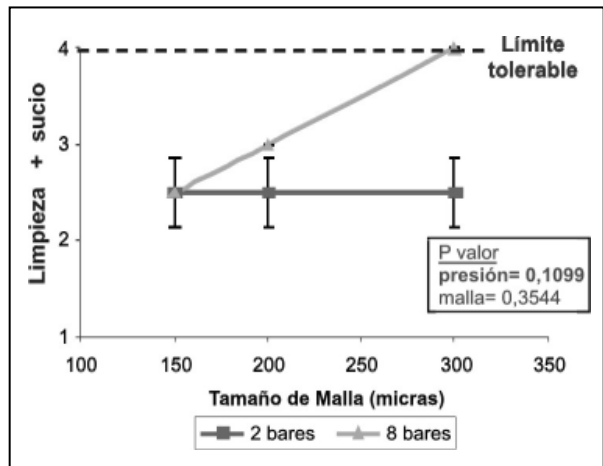
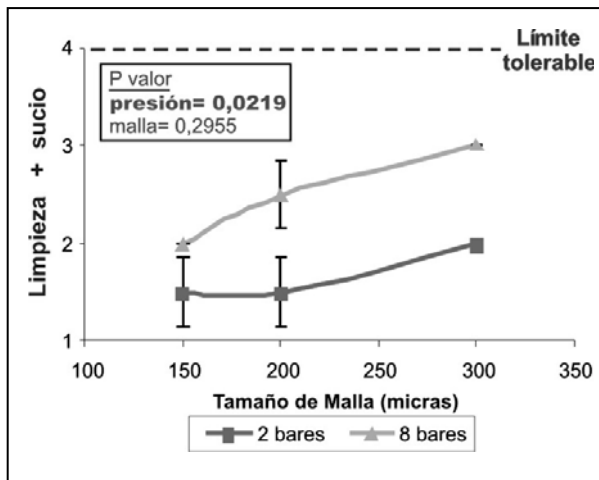


FIGURA 9
Comportamiento de la Limpieza del producto,
Masilla de Insonorización



Para la limpieza del producto se observa un comportamiento completamente opuesto al del tiempo de proceso, debido a que a mayores tamaños de malla hay menor retención de contaminación y, por lo tanto, el producto final tiende a estar más sucio, sin llegar a ser significativo este aumento en el valor de limpieza. (P-valores mayores o iguales a 0,05, no hay diferencia estadísticamente significativa en la limpieza a diferentes valores de malla).

Por otro lado, una mayor presión de operación empuja el producto con mayor fuerza a través del filtro haciendo que este tienda a expandirse y deje pasar una mayor cantidad de contaminantes.

Los P-valores obtenidos para la presión, mostraron una diferencia estadísticamente significativa para las Masillas de Extrusión e Insonorización, ya que son menores que 0,05. En el caso de la Masilla de Aspersión, el aumento en la presión no es considerado como significativo desde el análisis estadístico, debido a que el valor de limpieza es igual para 2 y 8 bares, a un tamaño de malla de 150 μm .

3.5 Presión de operación y tamaño de malla más adecuados para el nuevo sistema

Los mejores resultados de limpieza se obtuvieron a 2 bares y filtros de 150 μm , y los menores tiempos se alcanzaron a 8 bares y 300 μm . También se concluyó que la reducción en tiempo obtenida, por usar un filtro de 300 μm en lugar de uno de 150 μm , se considera significativa ya que hace posible filtrar un lote de 3 a 9 minutos más rápido, sin afectar la calidad final del producto porque la limpieza permanece dentro del estándar de aceptación. Como esto representa una reducción de 8 horas mensuales en el proceso de filtración, equivalentes a un turno de trabajo de un operario, se definió que los parámetros de operación más adecuados para el nuevo sistema corresponden a 8 bares de presión y 300 μm de tamaño de malla.

3.6 Comparación de resultados del nuevo sistema con el sistema anterior

Limpieza

La limpieza del producto, se conservó dentro del estándar (≤ 4) para las 3 masillas, e incluso, se redujo para las Masillas de Extrusión e Insonorización.

Fineza de grano

El valor de fineza de grano de las 3 masillas, se redujo en 3,2%, 6,7% 8,2% para las Masillas de Insonorización, Extrusión y Aspersión. Este resultado es satisfactorio porque se obtiene un menor tamaño de partícula que genera menor riesgo de obstrucción de las pistolas de aplicación en las ensambladoras.

Densidad y viscosidad

Los valores de densidad y viscosidad se mantuvieron dentro de los límites de especificación sin comprometer la calidad del producto.

Tiempo

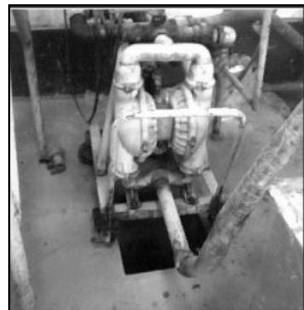
El tiempo de filtrado de la Masilla de Extrusión, Aspersión e Insonorización se redujo en un 87,8%, un 79,8% y un 86%, respectivamente. Esta reducción lleva a aumentar la capacidad de la planta un 34% ya que generara cerca de 649 horas disponibles al mes para procesar unos 101.594 Kg adicionales de las 3 masillas.

FIGURA 10

Proceso anterior de filtración-ensado



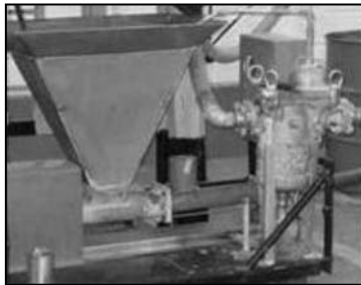
M.Extrusión y Aspersión



M. Insonorización

FIGURA 11

Proceso nuevo de filtración-ensado



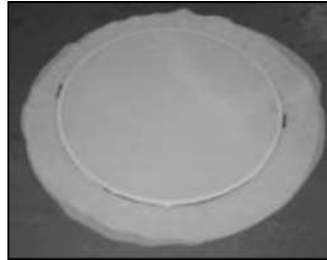
3 masillas

Elementos filtrantes

Se generó una reducción en el número de elementos filtrantes utilizados por lote, que trae a su vez beneficios económicos representados en una reducción de costos de \$103.190 mensuales.

FIGURA 12

Filtros proceso anterior de filtración-ensado



M.Extrusión y Aspersión Telas filtrantes de Nylon (150 μ m)



M. Insonorización Filtro metálico de rendijas (150 μ m)

FIGURA 13

Filtros proceso nuevo de filtración-ensado



Filtro de Nylon tipo bolsa (300 μ m)

3.7 Otros beneficios obtenidos con el nuevo sistema y retorno de la inversión

Para una Inversión total de \$34'716.000 y beneficios mensuales de \$3'622.044 mensuales, correspondientes a los ahorros por consumo de elementos filtrantes, mano de obra ordinaria, mano de obra en días festivos, reparación de tamices y consumo de energía, la inversión inicial por la adquisición del nuevo sistema puede ser recuperada en aproximadamente 10 meses.

TABLA 4
Retorno de la inversión del proyecto

Item	Valor
Ahorro en consumo de elementos filtrantes (\$/mes)	\$ 103.190
Ahorro en Mano de Obra en el proceso de filtración (\$/mes)	\$ 2'306.502
Ahorro en Mano de Obra festiva (\$/mes)	\$ 909.986
Ahorro en reparación de palancas de tamices (\$/mes)	\$ 240.000
Ahorro en consumo de energía (\$/mes)	\$ 62.367
BENEFICIO TOTAL (\$/mes)	\$ 3'622.044
INVERSIÓN TOTAL (\$)	\$ 34'716.000
RETORNO DE LA INVERSIÓN (Meses)	9,6
RETORNO DE LA INVERSIÓN (Años)	0,8

CONCLUSIONES

El tiempo de proceso y la limpieza del producto final son las características más representativas que reflejan la idoneidad de los equipos utilizados en la filtración de las masillas de aplicación automotriz.

La bomba implementada para la filtración en la empresa fabricante de masillas, es la bomba de tornillo, por ser la que mejor se adapta a las condiciones del proceso, entre los sistemas estudiados: bombas de diafragma, de pistón y de tornillo.

El ensayo de un equipo en demostración es buen parámetro de partida para la selección de un nuevo equipo ya que, con la bomba en demostración se obtuvieron reducciones en el tiempo de filtración entre el 60 y 85%, resultados similares a los obtenidos con la bomba implementada.

Para el sistema seleccionado, al utilizar mayores tamaños de malla y mayores presiones de operación, se obtienen

mayor contaminación en el producto final pero menores tiempos de filtración.

La presión de operación y tamaño de malla más adecuado para la filtración de las 3 masillas, con la bomba implementada, corresponden a 8 bares y 300 μm .

El tiempo de filtración se redujo entre un 80 y un 88%, para las condiciones óptimas de 8 bares de presión y 300 μm de tamaño de malla.

La limpieza del producto mejora entre un 25 y 22 % para las masillas de Extrusión e Insonorización. Para la Masilla de Aspersión la limpieza tiende a disminuir pero esto no se considera representativo (-5,3%) por permanecer dentro del estándar de aprobación.

El aumento en una persona adicional, con el nuevo sistema de filtración implementado, se contrarrestó con la disminución en el tiempo de proceso, generando un ahorro por mano de obra de \$2'306.502 mensuales.

BIBLIOGRAFÍA

Maron, Olivier, 2006. Operations Leader, Dow Automotive. Francia. [Comunicación personal]

Martínez, Carlos E., 2006. Asistente técnico en MAZDA (CCA), Mazda. Bogotá. [Comunicación personal]

Netsch, 2004. Data Book, Bombas. Brasil

Nieto, Henry, 2006. Asistente técnico en GMCOLMOTORES, GM Colmotores. Bogotá. [Comunicación personal]

Planta Chocolates, 2005. Antioquia. [Visita a la planta de producción de chocolates]

Planta Masillas, 2004. Indicador Cumplimiento al programa de producción. http://www.intranet.com.co/indicadores/operas_prod/ind_producc_mens_04.htm. [Consultado: 10 septiembre 2006].

SOFASA, 2006. Proceso de fabricación. <http://www.sofasa.com.co/Sofasa/Sofasa.nsf/vstImagenporcateg/4E3ED7F8EB96499305256BD8005D6084?OpenDocument> [Consultado: 10 Septiembre 2006].

DESARROLLO DE UNA FORMULACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE BLOQUES DE RESINAS DE POLIURETANO PARA MAQUINADO DE PROTOTIPOS

David Arana Aldana, daranaal@eafit.edu.co - Elizabeth López Correa, elopez@eafit.edu.co

RESUMEN

Este documento fue estructurado con el fin de ofrecer al lector un compendio de orden académico e industrial en el campo de la elaboración de resinas de poliuretano para mecanizado de prototipos, basándose fundamentalmente en la utilización de las máquinas y equipos existentes en el laboratorio de máquinas de la Universidad EAFIT. Se partió inicialmente con la descripción de los conceptos generales acerca de la elaboración del poliuretano, después se continuo con las pruebas y ensayos para caracterizar tanto el material base como el obtenido en esta investigación. Por último se llego a la descripción de un proceso para obtener un material con propiedades similares al poliuretano objetivo, Renshape 5020 elaborado por la compañía Freemansupply®. Se logro obtener un material para uso educativo, no se logro obtener una calidad superficial como la presentada por el polyuretano base debido a la presencia de celdas abiertas en la estructura del material, se recomienda el uso equipos especializados para obtener un menor número de celdas abiertas en la estructura del material.

Palabras Clave

Cnc, espumante, maquinable, One shot, polimerización, tiempo de crema, tiempo de gelificación.

ABSTRACT

The content of this paper was structured to provide to the reader a document whith industrial and academic issues on the elaboration of polyurethanes resins for machining prototypes using laboratories machines and equipments than exist in EAFIT University. Initially is the description of general's concepts about polyurethane elaboration, followed by the testing base and then the polyurethane obtained. Finally, provide the description of the process to obtain a material whit similar properties than polyurethane Renshape 5020 made by Freemansupply®. The product obtained is for educational use, the presence of open cells affected the superficial final quality, to reduce the open cell number the use of specialized equipment are recommended.

Key Words

Cnc, foamingm machining, One shot, polymerization, cream time, gel time

1. INTRODUCCIÓN

Este es un mundo globalizado, en el cual las exigencias en tecnología e innovación se hacen cada vez más grandes; es por esto que cada país se debe interesar en desarrollar nuevas herramientas para satisfacer las necesidades del mercado mundial.

En Colombia, el sector manufacturero, se ha visto obligado a crear una innovación constante, lo que conlleva a optimizar procesos y a desarrollar nuevos productos en periodos de tiempos más cortos y con el menor costo posible.

Una de las herramientas de innovación es la implementación del prototipaje rápido, con el cual se busca representar la forma y en el mejor de los casos las propiedades de un ítem real y así disminuir los tiempos involucrados entre la etapa de diseño y fabricación del mismo (Rob Hassold, 2007).

En la actualidad la Universidad EAFIT tiene una gran demanda en cuanto al uso de herramientas CAD/CAM para el maquinado de prototipos, esta gran demanda conlleva al uso de bloques específicos de poliuretano para este tipo de operación. Es por este incremento de la demanda y por los sobrecostos que la universidad ha visto la necesidad de buscar alternativas más económicas con respecto a la consecución de los bloques, sin afectar la calidad de los materiales. En el momento la universidad está optando por importar los bloques para cubrir la demanda, ya que hasta el momento no se ha encontrado un producto de calidad igual o similar en la industria nacional.

Para suplir esta necesidad se propone en este documento un método para la elaboración de resinas de poliuretano, en el cual se utilicen los equipos y las máquinas existentes en la universidad EAFIT y, a la vez, partiendo de materias primas que se consiguieran fácilmente en el mercado nacional. El uso de las técnicas estadísticas basado en diseño de experimentos, métodos de ensayo y error, y calificaciones cualitativas fueron las técnicas aplicadas para determinar el grado de aceptabilidad de los resultados obtenidos.

Al evaluar las propiedades físicas y mecánicas del poliuretano que se requiere obtener, se pueden ajustar y evaluar los resultados, tanto en el proceso de elaboración como en la parte de mecanizado con el fin de definir los parámetros que más se ajusten a las necesidades del producto.

Por último las preguntas de investigación que surgen son:

1. ¿Qué materiales y equipos son necesarios para producir el poliuretano?
2. ¿Qué características físicas, químicas y mecánicas debe tener el poliuretano?
3. ¿Cuáles son las variables que afectan el proceso?
4. ¿Cómo se caracteriza el material?
5. ¿Los materiales y equipos se encuentran en la Universidad?
6. ¿Es posible producir el poliuretano con las condiciones deseadas en la Universidad EAFIT?

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Búsqueda de Información

Primero se debe obtener la información suficiente acerca de las propiedades físicas y químicas del material a realizar, su proceso de elaboración, máquinas y condiciones y toda información pertinente acerca de cómo elaborar el poliuretano.

2.2 Caracterización del Material

Para la realización de un material maquinable de poliuretano se debe partir primero de una caracterización del material al cual se desea llegar. Esta caracterización se basa en definir las propiedades relevantes (Densidad, Dureza, Resistencia a la compresión, Resistencia a la tensión, maquinabilidad y porosidad) que tiene el poliuretano objetivo y así definir unos estándares mínimos, los cuales deben satisfacerse para poder alcanzar una calidad deseada en el material a elaborar.

Generalmente los proveedores de poliuretano proporcionan una ficha técnica en la cual se muestran las principales características físicas, químicas y mecánicas como se muestra en las tablas 1 y 2.

TABLA 1
Especificaciones del Poliuretano Importado

	Dureza Shore D	Densidad g/cc	Densidad lbs/ft ³	Resistencia tensión psi	Resistencia Compresión psi	Modulo elasticidad psi	Resistencia flexión psi	Color
RenShape 5020	27	0.16	10	370	260	-	330	Gris

Fuente tabla: (FREEMAN Manufacturing and supply company)

TABLA 2
Especificaciones de Mecanizado del Poliuretano Importado

	Velocidad de desbaste (RPM)	Avance de desbaste (IPM)	Velocidad de acabado (RPM)	Avance de acabado (IPM)
RenShape 5020	2.500	200	15.000	200

Fuente tabla: (FREEMAN Manufacturing and supply company)

2.2.1 Densidad. Esta prueba está regida por la norma ASTM D-792. Esta prueba se emplea como base para determinar si esta propiedad tiene alguna influencia sobre las demás pruebas que se realizarán posteriormente. Para determinar esta propiedad se empleó una **Balanza marca Ohaus con 0,01gr de incertidumbre.**

2.2.2 Dureza: en este ensayo se evalúa la resistencia que opone un material a ser penetrado por otro más duro. Para

este ensayo se debe trabajar con probetas cuya superficie cumpla con requerimientos como: Plana, homogénea, limpia y perpendicular al penetrador. Esta prueba se realiza bajo la norma ASTM D-2240, la cual emplea un durómetro shore D modelo 7938, suministrado y supervisado por el laboratorio de materiales de la universidad EAFIT.

2.2.3 Compresión. Permite conocer la carga máxima, el modulo de elasticidad por compresión, resiliencia del material, comparación entre resistencia de los diferentes bloques. Este ensayo está regido por la norma ASTM D-695, y arroja como resultado preliminar una gráfica carga vs deformación.

Para las diferentes pruebas de compresión, se utiliza la Maquina Universal de Ensayos Marca Instron modelo 3366 serie Q5582, con una capacidad máxima de 10 KN.

2.2.4 Tensión. Permite conocer datos de carga máxima, modulo de elasticidad por tensión, esfuerzo de tensión de ruptura, comparación de esfuerzos de las muestras obtenidas. Este ensayo está regido por la norma ASTM D -638 y se emplea la Maquina Universal de Ensayos Marca Instron modelo 3366 serie Q5582, con una capacidad máxima de 10 KN.

2.2.5 Maquinabilidad: los resultados que se quieren evaluar son: acabado de las aristas, acabado superficial, arranque de viruta y apariencia del material en cuanto a porosidad. Para el maquinado se emplea el centro de mecanizado Marca Benchman modelo XT existente en el laboratorio de Máquinas de la Universidad EAFIT. En el maquinado se pretende simular todas las operaciones que se llevan a cabo en el mecanizado de un prototipo por CNC. Las operaciones que se realizan en este centro de mecanizado son básicamente fresado (desbaste y acabado) y taladrado en diferentes direcciones y con herramientas para cada tipo de operación. Los parámetros de mecanizado fueron suministrados por el personal del laboratorio de Máquinas y son los que se utilizan actualmente para mecanizar las piezas de poliuretano comprado a Freeman Supply ®. A continuación se listan los parámetros:

- $V = 1000\text{mm/min}$.
- $V_a = 100\text{mm/min}$.
- $\text{RPM} = 4500$.
- $\text{VR} = 2000\text{mm/min}$

Para las operaciones de desbaste del prototipo se utilizó una broca fresa de metal duro de 1/2 pulgada, para la operación de acabado se empleó una broca fresa de metal duro de 1/4 pulgada. Y finalmente para la operación de taladrado se empleó una broca de metal duro de 3/16 de pulgada.

2.2.6 Porosidad: Este ensayo tiene como finalidad reconocer el tipo de superficie obtenida después de realizar cualquier operación de corte o mecanizado que se realice en la pieza. Para los análisis de porosidad se realizaron pruebas visuales para determinar la calidad de la superficie del material, y se les asignó una calificación de 1 a 5, siendo 5 la mejor calificación y se tomó como base el poliuretano importado.

2.3 Preparación y Selección de las Materias Primas

Las materias primas principales a emplear en los ensayos serán el polioli estructural Rimline LH 85228., el isocianato Rubinate Ref-5005 y el desmoldante FR en crema (este desmoldante se aplica únicamente sobre las superficies del molde que van a tener contacto con el poliuretano).

2.4 Mezclado de los Componentes

Se realizó un diseño en el cual se pudieran determinar cantidades mínimas y máximas de polioli e isocianato, rango mínimo y máximo tanto de revoluciones como de presión, proporciones adecuadas de polioli e isocianato.

Para las pruebas de inyección se utiliza una pistola de inyección DP400-85/0468 MIXPAC, con relación 1:1, los rangos de presión empleados son de 30 psi a 60 psi. Se emplea para los ensayos de vaciado un agitador estático tipo MC 06-32 elaborado por MIXPAC®, para el mezclado de las probetas se varió la velocidad de mezclado entre

190 RPM y 1700 RPM para homogeneizar la mezcla. Adicionalmente para calcular la cantidad de material inyectado se toma como base las divisiones que contiene la pistola de inyección, cada división equivale a 10 ml de cada uno de los componentes A y B.

Se emplearon para homogeneizar la mezcla tres tipos de mezcladores como se ilustra en la figura 1.

FIGURA 1. MEZCLADORES
(Mezclador diseñado) (Mezclador tipo aspas)
(Mezclador tipo disco)



Fuente Figura: Elaboración propia.

2.5 Moldeado y Curado de los Bloques

Después de mezclar los componentes se emplea el molde elaborado en este proyecto para darle la forma final a las probetas de poliuretano. Para la parte de curado es recomendable dejar pasar unos 15 minutos aproximadamente antes de proceder a desmoldar los bloques. Después de este tiempo el bloque ya está listo para ser almacenado.

2.6 Maquinado

Para obtener una base de comparación todas las probetas elaboradas, se cortan y se mecanizan como se explica en el numeral 2.2.5. Durante y después del mecanizado se analiza la calidad superficial, porosidad de las superficies, arranque de viruta, ruido de la maquina al realizar el corte y calidad de las aristas.

2.7 Diseño de Experimentos

El uso de las técnicas estadísticas basado en diseño de experimentos, métodos de ensayo y error, y calificaciones cualitativas fueron las técnicas aplicadas para determinar el grado de aceptabilidad de los resultados obtenidos.

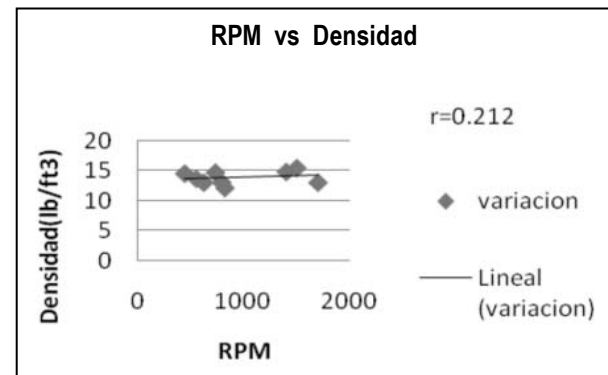
El diseño de experimentos se realizó una vez determinadas las variables de importancia, como son, RPM, cantidad de material total, proporción de cada uno de los componentes y temperatura del molde, presión de inyección.

El primer paso es definir la variable independiente X, en este caso la variable X= número de revoluciones o la cantidad de material (proporción), una vez definida esta variable se define la variable dependiente Y= densidad, resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, resistencia a la compresión y dureza.

El segundo paso es seleccionar el tamaño de muestra n para ambas variables, para nuestro caso el número de observaciones fueron n=9 para RPM y n= 8 para la cantidad, con lo que se obtienen 9 pares X Y para una y 8 pares de observaciones para la otra.

El tercer paso es mostrar la relación de las variables en un diagrama de dispersión. Con este diagrama se aprecia de manera descriptiva el sentido y la intensidad de relación entre las variables como se ilustra en la figura 2.

FIGURA 2
Relación de la variable RPM Vs Densidad



Fuente Figura: Elaboración propia.

EL cuarto paso es calcular un coeficiente de correlación lineal r a partir de la muestra, como aproximación de la verdadera relación lineal ρ (rho) entre las variables.

$$-1 < r < +1$$

Con la ayuda del STATGRAPHICS®, podemos calcular la correlación.

El paso siguiente es modelar la dependencia de la variable Y, de la variable X, a través de una recta, esto es la regresión lineal simple, esto es posible con la ayuda de STATGRAPHICS®. Este programa me arrojar los siguientes cálculos:

- Cálculo del error estándar de la estimación.
- Cálculo del Coeficiente de Determinación.
- Prueba de Hipótesis para analizar si la pendiente es significativa.
- Por último se realiza un Análisis de las suposiciones realizadas para la recta de regresión. Se debe comprobar que se cumple una condición fundamental. Los residuos siguen una distribución aproximadamente Normal: para esto se hace un análisis de los residuos.

3. RESULTADOS

De los diferentes tipos de ensayos mencionados, se caracterizo el poliuretano importado como se muestra en la tabla 3.

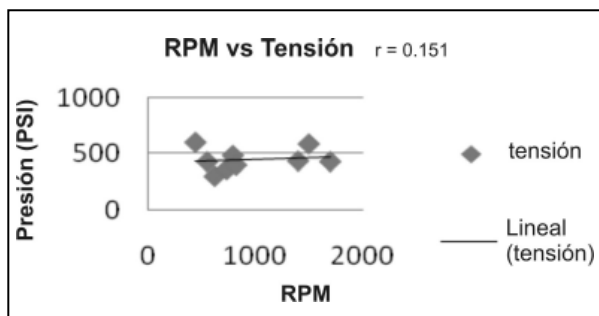
TABLA 3
Propiedades de los Poliuretanos importados

Caracterización de los poliuretanos importados						
	DENSIDAD (g/cm ³)	DENSIDAD (lb./ft. ³)	DUREZA SHORE A	RESISTENCIA A LA COMPRESION (PSI)	RESISTENCIA A LA TENSION (PSI)	CALIFICACION POROSIDAD (1-5)
RENSHAPE 5020	0,17	10,48	15,00	488,18	303,92	5
RENSHAPE 5025	0,29	18,10	25	1543,73	640,02	5
NORMA ASTM	D-792	D-792	D-2240	D-895	D-638	N/A

Fuente tabla: Elaboración propia

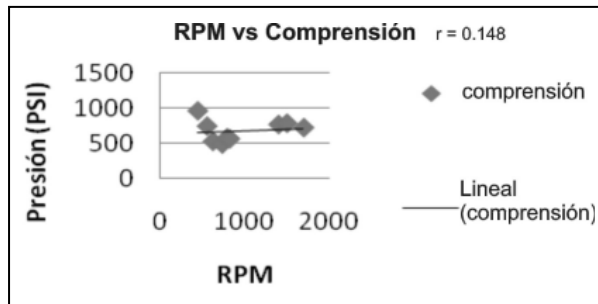
De todas las correlaciones halladas en las figuras 2 a la 5 se hacen las siguientes inferencias: en los casos en que se analizo las correlaciones cuando la variable independiente eran las RPM las correlaciones no sobrepasaban el valor de 0.212, la correlación de las RPM con las propiedades es baja o débil, y se dice que no existe alguna correlación entre las variables, por tanto se infiere que las revoluciones a las cuales se agite la mezcla no afectan las propiedades del poliuretano obtenido.

FIGURA 3
Relación de la variable RPM Vs Resistencia a la tensión



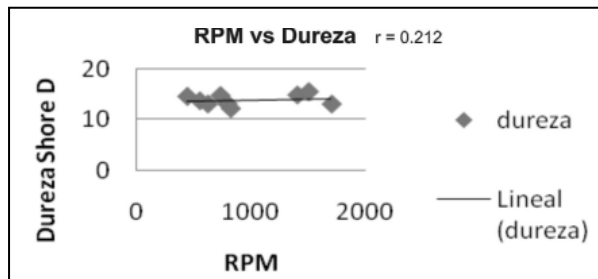
Fuente figura: Elaboración propia.

FIGURA 4
Relación de la variable RPM Vs Resistencia a la compresión



Fuente figura: Elaboración propia.

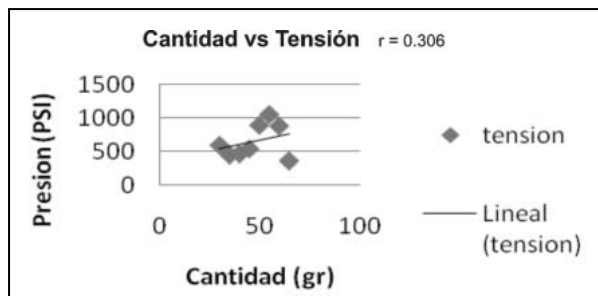
FIGURA 5
Relación de la variable RPM Vs Dureza



Fuente figura: Elaboración propia.

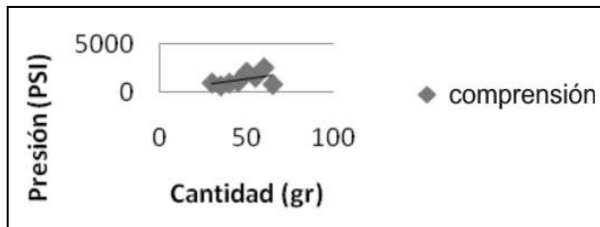
En el caso de la cantidad de material, las propiedades de tensión y compresión también presentan una correlación débil, como se muestra en las figuras 6 y 7, y se hace la inferencia que la cantidad de material no afecta las propiedades de tensión y compresión.

FIGURA 6
Relación de la variable Cantidad Vs Resistencia Tensión



Fuente figura: Elaboración propia.

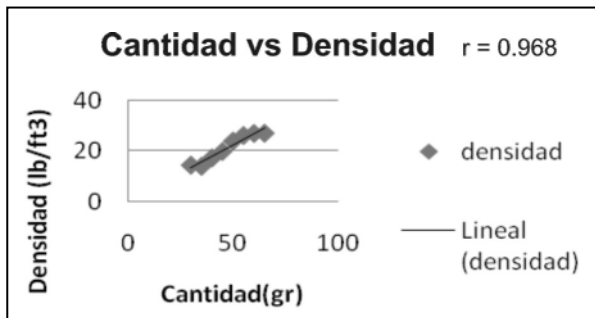
FIGURA 7
Relación de la variable Cantidad Vs Resistencia Compresión



Fuente figura: Elaboración propia.

En cambio las propiedades de densidad y dureza si se ven afectadas por la cantidad de material, las correlaciones son de 0.968 y 0.830 respectivamente como se ilustra en la figura 8. En este caso se dice que ambas correlaciones son positivas y la correlación es intensa o fuerte.

FIGURA 8
Relación de la variable Cantidad Vs Densidad



Fuente figura: Elaboración propia.

Después de analizar las mejores probetas se llegó a la conclusión que el mejor resultado se obtuvo con el ensayo correspondiente a la probeta # 42.

La caracterización de esta probeta se presenta en la tabla 4 y la figura 9.

TABLA 4
Caracterización del material obtenido

	DENSIDAD (gr/cc)	DENSIDAD (lb/ft3)	RESIST. TENSION	RESIST. COMPRESION	COMPOSICION (gr. A/ gr. B)	(RPM)	DUREZA SHORE D
42	0,43	27,08	886,941	2489,333	60/60	730	22

Fuente tabla: Elaboración propia

FIGURA 9
Bloque # 42



Fuente figura: Elaboración propia.

Adicionalmente se compararon las propiedades con el poliuretano importado, como se muestra en la tabla 7.

TABLA 7
Propiedades poliuretano importado y el poliuretano obtenido

Caracterización de los poliuretanos importados y el material obtenido						
	DENSIDAD (gr/cc)	DENSIDAD (lb/ft3)	DUREZA SHORE A	RESISTENCIA A LA COMPRESION (PSI)	RESISTENCIA A LA TENSION (PSI)	CALIFICACION POROSIDAD (1-5)
RENSHAPE 5020	0,17	10,48	15	488,18	303,92	5
RENSHAPE 5025	0,29	18,1	25	1543,73	640,02	5
PROBETA # 42	0,43	27,08	22	2489,333	886,941	3,5

Fuente tabla: Elaboración propia.

Esta tabla muestra las propiedades del poliuretano elaborado en el centro de laboratorios de la Universidad EAFIT, se observa que las resistencias de tensión y compresión son mucho mayores, al igual que la densidad. Esto confirma las buenas propiedades mecánicas del poliuretano obtenido.

La calificación de 3,5 en porosidad refleja que en la probeta, existe una porosidad apreciable, por lo cual la apariencia superficial e interna del material no es optima, pero de igual forma es aceptable.

En el mecanizado se observaba la calidad final de las superficies, la viruta y el ruido producido por el centro

de mecanizado marca Benchman. La viruta y el ruido producido por la máquina fueron del mismo tipo durante todas las pruebas realizadas, no se apreció algún cambio significativo en estos dos factores durante el mecanizado.

Se logro establecer una evaluación económica entre el poliuretano producido en este proyecto y el que se importa, esto se muestra en la tabla 8.

TABLA 8
Comparación de costos entre poliuretano importado y elaborado

	Volumen (cc)	Costo total
Poliuretano 5020	74332	687.753,00
Poliuretano proyecto	74332	642.075
Diferencia		45.678,00

Fuente tabla: Elaboración propia.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Aunque se contaba con una pistola inyectora, que es ideal para este tipo de resinas, no se pudieron obtener resultados satisfactorios debido a que esta pistola mezcla las materias primas por medio de un agitador estático, el cual produce una turbulencia determinada según la presión con la que se trabaje en la pistola.

En cuanto a las materias primas empleadas, el proveedor "Poliuretanos y Químicos" sugirió no adicionar elementos a la mezcla debido a que el componente A contenía aditivos como siliconas y catalizadores; pero no pudo especificar cuáles eran debido a la falta de información por parte del fabricante.

Otro factor importante a considerar en el mezclado era la apariencia final de los bloques después de este. A medida que se mezclaban los componentes, a mayores revoluciones el color final de la pieza era más fino y homogéneo, sin embargo no se observó ninguna mejora apreciable en cuanto a propiedades mecánicas del material obtenido.

Se pudieron determinar los tiempos de crema (cuando la espuma empieza a crecer después del mezclado) de 10 a 15 segundos. Tiempo de gelificación (tiempo en que se tarda en solidificarse el material y estar listo para desmoldarse) 15 min. Tiempo de curado (tiempo de espera para garantizar que el material está listo para ser maquinado) se recomienda dejar los bloques en un ambiente fresco por lo menos 1 día.

La única especificación que no se pudo igualar durante todo el proyecto, fue la de la porosidad. No se logro conseguir un material que se asemejara en esta característica. Las demás especificaciones fueron satisfactorias.

Para la mezcla de los componentes A y B, de los cuales se obtiene el poliuretano, se trabajo con 3 diferentes tipos de mezcladores. Se recomienda realizar las mezclas con el mezclador de aspas debido a que ofrece mayor turbulencia y homogenización de la mezcla. Los otros dos mezcladores empleados por tener su base paralela a la superficie de mezclado y dejaban el fondo de la mezcla sin una buena homogenización.

Un punto crítico de la investigación fue la presencia de poros en el producto final, se pudo determinar por medio de un ensayo con una bomba de vacío, que un posible causante era la existencia de burbujas de aire contenidas internamente en los componentes. Para eliminar las burbujas es necesario el uso de un tanque de agitación continua completamente cerrado, con una salida que llegue directamente a la fase de mezcla para evitar la entrada de aire. La elaboración de este tanque se salía del presupuesto y alcance del proyecto.

Uno de los factores que más influyo en la obtención de las probetas de poliuretano es la de no contar con unas máquinas o condiciones adecuadas para fabricar este tipo de productos, pese a toda la ayuda disponible por parte de los laboratorios de la Universidad EAFIT.

Empleando los recursos disponibles en el laboratorio de máquinas de la Universidad, se obtuvo un material que cumple con las propiedades relevantes del poliuretano importado, la única característica que no se pudo igualar fue la porosidad.

El mecanizado de las piezas se realizó sin complicaciones y con las mismas condiciones que se maquina el poliuretano importado. Las condiciones de aristas, viruta y ruido fueron similares, pero la calidad de las superficies de las probetas elaboradas en este proyecto presentaba algunos poros apreciables y que afectaban la calidad superficial del material final.

Los recipientes en donde deben ir almacenados tanto el poliol como el isocianato deben ser de materiales no porosos. Cuando el isocianato se deja en recipientes de materiales como PET o plástico, se forma una costra en la superficie del material. Esto debido a que el isocianato reacciona con el aire y puede degradar la calidad de la materia prima.

REFERENCIAS

- [1] Christopher W. Mackosco. RIM Fundamentals of reaction injection molding (University of Minnesota. Hanser publishers 1989 , Munich Viena new York).
- [2] Gerhard W. Becker, Dietrich Braun. Kunststoff Handbuch, 7 Poliuretano (Hanser publishers 1993).
- [3] González Castro Luisa Fernanda, Montoya Rivas Renata Stephany (2006). Desarrollo de un material plástico maquinable a partir de resinas poliméricas para la fabricación de prototipos, tecnología del proceso y aplicaciones al medio (Tesis de Ingeniería de Producción, EAFIT)
- [4] Manfred Kapps, Siegfried Buschkamp. Fabricación de espuma rígida de poliuretano (PUR). 2004
- [5] Rob Hassold, Piscataway CNC Machining As A Rapid Prototyping Technique, (New Jersey 2007).
- [6] SIERRA. M.E (2005). Diseño y fabricación de prototipos para prensado de pruebas de baldosas cerámicas para Sumicol S.A. (Tesis de ingeniería de Producto, EAFIT)

EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADACIÓN COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA TINTORERÍA Y LAVANDERÍA

Ana María Galeano Sánchez - Lukas Osorio González

RESUMEN

La idea de este proyecto surgió ante la necesidad que tiene la empresa bajo estudio, de hacerle un tratamiento al agua residual de los procesos que es descargada directamente al alcantarillado, ya que estas deterioran las tuberías y a su vez contaminan las fuentes receptoras, en este caso, las quebradas aledañas a la planta de producción, además ocasionan malos olores que causan malestar y afecciones a la salud colectiva vecina. El proyecto fue desarrollado a escala laboratorio en el cual se aislaron microorganismos de los efluentes tratados. La investigación se realizó en el Laboratorio de Biotecnología de la Universidad EAFIT en la ciudad de Medellín. Inicialmente se obtuvieron 20 aislamientos, y a partir de ensayos realizados de adaptación por presión estos se fueron eliminando hasta tener finalmente 4 microorganismos viables con los cuales se podían empezar los ensayos de remoción de DQO (Demanda Química de Oxígeno). Se verificó que no había diferencias significativas para la remoción de DQO si se esterilizaba o no el agua residual, por consiguiente se siguió trabajando sin esterilizar, esto con el fin de reducir costos. Se encontró que la reducción de la DQO por parte de los 4 microorganismos seleccionados preliminarmente fue muy similar, esto se corrobora con el análisis estadístico, el cual no tiene diferencias significativas. Sin embargo, se seleccionó el aislamiento que presentó un mayor porcentaje de remoción y crecimiento celular para el proceso. Con esta última cepa se mejoró el medio de cultivo y la velocidad

de agitación para lograr un crecimiento celular adecuado y una mayor reducción de los contaminantes. Los ensayos se realizaron por duplicado para la etapa del proyecto en medio sólido y se trabajó por triplicado para la etapa de siembra en medio líquido. En estos últimos se encontró que el mejor medio de cultivo es aquel que contiene 3 g/L de glucosa, 1.5 g/L de peptona y velocidad de agitación de 100 rpm, lográndose una remoción del 92.8% en la DQO.

Palabras clave

Biodegradación, DQO, optimización medio de cultivo, adaptación.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, 1100 millones de personas carecen de acceso a agua potable y 2600 millones de personas no disponen de sistemas de saneamiento adecuado, sistemas con los cuales se reducirían un gran número de enfermedades (Morato *et al.*, 2006). Por otra parte, la demanda global de agua sigue aumentando sin parar. Ante la grave crisis presentada por la escasez de este recurso a nivel global, se plantea una gestión ecosistémica del agua, siguiendo los principios del desarrollo sostenible. Dentro de estas tecnologías sostenibles para el tratamiento del agua están los procedimientos naturales de depuración que no emplean aditivos químicos y que eliminan las sustancias

contaminantes, usando vegetación acuática, el suelo y microorganismos (Morato *et al.*, 2006). Considerar a la industria textil para desarrollar este proyecto es importante debido a que en Colombia esta se ha extendido por todo el territorio nacional, se ha vuelto común en las actividades productivas de la nación y se estima que es uno de los cuatro rubros más representativos y que más utiliza agua en América Latina (Cepis, 1992). Se ha encontrado que los procesos textiles utilizan gran cantidad de compuestos químicos, en su mayoría líquidos, los cuales son arrojados a las fuentes de agua en los vertimientos de las plantas y pueden causar problemas con compuestos recalcitrantes o xenobióticos que ambientalmente son inaceptables (Cepis, 1992). Los efluentes textiles deben controlarse y debe estudiarse la calidad de estos para aplicar tratamientos biológicos, ya que existe una amplia gama de elementos químicos que pueden afectar la eficiencia de operación de las plantas de tratamiento biológico (Cepis, 1992). Estas tecnologías son menos costosas porque las reacciones de degradación, medidas por la actividad biocatalítica natural, se producen a velocidades rápidas a temperatura ambiente. Por lo tanto, los costos energéticos del tratamiento son relativamente bajos (Levin y Gealt, 1997). Con la realización de este proyecto se desarrolló un plan de recuperación de las aguas residuales de una empresa de tintorería, y se escogió la biodegradación del agua como técnica a utilizada para la disminución de este impacto. Esta técnica se basó en el uso de un microorganismo que utilizan como sustrato algunas de las sustancias contaminantes de origen orgánico y, por ende, son degradadas para ser utilizadas en su metabolismo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto fue desarrollado en los laboratorios de biotecnología de la Universidad EAFIT, ubicada en Medellín, Colombia.

2.1 Reactivos

Agar Nutritivo, Agar Sabouraud y Agar Ogy de Merck, ácido sulfúrico, sulfato de plata, dicromato de Potasio, sulfato de mercurio, 1,10 Fenantrolina, sulfato ferroso, lugol, safranina,

crystal violeta, alcohol-cetona, NaOH, NaCl, stock de BSA 400 ppm para Lowry y solución acomplejante para Lowry. El agua residual fue tomada de la empresa del sector textil que colaboró en la investigación, ubicada en Dosquebradas, Risaralda.

Los microorganismos se aislaron del efluente de la empresa estudiada. Para esto se utilizó la técnica de las diluciones en serie y sembrado en superficie.

2.2 Adaptación por presión

Esta técnica consistió en aumentar la concentración de agua residual para la preparación de los medios de cultivo sólido y posteriormente de los líquidos. Dicha adaptación comenzó aumentando un 10% la concentración de agua residual en el medio sólido y finalizó en un 60%. De 70% en adelante se empezó a disminuir la concentración de nutrientes y de esta manera poder añadir presión y poder depurar mas cepas.

2.3 Procedimientos microbiológicos de identificación preliminar

Se utilizó la tinción de Gram para diferenciar bacterias Gram positivas de Gram negativas. Mediante este método las bacterias Gram positivas quedan de un color azul violeta y las Gram negativas quedan de un color rojizo. Adicionalmente se hicieron pruebas de catalasa y oxidasa a todos los aislamientos que se adaptaban al aumento de concentración de agua residual.

2.3 Método analítico para la determinación del contenido orgánico del agua residual

Para ver los resultados obtenidos en la degradación del agua residual, se utilizó la técnica de la DQO la cual se llevó a cabo tomando un volumen de 2.5 mL de una dilución 1:100 de cada uno de los sobrenadantes que resultaron de la centrifugación de las muestras de las cinéticas requeridas en el proyecto y que son detalladas posteriormente. Cada

volumen tomado de los sobrenadantes fue vertido en un tubo de ensayo lavado previamente con ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 20%; posteriormente se añadieron 1.5 mL de la solución digestora de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) con una concentración de 0.0167 M y 3.5 mL del reactivo de ácido sulfúrico que consiste en una relación de 5.5 g Ag_2SO_4 /Kg H_2SO_4 . El complejo fue trasladado a la mufla y se mantuvo una temperatura de 150 °C por dos horas. Después de que las muestras se enfriaron, se titularon utilizando como solución indicadora la ferroína y una solución de FAS (sulfato de amonio) 0.1M como titulante. Para este ensayo también fue necesario tener un blanco que consistió en 2.5 mL de agua destilada adicionada con el resto de los reactivos mencionados anteriormente (APH *et al.*, 1992).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Ensayo preliminar y Preparación de medios

Se escogieron dos procesos para el agua residual, que consistieron: el primero esterilizar el agua en autoclave el otro fue pasarla por un filtro de 0.4 micras. Para estos ensayos relacionados con el proceso de filtración no se

obtuvo un resultado positivo, ya que a pesar de que se realizó en condiciones estériles, el medio que se preparó con el agua filtrada presentó crecimiento de diversas bacterias procedentes del agua residual. Por consiguiente la esterilización de los medios se realizó en autoclave.

Los medios de cultivo empleados en la investigación fueron: Agar Nutritivo, Agar Sabouraud y Agar Ogy de Merck, esto con el fin de tener un amplio rango de crecimiento de microorganismos.

3.2 Aislamiento de Microorganismo

En los aislamientos de los microorganismos presentes en el agua residual se obtuvieron en total 20 aislamientos mostrados en la tabla 1.

3.3 Procedimientos preliminares de identificación bioquímica

Se determinó que los microorganismos de trabajo podían clasificarse en 14 bacterianas bacilos Gram negativos, un coco Gram negativo y uno Gram positivo, un coco-bacilo Gram negativo y uno positivo y 2 levaduras, mostrados en la tabla 2.

TABLA 1
Microorganismos aislados en el proceso

ASL	Forma	Superficie	Color	Diámetro (mm)	Medio cultivo	Crecimiento
ASL 1	Masa	Lisa	Transparente	_____	A. Ogy	Poco, aislado y radial
ASL 2	Redonda	Lisa	Crema	3-4	A. Ogy	Separado por colonias
ASL 3	Masa	Rugosa	Crema	_____	A. Ogy	Aglomerado radial
ASL 4	Masa	Lisa	Ocre	_____	A. gy	Separado por colonias
ASL 5	Masa	Lisa	Rosada clara	_____	A. Ogy	Poco y aglomerado
ASL 6	Redonda	Lisa	Blanca	2-3	A. Ogy	Colonias separadas
ASL 7	Masa	Lisa	Transparente - opaco	_____ -	A. Ogy	Aglomerado lineal
ASL 8	Redonda	Lisa	Transparente	3-4	A. N ut	Poco y separado
ASL 9	Redonda	Rugosa	Amarilla	2-3	A. N ut	Colonias separadas
ASL 10	Redonda	Lisa	Blanca	4-5	A. N ut	Poco , colonias aisladas
ASL 11	Masa	Lisa	Transparente - opaco	_____	A. N ut	Poco y separado
ASL 12	Redonda	Lisa	Amarilla	3-4	A. N ut	Poco y separado
ASL 13	Masa	Lisa	Blanca	_____	A. N ut	Colonias separadas
ASL 14	Redonda	Lisa	Blanca	7-8	A. N ut	Mucho y aglo merado
ASL 15	Redonda	Lisa	Amarilla	3-4	A. Sab	Crecimiento separado
ASL 16	Redonda	Lisa	Ocre	3-4	A. Sab	Se parado por colonias
ASL 17	Masa	Lisa	Blanca	_____	A. Sab	Aglomerado y radial
ASL 18	Masa	Lisa	Crema	_____	A. Sab	Aglomerado lineal
ASL 19	Redonda	Lisa	Rosada	8-9	A. Sab	Separado por colonias
ASL 20	Redonda	Rugosa	Blanca	3-4	A. Sab	Poco y separado

ASL: Aislamiento / A.Nut: AgarNutritivo / A.Sab: Agar Saboraud

TABLA 2
Resultados de la Tinción de Gram para los microorganismos aislados

MEDIO CULTIVO	AISLAMIENTO	BACILO	COCO	COCO-BACILO	GRAM PROPOSITIVO	GRAM NEGATIVO	
A. Ogy	1	X				X	
	2	X				X	
	3		X			X	
	4	X				X	
	5	X				X	
	6				X	X	
	7	X				X	
	8	X				X	
A. Nutritivo	9			X	X		
	10	X				X	
	11	X				X	
	12	X				X	
	13	X				X	
	14	LEVADURA					
	15	X				X	
A. Saboraud	16		X		X		
	17	X				X	
	18	X				X	
	19	LEVADURA					
	20	X				X	

La tabla 3 muestra los resultados obtenidos para la prueba de la oxidasa y catalasa, con estas pruebas no se eliminó ningún aislamiento, ya que estos ensayos correspondían, únicamente, a ensayos relacionados con el proceso de identificación, los aislamientos 2, 5, 11, 12 y 17 no se habían adaptado al proceso de aumento de concentración de agua residual en el medio de cultivo

TABLA 3
Resultados de las pruebas de Oxidasa y Catalasa

AISLAMIENTO	CATALASA	OXIDASA
3	+	-
4	+	+
6	+	+
8	-	-
9	+	+
10	-	+
13	+	+
15	-	+
16	-	+
18	-	+
20	-	+

3.4 Adaptación de microorganismos al agua residual

3.4.1 Adaptación en sólido

La adaptación en sólido inicio con el aumento de la concentración del agua residual desde 10% hasta el 70%, los resultados se muestran en la tabla 4.

3.4.2 Adaptación en líquido

La adaptación en líquido inicio con el aumento de la concentración del agua residual desde 70% hasta el 100%, añadiendo otro factor de presión como la disminución en la concentración de nutrientes, los resultados se muestran en la tabla 5.

TABLA 4
Resultados de proceso de adaptación en sólido

AISLAMIENTO	10%	20%	30%	40%	50%	60%	ESTADO
2	X	X	X	X	X	X	D
3	X	X	X	X	X	X	EA
4	X	X	X	X	X	X	EA
5	X	X					D
6	X	X	X	X	X	X	EA
7	X						D
8	X	X	X	X	X	X	EA
9	X	X	X	X	X	X	EA
10	X	X	X	X	X	X	EA
11	X						D
12	X	X					D
13	X	X	X	X	X	X	EA
14	X	X	X	X	X	X	EA
15	X	X	X	X	X	X	D
16	X	X	X	X	X	X	EA
17	X						D
18	X	X	X	X	X	X	EA
19	X	X	X	X	X	X	EA
20	X	X	X	X	X	X	EA

D = Descartada EA = En Adaptación X = Crecimiento

TABLA 5
Resultados de proceso de adaptación en líquido

AISLAMIENTO	70%	80% AR*	-5% N**	90% AR	-50% N	100% AR	-75% N	ESTADO
3	X	X			X			D
4	X	X			X			D
6	X	X						D
8	X	X						D
9	X	X						D
10	X	X						D
13	X	X			X			D
14	X	X			X			D
16	X	X			X		X	EA
18	X	X			X		X	EA
19	X	X			X		X	EA
20	X	X			X		X	EA

D = Descartada EA = En Adaptación *AR: Agua Residual **N: Nutrientes X= Crecimiento

3.5 Blanco de degradación

La Gráfica 1 muestra los resultados de la cinética de degradación de DQO para el tratamiento con el microorganismo inoculado (aislamiento 19) y para el blanco de degradación; mediante este ensayo se pudo corroborar

la importancia de la inoculación del microorganismo viable, ya que se presentaron mayores porcentajes (92.8%) y velocidades de remoción de la DQO ante la presencia de este microorganismo que para el blanco de prueba (75.16%).

GRÁFICA 1
Resultados DQO para Blanco de Degradación vs Tratamiento con Inoculación

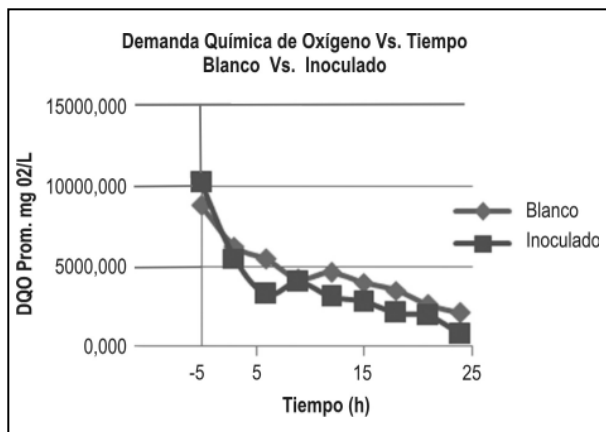


TABLA 6
Condiciones de Estudio y Resultados Finales del Proceso

ETAPA	ESTUDIO	RESULTADO
1	<ul style="list-style-type: none"> Tratamiento con aislamientos 16, 18, 19 y 20 con agua residual esterilizada y sin esterilizar 	<ul style="list-style-type: none"> Someter a estudio el aislamiento 16 y el aislamiento 19 Corroborar el inicio del tratamiento con agua residual sin esterilizar
2	<ul style="list-style-type: none"> Tratamiento con aislamientos 16 y 19 con agua residual esterilizada y sin esterilizar 	<ul style="list-style-type: none"> Elección de la aislamiento 19 para implementar en el tratamiento. Iniciar el tratamiento con agua residual sin esterilizar
3	<ul style="list-style-type: none"> Tratamiento con aislamiento 19, agua residual sin esterilizar, con concentración de glucosa de 10, 3 y 1 g/L y con velocidad de agitación de 100, 150 y 200 rpm. 	<ul style="list-style-type: none"> Elección de concentración de glucosa igual a 3 g/L. Llevar a cabo tratamiento a 100 rpm.
4	<ul style="list-style-type: none"> Tratamiento con aislamiento 19, agua residual sin esterilizar, concentración de glucosa de 3 g/L, velocidad de agitación de 100 rpm y concentración de peptona de 2.5, 1.5 y 0.5 g/L 	<ul style="list-style-type: none"> Elección de concentración de peptona igual a 1.5 g/L

El análisis estadístico realizado para los cuatro experimentos muestra que el tipo de microorganismo, el pretratamiento a utilizar y la velocidad de agitación son factores que no tienen influencia estadística sobre el porcentaje de remoción de la DQO.

Se seleccionó el microorganismo como el aislamiento 19, el pretratamiento 2 (agua sin esterilizar) y la velocidad de agitación de 100 rpm, basándose en los porcentajes de remoción más eficientes, la gráfica 2 muestra el

3.6 Diseño de Experimentos

Con el fin de conocer el desempeño de los microorganismos viables seleccionados se realizó un diseño de experimentos factorial donde se estudiaron cuatro factores sobre los cuales se tomó una decisión (tabla 6): velocidad de agitación, pretratamiento realizado (con y sin esterilización), concentración de glucosa y peptona, considerados en cuatro experimentos diferentes, todos realizados por triplicado, en este proceso la variable de respuesta es la disminución de la DQO (porcentaje).

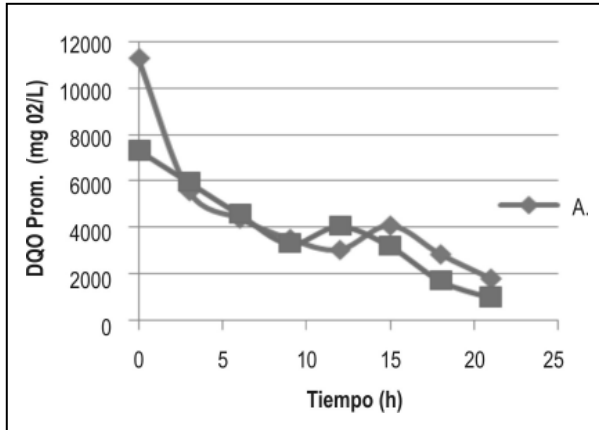
comportamiento de la cinética de degradación para el tipo de microorganismo en los dos pretratamientos.

La concentración de glucosa muestra tener influencia estadística sobre el porcentaje de remoción de la DQO, siendo la concentración de 3 g/L de glucosa la que muestra mayor porcentaje de remoción, la gráfica 3 muestra el comportamiento de las cinéticas de degradación para la concentración de glucosa a las diferentes velocidades de agitación.

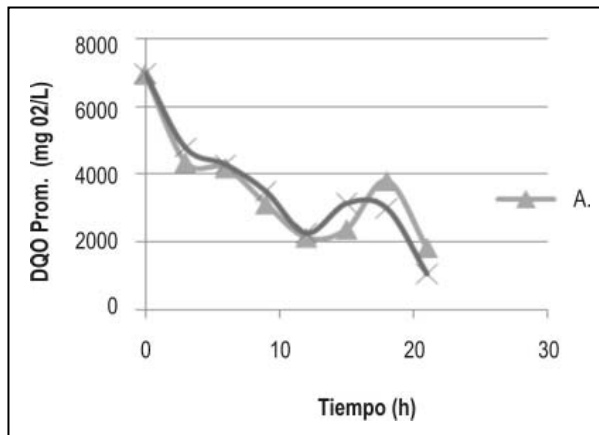
GRÁFICA 2

DQO vs Tiempo para aislamientos 16 y 19 en los dos pretatamientos. a) Aislamientos 16 y 19 en ensayo 1, b) Aislamientos 16 y 19 en ensayo 2

a)



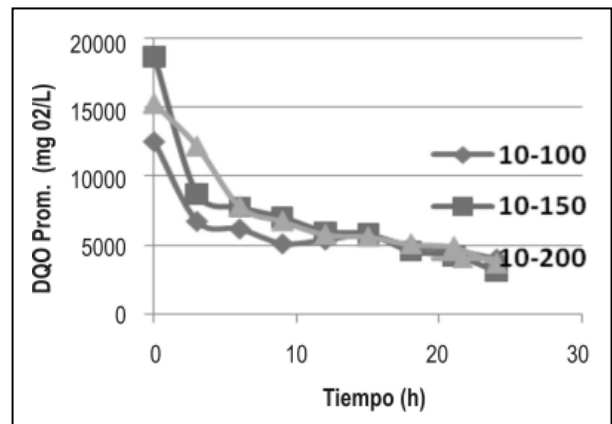
b)



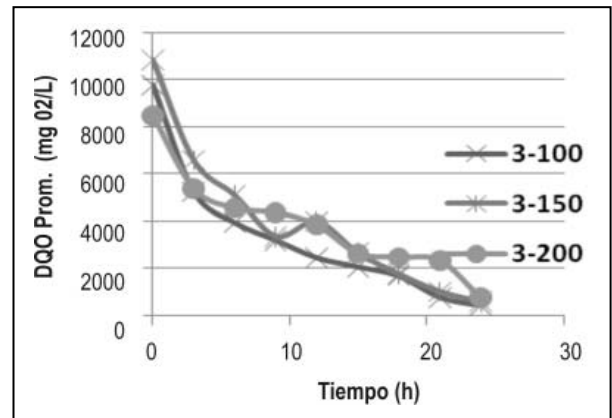
GRÁFICA 3

DQO vs Tiempo. Estudio efecto concentración de glucosa y velocidad de agitación, a) 10 g/L glucosa, b) 3 g/L glucosa, c) 3 g/L glucosa, con las tres velocidades de agitación.

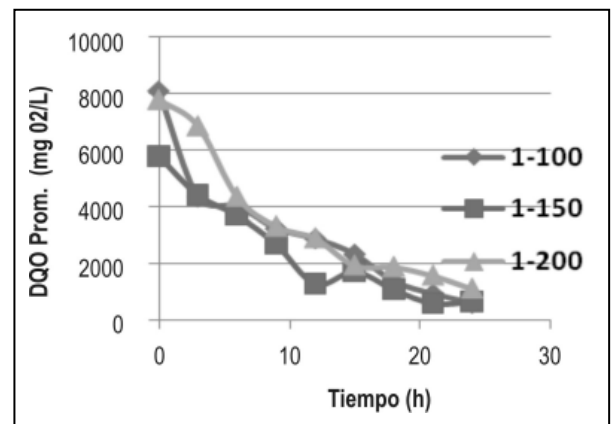
a)



b)



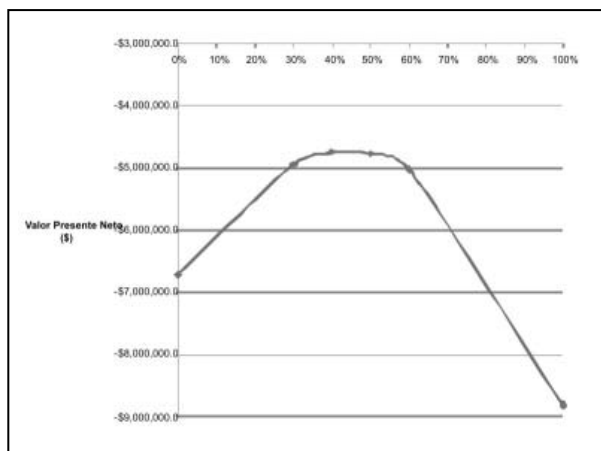
c)



4. ESTUDIO PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA

Para el estudio de prefactibilidad económica se estudiaron seis planteamientos donde el porcentaje de la deuda es del 0% hasta 100%, el comportamiento del valor presente neto se muestra en la grafica 4.

GRÁFICA 4
Comportamiento del VPN frente a la Financiación



La financiación del 40% presenta un valor presente neto de \$-4.738.356,01, el menos costoso de los escenarios planteados, de igual forma la amortización de capital se encuentra dentro de los rangos de liquidez de empresa \$ 5.779.776,20; para este tipo de pago de deuda de cuota fija los intereses totales que se deben pagar a la entidad financiera son de \$23.766.344,84.

CONCLUSIONES

Se obtuvieron 20 aislamientos conformados por 18 bacterias y 2 levaduras, de los cuales solo 4 aislamientos (3 bacterias y 1 levaduras) presentaron la capacidad de desarrollarse bajo las condiciones de presión (100% agua residual, 25% medio de cultivo), lo que permitió descartar, para este trabajo, el resto de aislamientos; con base en esto se realizaron los ensayos con los 4 aislamientos de donde se determinó que con el aislamiento 19 se obtuvieron los mejores resultados de degradación de la DQO.

Mediante pruebas bioquímicas se logró identificar el aislamiento 19, el cual correspondía a la levadura *Rhodotorula rubra*; esta levadura fue la que presentó mejores resultados al proceso de adaptación a las condiciones del agua residual de la empresa estudiada, razón por la cual fue la que finalmente se empleó en los procesos de biodegradación.

A partir de los diseños de experimentos y su análisis estadístico se logró determinar que el proceso de biodegradación de las aguas residuales de la empresa no requería ser llevado a cabo con la esterilización del agua antes de ser inoculada con el microorganismo, permitiendo reducir costos y simplificar el proceso.

Las condiciones de operación finales para proceso de biodegradación fijadas en un proceso iniciado con inoculación del aislamiento 19, 3g/L glucosa, 1.5 g/L peptona, 100rpm brindan un delta en remoción de la Demanda Química de Oxígeno de 9528.83 gr O₂/L que representa porcentaje de remoción promedio de 92.8%, el cual cumple con las condiciones impuestas por la legislación actual para el vertimiento de aguas residuales.

Mediante el análisis de un blanco de degradación se determinó la importancia de la presencia del microorganismo seleccionado dentro del proceso de biodegradación, ya que este presenta remociones más altas que dicho blanco.

La implementación del proceso de biodegradación trabajado en este proyecto, permite el cumplimiento de la norma de vertimiento con respecto a la Demanda Química de Oxígeno, estipulada en el Decreto 1594/1984, ya que se logran remociones en dicha variable superiores al 80%.

El diseño básico conceptual del proceso de biodegradación del agua residual de la empresa estudiada, brinda un acercamiento a la implementación del proceso con la información básica necesaria de condiciones de operación, características de los equipos a emplear y los procedimientos requeridos por el proceso.

El estudio de prefactibilidad económica indica que la mejor alternativa de implementación del tratamiento en estudio en la empresa en cuestión, se basa en la financiación del proyecto en un 40% con un valor presente neto de \$-47.38.356,01 estimado como el menos costoso de los escenarios planteados.

BIBLIOGRAFÍA

- ADOSINDA, MARTINS, JOAO, ARMANDO, SILVESTRE, NELSON. 2002. Relationship of chemical Structures of textile dyes on the preadaptation medium and the potentialities of their biodegradation by *Phanerochaete chrysosporium*. En: *Research in microbiology* (153):361-368
- APHA, AWWA, WPCF. 1992. Manual de DQO. p.p. 1-15.
- BACA. 1998. Ingeniería Económica. Quinta edición. Editorial Fondo Educativo Panamericano. Bogotá, Colombia.
- BENAVIDES. 1999. Aplicaciones biotecnológicas en el tratamiento de aguas residuales en textiles. En: *Colombia Textil*. Vol. 132. p.p. 17-25.
- CEPIS (CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE). 1992. Base de datos: Inventario de residuos industriales. Lima, CEPIS. INFORME TECNICO SOBRE MINIMIZACION DE RESIDUOS EN LA INDUSTRIAL TEXTIL. Acceso: Diciembre 17 de 2007.
- COSS. 1986. Análisis y evaluación de proyectos de inversión. Segunda edición. Editorial Limusa. México.
- COTO. 2000. Curso de Introducción al Conocimiento científico experimental. En: *Revista Química Viva*. Vol. 15. p.p. 45-47.
- CRITES, TCHOBANOGLIOUS. 2000. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Edit. McGraw-Hill. Colombia.
- CSUROS, CSUROS. 1999. Microbiological examination of water and wastewater. Lewis Publishers. Boca Raton, London, New York, Waschingon D.C
- FERRERO. 1974. Depuración Biológica del agua. Editorial Alambra. Méjico. p.p 56-62.
- GARDINER, BORNE. 1978. Textile waste waters; treatment and environmental effects. Stevenage, Water Research Centre.
- IZQUIERDO, CUNILL, TEJERO, IBORRA, FITÉ. 2004. Cinética de las reacciones químicas. Edicions universitat Barcelona. España.
- JARAMILLO, ECHEVERRI, FIGUEROA. 2006. Marcha microbiológica para la búsqueda e identificación de pseudomonas con potencial de degradar fenol, en ambientes de recepción de aguas residuales generadas en laboratorios de la Universidad de San Buenaventura Cartagena, Colombia. Acceso Enero 9 de 2008. [http://www.usbctg.edu.co/academica/pregrado/documentos/bac sem artbrocal02.pdf](http://www.usbctg.edu.co/academica/pregrado/documentos/bac_sem_artbrocal02.pdf)
- KONEMAN, ALLEN, JANDA, SOMMERS, DOWELL. 1997. Hill, Washington. Diagnóstico Microbiológico. México. En: *Médica Panamericana*, pp 307,420.
- LENNTECH. 2000. Calidad del agua: el pH. Acceso: Diciembre 18 de 2007. <http://www.lenntech.com/espanol/pH-y-alcalinidad.htm>
- LEVIN, GEALT. 1997. Biotratamiento de residuos tóxicos y peligrosos. Selección, estimación, y modificación de microorganismos y aplicaciones. Primera edición. Editorial McGraw-Hill.
- MADIGAN, MARTINKO, PARKER. 1999. Biología de los microorganismos. Octava edición. Editorial Prentice hall. Madrid, España.
- MAIMONE. 2004. *Pseudomonas aeruginosa*. Acceso: Enero 16 de 2008. <http://www.codeinep.org/CONTROL/pseudomonasaeruginosa.htm>
- MATEOS. 2007. Nutrición de los microorganismos. Facultad de Farmacia. Universidad de Salamanca. Acceso: Enero 2 de 2008. <http://nostoc.usal.es/sefin/MI/tema05MI.html>

MERCK. 2006. Catálogo de Productos. USA. pp. 153.

METCALF-EDDY. 1994. Ingeniería sanitaria tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. Segunda edición. Editorial labor s.a.

MORATO, SUBIRANA, GRIS, CARNEIRO, PASTOR. 2006. Tecnologías sostenibles para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales. En: revista lasallista de investigación. Vol 3 (1), pp. 19-29.

PEARCE, LLOYD, GUTHRIE. 2001. The removal of colour from textile wastewater using whole bacterial cells: a review. En: Dyes and pigments (58): pp. 179-196.

SANDHYA, PADMAVATHY, SWAMINATHAN, SUBRAHMANYAM, KAUL. 2005. Microaerophilic-aerobic sequential batch reactor for treatment of azo dyes containing simulated wastewater. En: Process Biochemistry (40): p.p. 885-890

DESARROLLO DE UN EMBUTIDO CRUDO CÁRNICO MADURADO, A PARTIR DE CARNE DE GANADO ANGUS

Luis Fernando García Calle - Daniel Ortiz López

ABSTRACT

Los autores de este artículo presentan el desarrollo de una formulación de un embutido crudo cárnico madurado a partir de carne de ganado angus.

Se incluyen algunas consideraciones de las materias primas, diferentes tipos de fundas y condiciones de proceso.

Se describen las condiciones óptimas de operación, que resultan de los estudios teóricos y ensayos preliminares. Se inicia el desarrollo del embutido cárnico crudo madurado, y se obtiene un producto con sabor especiado, dureza y textura adecuadas. Además, se realiza un estudio de mercado y financiero que sirven como base para estudiar la viabilidad técnica y económica de una nueva empresa.

Palabras clave

Cárnicos, curado, embutidos, madurado.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevos productos para sustituir productos importados genera beneficios como crecimiento económico y empleo, de ser implementados en la práctica.

Los embutidos cárnicos crudos madurados, son productos sometidos a un proceso en el cual se desarrollan bacterias que dan consistencia, sabor y conservación a la masa

cárnica en un ambiente controlado de humedad relativa y temperatura. Se producen principalmente en Europa y en Norteamérica, por lo que países como Colombia los importan a un alto costo.

Con estos conocimientos se propone desarrollar un embutido cárnico innovador, desde la materia prima y el proceso; en donde se experimentará con carne Angus como material cárnico de gran sabor y textura, para posteriormente someter el producto a un proceso de maduración que le de propiedades beneficiosas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la práctica experimental se utilizaron los siguientes materiales:

- Huevo de Solomo Angus.
- Manero de Cerdo.
- Grasa de Cerdo.
- Sales.
- Ascorbatos
- Azúcares.
- Nitritos
- Especias.
- Agua.
- Microorganismos ácido lácticos
 - *Pediococcus pentosaceus*
 - *Staphylococcus xylosum*

Los equipos que se utilizaron fueron:

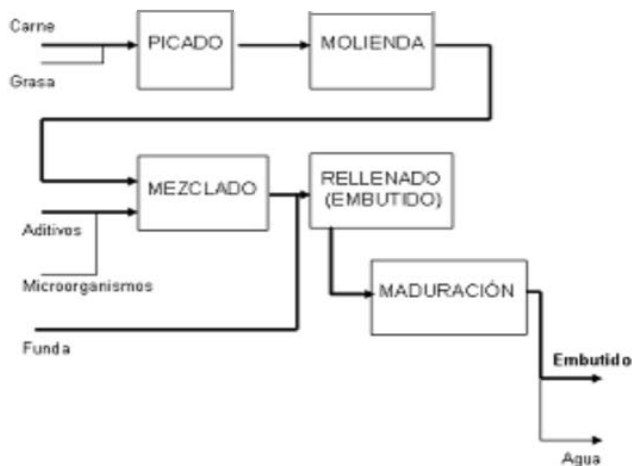
- Cutter Cruells 15Lt.
- Mezcladora M50 2.4 HP 50Lt.
- Embutidora Hidráulica 30Kg.
- Cámara de Maduración.

Los instrumentos que se utilizaron fueron:

- pH-metro IQ Scientific portátil PH metro.
- Medidor de Aw: Aqualab Model Series 3TE

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

FIGURA No. 1
Diagrama de Flujo Utilizado en el Laboratorio



Inicialmente se pican manualmente 5 Kg de carnes y grasa hasta un tamaño aproximado de 8 x 8 x 4 cm. Luego los trozos son ingresados al Cutter, donde son triturados con un disco de 8mm. Obtenida la pasta cárnica para un proceso de mezclado con los aditivos y microorganismos, para luego embutirse en fundas naturales o sintéticas. Finalmente los embutidos ingresan a la cámara de maduración a condiciones controladas de humedad y temperatura, donde se desarrollan los microorganismos, obteniéndose el producto final.

DESARROLLO DEL PRODUCTO

Inicialmente se realiza un estudio preliminar del mercado, para segmentarlo y definir algunas características que direccionen el desarrollo.

Después de realizar algunos ensayos preliminares, se desarrollan tres formulaciones, embutidas en dos fundas diferentes (Natural y sintética), con el fin de evaluar sus características fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales, para finalmente elegir la mejor.

Cada una de las formulaciones obtenidas durante el picado, molienda, mezclado y relleno, se ingresan a una cámara de maduración a las condiciones de temperatura y humedad como se muestran en las figuras 2 y 3, durante 21 días; Esto favorece el desarrollo de los microorganismos adicionados, que finalmente resaltan las características sensoriales y de conservación del embutido crudo madurado.

FIGURA No. 2
Variación de la Temperatura Vs. Tiempo en Días

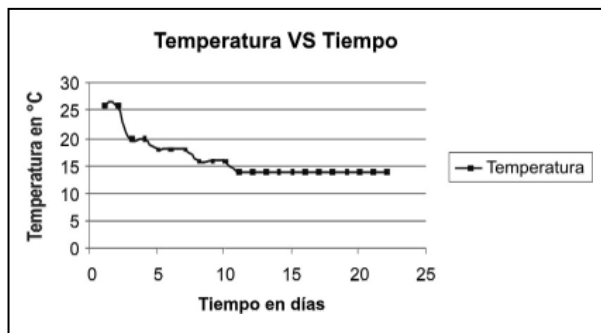
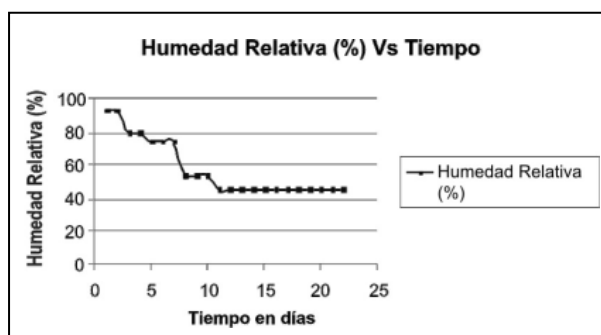


FIGURA No. 3
Variación de la Humedad Relativa Vs. Tiempo en Días



Después de realizarse los análisis fisicoquímicos, microbiológicos y sensoriales, se encuentra que la formulación llamada 2 en funda natural presenta los mejores resultados como se observa en la tabla 1.

TABLA No. 1
Características Fisicoquímicas y
Microbiológicas Evaluadas en el Producto

VALORES OBTENIDOS	
pH Final	4.95
Aw	0.88
Pérdida de humedad	25.30%
Crecimiento bacterias acidolácticas	49exp ⁶

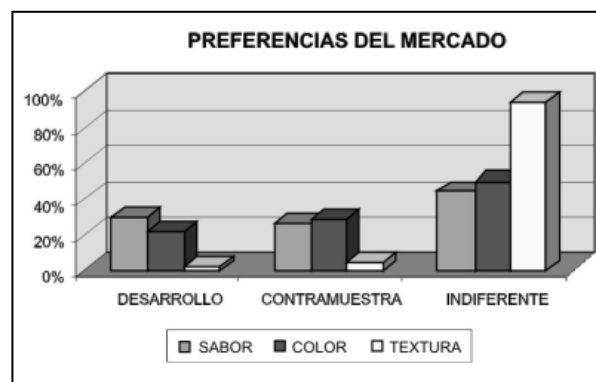
En la tabla 2 se muestran las características sensoriales más relevantes, donde 1=Bajo y 10=Alto.

TABLA No. 1
Características Sensoriales
Evaluadas en el Producto

VALORES OBTENIDOS	
Brillantez	8
Olor Lácteo	8
Dureza	7
Masticabilidad	7

El producto obtenido, se compara con una contramuestra reconocida del mercado con el fin de verificar la aceptación por parte de éste. En la figura 4 pueden verse los resultados obtenidos en cuanto a sabor, color y textura. Puede observarse que el producto desarrollado fue más aceptado en cuanto a sabor. Mientras que la contramuestra presentó una leve ventaja en cuanto a color y textura. Sin embargo es notable el porcentaje de encuestados que dieron una respuesta indiferente para las tres preguntas, lo que significa que el producto desarrollado está al mismo nivel que la contramuestra.

FIGURA No. 4
Preferencia del Mercado

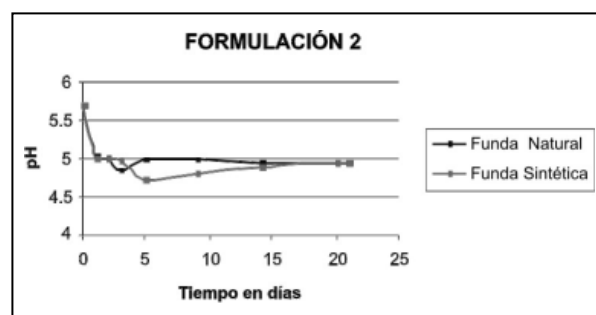


En cuanto al análisis de rentabilidad del proceso, se encontró una TIR de 22% y un VPN de \$389.721.804, luego de calcular los costos de capital y manufactura, estimando una proyección de ventas en un horizonte de 5 años.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Durante el proceso de maduración los microorganismos acidolácticos desdoblan los azúcares a ácido láctico, generando un descenso en el pH hasta 4.95, tal como se muestra en la figura 5 para el embutido seleccionado.

FIGURA No. 5
Descenso de pH para la Formulación 2



Al haber una disminución de la humedad al interior de la cámara, es lógico que ocurra un descenso en la actividad de agua (Aw) hasta 0.88 y en la humedad hasta 25.3%; dichos descensos pueden verse en las figuras 6 y 7.

FIGURA No. 6
Descenso de Aw para la Formulación 2

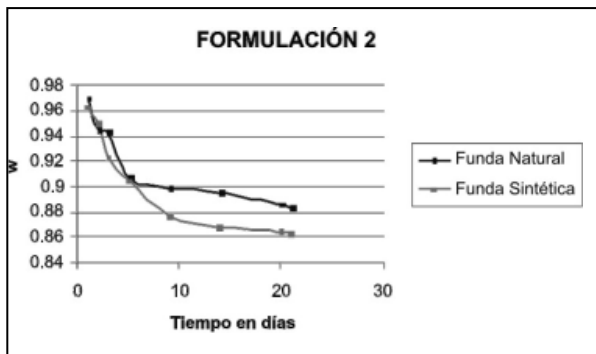
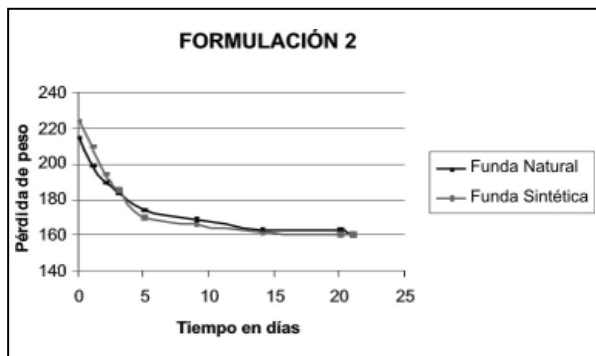


FIGURA No. 7
Descenso de Humedad para la Formulación 2



Los valores finales de pH, Aw, contenido de humedad se ajustan a los parámetros encontrados en la literatura.

CONSIDERACIONES

Luego de revisar la literatura, discutir las recomendaciones técnicas y antes de iniciar el desarrollo, es importante tener en cuenta los siguientes puntos.

- Se deben seleccionar especias frescas, aditivos de calidad y carnes con procesos de sacrificio, almacenaje y desposte regulados.
- Los microorganismos deben almacenarse a -17°C , temperatura a la que se garantiza su conservación durante 6 meses.
- El uso de aditivos debe realizarse según las normas vigentes.

- Las buenas prácticas de manufactura permiten garantizar las condiciones de especia adecuadas.
- La realización de un análisis de productos críticos del proceso por medio del modelo HACCP permite asegurar la higiene, calidad y seguridad del producto.
- El orden de adición de ingredientes durante el proceso de mezclado mas recomendado es: carnes, sales, especias, azucares, ascorbato, microorganismos y grasa.
- Antes de iniciar la molienda, la grasa debe estar congelada y debe cuidarse su temperatura para evitar que al fundirse ésta forme una capa alrededor de la carne, lo que perjudicaría el correcto secado.
- El descenso de la temperatura y humedad relativa en la cámara de maduración debe realizarse lenta y continuamente durante los primeros 9 días para evitar encostramientos.
- Luego de embutir la masa debe retirarse el aire atrapado.
- Realiza un seguimiento del pH y Aw es un buen método para verificar el correcto desarrollo del proceso de maduración.

CONCLUSIONES

Para la obtención de un embutido madurado que cumpla las exigencias del mercado, es definitiva la adecuada elección y adecuación de las materias primas. En el caso de la carne es muy importante la raza, el desarrollo del animal, el sacrificio, la asepsia durante su manipulación y su correcto almacenamiento. En el caso de los especias, es de gran importancia que estén puras, frescas y almacenarlas correctamente. En el caso de los microorganismos, contar con un buen proveedor que garantice la calidad de los mismos.

Durante la maduración las variables más importantes a medir, controlar y mantener dentro de los parámetros establecidos son la temperatura, humedad relativa, contenido de humedad, actividad de agua y pH; ya que éstas están estrechamente relacionadas con el éxito o no del producto en el mercado.

Los análisis organolépticos realizados muestran que las dos formulaciones cumplen con los parámetros de un embutido cárnico crudo madurado, de las que se escoge la formulación 2, con tripa natural para realizar la encuesta de aceptación del producto.

La encuesta de aceptación del producto confirma la calidad del embutido desarrollado y sugiere que es comparable con la contramuestra seleccionada, determinado la culminación del desarrollo.

Según el análisis financiero y técnico, el proyecto del embutido cárnico crudo madurado es económicamente viable.

RECOMENDACIONES

Realizar ensayos de producción a escala industrial que permitan homologar la formulación y proceso a esta escala.

Desarrollar otros tipos de madurados cárnicos, que amplíen el portafolio comercial, dando al proyecto mayor proyección de ventas y fortaleza en la penetración del mercado

REFERENCIAS

Andujar G., Pérez D., Venegas O. Química y Bioquímica de la Carne y los Productos Cárnicos. Instituto de Investigaciones para la Industria Alimenticia. 2003; 31-47.

Anónimo 1. Estadísticas Vacunos. [Artículo de Internet]. <http://www.feriaganadosmedellin.com.co/> [Consulta: Julio de 2007].

Aristizábal F. Revista Angus & Brangus, Aberdeen Angus, 20-21 p.

Arnau J. Factores de Proceso. España: Acidificación de Embutidos Crudos Curados; 2000. 12 p.

Banco de Datos de Comercio Exterior - BACEX. Análisis de Importaciones. Universidad EAFIT. [Consulta: Julio de 2007].

Bohórquez P. 5 Sentidos, Nutrición. 1ª ed. Medellín: Angus & Brangus; 2007. 28 p.

Brown GA. Empleo de Nitritos y Nitratos. España: Avances de la Ciencia de la Carne; 1972. 62 p.

Carriga M., Marcos B., Aymerich T., Hugas M. Prospectiva de Aplicación de Altas Presiones para la Minimización de Riesgos Asociados a la Salmonella y Listeria Monocitogenes en Embutidos Madurados en Frío. Centro de Tecnología de la Carne. 2003; 51: 74-82.

Castellani AF., Niven CF. 3 ed. USA: Applied Microbiology; 1965. 154 p.

Cuartas MI. Congreso Mundial Angus: Eventos Internacionales. 1ª ed. Medellín: Angus & Brangus; 2007. 26 p

Daly C., La Chance M., Sandine WE., Elliker PR. Control of Staphylococcus Aureus in Sausages by Starter Cultures and Chemical Acidulation. vol 38. USA: Journal of Food Science; 1973. 426 p.

Gil M. Tenderización o Maduración de la Carne. Unitat de Tecnologia Analítica. 1996; 12-17.

Hammes WP., Hertel C. New Developments in Meat Starter Cultures. Vol 49. USA: Meat Science; 1998. 125 p.

Hansen L. Fermented: Dry Sausages Produced With the Admixture of Probiotic Cultures. USA: Proceedings 44th International Congress of Meat Science Technology; 1998. 826 p.

Holzappel WH., Geisen R., Schillinger U. Biological Preservation of Food With Reference to Protective Cultures: Bacteriocins and Food-Grade Enzymes. Vol 24. USA: International Journal of Food Science; 1995. 343 p.

Hugas M. Cepas Bacterianas. España: Microbiología de la Carne; 1998. 6 p.

Instituto Colombiano de Exportación - ICEX. El Sector de los Procesados Cárnicos en Colombia: Situación y

- Estructura de la Economía. [Publicación de Internet] <http://www.icex.edu.co/> [Consulta: Julio de 2007].
- Juárez M. Estudio de Comunidades Microbianas en Embutidos Fermentados Ligeramente Acidificados. España: Microbiología de la Carne; 2003. 16 p.
- Lawrie RA. Ciencia de la Carne. Acribia 1985; 25-28.
- Leistner L., Hinton MH., Rowlings C. Bristol Food Protection by Hurdle Technology. U.K: Meeting of Concerted Action; 1996. 61 p.
- Londoño J. Criaderos. 2ª ed. Medellín: Angus & Brangus; 2007. 16 p.
- López G., Carballo GM. Manual de Bioquímica y Tecnología de la Carne. Ed Vicente Madrid, Madrid 1991.
- López J. Elaboración de Embutidos Crudos, Elección de Materia Prima. España. Embutidos Crudos Consistentes; 1987. 13 p.
- Mata C., Ferreira J., Fernández J., GÓMEZ R. Elaboración de Salchichones con Cultivos Indicadores y Bioconservadores. Tecnología de los Alimentos Universidad de Córdoba. Córdoba (España). 2000.
- Merkel RA. Química de la Carne. España: La Ciencia de la Carne y de los Productos Cárnicos; 1986. 77 p.
- Monin JR. Maduración Extendida. Departamento de Producción Animal y Ciencia de los Alimentos, Zaragoza. 1999; 4: 105-12.
- Muller SG. Elaboración: Estandarización y Control de Calidad. España. Procesamiento de Carnes y Embutidos; 2002. 74 p.
- Ordóñez J., Fernández M., Hierro E., Bruna J., Herranz B., Hoz L. Consideraciones Acerca de la Maduración Acelerada de Embutidos Crudos Curados. España: Instituto de Ciencia y Tecnología de la Carne; 2001. 102 p.
- Pascual AM. Metodología Para Alimentos. España: Microbiología Alimentaria; 1992. 943 p.
- Price J., Schweigert J. Ciencia de la Carne y de los Productos Cárnicos. Acribia 1998; 978.
- Quiroga G. Tecnología de Carnes y Pescados. Manual de Practicas para Planta Piloto. UNISUR 1995; 8-19.
- Restrepo P. Características Raciales. [Artículo de Internet]. <http://www.grupocibre.com/newface/angus/index.htm>. [Consulta: 15 de Enero de 2008].
- Sánchez F., Arnau J. Efectos de la Fusión de la Grasa. España: Instituto de Recerca y Tecnología Agroalimentarias; 2005.
- Sánchez R. "Revista Angus & Brangus", Aberdeen Angus, 1. 14 p.
- Sigfried G., Muller., Ardoino M. Procesamiento de Carnes y Embutidos. Organización de los Estados Americanos (OEA) y la Agencia Alemana para el Desarrollo (GTZ). 1997; 1: 4-5.
- Stiles ME. Biopreservation by Lactic Acid Bacteria. vol 70. UK: International Journal of General and Molecular Microbiology; 1996. 331 p.
- TURTON R., BAILIE R., WHITING W., SHAEWITZ J. Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes. New Jersey. Prectice Hall. Segunda edición. 2003.
- United States Department of Agricultura - USDA. Modelo General HACCP para Productos Cárnicos y Avícolas sin Tratamiento Térmico. Food Safety and Inspection Service 1998; 3-48.
- Zapata L., Pérez J., Aloisio G., Jurado M., González A., Muñoz M., Toledano M. Productos Tradicionales en Nuevos Formatos de Envasado. Instituto de Formación Agroalimentaria y Pesquera. 2004; 12: 52-59.

ANÁLISIS DEL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL Y DE CICLO DE VIDA DE LOS INSECTICIDAS CLORPYRIFOS Y BIFENTRINA PARA LA EMPRESA POLYBAN INTERNACIONAL S.A.

Manuela Inés Díaz Hernández

RESUMEN

Este proyecto, surgió no sólo de la necesidad de la empresa POLYBAN INTERNACIONAL S.A de evaluar y estandarizar los procesos referentes a la gestión medio ambiental, sino también porque los productos que en sus procesos tienen residuos peligrosos, deben acompañarse de planes para prevenir, mitigar y controlar estos desperdicios cumpliendo con las normas ambientales vigentes. El análisis del Plan de Manejo Ambiental (PMA) se realizó mediante un proceso de comparación entre la metodología estándar para la elaboración de estos documentos y el PMA de POLYBAN INTERNACIONAL S.A versión 2006. Teniendo el Análisis del Ciclo de Vida y el Análisis del PMA, se procede a diseñar los Planes de Gestión Integral para el control de los residuos peligrosos, tanto en el proceso productivo como el residuo post consumo (Fincas Bananeras). Con estos planes se deben controlar las emisiones de Residuos Peligroso (RP) en todo el ciclo de la cadena productiva. En los documentos se especifican las cantidades recogidas y tratadas en el último período del año 2007 y los compromisos adquiridos para cumplir las metas establecidas. Después de diseñados los planes, y habiendo cumplido con todos los requerimientos establecidos, se estandarizaron los procesos por medio de indicadores ambientales, de seguridad y de gestión, los cuales muestran el cumplimiento de los objetivos en lo que se ha corrido del último semestre del 2007. Por último, se realizaron los diagramas de proceso pertinentes en este estudio. Al finalizar todos los análisis, se diseñó

un proyecto capaz de mitigar la producción de RP usando como materia prima un compuesto a base de polietileno y aceites esenciales, no tóxico ni contaminante, que repele los insectos que ponen en peligro el cultivo de banano y puede producirse al mismo costo que la bolsa tratada actual.

Palabras calves

Plan de manejo ambiental, reciclaje, residuos peligroso, ciclo de vida.

1. INTRODUCCIÓN

Las organizaciones de todo tipo, están cada vez más preocupadas por lograr y demostrar un sólido desempeño ambiental controlando el impacto de sus actividades, productos o servicios sobre el medio ambiente, teniendo en cuenta su política y objetivos ambientales; esto lo hacen en el contexto de una legislación cada vez más estricta, del desarrollo de políticas económicas y otras medidas para alentar la protección ambiental y el desarrollo de una conciencia del desarrollo sostenible¹.

¹ LAGO, Lázaro. Monografías. Sistemas de Gestión Ambiental. Especificaciones directrices para su uso. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos14/gestion-uso/gestion-uso.shtml> [consultado el 16 Nov de 2007]

En Colombia, la legislación ambiental ha tenido un importante desarrollo en las últimas décadas, en especial, a partir de la Convención de Estocolmo de 1972, cuyos principios se acogieron en el Código de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente (Decreto Ley 2811 de 1974). Éste se constituyó en uno de los primeros esfuerzos en Iberoamérica para expedir una normatividad integral sobre el medio ambiente.

Luego, en 1991, como fruto de la nueva Constitución Política colombiana, se redimensionó la protección medio ambiental, elevándola a la categoría de derecho colectivo y dotándola de mecanismos de protección por parte de los ciudadanos, en particular, a través de las acciones populares o de grupo y, excepcionalmente, del uso de las acciones de tutela y de cumplimiento².

Dentro de la legislación ambiental, se estipula para ciertas empresas la construcción de un Plan de Manejo Ambiental, en el que estén consignadas las acciones tendientes al control, mitigación y medición de los factores que afectan el medio ambiente. Adicional a esto, la máxima autoridad gubernamental para la gestión ambiental, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, ha emitido varias resoluciones en las cuales exige la creación de planes con los cuales las empresas se comprometan a intervenir los residuos peligrosos que generan a lo largo de toda la cadena productiva.

Unidos estos dos factores, se desarrolló un análisis de la gestión ambiental de la empresa POLYBAN INTERNACIONAL S.A, con el fin de obtener una evaluación del proceso que se estaba llevando hasta entonces. Como consecuencia de este análisis, se diseñaron planes de control de los residuos peligrosos industriales y postindustriales haciendo un análisis detallado de los procesos, las materias primas usadas como insecticidas y las formas de control, con teorías de producción más limpia

2 IDEAM. Legislación. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/legal/index4.htm> Actualizado en 2001. [consultado el 16 Nov de 2007].

y estrategias de reciclaje de residuos que no sólo ayudan a mantener el medio ambiente sino también disminuir costos, generar empleos, capacitar a las personas y lograr un desarrollo sostenible en industrias, como la del plástico, para este caso.

1.1 Reciclaje de residuos peligroso

El reciclaje es otro enfoque aplicable a los residuos peligrosos generados por algunas industrias. Gracias al reciclaje de ciertos materiales contenidos en los residuos, es posible absorber por lo menos una parte de estos costos a través de la valorización de subproductos. Se logra así un ingreso para la empresa generadora del residuo y se reducen consecuentemente sus costos totales con la protección ambiental. En muchos casos es posible la reutilización interna de residuos que, después de pasar por un proceso de purificación, pueden usarse como materias primas.

2. METODOLOGÍA

2.1 Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión bibliográfica, que tiene como primer objetivo la búsqueda de artículos referentes al uso de Clorpirifos como compuesto activo de películas plásticas de polietileno y como segundo propósito se pretende realizar un análisis ambiental necesario para la organización, estudiando metodologías para la evaluación de los planes de manejo ambiental de proyectos y organizaciones³⁻⁴; con estas herramientas de análisis comparativo, se pretende conocer las falencias que presenta el plan de manejo ambiental de la empresa.

3 LEÓN PELAEZ, Juan Diego. Evaluación del Impacto Ambiental para Proyectos y Desarrollos. Edición, CORREA METRIO, Johan Alexander. Universidad Nacional de Colombia. 165 pág.

4 LEÓN MARQUEZ, Ricardo. Análisis de los Aspectos Ambientales de una Organización. Curso para responsables y auditores ambientales. Centro Nacional de Producción Mas Limpia. Medellín. 56 pág.

2.2 Análisis del Ciclo de Vida de los insecticidas clorpirifos y bifentrina

Después de realizada la revisión bibliográfica de los diferentes insecticidas y de recopilada toda la información procedente del proceso productivo, se realizó un análisis del ciclo de vida de los productos. Este análisis se usó también para determinar medidas de seguridad y contingencia en el manejo de los diferentes insecticidas en todas las partes del proceso productivo.

El análisis cuantitativo del ciclo de vida se hizo según la metodología planteada en la norma ISO 14040, la cual estipula cuatro pasos para su realización:

- Definición de Objetivos y alcance
- Inventario de impactos ambientales
- Análisis del Impacto
- Interpretación

2.3 Análisis del plan de manejo ambiental

Luego de la revisión de bibliográfica, se tomó el PMA de la empresa y se comparó con la estructura metodológica planteada por los documentos encontrados para el análisis de planes de manejo ambiental de las organizaciones, de esta forma se revisó cada una de las partes del PMA de POLYBANINTERNACIONAL S.A, haciendo un comparativo en el cual se determinó aquello que está estipulado en las metodologías de realización estudiadas pero que no se encontró dentro del documento de la empresa.

2.4 Plan de gestión de manejo de residuos peligrosos durante el proceso productivo

El plan de gestión de manejo de residuos peligrosos durante el proceso productivo, parte del análisis del plan de manejo ambiental y del análisis del ciclo de vida del producto; en este plan se encuentran las metas anuales de recolección

de residuos, los planes de disposición final y por último las personas y entidades encargadas de ejecutar dicho plan.

2.5 Plan de gestión de devolución de productos post consumo de plaguicidas

El plan de gestión de devolución de productos post consumo de plaguicidas, se hace según la metodología que presenta el Ministerio de Medio Ambiente, vivienda y desarrollo territorial en la resolución 0639⁵ (Ver anexo 1. Resumen ejecutivo resolución 0693 del 19 de abril de 2007); en este plan se destacan las metas anuales de recolección de residuos, los planes de disposición final de residuos y las entidades encargadas de ejecutar dicho plan.

2.3 Estandarización del proceso ambiental

Después de los diferentes estudios que se hicieron al proceso productivo que involucra estos dos insecticidas, se estandarizaron los asuntos referentes a los trabajos ambientales y de seguridad, con el fin de mantener un sistema de gestión que permita llevar un análisis cuantificable de cada una de las emisiones y procesos de soporte.

Esto se hizo emperando el software Excel con la elaboración de indicadores de gestión que muestran el trabajo realizado durante el segundo semestre del 2007 en la empresa POLYBAN INTERNACIONAL S.A, resaltando los resultados de la gestión integral.

Para la estandarización del proceso, se plantean además la elaboración de los diagramas de proceso como el diagrama general de bloques, el PFD y el layout donde se muestran los equipos, distribución y operaciones unitarias empleadas.

⁵ COLOMBIA. RESOLUCIÓN 0693 DE 19 DE ABRIL DE 2007. Por la cual se establecen los parámetros para los Planes de Gestión de Residuos Postconsumo. Santafe de Bogotá. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2007

2.7 Diseño de proyectos

Al final se propone un proyecto que tiene como objetivo reemplazar la materia prima con insecticida por un compuesto ambientalmente amigable y que es capaz de repeler las plagas que afectan la producción de banano.

Este proyecto comienza con una revisión de la bibliografía presentada por el proveedor del producto sustituto y continúa haciendo una simulación de costos del producto para determinar si es rentable y capaz de competir con la bolsa que contiene Clorpirifos y Bifentrina como ingredientes activos.

Luego de verificar la rentabilidad del producto y comparándolo con una simulación de las bolsas tratadas bajo las mismas condiciones, se procede a extruir el material para verificar que su comportamiento durante el proceso sea bueno y cumpla con los estándares de calidad de la bolsa.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

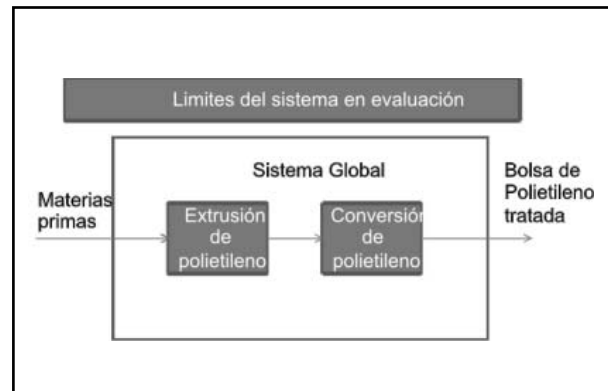
Análisis del ciclo de vida de los insecticidas clorpirifos y bifentrina

DIAGRAMA 1
Metodología Norma ISO 140140



Para el cálculo de los impactos ambientales fueron excluidas del proceso la generación de materias primas, importación de las mismas, transporte al consumidor del producto, consumo y disposición final de la bolsa. El sistema global abarca desde la entrada de materia prima al proceso de producción hasta la salida de la bolsa tratada.

DIAGRAMA 2
Definición del sistema global



El alcance del proyecto es establecer cuantitativamente el impacto ambiental causado por el uso de insecticidas en el proceso productivo.

Se realizó el cálculo de las emisiones ambientales producidas por la empresa por medio de un balance de masa y energía, los resultados se muestran en la tabla 1.

Según la clasificación de la norma ISO 14040, las áreas de protección afectadas por la producción de bolsas tratadas con insecticida son: Salud humana, entorno natural y recurso natural, teniendo en cuenta los interventores ambientales referentes al proceso que son: el consumo de pesticidas, el consumo de energía y el consumo de materias primas.

TABLA 1
Cargas ambientales por el proceso de
fabricación de bolsa tratada

Inventario de Efectos Ambientales	Kg/año
Emisiones de insecticida	465,89
Emisiones de Polietileno	43328,11
Otros residuos contaminantes	2795,36
Inventario de Efectos Ambientales	Ppm
Vertimientos liquido	0,000018
Inventario de Efectos Ambientales	mg
Emisiones a la atmósfera	0,001
Inventario de Efectos Ambientales	GJ-h
Emisiones de Energía	217,94
Inventario de Efectos Ambientales	dB
Emisiones de ruido	89.4 - 88.1

Análisis del Plan de Manejo Ambiental

Haciendo un análisis comparativo entre la estructura de un plan de manejo ambiental con el contenido general del PMA de POLYBAN INTERNACIONAL S.A, se encuentran los siguientes apartados ausentes:

- Resumen de características ambientales principales del proyecto
- Diagnóstico de Alternativas Ambientales
- Presentación de alternativas
- Descripción de las alternativas
- Diferenciación de las descripciones según el componente ambiental afectado

- Identificación y valoración de impactos
- Identificación de impactos según el componente afectado
- Correlación de aspectos ambientales e impactos ambientales
- Descripción de los criterios de valoración de impactos
- Matriz de valoración
- Descripción de los planes de manejo de los impactos
- Indicadores de desempeño
- Panorama de riesgos
- Medidas de mitigación
- Elementos de mitigación
- Medidas para la evaluación periódica de capacidad de respuesta y eficacia
- Medidas de corrección y compensación

Plan de gestión de manejo de residuos peligrosos durante el proceso productivo

En este punto, se puntualizó claramente el procedimiento utilizado en el manejo de residuos sólidos. También se cuantificaron las cantidades de material con insecticida producido y desperdiciado durante el proceso productivo. Adicionalmente, se definieron las metas anuales de reciclaje de residuos industriales.

En la tabla 3 se muestra los porcentajes de desperdicios durante el año 2007, con esto se tiene una idea de la cantidad de material que se convierte en residuo peligroso Tabla 3. Cantidad de material con insecticida producido y desperdiciado durante el primer semestre de 2007.

TABLA 3
Cantidad de material con insecticida producido y desperdiciado
durante el primer semestre de 2007

Desperdicios por proceso Clorpyrifos			
Proceso	Cantidad producida de material tratado Kilogramos	Cantidad desperdicio Kilogramos	% de Producto que es el desperdicio
Extrusión	528.161,56	10.688,13	2.02%
Conversión	463.590,63	12.013,7	2.59%

En la tabla 4 se muestran las cantidades de producto reciclado usado en POLYBAN INTERNACIONAL S.A. Post consumo se refiere al producto usado y reciclado ya sea por nuestro proceso, o por otros procesos y generadores que no necesariamente tiene relación con POLYBAN INTERNACIONAL S.A., y post industrial es el producto desperdiciado en el proceso productivo de la empresa y se muestra en la parte inferior de la tabla, éste es el 100% del material desperdiciado que vuelve al proceso productivo. POLYBAN INTERNACIONAL S.A.

TABLA 4
Desperdicio Post Consumo y Post Industrial Usado en los dos últimos años

POLYBAN INTERNACIONAL S.A.				
RECUPERACION DE DESPERDICIOS PLÁSTICOS PE Y PP				
	2005		2006	
DESCRIPCIÓN	KILOS	VALOR	KILOS	VALOR
POST-CONSUMO	520,381.00	856,681,076.00	609,676.00	1,266,373,060.00
POST-INDUSTRIAL	402,267.00	260,754,721.00	320,905.00	225,402,758.00

Plan de gestión de devolución de productos posconsumo de plaguicidas

Metodología tomada de la resolución 0693 del 19 de abril de 2007⁶.

⁶ COLOMBIA. RESOLUCIÓN 0693 DE 19 DE ABRIL DE 2007. Por la cual se establecen los parámetros para los Planes de Gestión de Residuos Postconsumo. Santafé de Bogotá. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial. 2007.

En este plan de gestión, se establecieron un conjunto de acciones, reglas y/o procedimientos que facilitan la devolución y acopio de residuos o desechos de la Bolsa Pyritilene 1% y de la Bolsa Biflex Treebags; adicionalmente estos procedimientos deben garantizar el manejo adecuado, aprovechamiento, tratamiento y/o disposición controlada de los mismos a lo largo de la cadena de importación, producción, distribución y comercialización.

La meta del 2007 fue lograr recolectar un 20% del total de los envases o empaques de Pyritilene 1% y Biflex Treebags puestos en el mercado y con incrementos anuales de un

5% hasta llegar a recolectar un mínimo anual de 75% del total de los envases puestos en el mercado .

La tabla 5 muestra la cuantificación de las metas anuales, esto partiendo de empresas recolectoras del plástico puesto en el mercado en Colombia, que recogen las bolsas en las fincas, las empacan y luego les dan valor agregado devolviéndolas a cualquier proceso en el cual sirvan como materia prima.

Estandarización de procesos

La estandarización del proceso constó de dos etapas: los indicadores de gestión integral y los diagramas de proceso. En la primera etapa se describieron el monitoreo y control de cada uno de los indicadores que componen el sistema en el tiempo y en la segunda etapa se detalló el proceso productivo de la bolsa tratada.

TABLA 5
Cuantificación de las metas anuales del plan establecidas por cada producto a nivel nacional

Departamento	Recolectores	Ton vendidas por departamento	Ton Recolectadas por Dpto.	% Recolección por Dpto.	% total recolectado
Antioquia	Gesta	380.6	95.15	25%	25%
	Asodeu				
Magdalena	Recicla	7.88	N.D	0%	

Diseño de proyecto para disminuir el impacto de los residuos peligrosos (rp)

Con el fin de disminuir las cantidades de insecticida usados en los procesos productivos, se está probando una materia prima llamada Phoenix plastic CO/WG 300 en HDPE. Esto podría no sólo cambiar las condiciones de salud, seguridad y medio ambiente de la empresa, sino también darle un valor agregado al proceso productivo con un producto totalmente amigable con el medio ambiente.

Phoenix plastic CO/WG 300, es el único aditivo en polietileno libre de insecticida concentrado que contiene aceites esenciales aromáticos, que son la última solución natural contra los insectos⁷.

El aroma de Phoenix Plastic CO/WG 300 a un insecto produce lo mismo que el amoníaco al ser humano. Los

vapores de los artículos plásticos que contienen Phoenix Plastics CO/WG 300, crea una barrera invisible que mantiene alejados a los insectos de las personas, plantas, y mascotas. Todos los insectos respiran a través de todo su cuerpo, entonces el residuo de la esencia del orgánico aromático en el Phoenix Plastics CO/WG 300 es absorbido directa e indirectamente en el cuerpo, afectando el sistema neurológico o biológico, causando parálisis, confusión y muerte. La película terminada debe ser empacada dentro de la bolsa de HDPE para mantener el aroma dentro de la película. Las estructuras co-extruidas donde el aceite esencial es incorporado en el centro del layer son muy recomendadas por su óptimo funcionamiento y consideraciones de costo⁸.

Usando como materia prima Phoenix Plastics, se desarrolla una bolsa de polietileno para matas de banano; esta bolsa ofrece protección contra insectos que atacan la fruta repeliéndolos. Esta tecnología es ambientalmente amigable y refuerza la protección al usar sustancias naturales.

⁷ PHOENIX PLASTICS. Información general sobre el uso de CO/WG 300. México. 2007

⁸ Ibidem.

CONCLUSIONES

Al realizar el análisis del ciclo de vida de los productos que contienen los insecticidas usados como materia prima en el proceso de POLYBAN INTERNACIONAL S.A., de acuerdo con la norma ISO 14040, se encontró lo siguiente: los residuos sólidos obtenidos del proceso son de 21661.87 Kg/año; las pérdidas de energía son de 217.94 GJ/h; la generación de ruido tiene un valor máximo 89.4 dB. Para el mejoramiento continuo de los procesos es vital atacar estos hallazgos, para obtener un efecto económico positivo en la compañía y minimizar los efectos causados al entorno medio ambiental.

El análisis de ciclo de vida llevado a cabo en la empresa, determina que los principales interventores de los daños ambientales son: el uso de insecticida, el consumo de materia prima y de energía. Estos interventores, afectan directamente a tres áreas trascendentales de protección, que son la salud humana, el entorno natural y los recursos naturales.

A partir del estudio realizado al plan de manejo ambiental, se encontraron falencias relacionadas con: la creación de la línea base de los impactos generados por la empresa; la identificación y valoración de los impactos y la descripción de planes que los mitiguen.

A lo largo de este proyecto se desarrolló un plan de gestión integral de manejo de residuos peligrosos durante el proceso productivo, con el fin de ser aplicado durante la ejecución de los procesos de POLYBAN INTERNACIONAL S.A. El plan para el manejo de residuos sólidos tiene como principal acción correctiva, el reciclaje de todos los desechos de la empresa cuyo indicador tiene como meta el reciclaje del 100% anual de los residuos. El indicador de manejo de residuos sólidos se cumplió al 100% durante el año 2007, es decir se logró el reciclaje de la totalidad de residuos sólidos de la empresa.

Para reforzar el plan de manejo de residuos sólidos, se crea el plan para la gestión de devolución de productos

plaguicidas postconsumo. Este es un plan realizado para devolver todo el producto plástico de las fincas después de consumido, además de presentar características de plan de reciclaje, en el cual la meta para el 2007 fue recolectar el 20% de las bolsas con insecticida puestas en el mercado y el cumplimiento final del indicador fue del 25%, lo que indica que se superó la meta estipulada.

Para optimizar los planes que involucran residuos peligrosos y equipos de abastecimiento, se elaboró un proyecto orientado a cambiar el masterbatch con insecticida clorpyrifos o bifentrina por un masterbatch con CO/WG 300, el cual es a base de polietileno y aceites esenciales, lo que lo hace ambientalmente sostenible, llevando a que esto no se convierta en un producto peligroso, ni tóxico, ni dañino y se logre cumplir con los requerimientos ambientales.

La utilización de masterbatch con CO/WG 300, además de ser un proyecto ambientalmente amigable, trae mejoras financieras a la empresa. El costo de producción de la bolsa tratada con este producto es de 6.32 dólares, comparado con el producto a base de pirilene 20 blue que cuesta 6.33 dólares, lo que lo hace competitivo en el mercado.

REFERENCIAS

Centro de información de producción limpia y desarrollo sostenible (CIPL y CS). Disponible en: http://www2.medioambiente.gov.ar/ciplycs/ciclo_vida/default.htm [Consultado del 28 de febrero de 2007]

COLOMBIA. RESOLUCIÓN 0693 DEL 19 DE ABRIL DE 2007. Por la cual se establecen los parámetros para los Planes de Gestión de Residuos Postconsumo. Santafé de Bogotá. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2007.

CONESA F., V. 1993. Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. Madrid: Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Levante & Mundi-prensa. 276 p.

GÓMEZ O., D. 1988. Evaluación de impacto ambiental (EIA). Ciudad y Territorio 75(1): 5-32.

GOMEZ P. Romero F. Evaluación del insecticida piretroide Bifentrina impregnado en la funda para el control de plagas del racimo en el cultivo de banano en Machala, Ecuador. ACORBAT. Memorias XV reunión. Realizada en Cartagena de Indias 27 de octubre de 2002.

Home page Dow Agroindustries. Disponible en: <http://www.dowagro.com/chlorp/index.htm> [Consultado del 3 de Abril de 2007]

IDEAM. Legislación. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/legal/index4.htm> Actualizado en 2001. [Consultado el 16 Nov de 2007]

Instituto Nacional de Ecología. Manejo de residuos peligrosos. Disponible en: http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/100/cap6_7.html [Consultado el 8 de mayo de 2007]

LAGO, Lázaro. Monografías. Sistemas de Gestión Ambiental. Especificaciones directrices para su uso. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos14/gestion-uso/gestion-uso.shtml> [consultado el 16 Nov de 2007]

LEÓN MÁRQUEZ, Ricardo. Análisis de los Aspectos Ambientales de una Organización. Curso para responsables y auditores ambientales. Centro Nacional de Producción Más Limpia. Medellín. 56 pág.

LEÓN PELAEZ, Juan Diego. Evaluación del Impacto Ambiental para Proyectos y Desarrollos. Edición, CORREA METRIO, Johan Alexander. Universidad Nacional de Colombia. 165 pág.

PHOENIX PLASTICS. Información general sobre el uso de CO/WG 300. México. 2007.

Plan de Manejo Ambiental, POLYBAN INTERNACIONAL S.A. Versión 2006.

Red de Desarrollo sostenible de Colombia. Disponible en: http://www.rds.org.co/resoluciones.htm?AA_SL_Session=95088faf77ef77f7856b1f7e193ea9e4&x=10733. [Consultado del 28 de febrero de 2007]

SÁNZ C., J.L. 1991. Concepto de impacto ambiental y su evaluación. En: Evaluación y corrección de impactos ambientales. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España. 302 p.

SOCIEDAD COLOMBIANA DE INGENIEROS. 1993. Manual de gestión ambiental. Vol. 1. 154 p. WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agricultura Handbook No. 537. Washington: USDA.

MICROPROPAGACIÓN DE CATTLEYA QUADRICOLOR

Isabel Cristina Cadavid C. isacrica@hotmail.com
Sandra Salazar A. sammysala57@hotmail.com

RESUMEN

Se investigó la influencia del medio de cultivo MS (1962) a diferentes concentraciones finales para evaluar la formación del cuerpo protocórmico y la adición de agua de coco, jugo de piña y ANA para la formación de raíces. Las cápsulas de *Cattleya quadricolor* en estado de madurez se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 2%, durante 3 minutos con dos gotas de Tween 20. Se obtuvo un porcentaje de germinación del 88% a los 30 días y una longitud promedio de hoja de 2.2608 cm en el cuerpo protocórmico a los 60 días al utilizar el medio MS (1962) completo y sin reguladores de crecimiento. Los cuerpos protocórmicos obtenidos fueron transferidos posteriormente al medio MS (1962) modificado suplementado con agua de coco en el cual se encontró el mejor promedio para la inducción de raíz a los 90 días de iniciado el cultivo. Las vitroplantas obtenidas se adaptaron bajo condiciones ex vitro utilizando como sustrato corteza de pino pátula.

Palabras clave

Cattleya quadricolor, estructuras protocórmicas, micropropagación in vitro, agua de coco, jugo de piña, Ácido Naftalenacético (ANA).

ABSTRACT

In this work was investigated the influence of the culture media MS (1962) at different concentrations to evaluate the final formation of the protocormic body and the addition of coconut water and pineapple juice with NAA to roots development. *Cattleya quadricolor* capsules in a state of maturity were disinfected with sodium hypochlorite to 2%, for 3 minutes with two drops of Tween 20. The percentage of germination rate was 88 at 30 days and the average length of leaves in the protocormic body to 60 days was 2.2608 cm using the MS (1962) media culture complete and without growth regulators. The protocormics bodies obtained were transferred to MS (1962) media supplemented with coconut water. In this media was found the best average for induction of root to 90 days of initiation of the crop. In the culture media MS (1962) supplemented with pineapple juice was not observed the roots induction efficiently. The vitroplantlets obtained were adapted under conditions ex vitro using as a substrate patula pinus

Key words

Cattleya quadricolor, protocormics structures, in vitro micropropagation, coconut water, pineapple juice, Naftalenacetic Acid (NAA).

INTRODUCCIÓN

Esta especie (*Cattleya quadricolor*), crece bajo algunas condiciones inusuales para una *Cattleya*: áreas húmedas y pantanosas en las montañas, sobre árboles pequeños, donde a menudo son bañadas por densas nieblas.

La orquídea, gracias a sus flores exóticas, hace parte de una de las plantas de mayor demanda entre las ornamentales, y es además, la flor más representativa y conocida en el territorio Colombiano. Sin embargo, a muchas especies se les ha restado importancia en su conservación y propagación como es el caso de la *Cattleya quadricolor*, la cual, ha sufrido maltrato en su nicho ecológico (Chadwick op cit); por las condiciones anteriormente mencionadas entre otras, se le considera como una especie en vía de extinción (Pacheco y Galindo, 2001; Rodríguez et ál, 2005; Herrera et ál, 2007).

Con la técnica del cultivo in vitro se han podido desarrollar y establecer diferentes protocolos para la micropropagación y obtención de vitroplantas de diferentes especies de orquídeas, a pesar de esto y luego de una extensiva revisión bibliográfica, no se encontraron estudios realizados con *Cattleya quadricolor*, por tal razón, esta investigación se orientó al desarrollo de un protocolo que permita la obtención de vitroplantas a bajo costo y en menor tiempo.

Con base en lo expuesto, se realizó este trabajo mediante el cual se obtuvo la micropropagación in vitro de *Cattleya quadricolor*, contribuyendo de esta manera a su conservación como especie en vía de extinción.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 Localización

La apertura de la cápsula de *Cattleya quadricolor*, siembra de las semillas y establecimiento del cultivo in vitro, se llevaron a cabo en el Laboratorio de Biotecnología de la Universidad EAFIT Medellín, Colombia, a 1.420 msnm con una temperatura ambiente promedio de 25°C.

1.2 Origen del material vegetal

Se utilizaron cápsulas de la variedad *Cattleya quadricolor*, material que fue donado por el Dr. Francisco Villegas, 1er Vicepresidente de La Sociedad Colombiana de Orquideología.

1.3 Obtención de los explantes y desinfección del material vegetal

Para la obtención de las plantas in vitro, se utilizaron cápsulas de *C. quadricolor* de las cuales se extrajeron las semillas y se sembraron bajo condiciones estériles en cámara de flujo laminar.

La cápsula de *Cattleya quadricolor* en estado de madurez (antes de que se presente el fenómeno de la dehiscencia), fue lavada mediante inmersión en una solución de hipoclorito de sodio al 2%, durante 3 minutos con dos gotas de Tween 20 (Sigma®) en 100 ml de solución, seguido de dos enjuagues para eliminar el exceso de detergente con agua destilada estéril.

1.4 Germinación de la semilla, aparición de la hoja e inducción de raíz

La cápsula se abrió longitudinalmente, se extrajeron las semillas y se sembraron en los diferentes medios de cultivo evaluando el desarrollo germinativo a los 30 días, y el promedio del tamaño de la hoja a los 60 días bajo condiciones de luz (2000 lux) a una temperatura de 25±1°C. Los Tratamientos realizados se describen a continuación:

1.4.1 Medios de cultivo utilizados para la inducción de la germinación de la semilla y aparición de hoja

Se sembraron las semillas de *C. quadricolor* en el medio Murashige Skoog, 1962 (MS) completo (tratamiento 1), (MS/2) a la mitad de la concentración final de sales (tratamiento 2) y (MS/4) a la cuarta parte de la concentración

final de sales (tratamiento 3). Cada uno fue suplementado con sacarosa (30 g/L), phytigel (2 g/L), con un pH de 5.5 y sin la presencia de reguladores de crecimiento.

1.4.2 Medios de cultivo utilizados para la inducción de la rizogénesis a partir de protocormos de *C. quadricolor*

Se utilizó el medio MS modificado (0.033 g/L de mioinositol). El tratamiento 4 fue suplementado con agua de coco en una concentración del 10% v/v y sin reguladores de crecimiento. El tratamiento 5 fue suplementado con agua de coco en una concentración del 10% v/v y con la presencia de ANA en una concentración de 0.5 mg/L.

El tratamiento 6 fue suplementado con jugo de piña en una concentración del 10% v/v y sin reguladores de crecimiento. El tratamiento 7 fue suplementado con jugo de piña en una concentración del 10% v/v y con la presencia de ANA en una concentración de 0.5 mg/L. Cada uno de los anteriores tratamientos fueron suplementados con sacarosa (30 g/L), phytigel (2 g/L) y con un pH de 5.5.

1.5 Diseño Estadístico

Se empleó un diseño de clasificación experimental completamente aleatorizado, efecto fijo balanceado con 50 replicaciones por tratamiento, donde se tuvo como variables respuesta el porcentaje de germinación, la longitud de la hoja y la longitud de la raíz. Se empleó la transformación arcoseno para la variable porcentaje de germinación con el objetivo de convalidar los supuestos estadísticos asociados con el diseño de clasificación experimental. Para contrastar el efecto de los diferentes tratamientos, se utilizó la prueba de Tukey con base en un nivel de significancia estadística del 5%. Adicionalmente se realizó un análisis descriptivo de carácter unidimensional para la variable longitud tanto de raíz como de hoja, con el objetivo de establecer la media aritmética, la desviación típica y el coeficiente de variación.

Para la variable germinabilidad se estableció la distribución de frecuencia por tratamiento complementado con

el análisis inferencial, teniendo en cuenta un 95% de confiabilidad. Los datos obtenidos se procesaron en el paquete estadístico SAS versión 8.2.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 Evaluación de los medios de cultivo utilizados para la inducción de la germinación y formación de hoja a partir de semilla de *C. quadricolor*

En el tratamiento 1 (MS completo) se observó en el momento de la siembra que la semilla presentó una coloración amarilla, tornándose a un color verde a los 15 días, acompañado este cambio de un engrosamiento, lo cual es una manifestación de la iniciación del proceso de germinación, lo que igualmente fue reportado por Arditti (1967); Pierik (1990); Kishor et ál, (2006) y Vendrame et ál, (2007). Posteriormente, a los 30 días se observó la aparición de protocormos a partir de los cuales a los 45 días, se inició la aparición de los brotes foliares, proceso que se manifestó de una forma directa, es decir, sin observarse la formación de callo. A los 60 días ya se tenían hojas emergentes de un rizoma grueso. En este tratamiento se observó un porcentaje de germinación de la semilla a los 30 días del 88% y un promedio de longitud de la hoja en cm a los 60 días de 2.2608.

El tratamiento 2 (MS/2) mostró un comportamiento similar al tratamiento 1, sin embargo, el engrosamiento de las semillas y la coloración verdosa se manifestó en una menor proporción, lo cual está íntimamente relacionado con la disminución de la germinación y de la concentración final de las sales del medio MS (1962), observando a los 30 días una germinación equivalente al 64%, y un promedio de longitud de la hoja a los 60 días de 0.9766 cm.

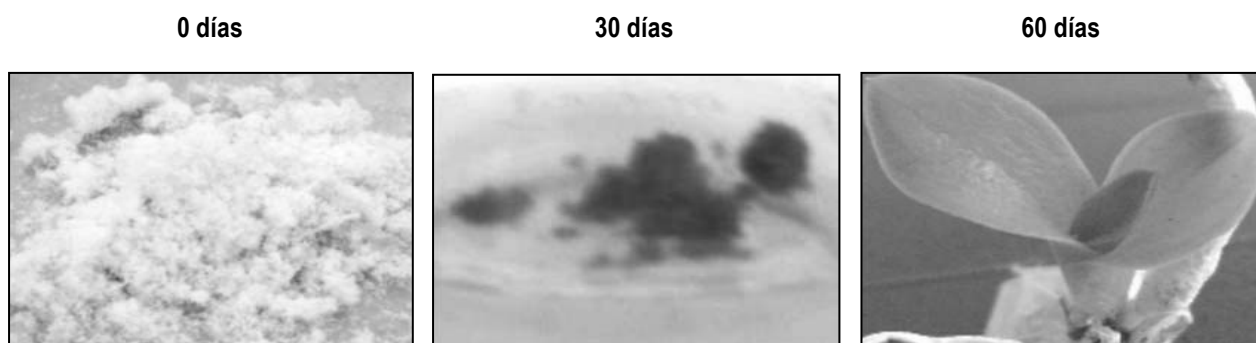
En el tratamiento 3 (MS/4) se observó un porcentaje de germinación a los 30 días y un promedio de longitud de la hoja a los 60 días mucho menor comparado con los tratamientos 1 y 2, equivalente al 54% y al 0.5704 cm respectivamente, lo cual está directamente relacionado

con la presencia de callo en este tratamiento y con la disminución a la cuarta parte de la concentración final de las sales del medio MS (1962).

Con base en estos resultados se observó que el porcentaje de germinación y aparición de hojas a los 30 y 60 días respectivamente, fue mayor en el tratamiento 1, lo cual indica que para el proceso de germinación y formación de hoja, la semilla de *C. quadricolor* requiere de las sales basales y vitaminas del medio de cultivo MS (1962)

completo, y que posiblemente no sea necesaria la utilización de hormonas de crecimiento tal y como lo reportan los estudios realizados por Yamazaki y Miyoshi, (2006), Ávila y Salgado (2006), y Vendrame et ál, (2007), lo cual disminuye de alguna manera los costos de producción permitiendo entregarle al consumidor una especie en vía de extinción sana y a menor costo. El proceso desde el momento inicial de la semilla hasta la obtención del protocormo, se puede observar en la Figura 1.

FIGURA 1
Apariencia de las semillas y protocormo en el tiempo discriminado por días



De acuerdo con los análisis estadísticos basados en $X \pm Std$, Cv y la Prueba de Comparación de Tukey, se pudo establecer para el tratamiento 1 con base en un 95% de confiabilidad, que el porcentaje de germinabilidad de la semilla oscila entre (79, 97%), para el tratamiento 2 entre el (51, 77 %), y para el tratamiento 3 entre (40, 68%). Lo anterior implica que desde el punto de vista inferencial, el tratamiento 1 fue el que mejor comportamiento presentó al evaluar los límites de confiabilidad.

Al efectuar el análisis de varianza para la variable germinabilidad, se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento 1 con respecto a los demás tratamientos sometidos a experimentación.

Al observar el análisis descriptivo exploratorio (Tabla 1), se observaron diferencias significativas entre los tratamientos realizados ($P < 0.05$) para la variable longitud de la hoja a los 60 días; de igual forma se pudo detectar que el tratamiento 2 fue el más homogéneo ya que presentó el menor coeficiente de variación. El tratamiento 1 alcanzó el más alto promedio con 2.26 cm, siendo este el mejor para la variable longitud de la hoja, el cual presentó un patrón de comportamiento intermedio en su variabilidad.

TABLA 1
Análisis descriptivo y comparativo entre los diferentes experimentos para la variable longitud de la hoja a los 60 días

Tratamientos	$\bar{X} \pm St_d$ Cv
1	2.26 ± 0.52 a 23.22
2	0.97 ± 0.18 b 19.20
3	0.57 ± 0.16 c 31.86

Letras distintas muestran diferencia estadística

2.2 Evaluación de los medios de cultivo utilizados para la inducción radicular a partir de protocormos de C. quadricolor

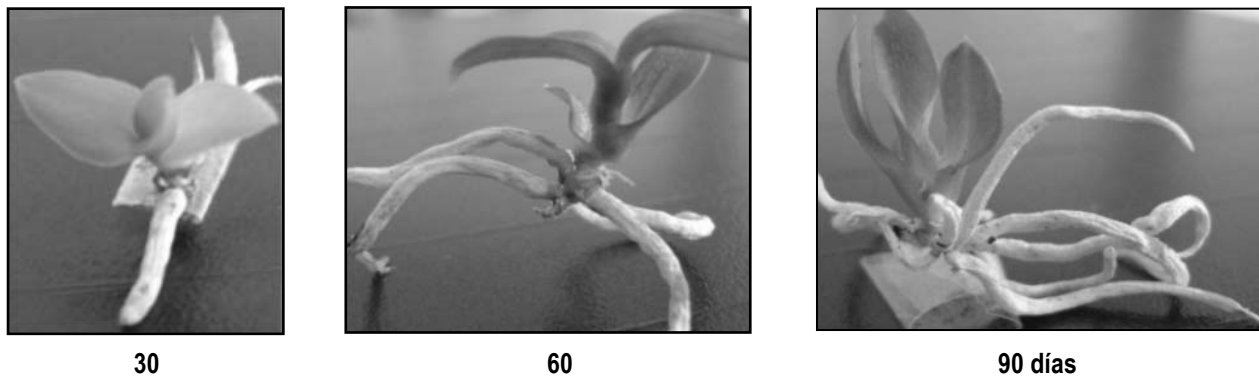
Los protocormos obtenidos en el tratamiento 1 el cual se consideró como el mejor, fueron transferidos a los tratamientos 4, 5, 6 y 7 con el propósito de inducir el

enraizamiento, utilizando el medio MS (1962) suplementado con agua de coco, jugo de piña y ANA como regulador de crecimiento evaluando el promedio de la longitud de la raíz a los 90 días.

En el tratamiento 4 (Medio MS + Agua de coco) los protocormos se adaptaron fácilmente al nuevo medio; el rizoma comenzó a desarrollar raíces a los de 15 días de realizado el transplante. Después de 60 días de realizada la siembra, las raíces presentaron un desarrollo completo con velamen, buena longitud y espesor; de igual manera como se reportó en los estudios realizados por Vendrame et ál, (2007) y Arditti (1993), las hojas del protocormo en el momento de realizar el transplante se prolongaron aún más y se logró distinguir y diferenciar la presencia de una vitroplanta completa a los 90 días contados a partir de la siembra de la semilla (Figura 2).

En este tratamiento se observó un promedio de longitud de la raíz a los 90 días de 5.1372 cm.

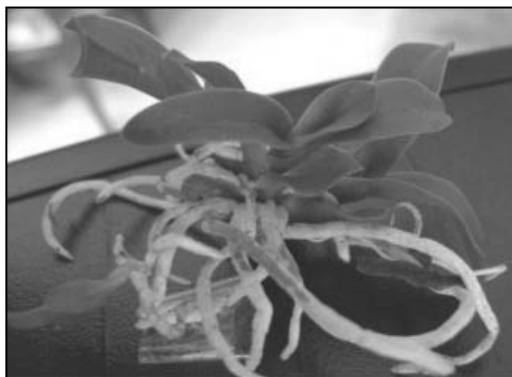
FIGURA 2
Apariencia de la C. quadricolor a los 30, 60 y 90 días de cultivo



Las vitroplantas obtenidas en el tratamiento 4 fueron llevadas a condiciones ex vitro en potes comunitarios (Figuras 3A y 3B), a los cuales se les adicionó como sustrato corteza de pino pátula(Sociedad Colombiana de Orquideología, 2003).

FIGURA 3

- A. Vitroplanta completa obtenida en el tratamiento 4 a los 90 días de cultivo
 B. Vitroplanta del tratamiento 4 establecida ex vitro en corteza de pino pátula



A



B

En el tratamiento 5 (Medio MS + Agua de coco + 0.5 mg/L de ANA) se observó un comportamiento similar al presentado en el tratamiento 4, es decir, ambos manifestaron prolongación de las hojas y conservaron la tonalidad verde inicial; sin embargo, las raíces desarrolladas en el tratamiento 5 presentaron un promedio inferior comparado con el tratamiento 4 en cuanto a la longitud de la raíz a los 90 días con un valor de 2.964 cm.

Los protocormos que fueron establecidos para enraizamiento en el tratamiento 6 (Medio MS + Jugo de piña) sufrieron secamiento de las hojas y de las raíces. No hubo presencia de nuevos brotes como estructuras protocórmicas, ni de nuevas hojas. Las raíces que aparecieron fueron delgadas, de color café, de escasa longitud y manifestaron desecación. Se observó igualmente pudrición del rizoma lo cual posiblemente se deba a una acción inhibitoria del jugo de piña para la absorción de los nutrientes del medio de cultivo, es decir, es una sustancia antagónica para el buen desarrollo del protocormo y de la raíz en esta especie comparado con el agua de coco. En este tratamiento (6), se obtuvo un promedio de longitud de la raíz de 1.8454 cm.

En el tratamiento 7 (Medio MS + Jugo de piña + 0.5 mg/L de ANA), se observó que los protocormos manifestaron una baja respuesta para el desarrollo foliar, radicular y una disminución en la presencia de nuevos brotes. Las hojas provenientes de los protocormos obtenidos, comenzaron a tornarse de un color amarillo al cabo de los 90 días. Algunas

de las vitroplantas obtenidas presentaron secamiento total de la hoja, siendo este más fuerte comparado con el que se observó en el tratamiento 6.

En este tratamiento se observó un promedio de longitud de raíz luego de 90 días de 1.1188 cm, valor que es mucho menor al compararlo con los tratamientos 4, 5 y 6.

Con base en estos resultados se observó que el promedio de longitud de raíz a los 90 días fue mayor en el tratamiento 4 seguido del tratamiento 5, 6 y finalmente del tratamiento 7, lo que da a entender que para el desarrollo radicular y la obtención de vitroplantas vigorosas de *C. quadricolor*, es más conveniente suplementar el medio de cultivo MS (1962) modificado con agua de coco al 10% y que no es necesaria la adición de la auxina ANA para inducir la formación de raíz tal y como lo reportan Ávila y Salgado, 2006 y Lo et ál, (2004).

De acuerdo con en este resultado se presume que el agua de coco actúa como una sustancia sinergista estimulando el crecimiento de raíces e incrementando la longitud de las hojas, una vez se comienza a formar el protocormo.

De acuerdo con los análisis estadísticos basados en $\bar{x} \pm \text{Std}$, Cv y en la Prueba de comparación de Tukey (Tabla 2), se logró establecer, que se presentaron diferencias estadísticas en el efecto promedio de los tratamientos ($P < 0.05$) donde se determinó que el tratamiento 4 fue

el de mejor comportamiento promedio con 5.13 cm, y el tratamiento 7 fue el de menor comportamiento promedio con 1.18 cm para la inducción radicular a los 90 días de cultivo; adicionalmente se observó que el tratamiento 7 presentó diferencias entre sus repeticiones, con un coeficiente de varianza del 36.74%.

Por el contrario, el tratamiento 4 fue el de mejor comportamiento en cuanto a la variabilidad, al presentar mayor homogeneidad en las distintas repeticiones efectuadas.

TABLA 2

Análisis descriptivo y comparativo entre los diferentes experimentos para el desarrollo radicular

Tratamientos	$\bar{X} \pm \text{Std Cv}$
4	5.13 ± 0.67 a 13.22
5	2.96 ± 0.4 b 14.89
6	1.84 ± 0.25 c 13.80
7	1.18 ± 0.43 d 36.74

Letras distintas muestran diferencia estadística

CONCLUSIONES

Se logró estandarizar un protocolo para la micropropagación de *Cattleya quadricolor*, el cual permitió a partir de semillas la obtención de vitroplantas a los 90 días de iniciada la siembra.

Se estableció que el medio MS (1962) completo en sus concentraciones y sin reguladores de crecimiento, es el mejor tratamiento para la germinación de semillas y obtención de protocormos de *Cattleya quadricolor*.

Se estableció que el medio MS(1962) modificado, suplementado con Agua de coco 10% y sin reguladores de crecimiento, es óptimo para la inducción de la rizogénesis en protocormos de *C. quadricolor*.

Se estableció que la adición de jugo de piña al medio de cultivo, tiene un efecto negativo en la inducción de vitroplantas de la especie *Cattleya quadricolor*, causando secamiento de las raíces y de las hojas en el cuerpo protocórmico.

Las vitroplantas obtenidas en el tratamiento 4, se adaptaron ex vitro utilizando como sustrato corteza de pino pátula con buenos resultados.

Se estableció que no existe la necesidad de adicionar reguladores de crecimiento para la obtención de vitroplantas de esta especie, lo cual hace más económico este sistema biotecnológico de propagación comparado con otros trabajos reportados.

BIBLIOGRAFÍA

Arditti, J. 1967. Factors affecting the germination of orchid seeds. *Botanical Review*. Vol. 33 (1). p.1-97.

Arditti, J. 1993. *Micropropagation of Orchid*. John Willey & Sons Inc. New York. p. 1-23.

Ávila, I.; Salgado, R. 2006. Propagación y mantenimiento in vitro de orquídeas mexicanas para colaborar en su conservación. *Biológicas*. Vol 8. p. 138-149.

Chadwick, A. 2001. *Cattleya quadricolor*, Stepchild of the Mountain Marshes. *Orchids*. The American Orchid Society Magazine. Vol. Diciembre.

Herrera, A. 2007. Asociación On Line de Colombianos en España: 19 septiembre. <http://www.groups.msn.com/k0horta24qr8mi/colombiaecologica>.

Kishor, R.; Valli K.S.; Sharma, G.J. 2006. Hybridization and in vitro culture of an orchid hybrid *Ascocenda 'Kangla'*. *Scientia Horticulturae*. Vol 108. p. 66-73.

- Lo, S.F.; Nalawade, S.M.; Kuo, C.L.; Chen, C.L.; Tsay, H.S. 2004. Asymbiotic germination of immature seeds, plantlet development and ex vitro establishment of plants of *Dendrobium Makino* - A medicinally important orchid. In vitro Cellular & Developmental Biology. Vol 40. p. 528-535.
- Lo, S.F.; Nalawade, S.M.; Mulabagal, V.; Matthew S.; Chen, C.L.; Kuo, C.L.; Tsay H.S. 2004. In vitro propagation by asymbiotic seed germination and 1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging activity studies of tissue culture raised plants of three medicinally important species of *Dendrobium*. Pharmaceutical Society of Japan. Vol 27. p. 731-735.
- Murashige, T.; Skoog, F. 1962. A revised medium for rapid growth and bio assay with tobacco tissue culture. Physiology Plantarum. Vol 15. p. 473- 497.
- Pierik, R.L.M. 1990. Cultivo in vitro de las plantas superiores. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Rodríguez, L.; González, P.; Díaz, A.; Fajardo, E.; Sánchez, E.; Hernández, J.; Castañeira, M.A.; De la Cruz, G.; González, J. (2005). Producción y recuperación de orquídeas silvestres cubanas. En: Cuba. ISBN 959-250-156-4.
- Sociedad Colombiana de Orquideología (2003). Manual de cultivo de orquídeas. Editorial SCO.
- Vendrame, W.; Carvalho, V.S.; Dias, J.M. 2007. In vitro germination and seedling development of cryopreserved *Dendrobium* hybrid mature seeds. Scientia Horticulturae. Vol 2746. p. 1-6
- Yamazaki, J.; Miyoshi, K. 2006. In vitro asymbiotic germination of immature seed and formation of protocorm by *Cephalanthera falcata*. Oxford Journals. Vol 98. p. 1197-1206

DESARROLLO DE UNA FORMULACIÓN CON BASE EN RIZOBACTERIAS PARA LA PROMOCIÓN DEL CRECIMIENTO DEL BANANO

Ana María Valencia, avalen16@eafit.edu.co - Victoria Valencia, vvalenc2@eafit.edu.co

RESUMEN

El objetivo de esta investigación, consistió en desarrollar una bioformulación a base de rizobacterias del género *Pseudomonas* con el propósito de promover el crecimiento de las plantas de banano. Se realizó una evaluación previa de las mejores formulaciones a base de *Pseudomonas putida* UA44MR-1 y diferentes vehículos con el fin de valorar diversos medios de protección para las células bacteriales. Los vehículos evaluados hacen parte de cuatro categorías reportadas en la literatura: cápsulas poliméricas de alginato de sodio y alginato de sodio con ácido húmico, polvos de talco y caolín, gránulos de harina y líquidos con suspensión bacterial y agua. Todas las formulaciones fueron evaluadas en frijol variedad Calima desde semilla y plántula, comparando con testigos no inoculados, sin embargo no se obtuvo promoción en el crecimiento de la planta indicadora. De igual forma se evaluó el efecto de los vehículos sobre la germinación de las plantas, encontrándose que ninguno de estos afecta dicha germinación. Las formulaciones de *P. putida* UA44MR-1 a base de harina y talco, fueron seleccionadas de las pruebas en frijol para ser evaluadas en las plantas de banano de la especie Musa AAA, cultivar Gran enano. Se observó que las dos formulaciones promovieron el crecimiento de la planta de banano en comparación con el testigo no inoculado durante los dos primeros meses de evaluación. Se evaluaron diferentes rasgos de PGPR a la cepa trabajada, encontrando altas producciones de Acido indol acético (AIA) y pérdida en la producción de quitinasas, por modificación de la cepa nativa con inducción de resistencia a rifampicina. Adicionalmente, se evaluó la via-

bilidad de las formulaciones en el tiempo, por medio del conteo viable de bacterias, encontrándose que el talco logró conservar la población bacteriana en mayor proporción que la harina.

Palabras clave

PGPR, *Pseudomonas*, banano, formulaciones, inoculación.

INTRODUCCIÓN

En el concierto internacional, el banano colombiano ha experimentado una pérdida de posicionamiento competitivo en el marco, como consecuencia del crecimiento de la oferta de competidores fuertes como Ecuador. Este detrimento obedece a diversos factores entre los que sobresalen la baja productividad por hectárea del cultivo, el deterioro en la calidad de la fruta y los problemas fitosanitarios (Sigatokas y Moko) en las plantaciones (Agrocadenas, 2006). Para solucionar este tipo de problemas se plantean diferentes soluciones a nivel biotecnológico, como el aprovechamiento de organismos altamente eficientes para aumentar el crecimiento de las plantas e incrementar su tolerancia a otros microorganismos causantes de enfermedades, conocidos como PGPR, por sus siglas en inglés, que significan Plant Growth Promoting Rizobacteria (Kleopffer y Schroth, 1978).

Este tipo de promoción se logra a través de diferentes mecanismos de acción unos primarios relacionados con el

aporte de compuestos sintetizados por la bacteria o por facilitarle a la planta la toma de ciertos nutrientes desde el ambiente, entre ellos la fijación de Nitrógeno biológico, solubilización de fosfatos y otros minerales y producción de reguladores de crecimiento, y unos secundarios que reducen o previenen los efectos deletéreos de uno o más organismos fitopatógenos, entre ellos el mejoramiento de otras relaciones simbióticas, producción de sideróforos, producción de antibióticos, producción de enzimas líticas e inducción de resistencia sistémica.

Entre las hormonas de crecimiento que producen algunas PGPR, se encuentra el Acido Indol Acético (AIA) que está asociado con la promoción del crecimiento de raíces a través del establecimiento de las mismas en el suelo, debido al desarrollo de pelos radicales como extensión de las raíces primarias (Cheryl y Glick, 2002). De ésta forma se generan ventajas para las nuevas plantas debido a que las raíces aumentan la habilidad de sustraer nutrientes del suelo logrando alcanzar los que están más distanciados y ampliando más sus límites de acceso.

Sin embargo, puede presentarse otro efecto alterno, donde en lugar de estimular el crecimiento de las raíces, altas concentraciones de AIA estimulan la producción de etileno, el cual genera una inhibición en el desarrollo radical y una maduración acelerada en los frutos (Glick *et al.*, 1998).

La inmovilización de este tipo de microorganismos para su aplicación en suelo se hace a través de diferentes materiales llamados inoculantes o portadores, que sirven para proveer protección a la PGPR y liberarla hacia el suelo de forma controlada y en las condiciones adecuadas. En la literatura se listan muchos materiales para inmovilizar PGPR, pero en general las formulaciones se clasifican en productos secos y suspensiones líquidas, las cuales ofrecen diferentes condiciones fisicoquímicas según la PGPR a inocular, el tipo de cultivos y el clima, entre otros factores importantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Microorganismo

Se utilizó la rizobacteria *P. putida* UA44MR-1 resistente a rifampicina (Pérez, 2007). y conservada en TSB + 20% glicerol en crioviales con tapa rosca. La bacteria fue aislada del suelo bananero de Urabá – Antioquia por Cenibanano y modificada por mutación inducida a rifampicina por el grupo de Investigación de Control Biológico de la Universidad de Antioquia (Ramírez, 2005).

Capacidades bioquímicas

Prueba de ácido indol acético (AIA): La prueba de producción de ácido indol acético (AIA) se realizó en condiciones *in vitro*, colocando dos colonias de *P. putida* UA44MR-1 en medio 50 mL de TSB con 500 ug/mL de triptófano en un erlenmeyer de 250 mL, equivalentes a 0.4 g. de caldo Triptófano (compuesto por 1 g. de triptófano/ 16 g. de caldo). La fermentación se mantuvo por 48 h a 150 rpm y 28°C. Finalmente la biomasa fue centrifugada a 4500 rpm por 15 minutos y 4°C. Para la determinación del AIA se tomaron 2 mL del sobrenadante y se mezclaron con un volumen igual de la solución de Salkowski (150mL de H₂SO₄ concentrado, 250 mL de Agua destilada, 7,5 mL de FeCl₃·6H₂O 0,5M). La mezcla fue agitada en vortex y se dejó reposar por 20 minutos. Al cabo de dicho tiempo, se determinó la absorbancia a 530 nm en un espectrofotómetro Helios Gamma. UV-Visible (Cole Parmer). Se realizaron dos ensayos con su duplicado respectivo, para determinar los indoles totales producidos.

Para determinar la concentración en ug/mL del sobrenadante se realizó la curva de referencia preparando una solución stock de 1 mg/mL de AIA (0.1 g de AIA en 100 mL de etanol) la cual fue almacenada en el congelador. Las anteriores mezclas fueron medidas en espectrofotómetro a una longitud de onda 530 nm usando como blanco el medio de cultivo (TSB) y se construyó la curva de calibración de concentración vs densidad óptica. En la tabla 1. Se observa los estándares utilizados para la construcción de esta curva de referencia.

TABLA 1
Estándares de curva de referencia para AIA

AIA µg / mL	SOLUCIÓN
10	0.1 mL de solución stock + 9.9 mL de agua destilada estéril o medio de cultivo TSB.
20	0.2 mL de solución stock + 9.8 mL de agua destilada estéril o medio de cultivo TSB.
30	0.3 mL de solución stock + 9.7 mL de agua destilada estéril o medio de cultivo TSB.
40	0.4 mL de solución stock + 9.6 mL de agua destilada estéril o medio de cultivo TSB..
50	0.5 mL de solución stock + 9.5 mL de agua destilada estéril o medio de cultivo TSB.

Medición de la capacidad quitinolítica: Para determinar la capacidad quitinolítica de la *P. putida* UA44MR-1 se emplearon tres medios sólidos con quitina coloidal. El medio 1 compuesto por 20 g/L de agar nutritivo con 8 g/L de quitina coloidal (Salazar, 2005.). El medio 2 compuesto por 15g/L de Agar-agar con 8 g/L de quitina coloidal (Salazar, 2005; Hallman et al., 1998.) y el medio 3 a base de sales con 8g/L de quitina coloidal. Las sales del medio 3 en g.L-1: nitrato de amonio (NH_4NO_3), 0.78; fosfato de potasio dibásico (K_2HPO_4), 0.8; fosfato de potasio monobásico (KH_2PO_4), 0.2 ; sulfato de magnesio ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$), 0.20; cloruro de calcio ($CaCl_2$), 0.06; cloruro de Sodio ($NaCl$), 0.10; molibdato de Sodio ($Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$), 0.002; sulfato de zinc ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$), 0.00024; sulfato de cobre ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), 0.00004; sulfato de cobalto ($CoSO_4 \cdot 7H_2O$), 0.010; sulfato de manganeso ($MnSO_4 \cdot 4H_2O$), 0.003; etilendiaminotetraacético sódico-férrico ($Na_2FeEDTA$), 0.028; ácido bórico (H_3BO_3), 0.005; agar, 15; biotina (5 µg.L-1) y Ácido p-aminobenzoico (10 µg.L-1).

Formulaciones

Para todos los procesos de producción de las formulaciones, la fermentación de *P. putida* UA44MR-1 de 36 horas de cultivo fue centrifugada en tubos falcon de 15 mL a 4500 rpm y 4°C por 20 minutos. De igual forma, todos los

materiales fueron previamente esterilizados a 121°C y 15 psig por 15 min.

Talco y caolín: Las formulaciones con base en talco y caolín se realizaron según la metodología propuesta por (Vidhyasekaran y Muthamilan 1995). La biomasa fue resuspendida en agua destilada estéril en una relación 1:1. Por cada 400 mL de suspensión bacteriana se utilizaron 1 kg de mineral (Talco o caolín), 15 g de $CaCO_3$ y 10 g de CMC.

El mineral y el carbonato fueron previamente mezclados y autoclavados a 121 °C y 15 psig por 1 hora. Una vez estériles todos los materiales, la suspensión bacteriana fue adicionada al mineral y al carbonato de calcio y mezclada bajo condiciones estériles. La mezcla fue extendida en una bandeja y secada a temperatura ambiente por dos días. Una vez seca se adicionó la cantidad de CMC respectiva.

Macro perlas de alginato: La biomasa fue resuspendida en una solución de alginato de sodio al 2% (w/v) en una relación 1:1. La mezcla fue bombeada a una solución de $CaCl_2$ 0.1 M con agitación constante. Una vez las gotas se sumergieron en la solución de cloruro de calcio se formaron las perlas por medio de la formación de alginato de calcio (insoluble en agua). Con el fin de lograr endurecer las macro perlas, estas permanecieron en la solución durante 3 horas (Bashan, 1986a)

Posteriormente la solución restante fue descartada y las perlas fueron enjuagadas dos veces con agua destilada estéril y almacenadas en una solución salina 0.85% w/v en frascos herméticamente cerrados.

Macro-perlas de alginato y ácido húmico: Las perlas de alginato fueron preparadas de acuerdo con el método publicado por Bashan (1986a) con algunas modificaciones propuestas por Young *et al.*, en el 2006. Una mezcla de 25 mL de ácido húmico al 10% y 7.5 mL de glicerol al 30% fueron mezclados con una solución de alginato de sodio al 2% para obtener un volumen final de 250 mL. La biomasa de *P. putida* UA44MR-1 fue resuspendida en la solución de alginato de sodio y ácido húmico en una relación 1:1. La mezcla fue bombeada a una solución de $CaCl_2$ 0.1 M con agitación constante por medio de un

montaje esquematizado en la figura 4. Una vez las gotas se sumergieron en la solución de cloruro de calcio se formaron las perlas por medio de la formación de alginato de calcio (insoluble en agua). Con el fin de lograr endurecer las macro-perlas, estas permanecieron en la solución con agitación durante 3 horas (Bashan, 1986a).

Posteriormente la solución restante fue descartada y las perlas fueron enjuagadas dos veces con agua destilada estéril y almacenadas en una solución salina 0.85% w/v en frascos herméticamente cerrados.

Harina: La biomasa de *P. putida* UA44MR-1 fue re-suspendida en una solución de Tween 80 al 0.05% en una relación 1:1. Por cada 400 mL de suspensión bacteriana se utilizaron 750 g de harina de trigo, 200 g de dextrosa, 50 g de caolín mineral y 200 mL de aceite vegetal. La harina, la dextrosa y el caolín fueron mezclados previamente y esterilizados en un recipiente independiente del aceite vegetal. Adicionalmente, se esterilizaron jeringas de boquilla ancha. En condiciones estériles, se fueron mezclando lentamente las células re-suspendidas, el aceite y la mezcla de harina. La masa formada fue esparcida con las jeringas en una bandeja limpia y desinfectada para dejarla secar a temperatura ambiente.

Suspensión bacteriana: La biomasa de *P. putida* UA44MR-1 fue re-suspendida en agua destilada estéril.

Evaluación de la viabilidad de las formulaciones: La viabilidad de las formulaciones se realizó mensualmente durante 3 meses. Las formulaciones fueron almacenadas a 4°C y 22°C y se determinó las UFC/g por el método de dilución en placa. De cada formulación se tomó 1 g y se disolvió en 9 mL de buffer fosfato de potasio pH 7.0, se agitó por 30 minutos. Posteriormente se realizaron diluciones seriadas hasta 10⁻⁵ y se platearon 100 uL de las diluciones 10⁻³ a 10⁻⁵ en TSA al 50% más 100 ppm. de rifampicina. Las cajas Petri fueron incubadas a 28°C de 3 a 5 días para el conteo de unidades formadoras de colonia por mL (UFC/mL)

Pruebas en frijol

Las pruebas de promoción de crecimiento se llevaron a cabo en la planta indicadora *Phaseolus vulgaris* variedad Calima de Agrosemillas Ltda. y con las formulaciones desarrolladas con base en *P. putida* UA 44MR-1.

La germinación de las semillas de frijol se realizó sumergiéndolas en agua por 1 hora y posteriormente fueron sembradas en Turba Canadiense en bandejas de 18 puestos, con tres semillas por puesto en el Invernadero de la Universidad EAFIT. Transcurridos 7 días se escogieron plantas de aproximadamente igual tamaño (longitud de tallo) y fueron trasplantadas en Turba Canadiense en bandejas de 18 puestos con una planta por puesto. Cada tratamiento consistió de 9 plantas y fueron inoculadas con diferentes dosificaciones:

TABLA 2
Dosificación en frijol

EXPERIMENTO	INOCULACIÓN UFC g.. sustrato
E1 y E2	4.5x10 ⁷ , 1.8x10 ⁷ y 9.0x10 ⁶
E3	9.0 x 10 ⁶
E4	2.5 x 10 ⁶ , x10 ⁴ y x10 ²

Pruebas en banano

Las plantas de banano "Gran enano" (*Musa AAA*) ya enraizadas y provenientes de la Universidad Católica de Oriente, fueron trasplantadas a suelo no estéril (2 tierra, 1 arena, ½ orgánico) de ECOFLORA en bolsas de 5 kilos y regadas por aspersión cada día por medio.

Se llevó a cabo un ensayo con formulaciones de talco y harina con base en *P. putida* UA44MR-1, el cual se describe en la tabla 3.

TABLA 3
Experimentación en banano

INOCULACIÓN		NÚMERO DE INOCULACIONES
UFC g.. sustrato	UFC g.. planta	
3,6*10 ⁵	9*10 ⁸	Inoculación mensual durante 4 meses

Durante dicho experimento se realizaron las siguientes mediciones de forma mensual:

- Altura de la planta: se tomó desde la base de la planta hasta el vértice formado entre la 1ª y la 2ª hoja completamente desarrollada.
- Diámetro de la planta: se tomó en la base del pseudotallo con un pie de rey.

Adicionalmente se realizó un muestreo destructivo para determinar el peso fresco y seco de los diferentes órganos: hojas, el pseudotallo, corno y raíz.

El peso fresco tanto aéreo como el de la raíz se midió en una balanza electrónica registrando cada órgano de la planta por separado. Posteriormente se secaron las plantas en un horno a 60° C durante 3 días para obtener el peso seco de cada órgano.

Las plantas fueron fertilizadas con 15-15-15 mensualmente adicionando 5 g/planta durante los dos primeros meses, y posteriormente con 2 g/planta durante los dos últimos meses. Adicionalmente fueron fertilizadas con Wuxal tapa negra (1 mL Wuxal en 1 L agua) adicionando 3 aspersiones/planta semanalmente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Prueba de ácido indol acético (AIA): La prueba de producción de ácido indol acético por parte de la *P. putida* UA 44 MR-1, cuantifica la cantidad de Indoles totales contenidos en el medio de cultivo.

Durante la prueba se encontró que la cantidad de indoles producidos por la *P. putida* UA44MR-1 es de 40.74±0.155 ppm.

Es de anotar que esta cantidad de indoles encontrados en las pruebas realizadas indican una alta producción por parte de la bacteria L de lo que probablemente es ácido indol acético, la cual es una hormona de crecimiento que favorece la elongación de las raíces.

Un resultado similar fue obtenido por Patten y Glick (2002) quienes evaluaron la producción de AIA de dos cepas, una silvestre y otra modificada de *P. putida* GR12-2, encontrando que a 500 ppm de triptófano la producción de AIA de la bacteria silvestre es de 32.7 ± 2.9 ppm. Con esta cepa, Patten y Glick también realizaron estudios en cultivos de canola donde la bacteria *P. putida* GR12-2 logró en un 35% la elongación de las raíces. La explicación de éste resultado es la activación de la enzima ACC sintetaza, gracias al AIA producido, la cual regula la producción de ACC (1-aminociclopropano 2-carboxylato), que es absorbida nuevamente por la bacteria y convertida en amoniaco y alfa cetobutirato, si ésta produce el ACC deaminaza, generando la elongación de las raíces (Glick *et al.*, 1998, Kloepper, 2003) ya que estos productos de la hidrólisis son usados por la bacteria como fuente de nitrógeno y carbono (Honma y Shimomura, 1984; citado en Ramírez y Mellado, 2000).

Sin embargo, puede presentarse otra ruta metabólica alterna a la presentada previamente, donde en lugar de estimular el crecimiento de las raíces, se genera una inhibición en el desarrollo de la planta. Si la bacteria no produce la ACC deaminaza, el ACC no es absorbido por la bacteria sino que la ACC oxidaza, producida por la planta, lo convierte en Etileno, el cual provoca la maduración de los frutos y la inhibición en la elongación de las raíces (Glick *et al.*, 1998).

Medición de la capacidad quitinolítica: El propósito de sembrar la bacteria en éstos tres medios, era verificar su capacidad de transformar la quitina en fuente de carbono y otros nutrientes esenciales para su crecimiento, a través de la producción de quitinasas. De ésta forma, si la *P. putida* UA44 MR-1 crece o no en éstos medios, con diferentes limitaciones, quiere decir que si produce dichas enzimas; característica que le permite ser competitiva en un medio frente a otras bacterias que no tengan esta capacidad.

La *P. putida* UA44MR-1 no mostró crecimiento ni formación de halo en los medios 2 ni 3, compuestos por agar-agar y quitina coloidal y algunas sales y quitina coloidal, respectivamente. La bacteria mostró crecimiento en el medio 1, compuesto por agar nutritivo y quitina coloidal, medio en el que puede crecer fácilmente la bacteria debido a su alto contenido de nutrientes y fuentes de carbono del agar nutritivo.

En este contexto, aunque la bacteria creció en el medio 1, no creció en los medios 2 ni 3. Esto significa que la bacteria pudo haber crecido en este ambiente gracias a la disponibilidad de fuente de carbono y demás nutrientes que le brinda el agar nutritivo sin usar específicamente la quitina del medio. A diferencia de esto, que la bacteria no haya crecido en los otros medios (2 y 3), los cuales tenían mayores limitaciones en cuanto a fuente de carbono y otros nutrientes, traduce que ésta no tuvo la habilidad de aprovechar la quitina como fuente principal para poder sobrevivir y desarrollarse.

Este resultado obtenido es opuesto lo encontrado por Ramírez, 2005, quien a través de pruebas similares observó que la *P. putida* UA44 silvestre (sin resistencia inducida a rifampicina) mostró respuesta positiva en la degradación de quitina. Teniendo en cuenta esto, es importante resaltar que una de las posibles razones para que la bacteria no produzca quitinasas, es la resistencia a la que fue inducida en laboratorio, contra rifampicina, consiguiéndose una posible alteración del metabolismo de la bacteria, y limitando indirectamente la producción de quitinasas.

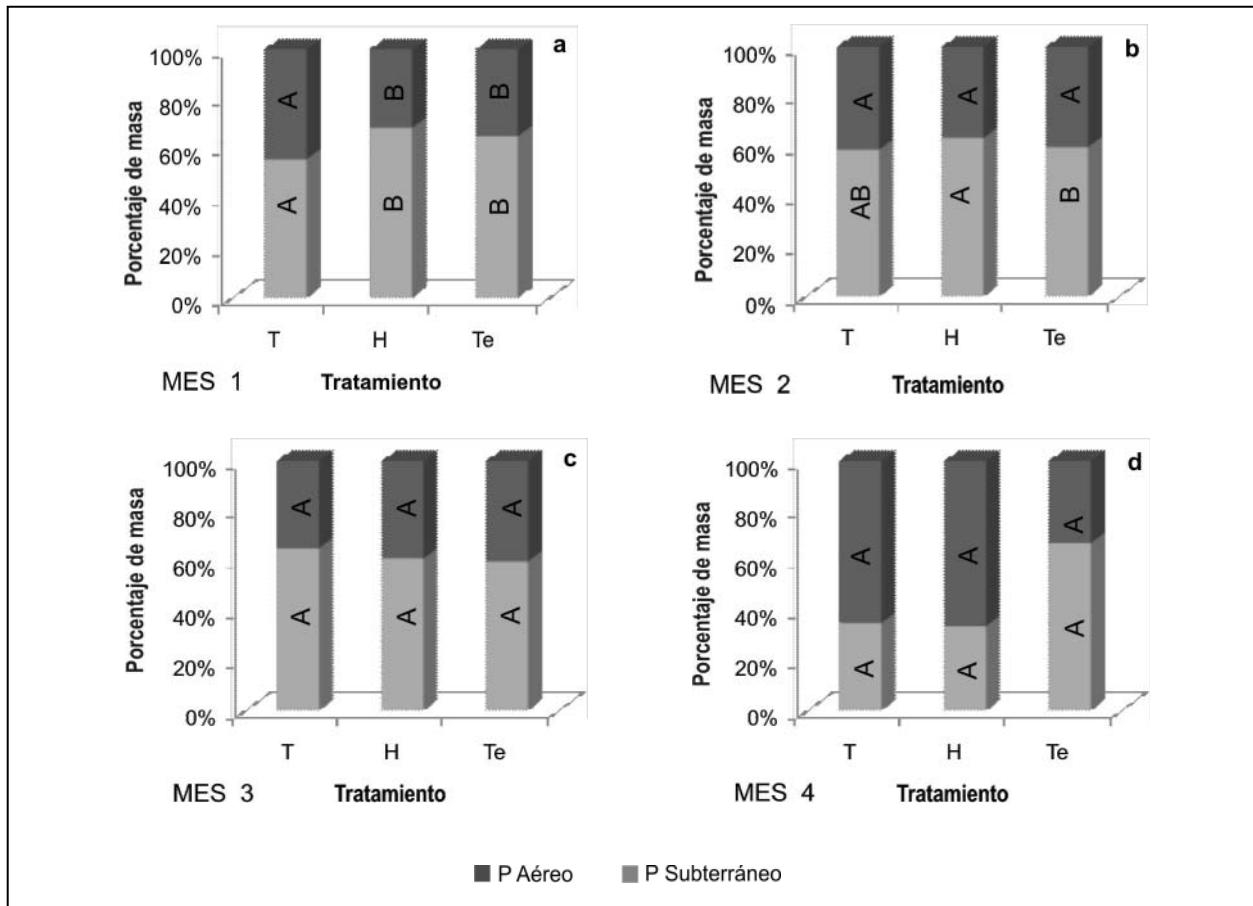
Pruebas en frijol: Con las diferentes pruebas en frijol, se observó que ninguno de los tratamientos inoculados promovió el crecimiento de la planta indicadora, lo cual pudo haber ocurrido debido a que la bacteria, que es nativa de suelos bananeros, no experimenta una relación simbiótica con la planta de frijol. De igual forma, se relaciona esta respuesta con los niveles de dosificación usados en los diferentes experimentos.

Pruebas en banano: Las formulaciones de talco y harina con base en *P. putida* UA44 MR1 promovieron el crecimiento de las plantas de banano cultivar Gran enano a nivel de invernadero durante los dos primeros meses de desarrollo. La formulación de talco aumentó la masa aérea de la planta de banano cultivar Gran enano, superando significativamente al testigo en el primer mes de evaluación y Las formulaciones de talco y harina con base en *P. putida* UA44.

MR1 promovieron el crecimiento de las plantas de banano cultivar Gran enano a nivel de invernadero durante los dos primeros meses de desarrollo. La formulación de talco aumentó la masa aérea de la planta de banano cultivar Gran enano, superando significativamente al testigo en el primer mes de evaluación y la formulación de harina aumentó la masa subterránea de la planta superando significativamente al testigo en el segundo mes de evaluación.

Las formulaciones evaluadas no promovieron el crecimiento aéreo ni radical de la planta de banano en comparación con el testigo en el tercer y cuarto mes de evaluación. En la **figura 1** se pueden observar los resultados descritos.

FIGURA 1
Porcentaje de participación aérea (pseudotallo y hojas) y subterránea (raíz y cormo) de la planta de banano
 a) mes 1, b) mes 2, c) mes 3, d) mes 4.



Evaluación de la viabilidad de las formulaciones: Las pruebas realizadas para verificar si los vehículos usados ayudan a la supervivencia de la bacteria, por un período de tiempo prolongado, muestran que la *P. putida* UA 44-MR1 en el tratamiento de talco y almacenado durante

90 días declina la población bacteriana de 10^8 a 10^6 UFC/g, manteniéndose desde el primer mes hasta el tercero con 10^6 UFC/g, mientras que la formulación de harina presenta una disminución en densidad poblacional mayor, pasando de 10^8 UFC/g a 10^5 UFC/g.

REFERENCIAS

- Agrocadenas, 2006. La cadena del banano en Colombia: una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005 [online]. Observatorio de Competitividad Agrocadenas.
- Bashan, Y. 1986a. Alginate beads as Synthetic inoculant carriers for slow release of bacteria that affect plant growth. *App. Environ. Microbiology*: 51, pp 1089-1098.
- Cheryl L. Patten y Glick B.R. 2002. Role of *Pseudomonas putida* Indoleacetic Acid in Development of the Host Plant Root System. *Appl Environ Microbiol.*; 68(8): 3795–3801
- Cooper, R. 1959. Bacterial fertilizers in the Soviet Union. *Soils Fertil* 22: 327-333
- Glick, B. R., D. M. Penrose, and J. Li. 1998. A model for the lowering of plant ethylene concentrations by plant growth-promoting bacteria. *J. Theor. Biol.* 190:63–68.
- Kloepper, J.W 2003. A review of mechanisms for plant growth Promotion by PGPR. 6th International PGPR Workshop, 5-10 October 2003.
- Patten, C y Glick B,R. 2002. Role of *Pseudomonas putida* Indoleacetic Acid in Development of the Host Plant Root System. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol.68 No 8 pp 3795-3801
- Pérez, J.E. 2007. Selección de mutantes espontáneos resistentes a rifampicina de rizobacterias aisladas de banano y plátano. Universidad de Antioquia, Facultad de ciencias exactas y naturales.
- Ramírez, C.A. 2005. Aislamiento y evaluación de rizobacterias con potencial biocontrolador y promotor de crecimiento en plantas de banano. Universidad Nacional Colombia, Facultad de ciencias exactas.
- Ramírez, L.E. y Mellado, J. 2000. Bacterial biofertilizers. Cap. 5, pp.144-161
- Vidhyasekaran, P., and Muthamilan, M. 1995. Development of formulations of *Pseudomonas fluorescens* for control of chickpea wilt. *Plant Dis.* 79, 782-786.
- Young C.C., Rekha, P.D., Lai, W.A. y Arun, A.B. 2006. Encapsulation of plant growth promoting bacteria in Alginate beads enriched with Humic acid. Department of soil and environmental Sciences.

EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE PECTINASAS A PARTIR DE *ASPERGILLUS NIGER* POR FERMENTACIÓN EN ESTADO SEMISÓLIDO

Alejandra García, agarcia8@eafit.edu.co - Yuly Andrea Ramírez, yramirez@eafit.edu.co

RESUMEN

La clarificación enzimática surge como una alternativa para sustituir los procesos mecánicos de extracción y clarificación de jugos naturales, ofreciendo ventajas en términos de rendimiento, filtrabilidad y fluidez. Las pectinasas, incluyendo la pectiniliasa (PL), la pectinestearasa (PE) la exopoligalacturonasa (exo-PG) y la endopoligalacturonasa (endo-PG) son excelentes para ser aplicadas en los procesos de clarificación, dada su capacidad de degradar la pectina presente en las frutas. El presente trabajo evalúa la producción de pectinasas a partir de *Aspergillus niger* por fermentación en estado semisólido con cáscara de naranja como sustrato inductor, con el propósito de identificar las mejores condiciones de pH y concentración de pectina para maximizar las productividades de formación de las enzimas pectinolíticas. Se encontró que las mejores condiciones para la producción de las enzimas dependen del tipo de pectinasa que se desee potencializar potencializar en el complejo enzimático, es decir, si lo que se busca es maximizar la productividad de las poligalacturonasas, las mejores condiciones son 10 g/L de pectina y pH 5.0, si es la pectinestearasa, 20 g/L y pH 6.0 y si es la pectiniliasa, 20 g/L y pH 4.0.

Palabras clave

Fermentación en estado semisólido, clarificación enzimática, pectinasas, actividad enzimática, *Aspergillus niger*.

ABSTRACT

Enzymatic clarification emerges as an alternative for the substitution of the mechanic extraction and clarification processes of the natural juice industry, presenting advantages in terms of production yield, filterability, and fluidity. Pectinases, including pectin lyase (PL), pectinestearase (PE), exopolygalacturonase (exo-PG) and endopolygalacturonase (endo-PG) are an excellent for clarification processes applications, given their ability to degrade the pectin contained in fruits. The present investigation evaluates the production of pectinases by *Aspergillus niger* grown by slurry state fermentation (SLSF) with orange peel as the inductive substrate with the purpose of identifying the best initial pH and pectin concentration conditions in order to maximize the productivity of the pectinolytic enzymes. The results indicate that the best conditions for the production of the enzymes depend on the type of pectinase, wich means that the best conditions for exo-PG and endo-PG are 10 g/L of pectin and pH 5.0, for the pectinestearase 20g/L of pectin and pH 6.0 and for PL 20g/L of pectin and pH 4.0.

Key words

Slurry state fermentation, enzymatic clarification, pectinases, enzymatic activity, *Aspergillus niger*.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la industria de los alimentos, en especial la industria de los jugos de fruta, enfrentan el reto de mejorar la productividad de sus procesos y la calidad nutricional de sus productos para satisfacer un mercado creciente, que busca excelentes propiedades organolépticas y altos requerimientos nutritivos.

Las pectinasas surgen como una respuesta a esta necesidad, ya que los métodos enzimáticos, en reemplazo de los métodos tradicionales de extracción y clarificación del jugo, logran una mayor fluidez, filtrabilidad y rendimiento (Demir *et al.*, 2001).

Las pectinasas son un grupo de enzimas que tienen la capacidad de degradar la pared celular de las células vegetales y de hidrolizar la pectina presente en la fruta, la cual es un polisacárido constituido principalmente por residuos de ácido D-galacturónico. Dentro del grupo de estas enzimas, se encuentran la exo-PG, la endo-PG, la PE y la PL, cada una de las cuales actúa de diferente manera sobre la cadena de pectina (Dogan y Tari, 2008; Hadj-Taieb *et al.*, 2002; Castilho *et al.*, 2000).

Existen varios microorganismos que producen pectinasas, siendo los hongos filamentosos del género *Aspergillus*, *Rizhopus* y *Trichoderma* los más empleados, ya que excretan cerca del 90% de las pectinasas al medio de cultivo, facilitando así los procesos de separación y purificación (Blandino, 2001).

En América Latina, la producción de pectinasas es escasa, es por eso que nuestros gobiernos le deben apostar al desarrollo de la biotecnología y promover investigaciones que busquen suplir la demanda de productos de síntesis biológica para aplicaciones en la industria de alimentos (Carrera, 2003).

Los resultados de esta investigación pretenden contribuir al desarrollo de procesos biológicos para la generación de enzimas pectinolíticas, un producto de alto valor agregado cuyas aplicaciones industriales generan un factor de diferenciación en los procesos de la industria de alimentos. De otro lado, el uso de desechos agroindustriales como

la cáscara de naranja es una propuesta para apostarle a la producción más limpia y un medio para disminuir los costos económicos que implican el diseño de un proceso biotecnológico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Microorganismo y conservación

La cepa de *A. niger* fue donada por el Centro de Investigación en Biotecnología (CIBIOT) de la Universidad Pontificia Bolivariana. La cepa madre se conservó en agar Sabouraud a 4 °C, de esta se realizaron réplicas y se garantizó que la cepa de trabajo fuera de tercera generación y con una edad de 15 días.

2.2 Producción de esporas

Las esporas fueron lavadas con caldo Sabouraud y fueron recuperadas hasta obtener una concentración aproximada de 1×10^6 esporas/ml, contadas en cámara de Neubauer. Posterior a la cosecha de esporas en erlenmeyers de 250 ml. la suspensión obtenida se agitó a 150 rpm durante 24 horas, al cabo de las cuales se realizó la inoculación.

2.3 Medio de cultivo

Se usaron cáscaras de naranja de la variedad Valencia como fuente de carbono. Éstas fueron obtenidas de un negocio de jugos de frutas ubicado en la Universidad Eafit.

Mediante una extracción por hidrólisis ácida se determinó la cantidad de pectina contenida en las cáscaras, encontrando un rendimiento pectina - cáscara de 5.6 %.

Para la preparación del medio de cultivo, se recolectaron las cáscaras de naranja y se les retiraron los sacos de jugo que aún estaban adheridos a ellas. Posteriormente, las cáscaras fueron lavadas con abundante agua y finalmente, fueron licuadas en agua a la concentración requerida con los demás nutrientes como fue propuesto por Abdel Mohsen (1996) (5 g/l de peptona, 1 g/l de extracto de

levadura, 0.5 g/l de sulfato de magnesio y 1 g/l de fosfato monopotásico). La esterilización del medio de cultivo se efectuó en autoclave a 120°C y 15 psi durante 20 minutos.

2.4 Fermentación

La fermentación se realizó a escala de laboratorio en erlenmeyers de 250 mL y se adicionó el sustrato rico en pectina en estado semisólido, ajustando un volumen aproximado de 50 mL.

La temperatura se mantuvo a 30°C y la velocidad de agitación a 220 rpm (De Gregorio *et al.*, 2002; Pashova *et al.*, 1999; Angelova *et al.*, 1997) y el proceso se realizó en presencia de luz durante 9 días.

El pH inicial fue un factor de evaluación que se varió en un rango de 4.0 a 6.0 con incrementos de una unidad, también se evaluó el efecto de la concentración del sustrato a 10, 15 y 20 g/L. Así, se constituyeron tres niveles para cada factor.

2.5 Obtención de muestras

El producto de la fermentación fue sometido a una extracción sólido – líquido con metabisulfito de sodio 0.1 M en una relación producto:solvente de 1:10. La temperatura de operación fue entre 28 °C y 30 °C y la mezcla se mantuvo bajo agitación constante durante 15 minutos (Singh *et al.*, 1999), posteriormente la mezcla fue filtrada empleando bomba de vacío y papel filtro comercial. La biomasa fue secada a 50 °C durante 24 horas y se empleó para realizar los análisis de crecimiento celular y el líquido filtrado constituyó el crudo enzimático, el cual fue almacenado en tubos falcon de 50 mL y conservados a -4°C, durante 7 días, momento en el que se le realizaron los análisis correspondientes. Las muestras se tomaron a intervalos de 8 horas durante los primeros 3 días y luego cada 24 horas.

2.6 Crecimiento celular

El crecimiento celular se cuantificó por el método de peso seco y determinación de proteína del micelio. Para este propósito, se construyó una curva de calibración que relaciona peso seco del micelio y proteína total.

2.7 Consumo de sustrato

El contenido de azúcares reductores se determinó por el método del ácido 3,5-dinitrosalisílico (DNS) (Miller, 1959).

2.8 Proteína total

La evaluación de proteína se realizó mediante el método de Lowry (1951), con albúmina de suero bovino (BSA) como estándar.

2.9 Actividad enzimática

2.9.1 Exopoligalacturonasa

La cuantificación de Exo-PG se realizó colorimétricamente a una longitud de onda 540 nm. Se tomaron 0.25 ml. del crudo enzimático y se adicionaron 0.25 ml. de una solución de pectina al 1% en buffer acetato 0.1 M y pH 4.5. Las muestras se incubaron a 45 °C por 30 minutos y la generación de grupos reductores se midió con el método DNS (Miller, 1959). La muestra en el tiempo cero constituyó el blanco.

Una unidad de Exo-PG se define como la cantidad de enzima necesaria para hidrolizar la pectina y formar 1 μ mol de ácido galacturónico por minuto, en las condiciones de reacción especificadas. (Debing *et al.*, 2006).

2.9.2 Endopoligalacturonasa

Se tomaron 2.5 ml de crudo enzimático y se mezclaron con 7.5 ml de 1% (p/v) de pectina en buffer acetato 0.1 M, pH de 4.5 en un tubo de ensayo. La solución se incubó a 45 °C durante 10 minutos, luego se detuvo la reacción enfriando durante 2 minutos hasta alcanzar un temperatura de 24 °C. Posteriormente se procedió a medir la viscosidad empleando un viscosímetro de Ostwald. La muestra en el tiempo cero constituyó el blanco.

Una unidad (U) de Endo-PG se define como la cantidad de enzima que reduce la viscosidad de la solución en 50% por minuto bajo las condiciones mencionadas (Debing *et al.*, 2006).

2.9.3 Pectinlasi

La enzima PL fue analizada midiendo el incremento en la absorbancia a 235 nm de una solución de pectina cítrica hidrolizada por el crudo enzimático. La mezcla de la reacción fue de 4.5 mL de solución de pectina al 0.5 % (p/v) en buffer fosfato 0.1 M pH 6.0 y 1.5 mL del crudo enzimático. Se realizó una incubación a 40 °C durante 15 min. El blanco o la muestra de referencia para realizar las comparaciones fue la muestra con el extracto crudo correspondiente al momento cero.

Una unidad de la actividad enzimática (U) fue definida como la cantidad de enzima que genera un incremento en la absorbancia de 0.01/min a 235nm bajo las condiciones mencionadas. (Rodríguez-Nogales *et al.*, 2008, Bai, *et al.*, 2004)

2.9.4 Pectinesterasa

La PE se analizó midiendo el metanol liberado de una solución de pectina cítrica metoxilada mediante espectrofotometría a una longitud de onda de 203 nm. La mezcla de reacción fue de 4 mL de una solución de pectina metoxilada al 1 % (p/v) en buffer acetato pH 5.0 y 1 mL del crudo de enzima. Se realizó una incubación a 50 °C por 10 min. El blanco o la muestra de referencia para realizar las comparaciones fue la muestra con el extracto crudo correspondiente al momento cero.

Previamente, se realiza una curva de calibración que relaciona la absorbancia de soluciones de metanol a diferentes concentraciones.

Una unidad enzimática (U) fue definida como la cantidad de PE que libera 1 μ mol de metanol por minuto bajo las condiciones especificadas. (Silva, *et al.*, 2005).

2.9.5 Análisis estadístico y diseño de experimentos

Se plantó un diseño multifactorial 3², los factores fueron pH inicial a niveles de 4.0, 5.0 y 6.0 y concentración de pectina en los niveles de 10, 15 y 20 g/L.

Previo a realizar el análisis de varianza, se comprobó la igualdad de varianzas y si las variables respuesta presentaban distribución normal mediante la prueba de Kolmogorov Smirnov. Comprobada estas condiciones, se procedió a realizar la prueba ANOVA con un nivel de confianza del 95 %. Si las variables presentaban distribución normal se realizaba un análisis de medias con el método de Tukey, de lo contrario, se realizaba una prueba no paramétrica con el método de Kruskal Wallis. El software que se empleó fue Statgraphics Plus 5.0.

2.9.6 Cuantificación de parámetros cinéticos

Los parámetros cinéticos calculados fueron biomasa producida (ΔX), velocidad específica de crecimiento celular (μ_x), rendimiento biomasa sustrato (Y_{xs}), productividad de biomasa (Px), velocidad volumétrica de consumo de sustrato (μ_s) y la productividad de cada enzima.

La cantidad de biomasa producida en gramos de micelio por litro de sustrato (g/L), se calculó efectuando la diferencia entre la cantidad de biomasa máxima producida y la cantidad correspondiente al momento cero de la fermentación. La velocidad específica de crecimiento celular se calculó hallando la pendiente que resulta al graficar los valores de logaritmo natural de biomasa correspondientes a los puntos de la fase exponencial del crecimiento con respecto al tiempo, las unidades de dicho parámetro son d⁻¹.

El rendimiento observado de biomasa sustrato se calculó hallando la pendiente que resulta al graficar los valores de concentración de biomasa respecto a la concentración de sustrato en cada punto de la fase exponencial del crecimiento celular. Para calcular la productividad de biomasa, se relacionó la biomasa producida por hora en los puntos de la fermentación que correspondían a la fase estacionaria. El mayor valor con la menor desviación estándar fue elegido como la productividad de biomasa cuya unidad de medida es g/Lh.

Respecto a la velocidad volumétrica de consumo de sustrato, ésta fue calculada graficando los valores de concentración de sustrato respecto al tiempo sólo en la fase exponencial del crecimiento celular. La pendiente

negativa de dicha gráfica correspondió a μ_s cuya unidad de medida es g/Ld.

La productividad de cada enzima fue calculada respecto al inverso de cada unidad enzimática U. Entonces, los máximos valores de 1/U se dividieron entre el tiempo en horas. De esta manera, se eligió la máxima productividad con la mínima desviación estándar.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Crecimiento celular

En la figura 1 se evidencia que la concentración de pectina favorece la producción de biomasa alcanzándose la máxima cantidad de biomasa producida a 20 g/L de pectina (56 g/L). Al comparar el efecto del pH, se encuentra que para la concentración de pectina de 10 g/L el crecimiento celular tiene un comportamiento semejante a pH inicial de 4.0 y 5.0. Sin embargo, a pH 6.0 no se evidencia un aumento en la biomasa que sea significativo. A concentraciones de 15

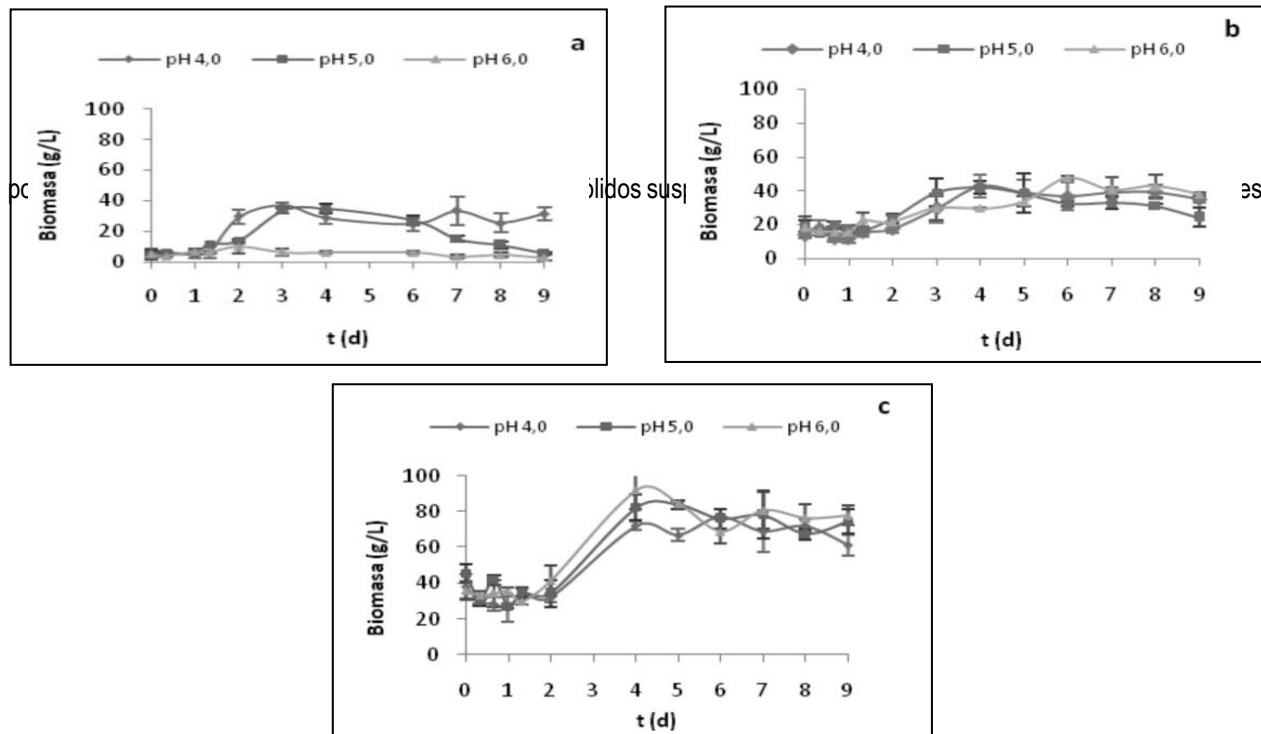
g/L y 20 g/L el pH no representa cambios notables en las curvas del crecimiento.

Las etapas del crecimiento celular se presentaron en diferentes tiempos de la fermentación según fue la concentración de pectina. La fase de latencia duró 24, 32 y 48 horas aproximadamente para las concentraciones de pectina de 10, 15 y 20 g/L, respectivamente. Esto significa que, a mayor cantidad de sólidos suspendidos en el sustrato la fase de latencia toma más tiempo, pues el microorganismo debe degradar mayor cantidad de material vegetal.

La fase exponencial duró aproximadamente 2 días para todas las fermentaciones, al término de ésta, se presentó la máxima concentración de biomasa (ΔX).

Al salir de la fase exponencial, el microorganismo inicia la fase estacionaria del crecimiento celular. En algunas fermentaciones se evidenció una desaceleración lenta en el crecimiento, estas corresponden a las de pH 5.0.

Cinética de crecimiento celular de *A. niger* en fermentación en estado semisólido con cascara de naranja.
(a) 10 g/L de pectina (b) 15 g/L de pectina (c) 20 g/L de pectina



la diferencia entre la concentración de biomasa máxima y la inicial es mayor a 20 g/L de pectina al cabo de 4 días (96 horas), presentando valores de 34, 36,7 y 56 g/L a pH 4.0, 5.0 y 6.0, respectivamente.

Aunque la producción máxima de biomasa se obtiene a 20 g/L de pectina, la velocidad específica de crecimiento bajo esta condición es la más baja, con un valor de 0.322 d⁻¹ a pH 4.0 en contraste con uno de 1.53 d⁻¹ a 10 g/L y pH 4.0, además, la productividad es menor que la obtenida en el tratamiento de 10 g/L y pH 5.0. Entonces, obtener mayor concentración de biomasa implica menor velocidad específica de crecimiento y una fermentación más larga, aproximadamente de 4 días.

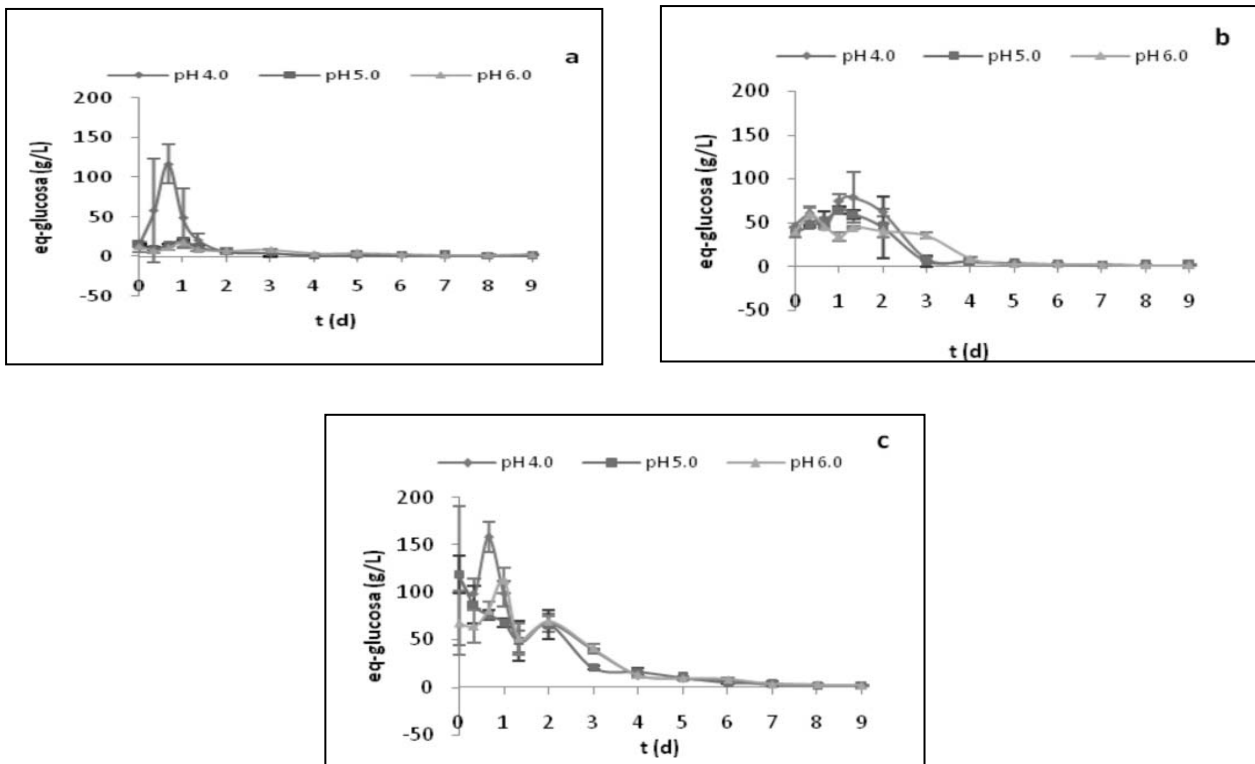
En general, el rendimiento biomasa sustrato (Y_{xs}) es similar en todas las condiciones de fermentación, se producen 0.42 g/L de biomasa por cada unidad de de eq-glucosa consumido provenientes de la cáscara de naranja.

Se realizó el análisis estadístico mediante un análisis de varianza ANOVA multifactorial e indicó que el pH no afecta significativamente la productividad de biomasa, con un valor-p calculado de 0.108. Sin embargo, la concentración de pectina y la interacción entre los factores si afecta significativamente, encontrando valores-p de 0.02 y 0.0031, respectivamente. Las condiciones que maximizan la productividad de biomasa son un pH 5.0 y 10 g/L de pectina.

Consumo de sustrato

Como se muestra en la figura 2, al inicio de cada proceso de fermentación la concentración de azúcares es diferente y depende, principalmente, de la concentración de cáscaras de naranja. Así, a mayor cantidad de cáscaras, es mayor la concentración de eq-glucosa en el medio de cultivo.

FIGURA 2
Cinética de consumo de sustrato a diferentes concentraciones de pectina y pH inicial.



(a) 10 g/L de pectina (b) 15 g/L de pectina (c) 20 g/L de pectina

El pH inicial no genera variaciones significativas en los tratamientos que corresponden a 15 y 20 g/L de pectina. Sin embargo, a 10 g/L el pH 4.0 cambia de manera drástica la concentración de eq-glucosa, pues a las 16 horas (0.666 días) la concentración se eleva a un máximo de 116 g/L. En general, la tendencia de las curvas es a aumentar en las primeras horas de la fermentación correspondientes a la etapa de latencia, para generar productos hidrolíticos de la pectina y la celulosa presente en el material vegetal y posteriormente, consumírseles, acción que ocurre en la fase exponencial del crecimiento celular y que genera un descenso en la concentración de azúcares entre 3 y 5 g/L de eq-glucosa, aproximadamente. A esta concentración mínima, el microorganismo se encuentra en fase estacionaria.

La velocidad volumétrica de consumo de sustrato fue mayor en los tratamientos de 10 g/L y pH 4.0 y 20 g/L y pH 5.0, con valores de 76,6 y 67, respectivamente.

3.3 Proteína total

La concentración promedio de proteína que se obtuvo en el día 0 corresponde aproximadamente a la disponible en el medio de cultivo por la peptona (5 g/L) y el extracto de levadura (1 g/L). La concentración de proteína promediada en el día 0 fue de 3.7, 4.8 y 4.0 g/L para una concentración de pectina de 10, 15 y 20 g/L, respectivamente. Luego de analizar el comportamiento de la cinética de proteína total para cada caso, se concluye que la cinética de proteína total presenta un comportamiento tanto de consumo, como de generación, lo cual evidencia que *A. niger* produjo pectinasas a la misma vez que iba consumiendo sustrato.

3.4 Actividad enzimática

3.4.1 Endo-PG

En la figura 3 se puede apreciar la cinética de actividad de la endo-PG para todas las fermentaciones realizadas.

En todas las fermentaciones se pudo observar que fue necesario alrededor de 32 horas (1.333 días) para que se

comenzara a presentar actividad enzimática de endo-PG. Esto se puede deber a que el microorganismo necesita este tiempo para degradar el tejido vegetal donde la pectina se encuentra embebida.

En estudios realizados por Rodríguez-Nogales y colaboradores (2008) donde se evaluó la producción de enzimas crudas (poligalacturonasa y pectiniliasa), a partir de *A. niger* CECT2088, empleando pulpa de manzana, se obtuvo un comportamiento similar de actividad tardía de la enzima. Ellos observaron que para mayores concentraciones de pulpa, no se detectó actividad extracelular de la poligalacturonasa, lo cual explican por el hecho de que bajo esas condiciones, puede ser posible que el hongo no secretó actividad enzimática hasta que las fuentes de carbono simples hubieran sido consumidas. Según Rodríguez-Nogales y colaboradores (2008), éstos resultados concuerdan con los obtenidos por otros autores, en cultivos con *A. niger* suplementados con pectina y azúcares (glucosa y sacarosa). Estos autores le atribuyeron este comportamiento a la inhibición por sustrato que ocurre en los primeros días de la fermentación como resultado de la presencia de glucosa y sacarosa. Mamma y colaboradores (2008) reportan que la cáscara de naranja posee un 41 % p/p de compuestos solubles en agua, de los cuales la glucosa aporta un 14.6 % p/p, la fructosa un 15.5 % p/p y la sacarosa 10.9 % p/p.

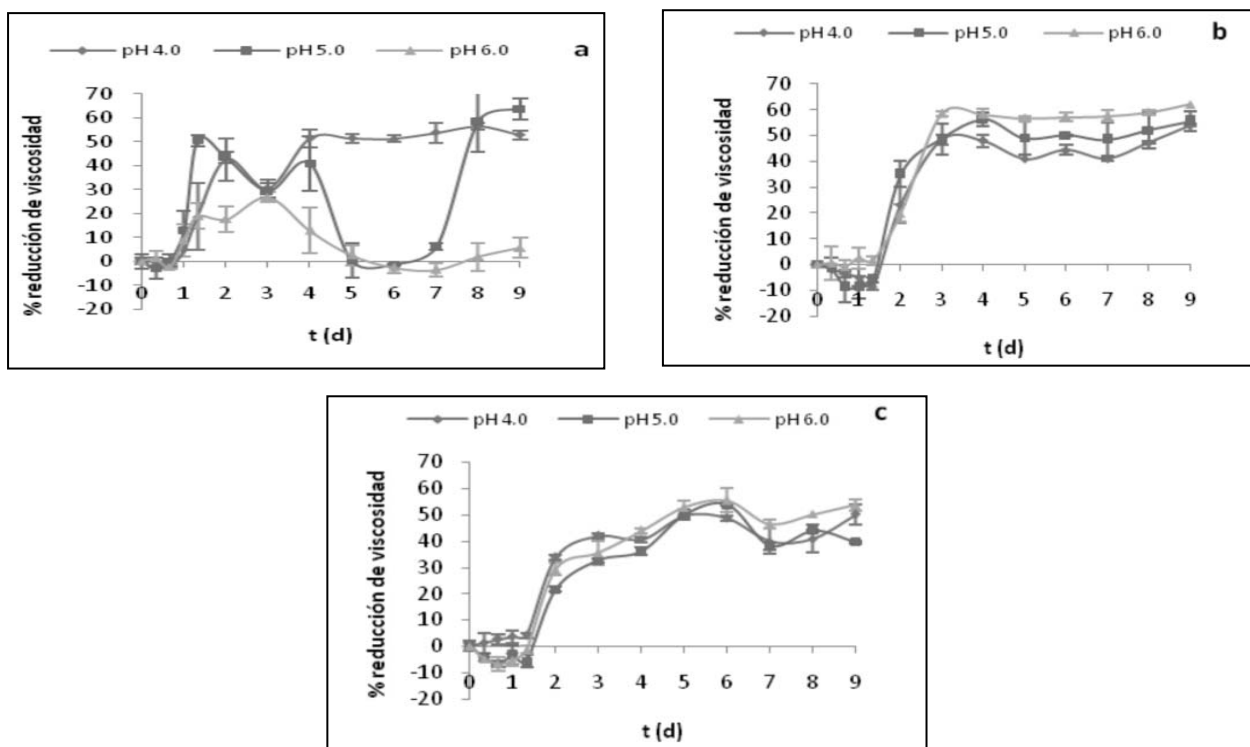
En la cinética de crecimiento celular (ver figura 1) la fase exponencial tardó aproximadamente 32 horas en comenzar y esto concuerda con el momento en que la actividad enzimática de endo-PG comienza a hacerse evidente, lo cual indica que la producción de esta enzima está asociada al crecimiento celular de *A. niger*.

Tanto el máximo porcentaje de reducción de la viscosidad (63.578 %) como la máxima productividad ($0.91\text{U}\cdot\text{h}^{-1}$) se dieron a pH 5.0 y una concentración de pectina de 10g/L en el día 9 y 1.33 (32 h), respectivamente. En la literatura existen algunos estudios en los cuales se realizaron fermentaciones en estado semisólido y la actividad óptima de las poligalacturonasas se dio a pH 5.0 (Mamma *et al.*, 2008; Schnitzhofer y colaboradores, 2007; Mohamed e investigadores, 2006; Niture y Pant, 2004).

El análisis de varianza no paramétrico realizado mediante el método de Kruskal Wallis, arrojó que la concentración de pectina afecta significativamente la productividad de endo-PG, mientras que el pH no. Los valores-p para la concentración de pectina y pH inicial fueron 0.0025 (<0.05) y 0.271 (>0.05), respectivamente.

FIGURA 3

Cinética de actividad de endo-PG. (a) 10 g/L de pectina (b) 15 g/L de pectina (c) 20 g/L de pectina



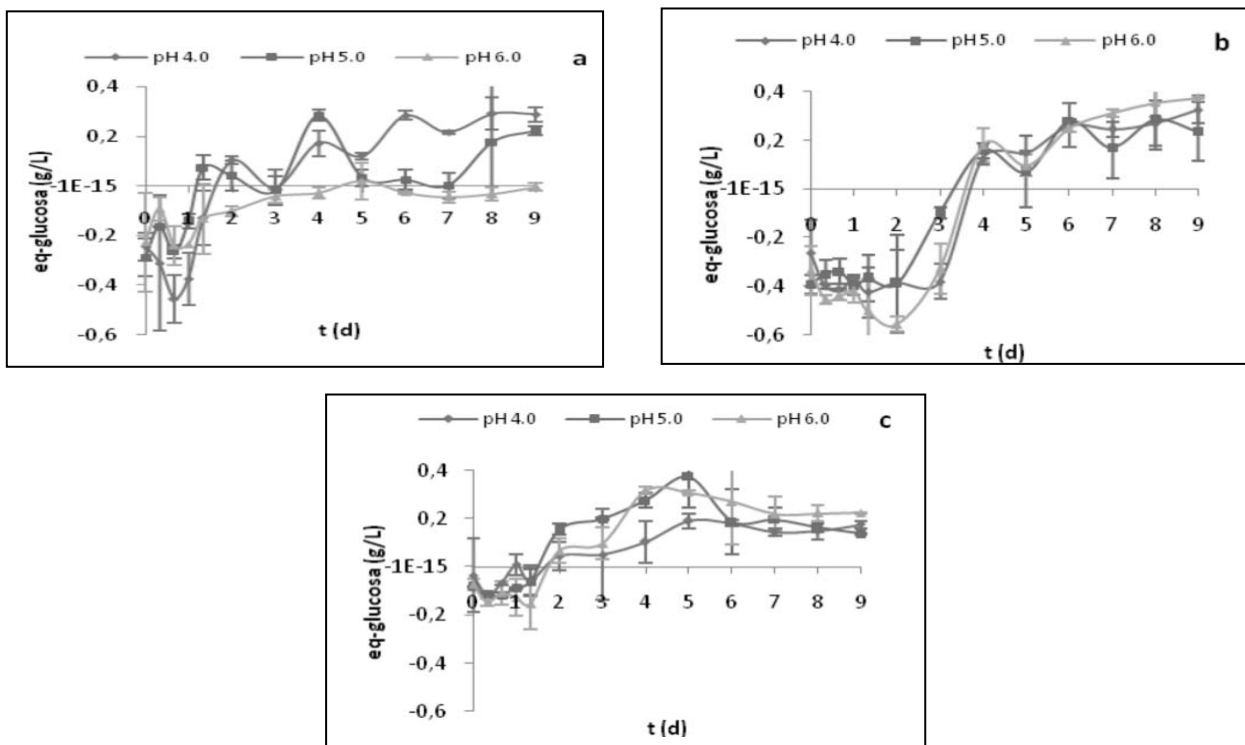
3.4.2 Exo-PG

Al relacionar la cinética de actividad enzimática de endo-PG (figura 3) y exo-PG (figura 4) se puede identificar el mecanismo de acción de cada enzima en cuanto a los tiempos en que se evidencia el inicio de la actividad enzimática y el valor máximo de la misma. De esta manera, se observa que la producción de endo-PG se inició a las 24 horas en la fermentación de 10 g/L de pectina y a las 32 horas (1.333 días) en las de 15 y 20 g/L y la máxima producción de la enzima se presentó entre las 48 y 72 horas (3 días), aproximadamente, tiempo a partir del cual se inició la actividad de exo-PG. La máxima actividad de ésta se produjo al sexto día.

Se puede inferir que la exo-PG actúa una vez ha actuado la endo-PG, pues es necesario que ésta última hidrolice la cadena de pectina generando mayor cantidad de oligosacáridos con extremos reductores, sustrato que posee mayor afinidad hacia la exo-PG.

De forma global, se puede inferir que a una concentración de 10 g/L de pectina, cambios en el pH afectan significativamente los resultados. Un pH inicial de 4,0 maximiza los resultados y a pH 6.0 se inhibe la producción de la exo-PG, esto significa que la producción de la enzima se potencializa en condiciones de acidez. Sin embargo, a 15 y 20 g/L de pectina el pH no ejerce efectos de variabilidad en los resultados.

FIGURA 4
Cinética de producción de exo-PG. (a) 10 g/L de pectina (b) 15 g/L de pectina (c) 20 g/L de pectina



Respecto a eq-glucosa liberados, se tiene que el pH 5.0 es el pH que favorece en mayor proporción la producción de la exo-PG y el pH 6.0 genera un efecto negativo en la síntesis de tal enzima. De igual forma, se infiere que 15 g/L de pectina en el medio de cultivo promueve una mayor obtención de exo-PG en estado semisólido al sexto día de fermentación.

A cerca de la productividad, estadísticamente se obtuvo que la interacción entre pH inicial y concentración de pectina afecta significativamente la variable respuesta, arrojando un valor-p de 0.0029, siendo el mejor tratamiento una concentración de pectina de 10 g/L y pH 5.0 pasados 4 días de la fermentación.

En investigaciones realizadas en estado semisólido con pulpa de limón para producir poligalacturonas a partir de *T. viridae* y *A. niger*, se reportó que la exo-PG presentó la máxima actividad específica en el día 14 de la fermentación (De Gregorio, *et al.*, 2002). En contraste con el estudio

realizado con cáscara de naranja, se evidencia que se requiere un largo período para obtener la enzima, lo cual es una ventaja en términos de productividad.

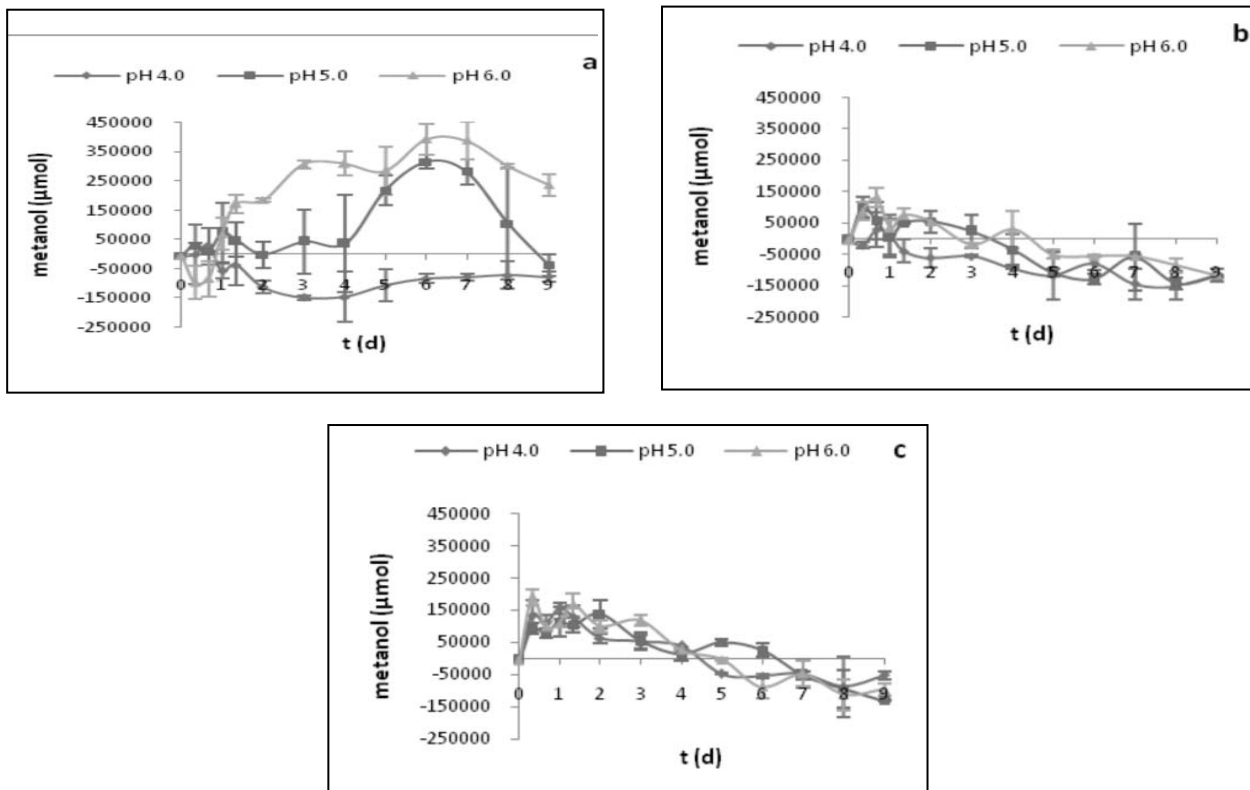
3.4.3 PE

La figura 5 se muestra la cinética de actividad de la PE para todas las fermentaciones realizadas.

Aparentemente las condiciones de la fermentación realizada con 10 g/L de pectina inhibieron la actividad de PE al inicio de la fermentación, pero en el día 6, la PE tuvo actividades inclusive mayores que las que se presentaron para los medios con 15 y 20 g/L de pectina. Este comportamiento se hace extraño, debido a que la PE no requiere de la acción previa de otra enzima para poder actuar, ella simplemente puede comenzar a retirar todos los grupos metoxilo de la pectina presente en el medio aportada por la cáscara de naranja, mostrando un preferencia por grupos metil éster de una unidad galacturonato cercana a otra no esterificada

(Kashyap *et al.*, 2001). En esta misma investigación se reporta que la pectina de la naranja es parcialmente metilada, debido a que naturalmente, el jugo de naranja posee grandes cantidades PE. Puede ser que la cáscara tenga otros componentes que, unidos a las condiciones de la fermentación con 10 g/L de pectina, hayan dificultado la acción de la PE.

FIGURA 5
Cinética de producción de PE. (a) 10 g/L de pectina (b) 15 g/L de pectina (c) 20 g/L de pectina



El valor máximo de metanol liberado fue 386139,990 µmol, obtenido en la fermentación con 10 g/L de pectina a pH 6.0. La productividad máxima fue de 45501,994 U⁻¹h⁻¹ obtenida en la fermentación con 20 g/L de pectina a pH 6.0 a las 8 horas (0.333 días).

El análisis estadístico empleando el método de Kruskal Wallis arrojó que la concentración de pectina no afecta significativamente la productividad de PE, obteniendo un valor-p de 0.472 y que el pH si afecta significativamente con un valor-p de 0.0056 con un 95 % de confianza.

3.4.4 PL

La cinética de actividad de la enzima pectinliasa de las fermentaciones realizadas, se presenta en la figura 6.

Se evidencia que a 10 g/L de pectina y pH 6.0 se presenta la mayor actividad enzimática aumentando la absorbancia en 0,061 min⁻¹ en el cuarto día y a 15 y 20 g/L se hace notable una reducción en la actividad cuyo valor de aumento de la absorbancia por minuto oscila entre 0,007 y 0,031. Este comportamiento, posiblemente es debido a la presencia de altas concentraciones de azúcares simples en los medios con mayor concentración de pectina, los cuales son consumidos por *A. niger* sin necesidad de activar su metabolismo en cuanto a la producción de la pectinliasa.

De otro lado, el pH inicial de la fermentación afecta la producción de la enzima, a 10 g/L de pectina, el pH 6.0 es el que más favorece la actividad y el pH 4.0 inhibe completamente la producción de la enzima, tal vez porque no es el pH óptimo de actividad enzimática. A 15 y 20 g/L

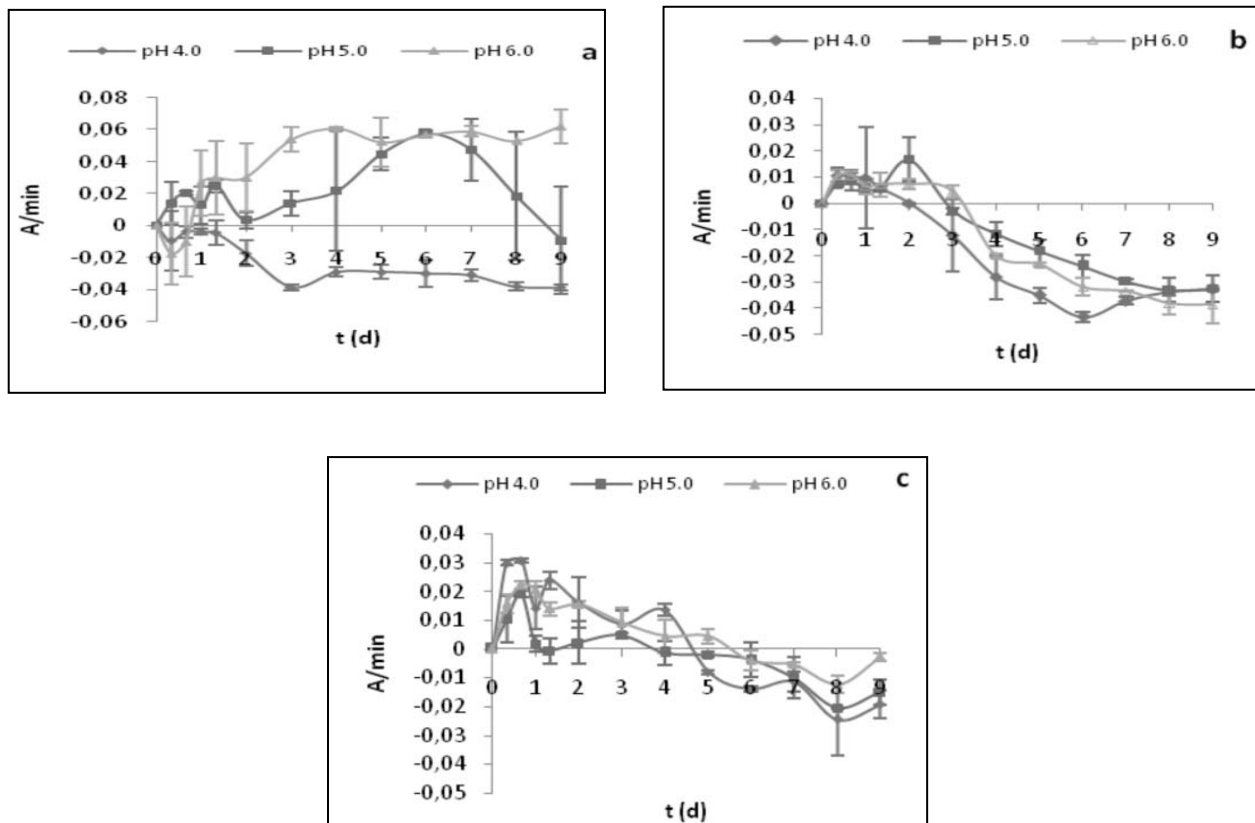
de pectina, el pH no representa variaciones significativas en la actividad enzimática.

Las condiciones de operación que favorecen la maximización de las variables A/min y 1/U son 10 g/L de pectina y un pH inicial de 6.0. Sin embargo, bajo estas condiciones, el tiempo que tarda la fermentación para llegar a los valores máximos es 4 días.

De otro lado, la productividad máxima, variable que lleva implícita el tiempo, se presentó bajo unas condiciones de 20 g/L y pH inicial 4.0 a las 8 horas de la fermentación. De acuerdo a las pruebas estadísticas, ningún factor genera diferencias significativas en la productividad de PL.

Una investigación realizada por Rodríguez-Nogales (2008) reporta que altas concentraciones de pulpa de manzana (3,6 % p/p) inhiben la producción enzimática de PL debido al aumento en la concentración de azúcares simples como glucosa, fructosa y sacarosa. La mejor concentración de pulpa de manzana fue 1,7 %. Este reporte, justifica la disminución de la actividad enzimática encontrada a 15 y 20 g/L de pectina con respecto al los resultados a 10 g/L. De otro lado, la limitada actividad enzimática de la PL también se puede deber a que La PL depolimeriza la pectina altamente esterificada, aproximadamente entre un 65 % y 98 % (Demir *et al.*, 2001) y se ha encontrado que la pectina de la naranja es sólo parcialmente metilada (Kashyap *et al.*, 2001), razón por la cual la pectiniasa se produciría en cantidades reducidas.

FIGURA 6
Cinética de producción de PL. (a) 10 g/L de pectina (b) 15 g/L de pectina (c) 20 g/L de pectina



4. CONCLUSIONES

La productividad de biomasa de *A. niger* en fermentación en estado semisólido a 220 rpm y 30 °C, no se vio afectada por el pH inicial, sin embargo, la concentración de pectina si afecta significativamente dicha variable, encontrándose que a 10 g/L de pectina se maximiza la productividad a la misma vez que se obtiene la mayor velocidad específica de crecimiento.

Las condiciones de pH inicial de fermentación y concentración de pectina que favorecen la productividad enzimática dependen del tipo de enzima que se quiera producir. Así, la productividad de las poligalacturonasas es mayor a una concentración de pectina de 10 g/L y pH inicial 5.0. De otro lado, la productividad de PL es afectada significativamente por las interacciones entre pH y concentración de pectina, donde pH 4.0 y 20 g/L de pectina favorecen un aumento en la productividad. Finalmente, la producción de PE es maximizada a una concentración de pectina de 20 g/L y pH inicial 6.0. Dado que el pH no afecta significativamente la productividad de PE, se puede trabajar a las condiciones establecidas para PL obteniendo buenas productividades para ambas enzimas.

La productividad de exo-PG de *A. niger* en fermentación en estado semisólido a 220 rpm y 30 °C se vio afectada por la interacción entre los factores pH y concentración de pectina, siendo pH 5.0 y 10 g/L las condiciones que maximizan su productividad.

La cinética de proteína total de *A. niger* en fermentación en estado semisólido a 220 rpm y 30 °C indica un balance entre la velocidad de consumo de proteína y la velocidad de generación de producto.

La actividad enzimática de la endo-PG y exo-PG fue reducida al comienzo de las fermentaciones, debido a la presencia de compuestos solubles, tales como glucosa, fructosa y sacarosa, presentes en la cáscara de la naranja.

5. BIBLIOGRAFÍA

BAI, Z.H., ZHANG, H.X., QI, H.Y, PENG, X.W., LI, B.J. Pectinase production by *A. niger* using wastewater in solid state fermentation for eliciting plant disease resistance. En: Bioresource Technology. N° 95. (2004). pp. 49-52.

BLANDINO, A., DRAVILLAS, K., CANTERO, D., PANDIELLA, S.S., WEBB, C., Utilisation of whole wheat flour for the production of extracellular pectinases by some fungal strains. En: Process Biochemistry. N°37. (2001). pp. 497-503.

CARRERA, J. Producción y aplicación de enzimas industriales. En: Facultad de Ciencias Agropecuarias. N°1. (2003). pp. 10-15.

CASTILHO, L., MEDRONHOB, R., ALVESA, T. Production and extraction of pectinases obtained by solid state fermentation of agroindustrial residues with *A. niger*. En: Bioresource Technology. N°71. (2000). pp. 45-50.

DEBING, J., PEIJUN, L., STAGNITTI, F., XIANZHE, X., LI, L. Pectinase production by solid fermentation from *A. niger* by a new prescription experiment. En: Ecotoxicology and Environmental. N° 64. (2006). pp. 244-250.

DEMIR, N., ACAR, J., MUTULU, M. The use of commercial pectinase in the fruit juice industry, part 2: Determination of the kinetic behaviour of immobilized commercial pectinase. En: Journal of Food Engineering. N° 47. (2001). pp. 271-274.

DOGAN, N., TARI, C. Characterization of three-phase partitioned exo-polygalacturonase from *Aspergillus sojae* with unique properties. En: Biochemical Engineering Journal. N° 39. (2008). pp. 43-50.

HADJ-TAIEB, N., AYADI, M., TRIGUI, S., BOUABDALLAH, F., GARGOURI, A. Hyperproduction of pectinase activities by a fully constitutive mutant (CT1) of *Penicillium occitanis*. En: Enzyme and Microbial Technology. N°30. (2002), pp. 662-666.

KASHYAP, D.R., VOHRA, P.K., CHOPRA, S., TEWARI, R. Applications of pectinases in the commercial sector: a review. En: *Bioresource Technology*. N°77. (2001). pp. 215-227.

LOWRY, O.H., Protein measurement with the folin phenol reagent. En: *J. Biol. Chem.* N°193. (1951). pp. 265-275

MAMMA, D., KOURTOGLOU, E., CHRISTAKOPOULOS, P., Fungal multienzyme production on industrial by-products of the citrus-processing industry. En: *Bioresource Technology*. N°99. (2008). pp. 2373-2383.

MILLER, G., Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugars. En: *Analytical Chemistry*, N°31. (1959). pp. 426-428.

MOHAMED SALEH, A., FARID NEVIN, M., HOSSINY EBTSAM, N., BASSUINY ROQAYA, I. Biochemical characterization of an extracellular polygalacturonase from *Trichoderma harzianum*. En: *Journal of Biotechnology*. N°127. (2006). pp. 54-64.

NITURE, S. K., PANT, A. Purification and biochemical characterization of polygalacturonase II produced in semi-solid medium by a strain of *Fusarium moniliforme*. En: *Process Biochemistry*. N°159. (2004). pp. 305-314.

RODRIGUEZ-NOGALES, J., ORTEGA, N., PEREZ-MATEOS, M., BUSTO, M. Pectin hydrolysis in a free enzyme membrane reactor: An approach to the wine and juice clarification. En: *Food Chemistry*. N°107. (2008). pp. 112-119.

SCHNITZHOFER, W., WEBER, H. J., VRSANSKA, M., BIELY, P., PAULO CAVACO, A., GUEBITZ, G. M. Purification and mechanistic characterisation of two polygalacturonases from *Sclerotium rolfsii*. En: *Enzyme and Microbial Technology*, N°40. (2007). pp. 1739-1747.

REDISEÑO DE UNA CENTRAL PREMEZCLADORA DE MATERIAL PULVERIZADO

Gabriel Jaime Arias Castro - Catalina Medina Vargas

RESUMEN

Este trabajo fue desarrollado con el fin de rediseñar una central premezcladora de material pulverizado en una industria productora de chocolates en particular. La situación actual de ésta central demuestra la carencia y necesidad de mejorar características importantes y determinantes en la productividad de la planta, como lo son: la capacidad limitada de la central, la alimentación manual de los insumos, la ausencia de una báscula para la dosificación del material y un tiempo de mezclado considerable. A través de la evaluación y análisis de la situación de la actual central de premezclas, la identificación de las variables críticas del proceso, el rediseño, dimensionamiento y selección de los equipos necesarios en la nueva central, la evaluación teórica de los resultados y la estimación del costo aproximado, se logró aumentar el flujo de material de la central de premezclas a las centrales de mezclas en un 41.07 %, se evaluaron alternativas para la alimentación de los insumos como también se presentaron alternativas para la nueva distribución de la central supliendo los requerimientos de las centrales que dependen de manera directa de los procesos llevados a cabo en la central de premezclas.

ABSTRACT

This paper was developed with the purpose of redesign a powdered material premixer station at a particular chocolate production industry. The actual situation of this central shows the lack and need to improve important and determinant characteristics in the plant productivity, which are: the limited capacity of the station, the raw material feed is manually, the lack of a bascule to measure the material and a considerable mix time. Through the evaluation and analysis of the actual situation of the premix station, the identification of the critical variables in the process, the redesign, sizing and selection of the required equipments in the new central, the theoretical results evaluation and the approximated cost estimation, it was achieved an increase of the material flow from the premix station to the mix stations in a 41.07%, alternatives were evaluated for the raw materials feeding and also for the new distribution of the station alternatives were presented to fulfill the supply requirements of the stations that depends on a direct way of the process made in the premix station.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo fue desarrollado con el fin de rediseñar una central premezcladora de material pulverizado en una industria productora de chocolates en particular. La situación actual de ésta central demuestra la carencia y necesidad de mejorar características importantes y determinantes en la productividad de la planta, como lo son:

- La capacidad en el área de premezclas es reducida con respecto a la capacidad de las áreas de mezcla final.
- La alimentación de los insumos que son mezclados es manual y se realiza varias veces (aprox. 100) en un turno de trabajo de 8 horas.
- No se cuenta con báscula para la dosificación del material, la cual es necesaria para que se mezclen los ingredientes en las proporciones que lo establece la formulación.
- El tiempo de mezclado es considerable, entre 20 a 30 minutos por fórmula completa de mezcla, lo que impacta en los tiempos de producción y conlleva a tiempos muertos.

La operación de mezclado de material pulverizado es muy importante dentro del proceso productivo de las industrias que hacen parte de la cadena de transformación del cacao. Tal como lo explican A. Madrid y J. Madrid, el chocolate es el producto obtenido por la mezcla íntima y homogénea de cantidades variables de cacao descascarillado o en polvo, azúcar, con o sin adiciones de manteca de cacao y leche (Madrid, 2001). Considerando lo anterior, alrededor del 75% de las materias primas utilizadas en esta industria son en polvo, a excepción de la manteca de cacao, por lo cual es necesario asegurar la homogeneidad de las mismas una vez estén incorporadas en el producto final.

Este proyecto busca entonces mejorar el proceso que se lleva a cabo en esta central de premezclas de material pulverizado para obtener una mejor eficiencia del proceso, ampliando la capacidad de la central actual y mejorando las condiciones de premezclado, eliminando tiempos muertos y tediosas cargas de alimentación realizadas por los operarios.

Es por esto que a través de una metodología basada en la identificación de los requerimientos básicos de la central, se presentarán a lo largo de este trabajo estudios que facilitaron la creación de alternativas de diseño.

2. METODOLOGÍA Y DESARROLLO

El proyecto se realizó en las siguientes etapas:

2.1 Evaluación de la distribución, características y funcionamiento del proceso actual

Se realizó mediante la esquematización de las actividades que componen el proceso (Figura 1), la comprensión de la secuencia de operación, la interrelación de estas actividades y la identificación del responsable de cada una de ellas, adicional a esto, reconociendo e identificando las debilidades de cada uno de los componentes que conforman la actual central de premezclas.

Adicionalmente, se realizó un estudio de los consumos de material pulverizado en la planta con el fin de establecer cuáles eran los ingredientes de mayor volumen y frecuencia de consumo (Figura 2).

TABLA 1
Requerimientos de premezclas de operación – central de

OSCURAS	BLANCAS	WIENER	TOTAL
1060	285,59	232,88	1578,47

premezclas

CENTRAL PREMEZCLAS

TIEMPO TOTAL (MIN)	FLUJO DE MATERIAL HACIA CENTRALES DE MEZCLA (KG/H)	REQUERIMIENTOS CUMPLIDOS DE LA CENTRAL DE MEZCLAS (%)
145,95	472,77	29,95

2.2 Identificación de las variables críticas

FIGURA 1. Esquematización del proceso actual

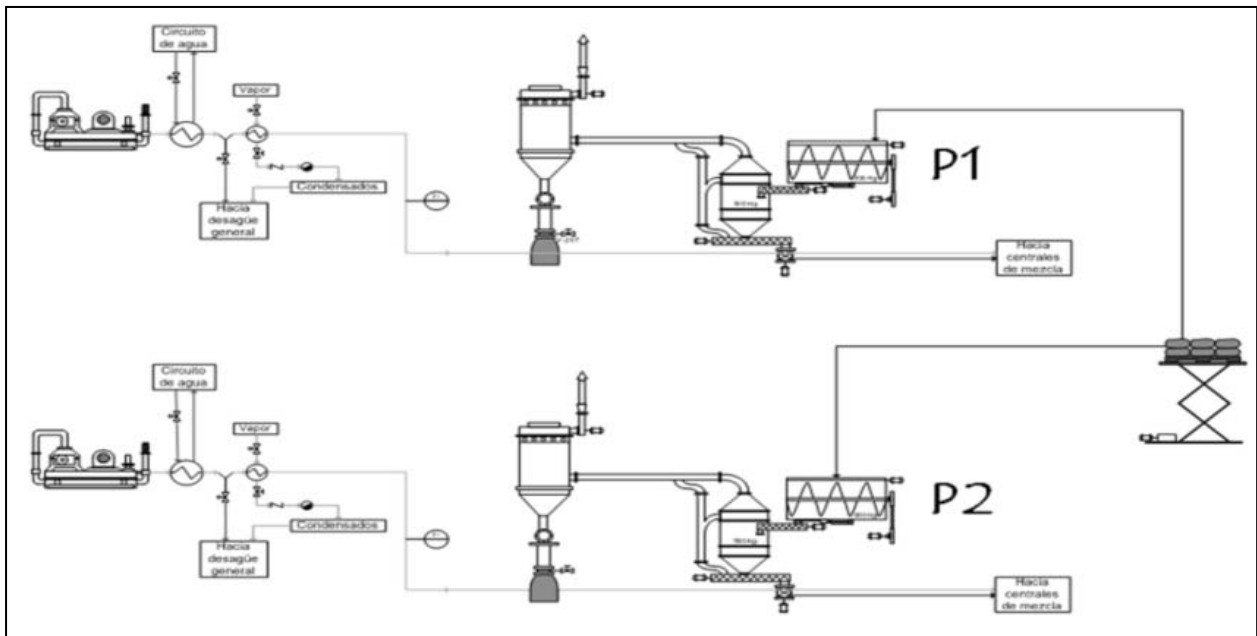
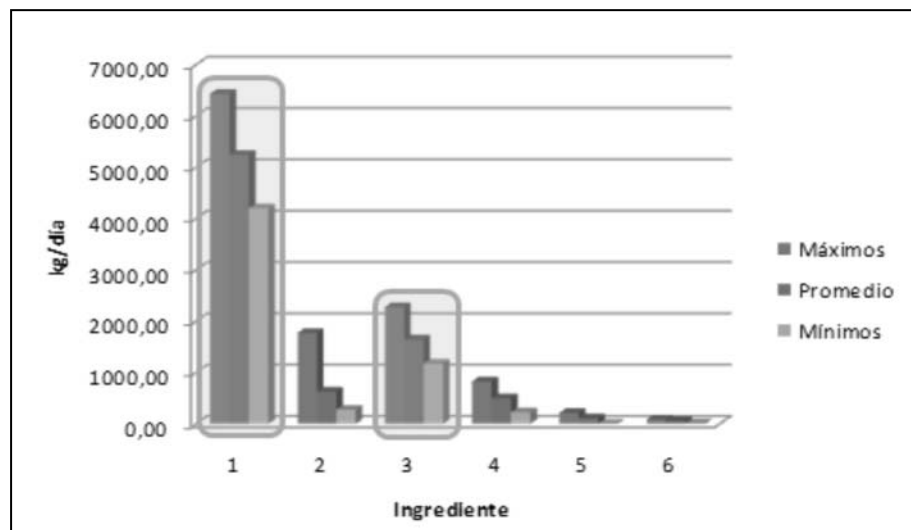


FIGURA 2. Consumos límite diarios



Las variables críticas de un proceso son aquellas que causan el descontrol del mismo y se manifiestan directamente en la insatisfacción tanto del cliente interno como del externo. Estas variables pueden ser cualitativas como: el equipo de trabajo, la capacitación y adiestramiento y la comunicación; o cuantitativas como: el tiempo, los errores humanos, el

retrabajo y otros parámetros de control. Estas variables se evaluaron desarrollando encuestas al equipo de trabajo, haciendo en planta un estudio de métodos, tiempos y movimientos (Figuras 3 - 4) y analizando las frecuencias y los parámetros de control del proceso.

FIGURA 3. Diagrama de flujo del proceso actual

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO			
Método Actual:	X	Fecha	2008
Método Propuesto:		Realizado por	Gabriel Arias C. - Catalina Medina V.
		Diagrama N°	1
		Hoja N°	1 de 1
SUJETO DEL DIAGRAMA	Actividades realizadas en la central de premezclas en base a una tanda de la Ref1		
DEPARTAMENTO	Central Premezclas		
DISTANCIA EN METROS	TIEMPO EN MINUTOS	SÍMBOLOS DEL DIAGRAMA	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO
886,68	13,4004		Envío de material pulverizado desde la bodega de materias primas hasta la central de premezclas, según pedido de producción. (6 estibas ida-vuelta)
0	3,67		Recibo y verificación del material para la producción de un turno.
6,96	0,9514		Transporte de estibas hacia el elevador hidráulico con material pulverizado para una fórmula completa
2,65	1,05		Montaje y transporte de estibas en el elevador hidráulico con material pulverizado para una fórmula completa
5,07	4,56		Carga de la mezcladora con material pulverizado para una tanda de mezcla.
0	5,11		Mezcla de los ingredientes según la formulación a preparar.
1,15	6,14		Envío de premezcla homogénea a tolva de espera.
0	1,8		Almacenamiento de premezcla homogénea en tolva de espera.
61,4	11,58		Envío de premezcla homogénea a centrales de destino.

FIGURA 4. Resumen de tiempos

RESUMEN			
TIEMPO	OPERARIO	SISTEMA DE TRANSPORTE	MÁQUINA
Inactivo (min)	43,7872	40,0814	44,3514
De trabajo (min)	33,8714	88,6000	25,3672
Total del ciclo (min)	77,6586	128,6814	69,7186
Utilización (%)	43,6158	68,8522	36,3851

Analizando los resultados obtenidos a partir de este estudio y de la evaluación de la distribución, características y funcionamiento de la actual central de premezclas (etapa 2.1) fue posible determinar que las variables críticas del proceso son:

- **Capacidad de la central:** es reducida ya que no suministra los requerimientos totales de premezcla necesarios en las centrales de recepción y mezcla final.
- **Ausencia de báscula para dosificación del material:** la cual es necesaria para que los ingredientes sean mezclados en las proporciones que lo establece la formulación.
- **Transporte constante de material en la central:** como no se cuenta con un almacenamiento de material en el sitio, deben transportarse constantemente estibas cargadas de material pulverizado hacia la zona de mezcla.
- **Tiempo y distancias recorridas:** El tiempo empleado para el transporte y carga del material, junto a las

distancias recorridas por el operario, ocasionan pérdidas de tiempo y un desgaste físico en el operario que se puede minimizar.

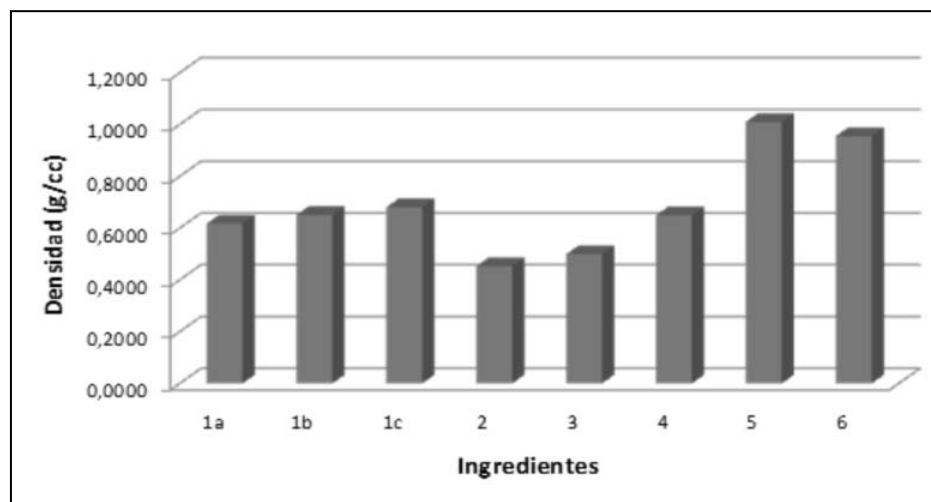
2.3 Rediseño, dimensionamiento y/o selección de equipos, accesorios y procedimientos requeridos:

Tales como las tolvas de almacenamiento, el sistema de alimentación a las tolvas y el sistema de pesaje del material a premezclar, a partir de la aplicación de reglas heurísticas, de la utilización de software de diseño, simulación y selección de equipos, tomando como base la central existente, las variables críticas identificadas y las necesidades del proceso. Esta etapa se dividió en tres fases:

a. Pruebas de caracterización

Se realizaron mediciones de densidad, análisis granulométrico y ángulos de reposo, deslizamiento y fricción.

FIGURA 5
Resultados medición de densidad



Se puede notar que la densidad del Ing 1(a,b,c) se encuentra aproximadamente en el mismo valor, lo que da facilidades para llevar a cabo el rediseño de los equipos sin ser imponente la selección de uno de los proveedores para este ingrediente.

FIGURA 6
Resultados análisis granulométrico

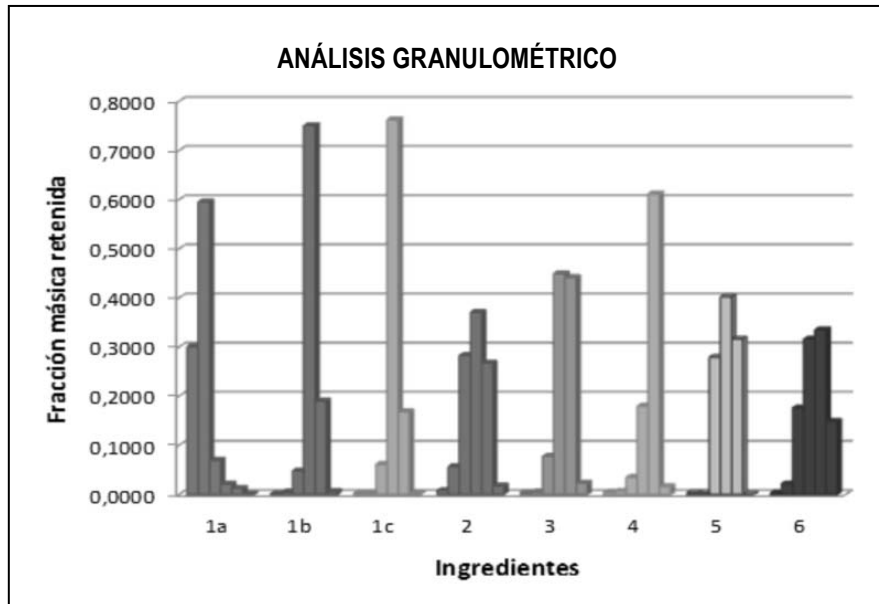
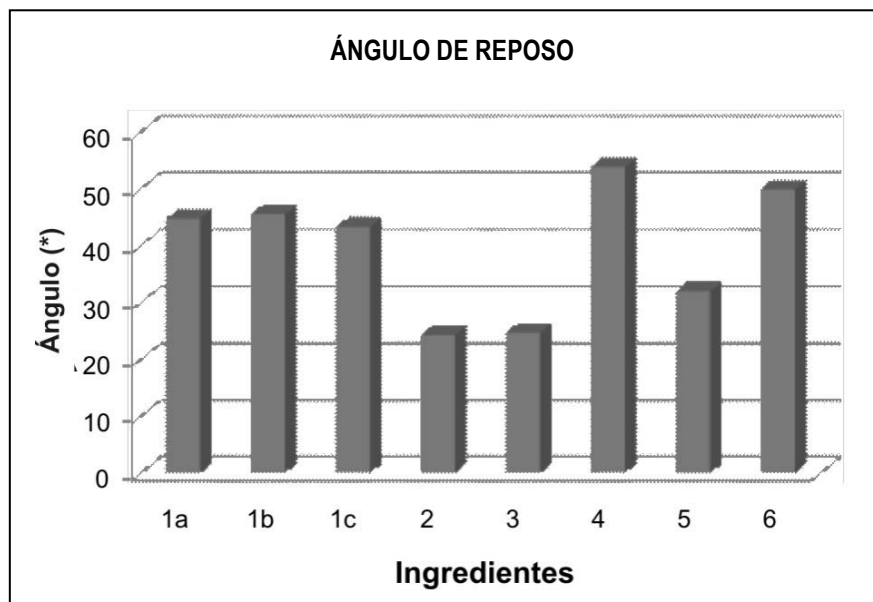
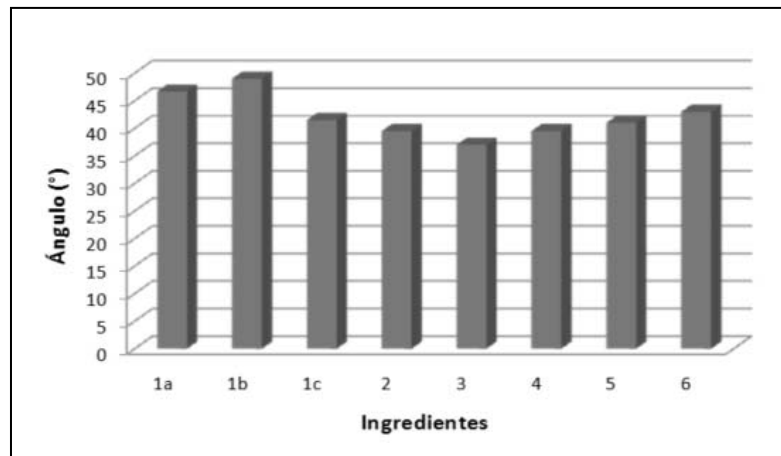


FIGURA 7
Resultados medición ángulo de reposo



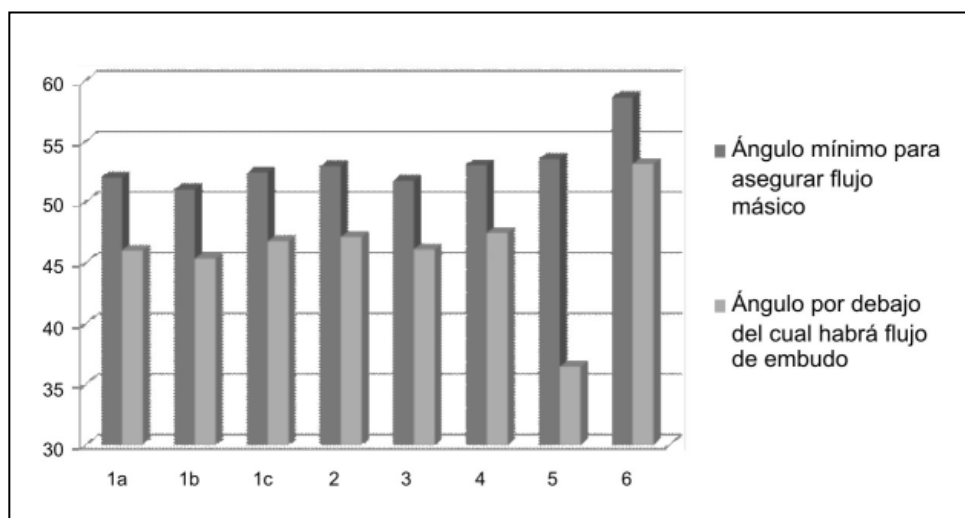
El ángulo de reposo determinante para el rediseño corresponde al Ing 4 con un valor de 53,92°. Se realizó una reducción del 10% del valor del ángulo de reposo correspondiente a 48,56°, asumiendo el efecto que el fondo vibrante de la tolva tiene sobre la altura libre requerida al redistribuir más homogéneamente el material pulverizado en la tolva.

FIGURA 8
Resultados medición ángulo de deslizamiento



El ángulo de deslizamiento crítico para llevar a cabo el rediseño corresponde al Ing 1b con un valor de 49° . Se selecciona éste ángulo ya que este valor asegura que todos los ingredientes a premezclar se deslicen libremente. El valor de ángulo de deslizamiento tomado en cuenta en el rediseño fue de $51,45^\circ$ que correspondió a un ajuste del 5% como margen de error.

FIGURA 9
Resultados medición ángulo de diseño



El ángulo crítico para llevar a cabo el rediseño de las tolvas destinadas a almacenar los ingredientes (Ing 1a, Ing 1b, Ing 1c, Ing 2, Ing 3, Ing 4) y microingredientes (Ing 5, Ing 6) principales, corresponde al Ing 4 y Ing 6 respectivamente, con un valor de $53,04^\circ$ y $58,61^\circ$. Se seleccionan estos ángulos ya que esos valores aseguran el flujo másico de

todos los ingredientes y microingredientes a premezclar. Los valores de ángulos de diseño tomados en cuenta fueron de $55,70^\circ$ y $61,54^\circ$ para ingredientes y microingredientes respectivamente, lo cual correspondió a un ajuste del 5% como margen de error.

Para asegurar que el ángulo de diseño encontrado es efectivamente útil para el diseño, es necesario realizar una comparación entre el ángulo de deslizamiento crítico y el ángulo de diseño. Es preciso que el ángulo de diseño sea mayor que el de deslizamiento, ya que de esta manera se garantiza el correcto flujo del material.

De los resultados obtenidos se puede apreciar que ciertamente se cumple este criterio, ya que los ángulos de diseño seleccionados ($55,70^\circ$ y $61,54^\circ$ para ingredientes y microingredientes respectivamente) son mayores que el ángulo de deslizamiento crítico ($51,45^\circ$) encontrado.

De esta manera se pueda continuar con la siguiente fase.

FIGURA 10
Alternativas de tolvas para ingredientes principales

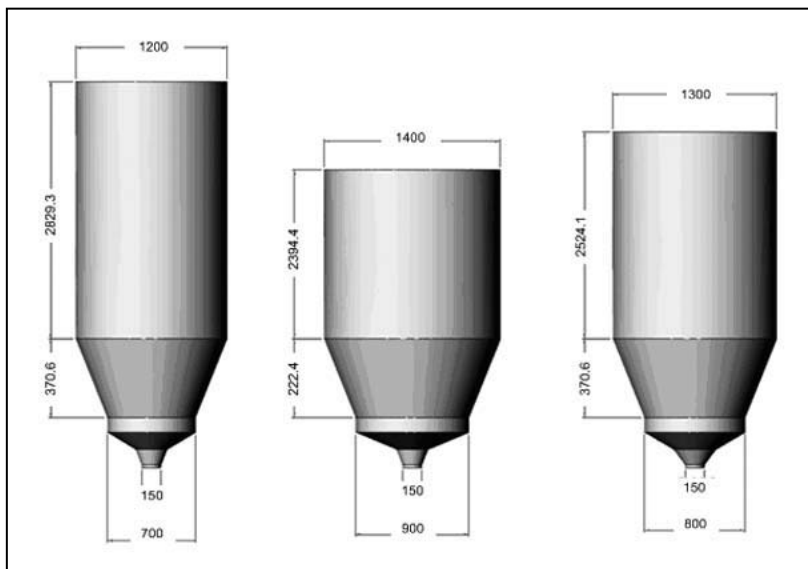
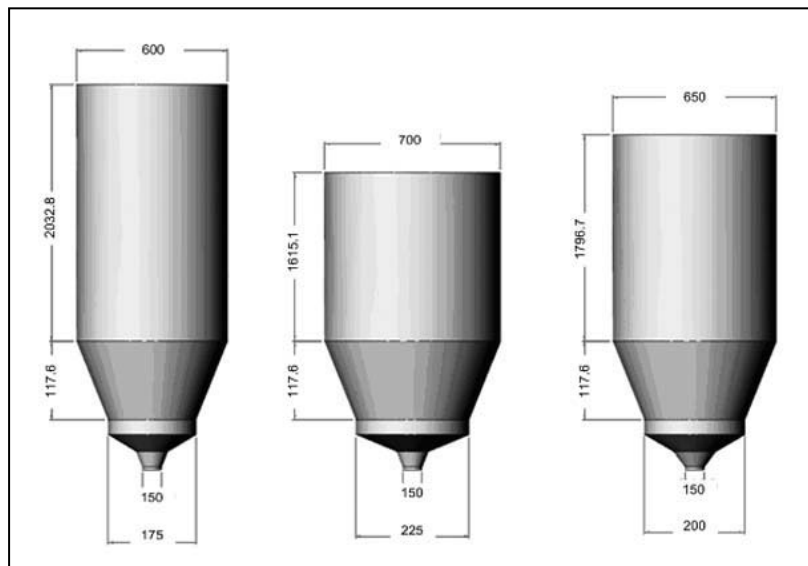


FIGURA 11
Alternativas de tolvas para microingredientes

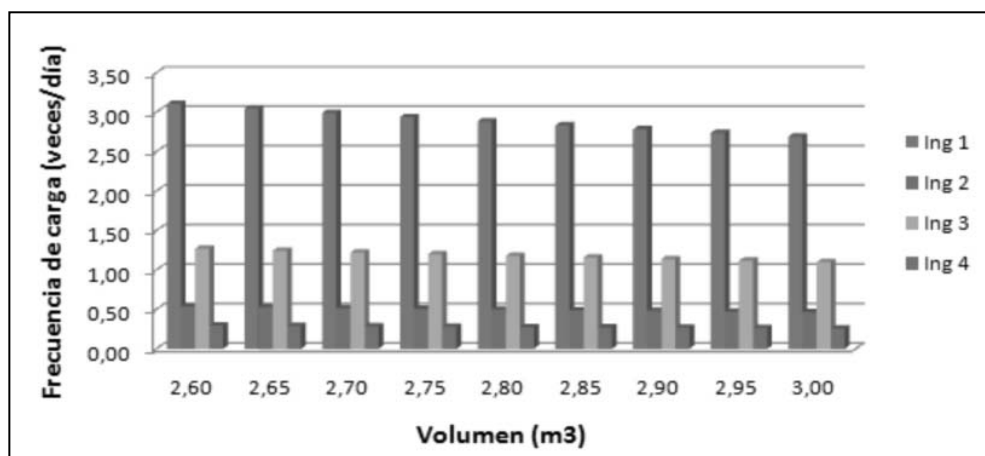


B. Diseño de equipos

a. **Tolvas de almacenamiento:** para el diseño de las tolvas se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros (Figuras 10 - 11):

1. **Tipo de flujo al interior de la tolva:** flujo másico.
2. **Estudio de consumos** realizado en la etapa 1 de la metodología.
3. **Turnos de trabajo en la empresa:** 3
4. **Frecuencia de carga – tolva Ing 1:** para hacer la selección del volumen de la tolva.

FIGURA 12
Selección del volumen de tolva



Teniendo en cuenta la figura anterior, se seleccionó un volumen que, en primer lugar, no supere las tres cargas que se puedan realizar por día en la empresa (es decir, una carga por turno), y en segundo lugar, que sea un volumen que no incremente los costos de capital y que cumpla con el dimensionamiento para el espacio disponible en planta. Debido a estos motivos se seleccionó para los ingredientes principales un volumen de almacenamiento de 2.7m³ con un volumen libre entre 0.77m³ y 1.22m³ según el diseño de la tolva.

5. **Ángulo de reposo:** 48,56°.
6. **Ángulo de deslizamiento:** 51,45°.
7. **Ángulo de diseño:** 55,70° y 61,54° para ingredientes y microingredientes respectivamente.
8. **Otras especificaciones de diseño:**

Materiales:

- Cuerpo de la tolva: acero inoxidable AISI 304 - 1/8" de espesor.
- Fondo vibrante: acero inoxidable AISI 304 - 3/16" de espesor.

Accesorios:

- Tapa: toriesférica con manhole
- Celdas de carga.
- Medidor de nivel de sólidos.

b. **Sistema de alimentación de tolvas:** se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

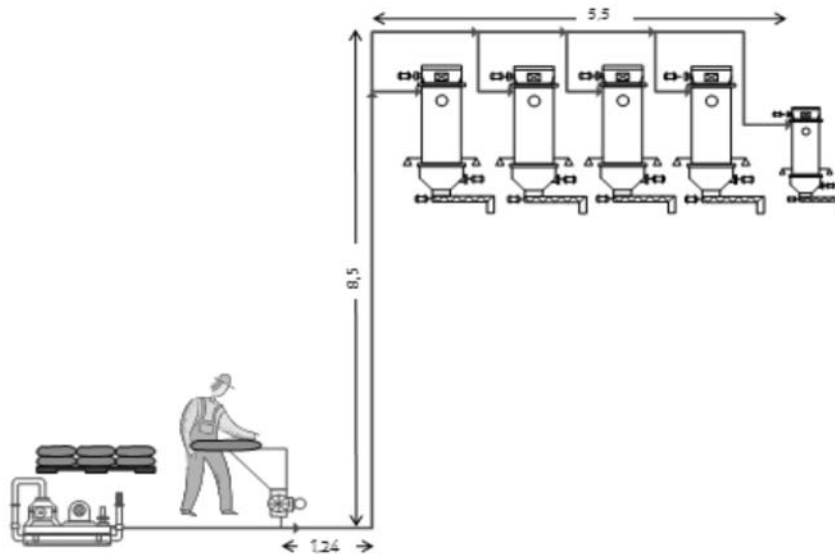
1. **Tipo de transporte:** transporte neumático.

- 2. **Capacidad del transporte:** 5500 Kg/h.
- 3. **Densidad promedio del material pulverizado:** 562,77 Kg/m.
- 4. **Longitud equivalente del transporte:** 15,24 m
- 5. **Parámetros de diseño:** hallados a partir de nomogramas de Perry.
- 6. **Validación del sistema:** determinada a partir de relaciones empíricas.
- 7. **Diámetro de partícula:** menor de 50 mm.

FIGURA 13
Parámetros de diseño y validación del transporte neumático

	Nomogramas	Relaciones Empíricas	Desviación
Flujo Volumétrico (m³/h)	9,7731	9,7731	0,0000
Velocidad de aire (m/min)	1679,6010	1666,1937	0,7982
Volumen de aire (m³/min)	7,7850	7,6698	1,4798
Relación de sólidos	10,7800	10,1967	5,4100
Factor de diseño	72,0000	70,9013	1,5260
Caída de presión del sistema (psi)	2,2857	1,8385	1,9565
Potencia del sistema (Hp)	3,8875	3,1312	1,9456

FIGURA 14
Sistema de transporte neumático para alimentación de tolvas



- 8. **Método de transporte:** transporte por presión.
- 9. **Régimen de transporte:** transporte en fase densa.
- 10. **Entorno de trabajo:** se plantearon dos alternativas con el objetivo de hacer más cómodo y ágil el entorno de

trabajo del operario, a partir de la aplicación de algunos parámetros ergonómicos.

FIGURA 15

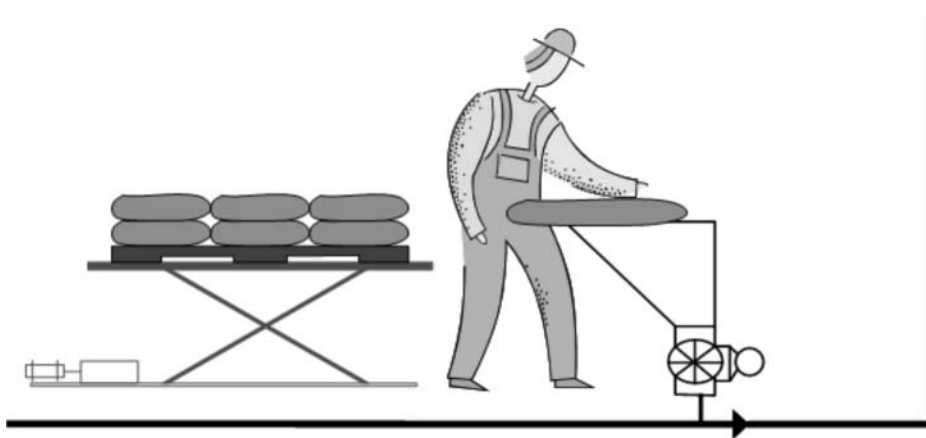
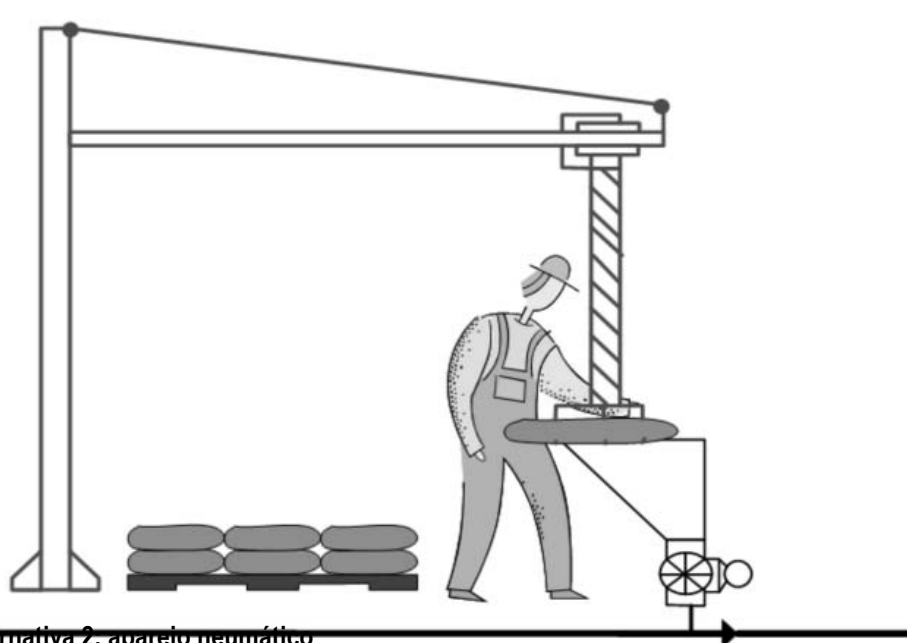


FIGURA 16



Alternativa 2: aparejo neumático

c. **Sistema de pesaje:** se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

1. Estudio de consumos.
2. Rango de peso de ingredientes y micro-ingredientes.

De acuerdo a estos dos parámetros se decide instalar básculas independientes para ingredientes y

microingredientes:

Ingredientes: **300 Kg**

Microingredientes: **100 Kg**

Finalmente, se llevó a cabo la tercera fase.

d. **Selección de equipos:** el equipo a seleccionar es la mezcladora, ya que la empresa cuenta con mezcladoras de las mismas características que han

dado buenos resultados en otras áreas de la misma. Para la selección de la mezcladora se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

1. **Ensayos de validación:** se realizaron ensayos en una mezcladora piloto. Se prepararon las referencias 1 y 2 y se realizaron mediciones del porcentaje de grasa luego de 5 minutos de mezcla en diferentes ubicaciones de la mezcladora. Con el fin de comprobar la dispersión de las muestras y darle más confianza al ensayo, se tomaron las muestras por duplicado.
2. **Análisis de resultados:**

FIGURA 17
Resultados Ref 1

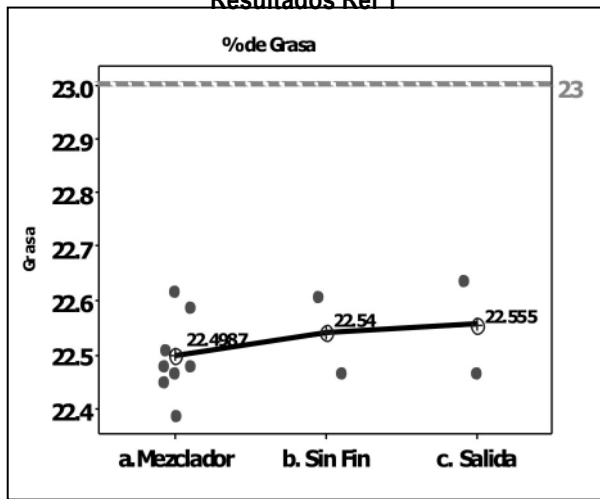
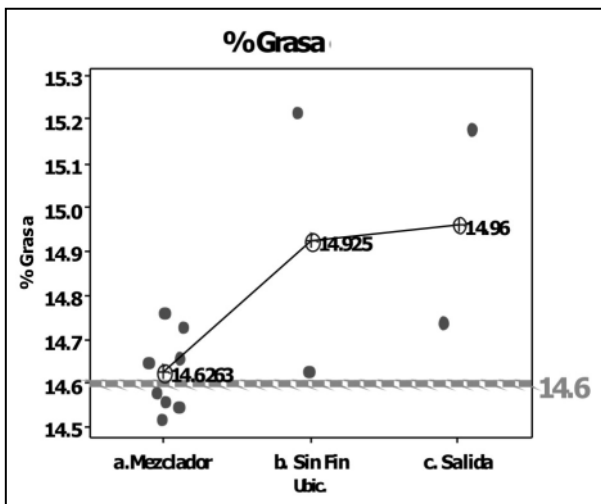


FIGURA 18



Resultados Ref 2

Según los resultados obtenidos y la posterior revisión y aprobación por parte de la empresa, se valida la selección de esta mezcladora de alta eficiencia para ser utilizada en la nueva central premezcladora de material pulverizado.

2.4 Evaluación teórica de los resultados obtenidos

Se realizó mediante un análisis comparativo de las variables críticas y fallas identificadas y posteriormente solucionadas, con el fin de establecer cuáles fueron en teoría las mejoras alcanzadas y sus impactos económicos, ambientales y técnicos en el proceso.

La comparación realizada entre los diagramas de flujo actual y propuesto (Figuras 3 - 18) de la central de premezclas, arrojó valores que permitieron realizar una evaluación de las variables críticas en el proceso. La construcción del diagrama de flujo propuesto fue realizada a partir de ensayos realizados en la zona de premezclas y de las especificaciones de tiempos de operación brindadas por los proveedores de los equipos.

Con el nuevo diseño de la central, se reduce el proceso de 5 a 2 tandas para producir la fórmula completa de la referencia mencionada.

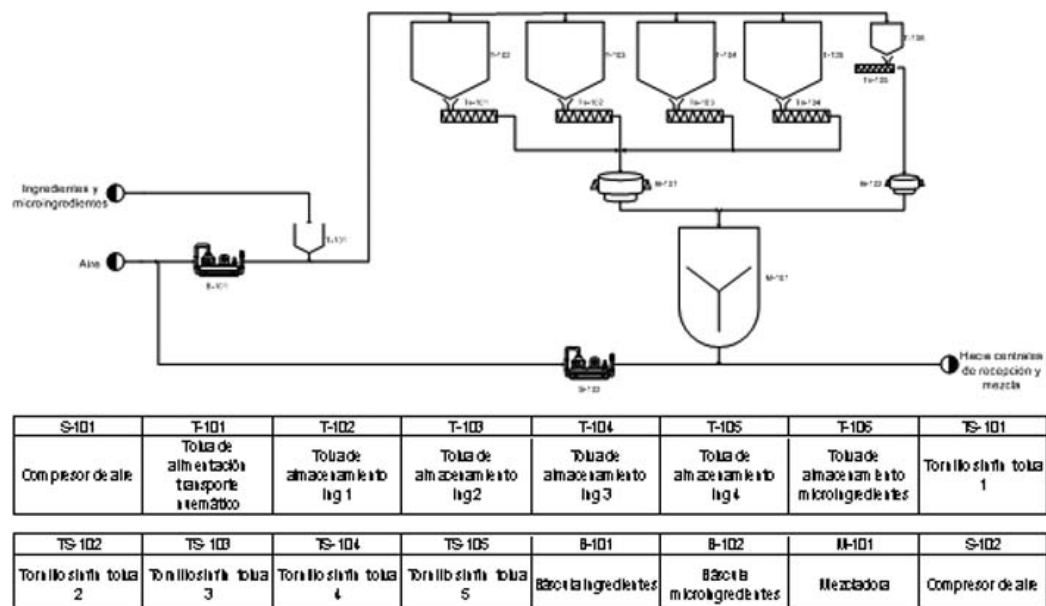
El tiempo total desde que se selecciona la fórmula a preparar hasta que la tolva de premezclas queda vacía (tiempo que se asume como el de llegada del insumo a las centrales de mezcla) es de 61,55 minutos, lo cual significa que el flujo de material desde la central de premezclas hacia la central de mezclas es de 1121,11 kg/h (tomando como base la referencia de mayor producción Ref 1). Éste flujo suplir el 71,02% de los requerimientos totales de esta premezcla en las centrales de recepción y mezcla final, lo cual significa un aumento del 41,07% respecto al proceso actual.

Analizando los resultados obtenidos a partir de este estudio, fue posible determinar las transformaciones alcanzadas en los estados de las variables críticas del sistema actual al sistema propuesto:

FIGURA 19. Diagrama de flujo del proceso propuesto

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO			
Método Actual:		Fecha	2008
Método Propuesto:	X	Realizado por	Gabriel Arias C. - Catalina Medina V.
		Diagrama N°	2
		Hoja N°	1 de 1
SUJETO DEL DIAGRAMA	Actividades realizadas en central de mezclas en base a 1 tanda de Ref1		
DEPARTAMENTO	Central Premezclas		
DISTANCIA EN METROS	TIEMPO EN MINUTOS	SIMBOLOS DEL DIAGRAMA	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO
886,68	13,4004	○ → □ □ ▽	Envío de material pulverizado desde la bodega de materias primas hasta la central de premezclas, para carga de tolvas
15,24	66	● → □ □ ▽	Carga de tolvas de almacenamiento
2	0,083	● → □ □ ▽	Selección de formula a preparar (plc).
1	3	○ → □ □ ▽	Dosificación de ingredientes a la báscula.
0,5	3	● → □ □ ▽	Pesaje de ingredientes según formulación seleccionada.
0,5	3	○ → □ □ ▽	Dosificación de ingredientes a la mezcladora.
0	5	● → □ □ ▽	Mezcla de los ingredientes.
46,4	16,69	○ → □ □ ▽	Envío de premezcla homogénea a centrales de destino.

FIGURA 20. Diagrama de flujo PFD del proceso propuesto



- Capacidad de la central:** aumentó considerablemente respecto a la capacidad actual. En la siguiente figura, se ilustra el rendimiento de la nueva central de premezclas. El tiempo de proceso corresponde al tiempo utilizado para el pesaje y mezclado del material, teniendo entonces en consideración, que la carga a las tolvas ya ha sido realizada. Estos tiempos aproximados hacen parte de la especificación del proveedor de la mezcladora y de la observación del proceso que se lleva a cabo en otra zona de la empresa en la cual se cuenta con un diseño similar. La densidad de las mezclas de la central fluctúa entre 0,4 – 0,7 kg/L, valores con los cuales se determinó el rendimiento (Kg/h) de la nueva central de premezclas.

FIGURA 21. Rendimientos nueva central

RENDIMIENTO NUEVA CENTRAL PREMEZCLAS			
Capacidad de la mezcladora al 75% (l)	Tiempo de proces (min)	Rendimiento con $\Xi=0,4$ (kg/h)	Rendimiento con $\Xi=0,7$ (kg/h)
975	14	1671,43	2925,00

El rendimiento calculado para el rango de densidades de mezcla supera los requerimientos totales de premezcla de las centrales de recepción y mezcla final (1578,47 Kg/h) analizados en el capítulo 6, por lo cual se concluye que la nueva central satisface las necesidades de la empresa.

- Báscula para dosificación del material:** con la presencia de este nuevo componente en la central, se asegura que tanto los ingredientes como los microingredientes sean mezclados en las proporciones que lo establece la formulación.
- Transporte constante de material en la central:** contando con un almacenamiento de material en el sitio, se evita el transporte constantemente estibas cargadas de material pulverizado hacia la zona de mezcla. El operario solo requerirá hacer un transporte de material para la carga inicial de las tolvas y uno más cada turno para transportar el Ing 1 destinado a llenar la tolva correspondiente, por lo cual el transporte de material se reduce.
- Tiempo y distancias recorridas:** Con el sistema propuesto se reduce el tiempo empleado para el transporte y carga del material, junto a las distancias recorridas por el operario. A la velocidad establecida para el sistema de transporte neumático, el tiempo total que tardará el operario en cargar las tolvas de almacenamiento será de 1,10 horas para el primer turno y de 0,3 horas para los dos turnos siguientes, ya que

según el diseño planteado, éstos solo deberán cargar la tolva del Ing 1.

2.4.1 Impacto económico

El impacto económico del rediseño de la central, obviando los resultados y conclusiones detalladas a continuación en el capítulo 10, se fundamenta bajo el factor tiempo y el factor capacidad. La reducción del tiempo de carga como también del tiempo de mezcla, la capacidad de la mezcladora y el almacenamiento in situ, implican disminución en el tiempo de proceso, un mejor rendimiento del tiempo por operario e inclusive una disminución del combustible para el transporte del material pulverizado de la bodega de materias primas a la central de premezclas.

2.4.2 Impacto ambiental

Características como la disminución del transporte continuo y el almacenamiento en silos del material pulverizado en la central, ocasionan una baja importante de la contaminación auditiva además de evitar que se presente material particulado en la zona que pueda generar problemas respiratorios en los operarios.

2.4.3 Impacto tecnológico

Las nuevas características del área, el cambio en la capacidad de la central de premezclas para abastecer las centrales de recepción y mezcla posteriores, la utilización

de equipos que faciliten la labor del operario evitando lesiones laborales y la imperante necesidad de renovar un proceso de más de 20 años sin actualizarse, hacen que éste proyecto tenga un impacto tecnológico muy positivo para la empresa Z.

2.5 Estimación del costo aproximado de la central

Se realizó a partir de la solicitud de cotizaciones para la construcción y/o adquisición de los equipos involucrados en el rediseño.

FIGURA 21. Costo total aproximado

COSTO TOTAL APROXIMADO	
MÍNIMO	273.418.960
MÁXIMO	295.168.960

3. CONCLUSIONES

Se logró mejorar la eficiencia del proceso en un 41,07%.

Se identificaron como variables críticas del proceso la capacidad de la central, la ausencia de báscula, el transporte constante de material en la central y el tiempo y las distancias recorridas.

Se identificó el efecto que dichas variables ejercían en la producción y en la eficiencia global de la central.

El dimensionamiento y selección de las tolvas de almacenamiento suple los requerimientos de premezclas de los procesos posteriores.

El diseño y dimensionamiento de un sistema de transporte neumático como sistema de alimentación a las tolvas de almacenamiento, brinda al operario un entorno de trabajo cómodo y ágil, debido a la instalación de alternativas de carga y a la velocidad de flujo del mismo (5500 kg/h de material pulverizado).

Con el diseño del sistema de pesaje se asegura que los ingredientes sean mezclados en las proporciones que indica la formulación de cada producto.

Las pruebas de caracterización sirvieron para establecer los parámetros a tener en cuenta en el diseño de los equipos de la central y de las condiciones de trabajo.

4. BIBLIOGRAFÍA

BARNES, Ralph M. Estudio de movimientos y tiempos. España: Ed. Aguilar. 1966

CHEREMISINOFF, Nicholas. Chemical Engineer's: Condensed Encyclopedia of Process Equipment. Gulf Pub. Co. 1999

COUPER, J. Gulf Professional Publishing - Chemical Process Equipment - Selection and Design. 2a. ed, 2005

EUROCODE, BS_EN_1991-4-2006 Eurocode 1: Actions on structures Silos and tanks. British Standar, 2006

GRUPO DE DISEÑO, Proyectos de Ingeniería E.U., 2006

LLANEZA A., Javier. Ergonomía y psicología aplicada. Manual para la formación del especialista. Editorial Lex Nova. España. 2008

MADRID, A., Madrid, J.. Nuevo manual de industrias alimentarias. AMV Ediciones. Madrid, España. 2001

MESA V, Ignacio. Manejo de Sólidos. Serie Nabla – Delta de la Escuela de Ingeniería UPB. 1990

MILLS, David. Pneumatic Conveying Design Guide. 2a. ed. Elsevier Butterworth-Heinemann. Oxford. 2004

NIEBEL, Benjamin W. y FREIVALDS, Andris. Ingeniería Industrial: Métodos, estándares y diseño del trabajo. 11a edición. México: Ed. Alfaomega. 2004

PEREZ, Silvia P.. Revista de divulgación científico-tecnológica HYPATIA. No. 19. Año 3. Morelos. 2000

PERRY, R.H., Green, J.O., Perry's Chemical Engineers Handbook. Séptima edición. Mc Graw Hill Professional. New York. 1997

ROJAS, Renán A..Diseñar desde la ergonomía evita riesgos. Protección y Seguridad. Consejo Colombiano de Seguridad. Santa Fe de Bogotá. 2000

SINNOT, R. K. Coulson and Richardson's Chemical Engineering – Chemical Engineering Design – Volume 6. Butterworth-Heinemann. Tercera Edición. 2003

WALAS, Stanley. Chemical Process Equipment: Selection and Design. Butterworth-Heinemann. 1998

IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SIX SIGMA PARA LA DISMINUCIÓN DEL SCRAP EN LA FAMILIA COLAPSIBLES DE LA PLANTA DE ENVASADO PREBEL S.A.

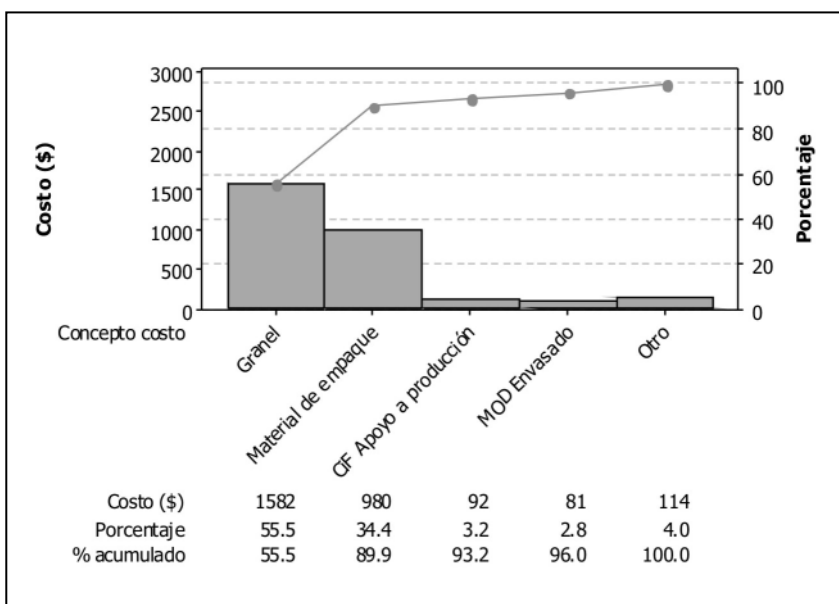
Santiago A. Giraldo G.

RESUMEN

Los clientes de las empresas maquiladoras y también los propietarios de las empresas productoras de bienes, establecen como indicador estratégico el porcentaje de desperdicio generado de materias primas, graneles e insumos. Este porcentaje de desperdicio se conoce como porcentaje de scrap.

Para el caso de PREBEL S.A., es importante cuantificar y tratar de minimizar el porcentaje de scrap generado para los graneles de los productos que se envasan en la planta, ya que éste constituye aproximadamente, el 55% del costo del producto, equivalente a un promedio de \$1,582 (ver gráfica 1).

GRÁFICA 1
Pareto por tipo de costo asociado al producto



Por lo anterior, se implementa la metodología Six Sigma en la planta de envasado de PREBEL S.A., con el objetivo de identificar y mitigar las causas generadoras de dicho desperdicio.

El enfoque del trabajo empieza por las familias de producción que generen los mayores ahorros al hacer las disminuciones del indicador y que a su vez, sean las de mayor volumen de producción anual.

Para el caso de este proyecto, el enfoque se realiza sobre la familia de colapsibles de la planta de envasado de PREBEL S.A., en la cual se manejan dos clientes principales: las marcas propias de PREBEL S.A. y las referencias del principal cliente, AVON.

Los niveles actuales de scrap, para la familia colapsibles de las marcas propias de la compañía, está alrededor del 12.977% (que representa \$280'259,965) y su reducción proyectada producirá ahorros aproximados de \$59'583,253 anuales; comparado con el cliente AVON, cuyo nivel actual de scrap se encuentra en 4.9258% aproximadamente (que representa \$1,121'039,861), y su reducción proyectada produciría ahorros de \$251'543,116 anuales.

Palabras clave

Scrap, colapsibles, Seis Sigma, granel.

ABSTRACT

The customers and the owners of the manufacturing facilities, establish as a key process indicator, the percentage of waste generated for the raw materials, bulk and packaging materials. This percentage is known as scrap.

For the case of PREBEL S.A., is important to know the amount and try to minimize the percentage of scrap generated, for the bulks of the products that have been filled in the facility. In this case, the cost of the bulk represents the 55% of the total cost for the product, equivalent to an average of \$ 1,582 Colombian pesos. (See graph number 1)

Accordingly to this, PREBEL S.A., desire to implement the Six Sigma methodology in its filling facility, establishing as its target to identify and minimize the principal causes that generate the scrap.

The focus of the present investigation begins in the production families that generate the most significant savings when the percentage of scrap has been minimized and also, the families that have the biggest volumes of annually production.

The actual state of art for the products from PREBEL S.A., is a percentage of scrap, approximately to 12.977% (that represent \$280'259,965 Colombian pesos), minimizing it, the project can achieve savings approximately to \$59'583,253 annually Colombian pesos; comparing with the products from AVON, which the actual level of percentage of scrap, is around 4.9258% (that represent \$1,121'039,861 Colombian pesos). If this percentage is minimized, the savings would be, approximately, \$251'543,116 annually Colombian pesos.

Key words

Scrap, tubes, Six Sigma, bulk.

INTRODUCCIÓN

Preparaciones de belleza, PREBEL S.A., es una empresa maquiladora de productos de belleza y cuidado personal para terceros que posee, dentro de su portafolio de negocios, marcas propias y representadas. Ante la evidente globalización que el país está afrontando, PREBEL S.A se traza como objetivo estratégico alcanzar los más altos indicadores de producción con el fin de poder competir frente a otras grandes empresas de clase mundial.

Un punto fundamental para las negociaciones con terceros es el costo del desperdicio generado (scrap) en la maquila de sus productos a causa de reprocesos que se generan en el transcurso de una orden de envasado. Estos reprocesos generan en el producto terminado características que no están dentro de las especificaciones exigidas por el cliente, lo cual disminuye el nivel de servicio y por lo tanto, su satisfacción.

Implementar la metodología Seis Sigma para la disminución del scrap generado durante el proceso de envasado, permite reducir la variabilidad en el proceso y en los productos, garantizando uniformidad y estandarización, lo que se ve reflejado en la reducción de costos, en la obtención de un mayor beneficio económico para la empresa y, lo más importante, en la satisfacción del cliente, quien recibirá productos de mejor calidad.

2. DESPLIEGUE DE LA METODOLOGÍA

Definir

El objetivo de esta etapa es definir la problemática actual del scrap en la familia de colapsibles de la planta de envasado de PREBEL S.A. y justificar por que es necesario implementar un proyecto de mejora que disminuya el indicador.

Para lo anterior se estructura el siguiente resumen que responde a preguntas como: ¿Cuál es el problema? ¿Qué fue lo que hizo que PREBEL S.A., centrara la atención en él? ¿Qué impacto ha tenido el problema? ¿Cómo lo sé? ¿Qué consecuencia puede traer que la empresa no lo solucione?.

Resumen: Desde febrero del 2007 cuando surgió la necesidad de controlar el scrap en la planta de cosméticos, se evidenciaron los altos niveles de desperdicio generados en la familia de colapsibles. El porcentaje de scrap promedio por semana desde entonces ha sido 7.13% para Avon y 14.32% para PREBEL S.A. El mejor comportamiento en anteriores semanas fue 4.52% para Avon y 8.15% para PREBEL S.A., siendo el requerimiento del cliente de un 3% en desperdicio.

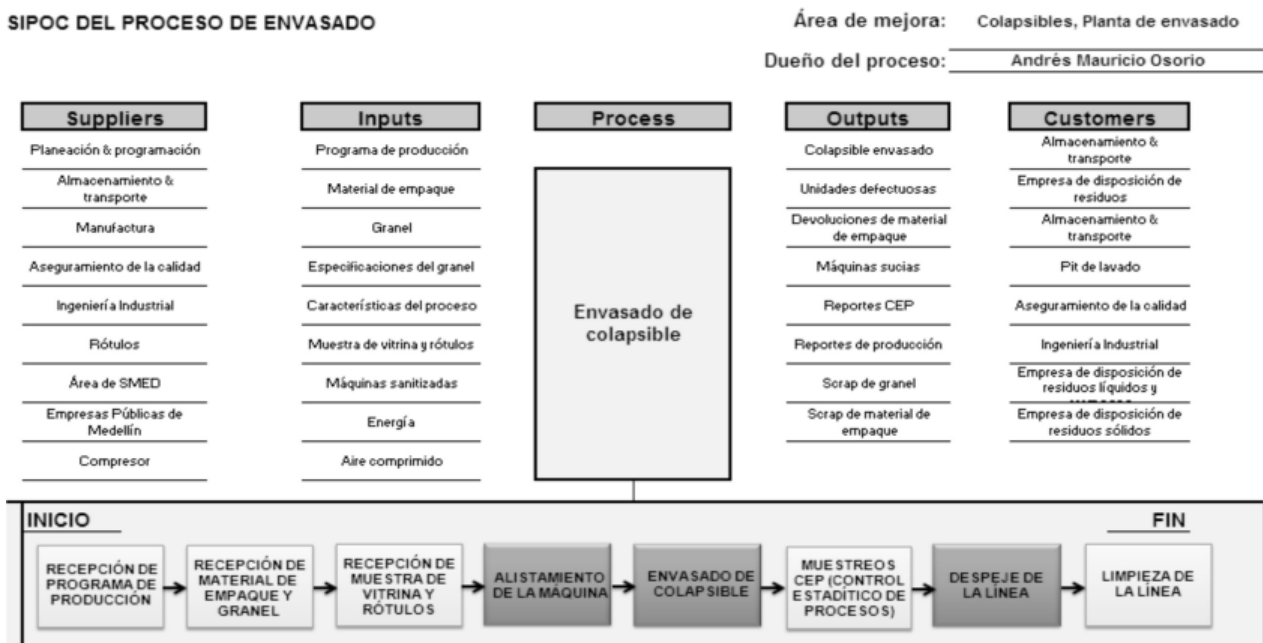
Por lo anterior se plantea como objetivo:

Disminuir el porcentaje de scrap, de 7.13% a 4.52%, para las referencias de Avon pertenecientes a la familia de envasado colapsibles en la planta de cosméticos, para Julio del 2008.

Disminuir el porcentaje de scrap, de 14.32% a 8.15%, para las referencias de PREBEL S.A. pertenecientes a la familia de envasado colapsibles en la planta de cosméticos, para Julio de 2008.

Para el conocimiento más a fondo de la problemática actual se estructura el mapa SIPOC (Suppliers Inputs Process Outputs Customers). (Ver figura 1).

FIGURA 1. Mapa SIPOC del proceso de envasado de un colapsible



Como conclusión de la etapa, se establecen los métricos del proyecto, con los cuales se pretende medir la eficiencia de éste. Estos son:

TABLA 1
Métrico primario del proyecto

MÉTRICO PRIMARIO			
Nombre	Unidad de medida	Método de cálculo	Descripción
% Scrap	Porcentaje	$\frac{(1 - (\text{Unidad envasada} \times \text{Kg fórmula}))}{\text{Cantidad surtida}} \times 100$	Porcentaje de granel que no se usa adecuadamente con relación a lo surtido en una orden de producción

TABLA 2
Métrico secundario del proyecto

MÉTRICO SECUNDARIO			
Nombre	Unidad de medida	Método de cálculo	Descripción
% Nivel de servicio	Porcentaje	$\frac{\text{Unidades despachadas}}{\text{Unidades pérdidas}} \times 100$	Entrega oportuna del producto a los clientes en el lugar, cantidad y momento requeridos; con la calidad esperada por ellos.

Medir

La meta de la segunda fase de la metodología Seis Sigma es enfocar el esfuerzo de mejoramiento mediante la recolección de información sobre la situación actual y la identificación de los requerimientos del cliente.

Identificación y priorización de las CTQ's

En esta etapa de la fase se realiza una lluvia de ideas con el equipo de trabajo, en donde se busca encontrar las causas potenciales de la generación de scrap en el proceso de envasado de la familia de colapsibles. Luego, se priorizan las causas, a nivel interno, y se procede a escoger aquellas que sean significativas dentro de la priorización. Finalmente, se presentan las causas seleccionadas al cliente, para que éste las priorice, de mayor a menor importancia, según su criterio.

En la tabla 3, se presentan las CTQ's para el proyecto.

TABLA 3
CTQ's Priorizadas

Causas	Generalización	Priorización del cliente
Fugas de las máquinas	Malos alistamientos	7
Productos defectuosos	Malos alistamientos	
Sobreadición	Malos alistamientos	
Consideraciones en el desarrollo del producto	Falta estandarización	6
Establecimiento de metodologías para diferentes operaciones Ej: Contar rechazos del proceso	Falta estandarización	
Falta de estandarización y lotes piloto para la referencias	Falta estandarización	
Granel fuera de especificaciones	Falta estandarización	
Mala formulación en el Sistema	Falta estandarización	
Potes de prueba en el alistamiento	Falta estandarización	
Baja confiabilidad de inventarios	Mala confiabilidad de inventarios	5
Falta de revisión del surtido por planta	Mala confiabilidad de inventarios	
Insumos demorados en las adiciones	Mala confiabilidad de inventarios	
Mal surtido	Mala confiabilidad de inventarios	
Deterioro de máquinas por falta de manto	Falta de mantenimiento	3
Falta de boquillas	Falta de mantenimiento	
Variación de material por variación en el proveedor	Problema con materiales	1
Problemas con material de empaque	Problema con materiales	
Variación en taras	Problema con materiales	
Granel en bolsas	Problemas del proceso	2
Granel en mangueras bombas y accesorios	Problemas del proceso	
Purgas	Problemas del proceso	
Residuo de graneles en tanques	Problemas del proceso	
Mala Programación (ordenes suspendidas)	Mala programación	4
Tamaños de lotes muy pequeños	Mala programación	

Luego de tener las causas priorizadas, se realiza el diagrama de flujo para los procesos involucrados, con los cuales se estructuran matrices como:

Matriz Causa & Efecto: Se enfrentan las etapas de cada proceso contra las CTQ's priorizadas, respetando la ponderación dada por el cliente. Con el resultado de la matriz Causa & Efecto se procede a realizar el mapa detallado.

Mapa detallado: A cada una de las etapas que resultaron importantes de la matriz anterior se les hace un análisis profundo e individual con el cual, se busca obtener las entradas que hacen posible dicha etapa.

MDF o Matriz de Despliegue de Funciones: En la cual se comparan las entradas de cada etapa contra las causas que resultaron significativas luego de la matriz Causa & Efecto.

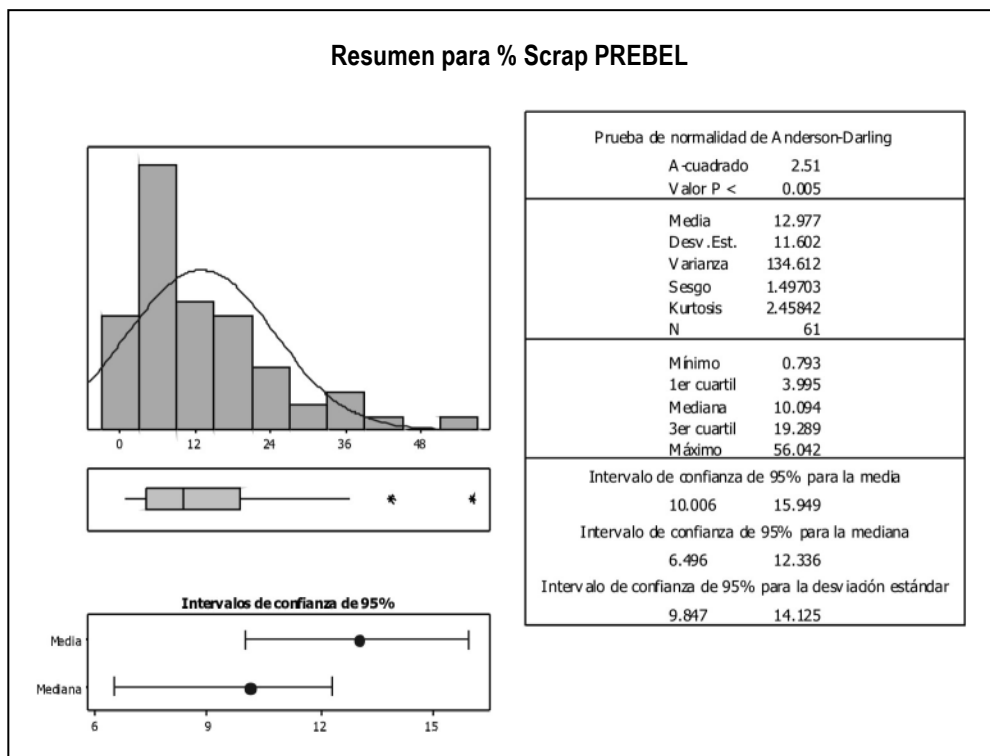
Matriz AMEF o Análisis de Modo y Efecto de Falla: En la cual se reconoce y evalúa la falla potencial del proceso, y sus efectos. Además, se identifican las acciones que

puedan eliminar o reducir las posibilidades de que ocurra una falla potencial.

Como evaluación estadística de la etapa, se realiza el análisis de capacidad de los datos para conocer la estadística descriptiva de los mismos y proceder a realizar la prueba de capacidad, dependiendo de si su comportamiento es normal o no.

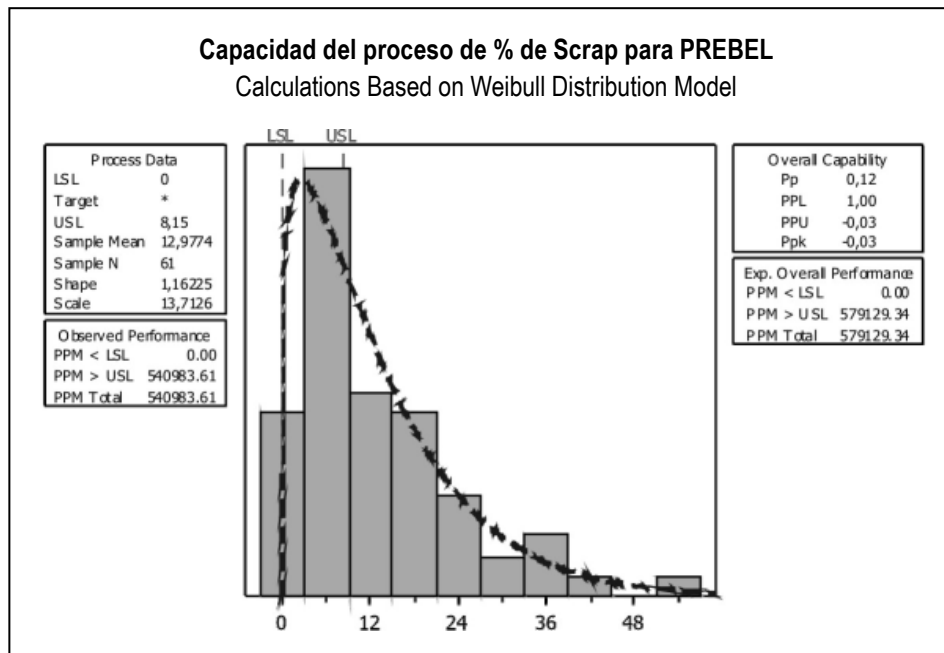
En la gráfica 2 y 3, se presenta la estadística descriptiva de los datos de scrap para las marcas PREBEL S.A. y la prueba de capacidad de los datos, respectivamente.

GRÁFICA 2
Estadística descriptiva para los datos de PREBEL S.A.



Basados en el análisis anterior, se nota que los datos PREBEL S.A., no se comportan como normales debido a que la prueba de Anderson Darling arroja un valor P menor que 0.05. A su vez se nota que la curva está sesgada hacia la derecha.

GRÁFICA 3
Análisis de capacidad para los datos de PREBEL S.A.



Del análisis anterior se lee que la capacidad actual del proceso de envasado de un colapsible, para las marcas propias de PREBEL S.A., es de 0.12 y realizando el cálculo del nivel sigma se encuentra que es igual a 0.36, lo que indica que este proceso está lejos de ser un proceso Seis Sigma.

También se observa que la curva está descentrada con respecto a los límites de especificación establecidos por el cliente.

De la misma manera se realizó el análisis de capacidad para los datos de AVON, donde se encontró que los datos no se comportan como una normal, la capacidad actual del proceso es de 0.22 y por lo tanto su nivel sigma es 0.66.

Analizar

El principal objetivo de esta etapa es identificar la causa raíz del problema y confirmarla con datos, entrando en los detalles y aumentando la comprensión del proceso y del problema. Este objetivo se logra cuando se obtiene un modelo matemático, en el cual se encuentran las variables más significativas del problema, que permita predecir el comportamiento del fenómeno en estudio.

En esta etapa se emplean herramientas como: Análisis de correlación, pruebas de hipótesis y la obtención del modelo matemático. Del análisis de correlación se obtiene que el tamaño de lote y la cantidad de granel declarada, tienen relación con el porcentaje de scrap generado. Lo anterior se observa en las gráficas 4 y 5.

Para la gráfica 4, se emplea la siguiente codificación de los datos:

TABLA 3
Codificación para los datos de tamaño de lote

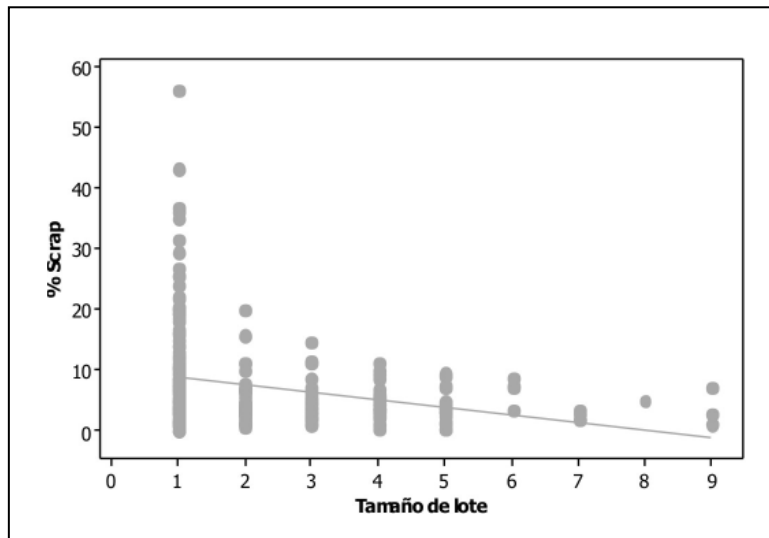
Intervalo Tamaño de Lote (Kg)	Codificación
<499	1
500-999	2
1000-1499	3
1500-1999	4
2000-2499	5
2500-2999	6
3000-3499	7
3500-3999	8
>3999	9

Para la gráfica 5, los datos se codifican de la siguiente manera:

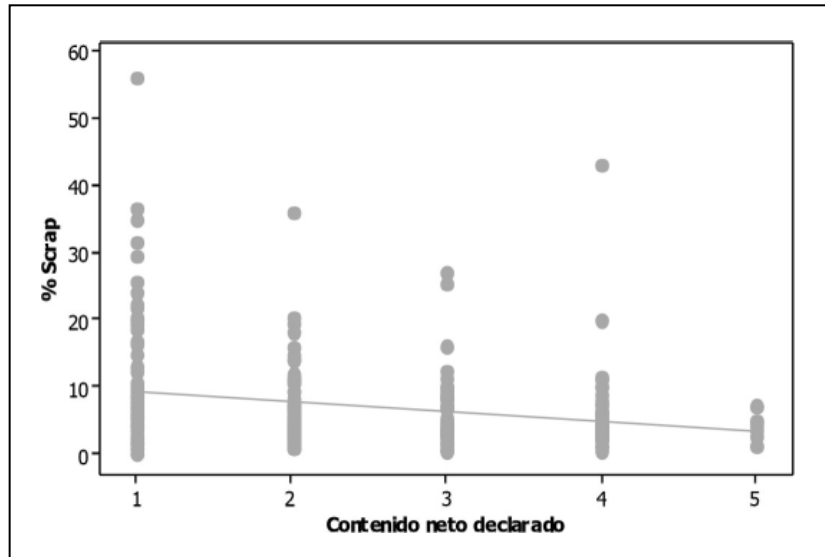
TABLA 4
Codificación de los datos del contenido neto declarado

Intervalo de Contenido Neto (Gr)	Codificación
0-49	1
50-99	2
100-149	3
150-200	4
>200	5

GRÁFICA 4
Comportamiento del porcentaje de scrap, según el tamaño del lote



GRÁFICA 5
Comportamiento del porcentaje de scrap, según el contenido neto declarado



De la prueba de hipótesis se obtiene que hay diferencias significativas entre las siguientes variables, en sus medias y desviaciones, cuando se evalúan sus niveles con respecto al porcentaje de scrap generado:

- Compañía
- Recipiente de surtido de granel
- Tamaño de lote
- Contenido neto declarado
- Material del tubo

Se emplea un análisis de mejores subconjuntos para revisar cuales de las variables anteriores y sus interacciones, pueden describir mejor el indicador scrap (ver tabla 5). De esto se obtiene que el mejor subconjunto es el número 3 ya que éste tiene el mejor coeficiente de correlación ajustado, el menor coeficiente C_p de Mallows y, la menor desviación.

TABLA 5
Análisis de mejores subconjuntos

Subconjunto	Vars	R-Cuad	R-Cuad (ajustado)	Cp de Mal-lows	S	VARIABLES SIGNIFICATIVAS				
						Tamaño de lote	Tipo de recipiente de surtido	Contenido neto declarado	Material	Compañía
1	1	77	76.9	2	3.5575				X	
2	1	22.9	22.7	632.8	6.5064					X
3	2	77.2	77	1.1	3.5448		X		X	
4	2	77.1	76.9	2.6	3.555				X	X
5	3	77.2	77	2.7	3.5488	X	X		X	
6	3	77.2	77	2.9	3.5501		X		X	X
7	4	77.3	76.9	4.4	3.5531	X	X	X	X	
8	4	77.3	76.9	4.4	3.5535	X	X		X	X
9	5	77.3	76.9	6	3.5574	X	X	X	X	X

Con este análisis se realiza la regresión para obtener el modelo matemático, el cual describe el porcentaje de scrap tanto para PREBEL S.A. como para AVON.

$$\% \text{ Scrap} = - 6.42 - 0.785 \text{ Tipo de recipiente de surtido} + 11.7 \text{ Material del tubo}$$

3. TÉCNICAS LEAN

Estas técnicas como tal son una mejora en un proceso administrativo que puede impactar positivamente el indicador de porcentaje de scrap.

Las técnicas implementadas se enumeran a continuación:

Instalación de puesto de control de scrap en la planta de envasado de PREBEL S.A., en el cual se realizan actividades como: verificaciones de surtido a la planta para corroborar que la lista de materiales de una orden de producción concuerden físicamente con el material surtido; verificación de las devoluciones de la planta de envasado al almacén para verificar que el balance de materia de la

lista de materiales concuerde con las devoluciones físicas del material.

Mejoramiento del control estadístico de procesos, mediante la inclusión, de la variable densidad, al software de muestreo como se muestra en la figura 13. Cabe anotar que, anteriormente, la variable densidad se establecía como un parámetro fijo en el sistema obtenido del primer lote de granel fabricado.

La densidad es una variable que depende de gran cantidad de factores como las materia primas, la temperatura, entre otros, por lo que es un error considerar esta variable como un parámetro fijo.

CONCLUSIONES

Con mediciones hechas en planta, se pudo establecer la situación actual para la familia de colapsibles de la planta de envasado de PREBEL S.A., en cuanto al indicador porcentaje de scrap. Los resultados encontrados mostraron que, para el cliente externo principal, AVON, el porcentaje de scrap actual es del 7.13%, mientras que para las marcas propias de PREBEL S.A., se encontró que el porcentaje de scrap actual es aproximadamente del 14.32%.

Con el despliegue de la metodología Seis Sigma hasta la etapa de análisis, la implementación de los sistemas de medición y las técnicas Lean aplicadas, se observa una reducción en el indicador de scrap. Para el mes de agosto, el cliente AVON tiene un promedio de scrap de 5.64% y, para PREBEL S.A., un promedio de 12.76%.

El métrico primario del proyecto es el porcentaje de scrap de granel generado en la planta de envasado de PREBEL S.A., cuyo procedimiento de cálculo se ilustra en el numeral 3.1.8 del presente informe. A su vez se logró establecer como métrico secundario el nivel de servicio cuyo procedimiento de cálculo también se ilustra en el numeral 3.1.8 del presente informe.

Luego de aplicar todas las herramientas de la etapa de análisis de la metodología Seis Sigma, se concluye que las variables que afectan de manera significativa el indicador

son: el tipo de recipiente de surtido, el material del tubo y, en menor proporción, el tamaño de lote del granel.

Se estable que la mejor manera para llevar a cabo las mediciones de scrap en la planta de envasado de PREBEL S.A., mediante la recolección de datos, es de la siguiente manera:

Del balance de materia realizado a través de los datos obtenidos del informe extraído del ERP, luego del cierre de las órdenes. Este informe se genera mensualmente y arroja todos los datos necesarios para el balance de materia respectivo de cada orden de envasado producida y cerrada al último día del mes. Se considera que este reporte ofrece una excelente confiabilidad en el cálculo del indicador, ya que éste se empezó a generar luego del inventario Wall to Wall realizado en el mes de mayo, para toda la fábrica de cosméticos.

Información obtenida de datos recolectados en planta mediante el puesto de control de scrap. Este informe se compone de información obtenida en tiempo real en la planta de envasado de PREBEL S.A. La metodología para la recolección de los datos es que, al momento de hacer el despeje de línea de la orden de producción que acaba de finalizar, se hace un recuento con una balanza contadora del material de rechazo, devoluciones y material rechazado por calidad. Cabe anotar que ambos informes se comparan mes tras mes y, el resultado de dichas comparaciones, arroja valores del 95% en similitud con los datos obtenidos.

Los estimados financieros, entendidos como ahorros, presupuestados luego de cumplir con la meta establecida, son del orden de \$59'583,253 al alcanzar la meta fijada para las marcas propias de PREBEL S.A., y del orden de \$251'543,116 para el principal cliente externo AVON. En consolidado se generará un ahorro aproximado de \$311'126,371.

Se implementará como herramienta del día a día los gráficos de Pareto, aunque no se emplee la metodología Seis Sigma, para todo proyecto de mejora que requiera justificación de decisiones. Lo anterior debido a que dichos diagramas permiten focalizar más rápidamente al contexto de situaciones en cuestión.

Con la metodología Seis Sigma se logra alcanzar el objetivo estratégico, disminución de scrap, para la compañía PREBEL S.A., ya que es una filosofía estructurada para la disminución de la variación en los procesos, además que logra maximizar la calidad de los productos entregado al cliente, lo que a su vez conlleva a una mayor satisfacción por parte de éste.

BIBLIOGRAFÍA

BREAKTHROUGH MANAGMENT GROUP. (2006). Programa de certificación internacional en seis sigma. Tecnológico de Monterrey; módulos definición, medición y análisis

PANDE P.S.; NEUMAN R.P.; CAVANAGH R.R. (2002). Las claves practicas de Seis Sigma. Editorial Mc Graw Hill; pp 4-268.

RINCÓN F.; RESTREPO C.A.; GARCÍA R. (2008). Memorias del Diplomado Seis Sigma. Universidad Eafit; módulos definición, medición y análisis.

PREBELNET (2008). Historia, misión y visión de la compañía. Disponible en línea: <http://prebelnet.prebel.com.co/Aplicaciones/Intranet/HomeIntranet.nsf>. Consulta: Septiembre 08 de 2008.

PYZDEK (1997). Motorola's Six Sigma Program. Disponible en línea: <http://www.qualitydigest.com/dec97/html/motsix.html> 2000-2005. Consulta: Abril 15 de 2008.

DISEÑO CONCEPTUAL DE UN PROCESO DE OBTENCIÓN DE HEMOGLOBINA BOVINA EMPLEANDO SECADO POR LIOFILIZACIÓN

Natalia Ramírez, nramire3@eafit.edu.co - Angélica María Zapata, azapata1@eafit.edu.co

RESUMEN

Los frigoríficos y centros de matanza son uno de los principales generadores de subproductos bovinos, uno de los de mayor volumen es la sangre, los cuales sin una adecuada disposición final pueden llegar a convertirse en grandes agentes contaminantes biológicos. El presente trabajo estudia la obtención de hemoglobina a partir de sangre bovina empleando secado por liofilización para la conservación final, con el propósito de compararla con el producto que se encuentra en el mercado, buscando nuevas aplicaciones para este tipo de subproductos. Se encontró que el tiempo de secado por liofilización para la hemoglobina bovina que presenta mejores resultados de calidad es de 9 horas, obteniendo un producto con una concentración de proteínas de 0.99gr/litro, un porcentaje de humedad de 0.81%, un porcentaje de cenizas de 2.08%, una solubilidad 0.73gr/ml de agua y libre de bacterias como *Salmonella* y *E-Coli*. Posteriormente en un análisis comparativo entre el secado por liofilización y el secado por aspersión para las muestras de hemoglobina bovina, se encontraron diferencias bastante significativas en cuanto a la solubilidad en agua y la concentración de hierro Fe^{+2} , siendo muy superiores para el primer secado. Finalmente se desarrolló todo el diseño conceptual optimizado de una planta de obtención de hemoglobina bovina a escala industrial empleando la técnica de secado por liofilización, y un análisis de rentabilidad del proyecto.

Palabras clave

Sangre Bovina, Hemoglobina Bovina, Liofilización, Aspersión, Proteínas, solubilidad, humedad, cenizas, hierro, residuos bovinos, frigoríficos, *Salmonella*, *E-Coli*, Diseño Conceptual, Optimización.

ABSTRACT

The Slaughterhouses are the principal producers of bovine sub-products, and the blood is the biggest volumen generated, which without an adequate treatment can become biological pollutants. This paper studies the conservation of the bovine hemoglobin by freeze drying, and compares it with the product that is in the market, seeking new applications for such products. It was found that the drying time by freeze drying for bovine hemoglobin that provides better quality results is 9 hours, getting a product with a concentration of proteins 0.99gr/lit, a moisture content of 0.81%, a percentage of ash of 2.08%, a 0.73gr/ml water solubility and free of bacteria such as *Salmonella* and *E-Coli*. In order to do a comparative analysis between the freeze drying with spray-dried samples of bovine hemoglobin, was found a significant differences about solubility in water and the concentration of iron Fe^{+2} , being much higher for the first drying. Finally is developing the optimized conceptual design of a plant for the production of bovine hemoglobin on an industrial scale using the freeze drying, and a cost-benefit analysis of the project.

Key words

Bovine blood, Bovine hemoglobin, lyophilisation, Spray dry, solubility, moisture, ash, bovine waste, Slaughterhouse, *Salmonella*, *E-coli*, conceptual design, optimization.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las grandes preocupaciones del siglo XXI es el impacto ambiental de las corrientes industriales residuales sobre la contaminación de las fuentes hídricas; uno de estos efluentes de gran impacto biológico es la sangre bovina procedente de las plantas de sacrificio animal, cuyo tratamiento es problemático debido a su alto contenido de materia orgánica, el volumen generado y su tiempo de conservación. Con el fin de aprovechar este subproducto, surgen empresas a nivel nacional e internacional como FRGODAN, VEPRO, DANOVO (Proexport, 2008) fomentando el aprovechamiento de la sangre bovina como una fuente de proteínas por medio del secado por Aspersión en el mercado de embutidos. También se han adelantado diversas investigaciones en cuanto al aprovechamiento de la sangre bovina. Entre ellas están: estudios para la fortificación de alimentos en Colombia (Gómez, et.al. 2003), fuente de proteínas como lisina (Márquez et al., 2003), Soluciones de hemoglobina como alternativa a la transfusión convencional (Zheng et al., 2003), hemoglobina bovina como fuente natural de hierro (Reves et al., EU 2007), péptidos antibacteriales derivados de la hemoglobina bovina (Daoud et al., Francia 2005), entre otros estudios.

Bajo este contexto, la liofilización surge como una alternativa de conservación. Este método de secado emplea el fenómeno de sublimación (cambio de fase de sólido a gas) para eliminar el agua presente en los productos (Restrepo, 1963). Un equipo de liofilización consta de una cámara de vacío, un condensador o trampa de vapor y una bomba de vacío que genere el flujo de vapor en el equipo. La congelación es uno de los pasos primordiales en este proceso, seguido de una etapa de transferencia de calor inicial para iniciar la sublimación y una etapa de transferencia de vapor (Restrepo, 1963). Este proceso se lleva a cabo a presiones de vacío inferiores a 4.58Torr y temperaturas por debajo de lo 0°C (Restrepo, 1963), mientras que el secado por Aspersión el proceso se basa en el fenómeno de evaporización a 180°C y presiones atmosféricas; bajo estas circunstancias la liofilización conserva mejor las propiedades nutricionales de los productos y se obtienen productos de menor densidad (Fellows, 2000).

La sangre es uno de los componentes más importantes de cualquier ser vivo altamente rica en proteínas, esta se compone básicamente de un 60% de una fracción plasmática y un 40% de una fracción corpuscular llamada hemoglobina la cual contiene una alta proporción de hierro (Olmeda, 1991). Esta sangre puede desecharse indiscriminadamente en el proceso de sacrificio bovino, en el cual al momento del desangrado una res pierde entre 12 y 14 litros de sangre.

Los resultados de esta investigación pretenden contribuir al desarrollo de procesos alternativos para el aprovechamiento de estos subproductos por medio del secado de liofilización, permitiéndole incursionar en mercados de calidad más exigentes, como es el caso del sector farmacéutico, nutracéutico y el sector de los medios de cultivo (Rey et.al., 2004). Además es una propuesta para adoptar la metodología de producción más limpia agregándole valor a un desecho industrial.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Evaluación de la Liofilización

2.1.1 Obtención de la Materia Prima

La sangre bovina fue donada por la empresa FRIGODAN S.A, la cual es extraída con todas las recomendaciones sanitarias evitando la contaminación de la misma. Esta es mezclada posteriormente con el anticoagulante citrato de sodio en una concentración de 0.1M y conservada bajo refrigeración a 13°C. Esta muestra fue posteriormente caracterizada midiendo su densidad, viscosidad, pH y concentración de proteínas.

2.1.2 Proceso de Centrifugación

La sangre fue depositada en probetas para de 50mL que posteriormente fueron centrifugadas a 2000RPM durante 30 minutos en la centrifuga del laboratorio de Biotecnología de la Universidad EAFIT. Una vez se realizó la diferenciación de fases, se separó la fase sobrenadante (plasma) de la fase precipitada (Hemoglobina) manualmente. Una vez obtenida la hemoglobina se le realizó una caracterización

midiendo su viscosidad, densidad, pH y concentración de proteínas.

2.1.3 Proceso de Liofilización

El proceso de liofilización se llevo a cabo en un liofilizador automático a escala laboratorio marca LABCONCO, proporcionado por la Sede de Investigación Universitaria (SIU) de la Universidad de Antioquia. En primer lugar se realizó una desinfección de los vasos de liofilización con etanol, luego se depositó un volumen de 220mL de hemoglobina líquida en cada uno de los recipientes, los cuales posteriormente, se llevaron a un proceso de congelación a -20°C durante 20 minutos y finalmente se montaron en el cabezal del equipo a una presión de 133mBar y una temperatura de -47°C .

2.1.4 Análisis Estadístico y Diseño de Experimentos I

Se planteó un análisis unifactorial evaluando cuatro tiempos de secado (5, 7, 9 y 15 horas), partiendo del tiempo de secado por liofilización del plasma correspondiente a 16 horas (Fellows, 2000), y se realizaron dos réplicas de cada ensayo. Con estas condiciones se procedió a realizar un análisis de varianza ANOVA con una confiabilidad del 95% empleando el software estadístico STATGRAPHCS 5.0.

2.1.5 Medición de las variables respuesta

Posterior al proceso de liofilización se evaluaron las variables: rendimiento del proceso de secado, humedad sublimada en el proceso, concentración de proteínas, solubilidad y porcentaje de humedad y cenizas, definidos como los parámetros de calidad para este tipo de productos.

Tanto el rendimiento del proceso de secado, como el porcentaje de humedad sublimado, se realizaron por medio del método de diferencias de peso, usando una balanza automática.

En el caso de la concentración de proteínas se empleó el método colorimétrico de Lowry (Lowry, 1951) empleando

una solución de BSA a 1000ppm, y una solución de hemoglobina de 0.001gr/ml de agua.

En el caso de la solubilidad se empleó un método de saturación cualitativa, a un volumen constante.

El porcentaje de humedad y cenizas se midió por medio de diferencias de peso de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana de métodos de ensayo para la harina de trigo (NTC 267, 2003). En el caso del porcentaje de humedad se depositó la muestra en una capsula de porcelana cerrada en un horno a 110°C . Para las cenizas primero se realizó una carbonización de las muestras en un mechero bunsen y luego se ingresaron a una quema en una mufla a 550°C .

2.2 Comparación de los métodos de Secado Liofilización y Aspersión

2.2.1 Obtención de la materia prima

La muestra de hemoglobina secada por aspersión se obtuvo por intermedio de la empresa Frigodan en Bogotá. Este producto se obtiene a partir de sangre higiénicamente recolectada de bovinos técnicamente beneficiados, con adición de sales anticoagulantes, debidamente refrigerada, se centrifuga hasta obtener la separación del plasma y la fracción hemoglobina. La hemoglobina es sometida a un proceso de secado por aspersión a temperatura de 200°C (Frigodan, 2008).

2.2.2 Análisis Estadístico y Diseño de Experimentos II

Se realizó un segundo diseño de experimentos para evaluar los tipos de secado por liofilización y aspersión, por medio de un diseño unifactorial. También se empleó un análisis de varianza ANOVA con una confiabilidad del 95% empleando el software STATGRAPHICS 5.0.

2.2.3 Medición de las variables respuesta

Para este bloque, se realizaron los mismos análisis de la etapa de liofilización (concentración de proteínas,

solubilidad, porcentaje de humedad y cenizas) empleando los mismos métodos, sin embargo en este caso se adicionó una medición del contenido de hierro Fe+2, el cual se llevó a cabo por un método fotométrico a 510nm (Correa, 2005).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 de la Liofilización

En la figura 1 se pueden observar los resultados de las variables donde se obtuvo una diferencia significativa entre los tiempos de secado del proceso de liofilización. Con base en esto en la figura 1 (a) se puede analizar que a mayores tiempos de secado el rendimiento del peso seco es mayor, obteniéndose un mayor rendimiento a las 9 horas de secado de 83.49gr; esto se debe a que en un lapso mayor de tiempo se alcanza a sublimar una mayor cantidad de agua, logrando un mayor rendimiento en el secado. En la figura 1(b) se pueden observar dos grupos homogéneos, uno entre los tiempos de secado de 5 y 7 horas con un promedio de 2.2% y otro entre los tiempos de 9 y 15 horas con un promedio de 0.59%, observándose que a mayores tiempos de secado la humedad residual era mucho menor. Sin embargo en cuanto a la solubilidad se observó un efecto inverso, la cual aumentaba en la medida que el tiempo de liofilización era mucho mayor, como puede observarse en la figura 1 (c), donde se observan también dos grupos homogéneos, uno con un promedio de solubilidad de 0.89gr/ml de agua y otro con 0.7gr/mL de agua. En un equipo de liofilización el vapor que se va generando por la sublimación es succionado por medio de una bomba de vacío, generando una especie de "camino" en la estructura sólida; un mayor tiempo de secado, implica que la estructura es sometida por un mayor tiempo a la generación de estos caminos que pueden generar cambios estructurales en la proteína disminuyendo su solubilidad.

El análisis estadístico a su vez no mostró una diferencia significativa entre los tiempos de secado para la humedad sublimada por el proceso, la cual fue en promedio del 64.75%, valor que se asumió como la humedad específica de la hemoglobina bovina para el posterior diseño del liofilizador. Tampoco se evidenciaron cambios significativos en cuanto a la concentración de proteína y

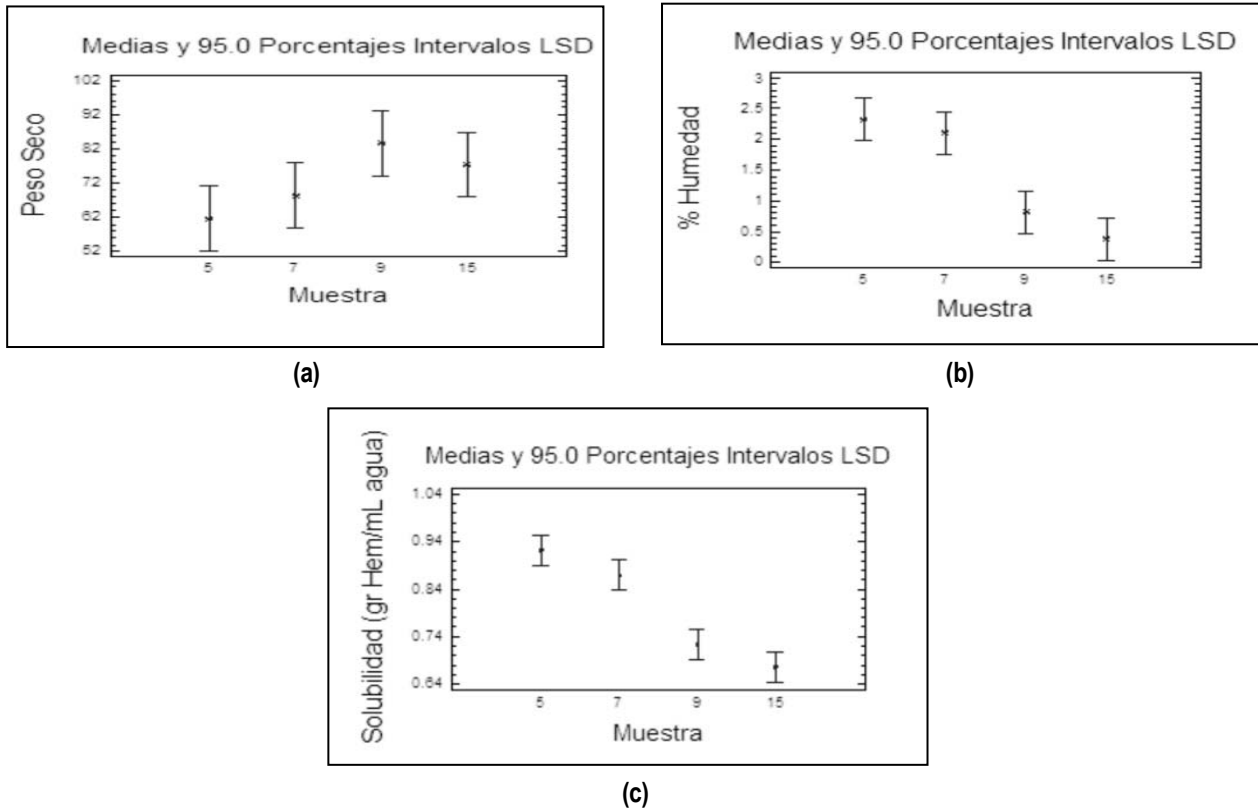
al porcentaje de cenizas como era de esperarse, ya que el método de Lowry mide la cantidad de grupos funcionales presentes en las muestras de hemoglobina y el análisis de cenizas detecta la cantidad de minerales inorgánicos que puedan presentarse en estas; como la hemoglobina estudiada provenía de lotes muy similares bajo las mismas condiciones de procesamiento, finalmente son muestras con estándares muy semejantes. De esta forma se obtuvo una concentración de proteínas promedio de 0.98gr/Lt y un porcentaje de cenizas promedio de 2.27%.

Con los resultados obtenidos, se procedió a elegir la muestra que ofrecía las mejores condiciones de calidad para el producto a menores costos. De esta forma se eligió la muestra de 9 horas por el rendimiento obtenido durante el proceso de secado y por su bajo porcentaje de humedad residual que facilita la conservación del producto. La muestra fue sometida a un análisis microbiológico evaluando la presencia de Salmonella y E-Coli, los cuales fueron negativos, demostrando la calidad sanitaria del producto a lo largo de todo el proceso. Bajo estas condiciones se determinó que la muestra estándar de liofilización se obtuvo con un tiempo de secado de 9 horas, obteniendo un rendimiento de 83.49gr de hemoglobina seca, una concentración de proteínas de 0.99gr/mL, un porcentaje de cenizas de 2.08%, un porcentaje de humedad de 0.81% y una solubilidad de 0.73gr/mL de agua.

3.2 Comparación de los métodos de secado liofilización y aspersion

En la figura 2 se observa una fotografía comparativa de las muestras de hemoglobina bovina secadas por aspersion y por liofilización. Dentro de las principales diferencias se observa su granulometría, siendo mucho menor para la aspersion y más suave, mientras que en el caso de la liofilización son escamas de bajo peso molecular. El color es otro factor diferenciador, siendo en la liofilización de un color rojo escarlata más similar a la hemoglobina líquida; finalmente el olor a hierro típico de la hemoglobina, es mucho más concentrado en las muestras liofilizadas. En la figura 3 se pueden observar los resultados de las variables que presentaron una diferencia significativa en cuanto al tipo de secado.

FIGURA 1
Resultados de las variables respuesta en la liofilización. (a) Rendimiento del secado en peso seco
(b) Porcentaje de Humedad residual (c) Solubilidad en agua



En la figura 3 (a) se observa con claridad la diferencia en la solubilidad de ambas muestras en agua. Mientras que en la liofilización el promedio fue de 0.73gr/mL de agua, en la aspersión fue de 0.04gr/mL, prácticamente un 90% menos. En la figura 4, se puede observar este fenómeno cualitativamente. Esta gran diferencia se debe principalmente a la desnaturalización que sufren las proteínas en el secado por Aspersión. La temperatura de degradación de las proteínas oscila en un promedio de 70°C (Fellows, 2000), si se tiene en cuenta que el secado por aspersión se realiza a 200°C (Frigodan, 2008), ya las proteínas sufren un proceso de desnaturalización, cambiando su estructura globular, por una estructura abierta que deja al exterior los grupos hidrofóbicos presentes en ésta, disminuyendo su compatibilidad con el agua, y por ende disminuyendo la solubilidad de esta, limitando su uso en varios productos como los farmacéuticos. Desde este punto de vista, la liofilización por las bajas temperaturas de

operación (-47°C), pueden conservar la estructura globular de las proteínas mejorando su solubilidad en agua.

En la figura 3 (b) también se observa las diferencias en cuanto a la concentración de hierro de ambas muestras. En el caso de la aspersión se obtuvo una concentración promedio de 54.6ppm/gr de hemoglobina y en la liofilización una de 73.7ppm/gr, prácticamente un 26% menor. Esto se debe, a que la prueba empleada mide la concentración de Fe+2 presente en la muestra, y en el secado por Aspersión la muestra es secada con una corriente de aire, lo que puede ocasionar que muchas partículas de Fe+2 se oxiden a Fe+3, sin ser detectadas por el método empleado.

El análisis estadístico a su vez no mostró una diferencia significativa entre los tipos de secado en cuanto a la concentración de proteínas y el porcentaje de cenizas, como era de esperarse por las razones mencionadas

previamente en la sección 3.1, obteniendo unos promedios de 0.985gr/mL y 2.33% respectivamente. De igual forma no se presentaron diferencias significativas en cuanto a la humedad residual de ambas muestras, obteniendo un promedio de 1.57%; ambas técnicas de secado tienen como objetivo final eliminar la mayor cantidad de agua presente en el producto, sin embargo las diferencias se pueden presentar en otras variables importantes para el producto como la solubilidad y la concentración de hierro analizadas previamente.

Es importante en este punto aclarar que no existe un mejor método de secado, simplemente la elección de este depende del tipo de mercado, el tipo de producto que se desea y los costos de operación, de allí que al evaluar estas técnicas de secado, sólo se quiere comparar el producto obtenido con la liofilización con respecto a lo que se encuentra en la actualidad en el mercado, con el fin de buscar mercados alternativos de comercializar para este tipo de subproductos. Aunque en este análisis tres de los criterios establecidos no presentaron diferencias significativas y es más económica la aspersión, se presentaron grandes diferencias en cuanto a la solubilidad y la concentración de

hierro. Una de las principales características para pensar en un producto farmacéutico, nutracéutico o en el sector de los medios de cultivo es la solubilidad en agua (Rey et.al., 2004). Son pocas las proteínas realmente solubles en agua (Fellows, 2000), lo cual hace de la hemoglobina obtenida por liofilización, un producto de gran aplicabilidad en este mercado, gracias a su alto porcentaje de solubilidad y concentración de hierro.

FIGURA 2
Comparación cualitativa de la hemoglobina bovina
secada por Aspersión y por liofilización

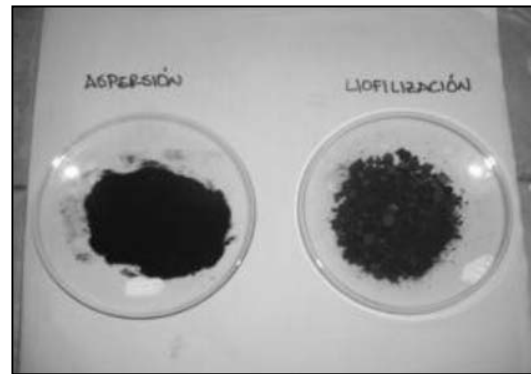
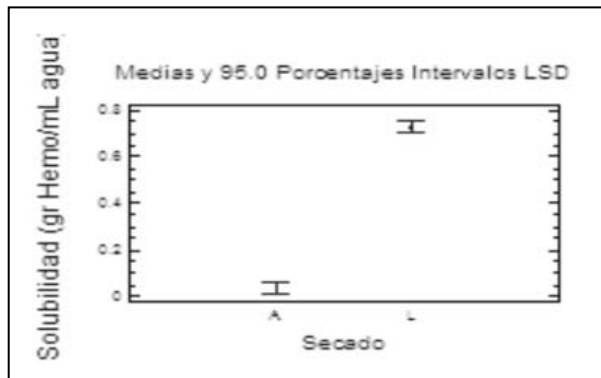
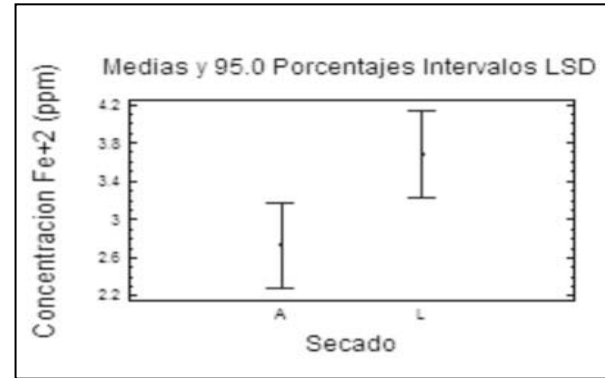


FIGURA 3
Resultados de las variables respuesta significativas para la comparación entre liofilización y Aspersión.
(a) Solubilidad (b) Concentración de hierro

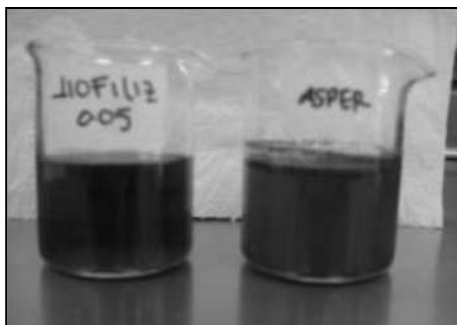


(a)



(b)

FIGURA 4
Comparación cualitativa de la solubilidad de la hemoglobina bovina secada por Aspersión y por liofilización



4. DISEÑO CONCEPTUAL

La elaboración de un diseño conceptual, es de vital importancia para tomar decisiones económicas, de infraestructura y de capacidad frente a un proceso de producción.

Para desarrollar con éxito el diseño conceptual, se debe tener en cuenta el tipo de proceso, los balances de masa y energía, especificación de las corrientes y servicios industriales, especificación de los equipos y la heurística, evaluando por último los costos de capital, manufactura y la viabilidad del proyecto. (Turton, 2003)

4.1 Capacidad y Ubicación de la planta

Para determinar la capacidad de la planta se estudio la distribución de los diferentes frigoríficos del país, encontrando en Agrocadenas que Antioquia conformaba el 13,06% (15 Frigoríficos de los 114), los cuales generan aproximadamente 6927.48 Ton de sangre al año. Con base en esto se decidió diseñar la planta contando con esta capacidad. De igual forma se definió la ubicación de la planta en el municipio de Giradota a 24 Km de Medellín, por la cercanía a la Central Ganadera uno de los principales proveedores.

4.2 Descripción del Proceso

El la figura 5 se muestra un diagrama de bloques que resume todas las etapas del proceso estudiadas. En primer lugar se realiza una recepción de la materia prima (Sangre y citrato), la cual pasa a un sistema de almacenamiento refrigerado para conservar sus propiedades; posteriormente la mezcla se lleva a un proceso de centrifugación donde se separa el plasma de la hemoglobina, el cual es empacado para ser comercializado en su estado líquido. La hemoglobina a su vez pasa a un tanque de almacenamiento en frío, unidad adicionada con el fin de convertir todo el proceso en un sistema continuo, para completar el tamaño del batch requerido por el congelador y el liofilizador. Una vez completado el volumen requerido, se pasa a un proceso de congelación en una cava con bandejas a 20°C durante una hora, y luego pasa a un proceso de secado por liofilización durante 9 horas.

FIGURA 5

Comparación cualitativa de la solubilidad de la hemoglobina bovina secada por Aspersión y por liofilización



4.3 Balances de Masa y Energía

Una vez definido el proceso se realizaron los balances de materia y energía. Debido a que el proceso analizado no involucra ninguna reacción dentro del proceso, básicamente las entradas son iguales a las salidas. En el anexo 1, se puede encontrar el diagrama de flujo (PFD) de todo el proceso, con la tabla de corrientes, de equipos y de utilities. En el proceso de centrifugación se usó un criterio de separación el 36% obtenido como la proporción de hemoglobina de la sangre en la parte experimental del proyecto. En el proceso de liofilización se asumió el 64.75% de humedad retirado por medio de la sublimación. Con base en estos criterios, ingresando un flujo de 1312Kg/h de sangre, se obtienen 191.77Kg/h de hemoglobina bovina liofilizada, lo cual en un año representa 1009 Ton.

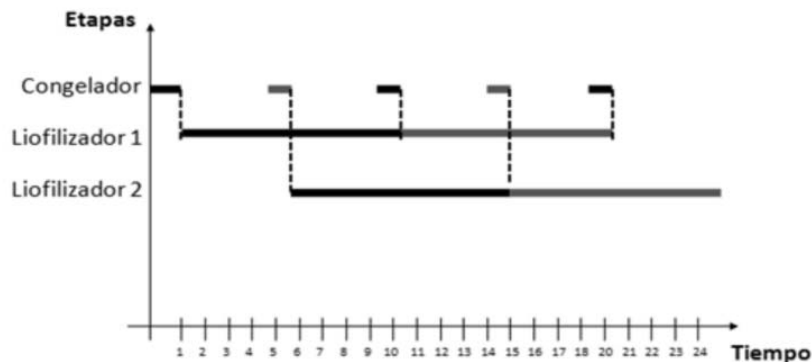
En este punto del proceso también se realizó un análisis para determinar el tamaño del Batch del proceso. Desde principios del proyecto se tomó la decisión de operar dos turnos de 16 horas para evitar costos de mano de obra adicional; sin embargo después de realizar las pruebas experimentales se obtuvo que el tiempo de secado para la hemoglobina bovina es de 9 horas, de allí que en este lapso de tiempo no alcanzan a completarse los dos batch de liofilización. Bajo estas circunstancias se plantearon varias alternativas:

- Aumentar un turno de operación para completar los dos batch del liofilizador, aumentando los costos de operación y perdiendo una gran porción de tiempo del turno.
- Realizar sólo un batch de operación disminuyendo la capacidad de producción, ya que el máximo tamaño de liofilizador a nivel comercial procesa 3 Ton, y en este caso el tamaño del batch sería de 8 Ton.
- Optimizar el proceso incorporando dos liofilizadores en paralelo que disminuyan el tiempo de ciclo del proceso y reduzcan el tamaño del batch logrando una mayor flexibilidad.

Tomando la opción de optimizar el proceso se realizó un análisis por medio del diagrama de gantt que se presenta en la figura 5.

Partiendo de este análisis, el tiempo de ciclo se reduce a 4.5 horas, lo que permite realizar durante las 16 horas de operación tres batches de 2.8 Ton cada uno, y emplear más eficientemente el congelador, aumentando su frecuencia de uso de 7 horas a 3.5 horas.

FIGURA 6
Diagrama de Gantt para la optimización del proceso de obtención de hemoglobina bovina liofilizada



4.4 Hojas de especificación de equipos y Diseño Heurístico de equipos

Una generalización para el diseño de equipos, es que éste debe ser seleccionado, siempre que sea posible. Si el equipo es estándar, el fabricante puede tener el tamaño deseado en el almacén. En cualquier caso, el fabricante puede citar por lo general un precio más bajo y dar mejores garantías para equipos estándar o para equipos especiales (Peters y Timmerhaus, 1991). Antes de realizar el contacto con el fabricante, el ingeniero debe evaluar el diseño de las necesidades y preparar un anteproyecto de hoja de especificaciones para el equipo. La especificación preliminar de esta hoja puede ser utilizada por el ingeniero como una base para la preparación de los parámetros finales, o puede ser enviado a un fabricante con una petición de sugerencias y de fabricación de la información (Peters y Timmerhaus, 1991). Para este proyecto se realizaron hojas de especificación y diseño heurístico para los siguientes equipos (Ver Anexo):

- Recipiente (V-101)
- Mezcladores en frío (TA-101, TA-102, TA-103)
- Bombas (P-101, P-102)
- Centrífuga (CE-101)
- Congelador (RE-102)
- Liofilizadores (L-101, L-102)

4.5 Estimación de Costos

En la tabla 1 se muestra un resumen de todos los costos de operación del proyecto. Prácticamente el 85% de estos costos se encuentran en el capital y los costos de los utilities. En ambos casos los mayores costos se deben a los equipos de liofilización, cada uno lleva una inversión de \$2700 millones y consumen electricidad, vapor y cw.

TABLA 1
Costos de Operación del Proceso con dos liofilizadores

Costos del Proyecto	
Costos de Capital	\$ 6,495,539,850.00
Costos de Mano de Obra	\$ 178,323,600.00
Costo de Utilities	\$ 5,310,138,796.00
Costo Materias Primas	\$ 1,898,212,536.00
COMd	\$ 10,732,748,230.50

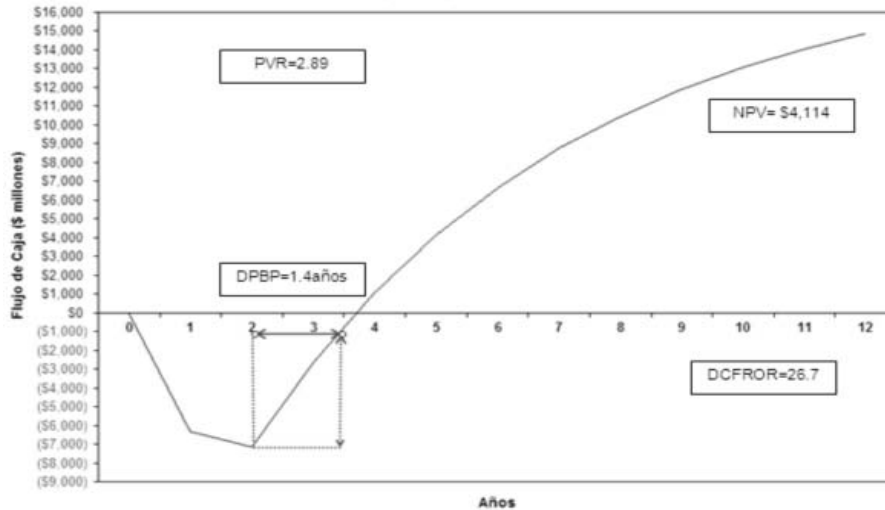
Los costos de mano de obra implican ocho operarios en la planta de procesamiento y 15 más en cada frigorífico. En las materias primas se observa una gran ventaja ya que la sangre y el citrato son de bajo costo.

5. ANÁLISIS DE RENTABILIDAD

Partiendo de una inversión de capital total de \$8,814,447,576, se realizó un análisis de rentabilidad del proyecto a un período de 12 años, con una tasa de impuestos del 33%, una tasa de interés efectiva anual del 21%, y un precio

de venta constante de \$22,000/kg de hemoglobina para un total de producción de 1009Ton/año. El flujo de caja descontado de la figura 7, muestra un NPV positivo indicando que el proyecto es económicamente rentable. Además se muestra un retorno a la inversión (DPBP) de 1.4 años, una relación beneficio/Costo (PVR) de 2.89 y una tasa de retorno a la inversión (DCFRCR) del 26.7% superior a la tasa de oportunidad del 21%.

FIGURA 7
Flujo de Caja descontado



5.1 Análisis de sensibilidad

Con el fin de analizar otra alternativa de inversión, se estudió la posibilidad de comprar un solo liofilizador disminuyendo costos de capital y de operación. Los costos de manufactura de esta alternativa se muestran en la tabla 2.

TABLA 2
Costos de Operación del Proceso con un liofilizadores

Costos de Manufactura	
Costos de Capital	\$ 3,723,089,850.00
FCI	\$ 4,393,246,023.00
Costos de Mano de Obra	\$ 357,731,587.20
Costo de Utilities	\$ 4,141,083,165.83
Costo Materias Primas	\$ 1,268,315,928.00
COMd	\$ 8,421,611

Con esta alternativa la producción se reduce a 679 Ton/año reduciendo las ventas, a pesar que se disminuye la inversión de capital a \$5,132,232,000.

TABLA 3
Comparación de las alternativas de Inversión

Flujo de Caja Descontado		
Alternativa	A	B
Inversión Inicial	\$8,894,447,576.45	\$5,132,232,926.
Ventas	\$22,206,294,000.00	\$14,804,684,928.00
NPV	\$4,114,456,870.54	\$1,719,753,678
DPBP (años)	1.4	1.1
PVR	2.89	2.68
DCFROR	26.7%	25.16%

La tabla 3 resume el análisis de factibilidad para ambas alternativas, siendo A la alternativa de invertir en dos liofilizadores y B invertir en un solo liofilizador restringiendo el nivel de producción. Los resultados de todos los indicadores de tiempo, costo y de tasas de interés muestran como la mejor alternativa es la opción A, demostrando la efectividad de la optimización del proceso.

6. CONCLUSIONES

El tiempo de secado por liofilización que permite obtener hemoglobina bovina seca con las mejores propiedades y con las condiciones sanitarias exigidas es el de 9 horas. Aunque no hubo diferencias significativas entre los tiempos de secado en cuanto a la concentración de proteínas y el porcentaje de cenizas, si se pudo observar el efecto del tiempo de secado sobre el rendimiento del proceso de secado, siendo mayor el peso obtenido a periodos de tiempo más largos; a su vez el porcentaje de humedad residual tiende a ser menor entre mayor es el tiempo de secado y la solubilidad tiende a ser mayor a menores periodos de secado.

Considerando la importancia de la solubilidad y el contenido de hierro desde la perspectiva de las industrias nutracéuticas, farmacéuticas y la aplicación de estas en medios de cultivo y agares, se puede concluir que la liofilización se convierte en una opción de secado que ofrece propiedades de mejor calidad sobre la aspersion, que puede dar un valor agregado adicional a la hemoglobina bovina, permitiéndole a este producto incursionar en mercados

más exigentes. Sin embargo la elección de una técnica de secado depende del mercado objetivo, del tipo de producto y los costos de operación, de allí que no se puede concluir que un método de secado es mejor que otro. Además para la aspersion no se efectuó un proceso de optimización que pueda compararse con la liofilización.

El diseño de una planta de obtención de hemoglobina bovina liofilizada requiere una alta inversión en costos de capital, además de altos costos de operación; prácticamente el 90% de los servicios consumidos se deben a los liofilizadores. La definición de la capacidad y ubicación de la planta se definió con base en la generación de sangre bovina en Antioquia y la cercanía con los principales proveedores.

Para cumplir con el procesamiento de toda la sangre desechada en los frigoríficos de Antioquia y maximizar la capacidad de producción, se optimizó el proceso con dos liofilizadores funcionando en paralelo para reducir el tiempo de ciclo de 9 a 4.5 horas, aumentando la frecuencia de uso de los equipos, mejorando la eficiencia del proceso y evitando un tercer turno de operación.

El proyecto es económicamente rentable.

7. RECOMENDACIONES

Se sugiere hacer estudios con otro tipo de anticoagulantes diferentes al citrato de sodio, para evaluar su comportamiento dentro del secado por liofilización.

Realizar un tratamiento alternativo al plasma.

Tener en cuenta una unidad de tratamiento de aguas residuales dentro del proceso, para el posterior lavado de los equipos.

Se sugiere el uso de un molino de frotación después del secado por liofilización para obtener el producto en polvo en lugar de escamas, mejorando la apariencia del producto final haciéndolo más atractivo en el mercado.

Para futuros estudios sería de gran aporte adicionar a este proceso separación del grupo Hemo conocido como hemólisis, para aislar el contenido de hierro dentro de la hemoglobina haciéndolo más efectivo nutricionalmente.

Evaluar la vida útil del producto, con el fin de conocer el tiempo de duración de la misma.

8. BIBLIOGRAFÍA

AGROCADENAS (2004): Sub-productos del bovino, propiedad de los frigoríficos en Colombia, Clasificación de los mataderos según capacidad de sacrificio diaria. Consulta: Agosto, 2008. Disponible en: <<http://www.agrocadenas.gov.co/home.htm>>

DAOUD, Rachid; DUBOIS, Veronique; BORS-DODITA, Loredana. New antibacterial peptide derived from bovine hemoglobin. Disponible en: Science Direct, 2005. <www.sciencedirect.com>

DIMINO, Michael; PALMER, Andre F. Purification of bovine hemoglobin via fast performance liquid chromatography. Disponible en: Science Direct, 2007. <www.sciencedirect.com>

FELLOWS, P.J. Food processing technology principles and practice. 2 ed. United States.: Cambrige England, 2000. p.441-465.

FRIGODAN Ltda (1997): Información de proteínas líquidas y en polvo derivadas de la sangre bovina. Consulta: Julio, 2008. Disponible en: <<http://www.frigodan.com.co/>>

GÓMEZ, Oscar; PINILLA, Javier. Hierro Orgánico, una alternativa para fortificar alimentos. Consulta: Agosto, 2008. Disponible en: AGENCIA DE NOTICIAS DE CIENCIA Y TECNOLOGIA EN COLOMBIA [En línea]. <<http://encolombia.com/medicina/academedicina/noticyt5-2.htm>>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Métodos de ensayo de la Harina de Trigo NTC 267. Bogota: ICONTEC. 2003.

LOWRY, O.H., Protein measurement with the folin phenol reagent. En: J. Biol. Chem. N°193. (1951). pp. 265-275

MONTGOMERY, Douglas. Design and analysis of experiments. 5ed. Estados Unidos. Ed Jhon Wiley & Sons. 2002. p.60-69

OLMEDA, Concepción. Enciclopedia Ciencias Naturales. 1 ed. Colombia. Planeta S.A, 1991. p.130-131.

PETERS, Max; D'TIMMERHAUS, Klaus. Plant Design and Economics for chemical Engineers. 4ed. Colorado. Ed McGraw-Hill.1991.p.78-90

PROEXPORT [En línea]: Empresas comercializadoras de sangre bovina y sus derivados. Consulta: Agosto, 2008. Disponible en: <<http://www.proexport.com.co/SIICExterno>>.

RESTREPO, Leonel. Liofilización. Medellín, 1963. Trabajo de grado (Químico farmacéutico). Universidad de Antioquia. Facultad de química farmacéutica. p. 20-25, 50-56, 143-145

REY, Louis; MAY, Joan C. Freeze-Drying/lyophilization of Pharmaceutical and Biological Products. 2 ed. Maryland, United States. Marcel Dekker, 2004. Capitulo 15 pp. 1-50.

TURTON, Richard. Analysis, Sintesis, and Desing of Chemical Processes. 2ed. New Jersey. Prentice Hall, 2003.p.27-102.

WALAS, Stanley M. Chemical Process Equipment Selection and Design. 1ed. Estados Unidos. Ed BUTTERWORTH-HEINEMANN. 1998.p.224-226, 613, 638-639.

ANEXO 1 Diagrama de Flujo del Proceso

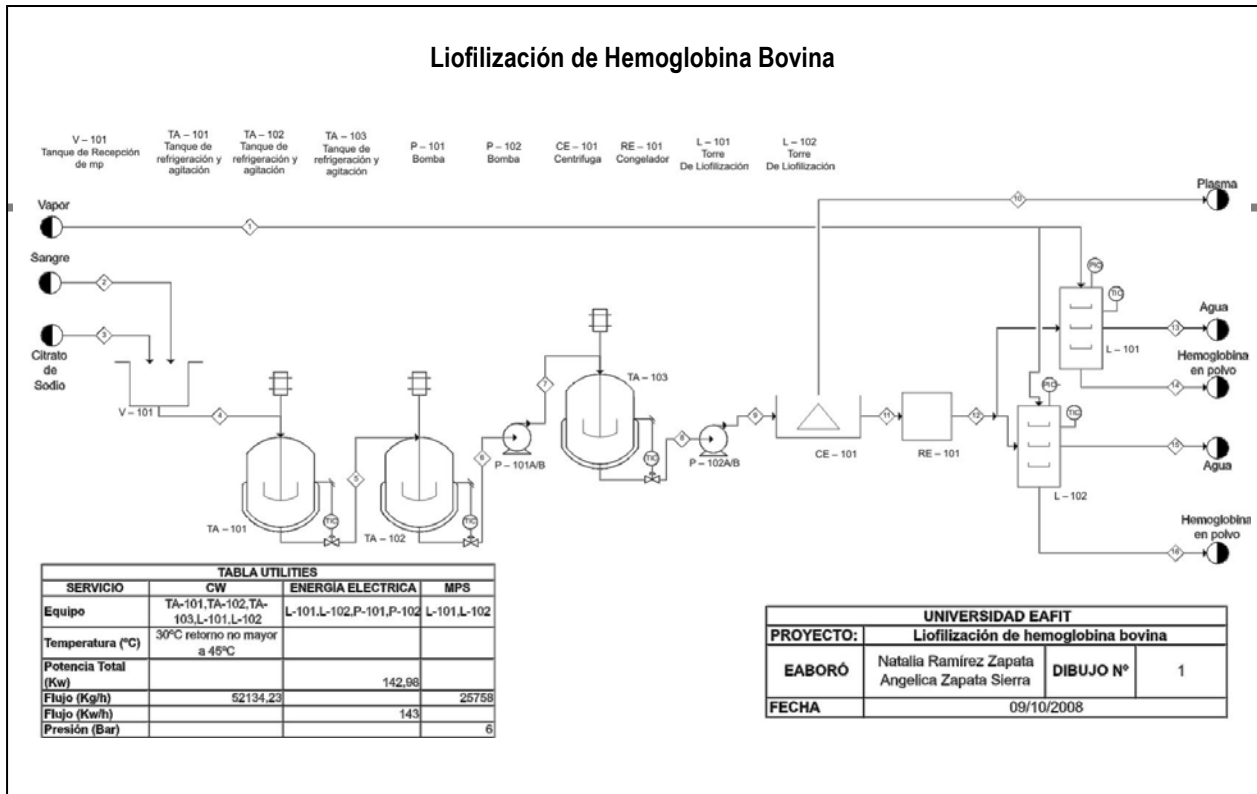


TABLA DE CORRIENTES																			
Corriente No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Temperatura (°C)	200	37	25	31	27	13	20	15	15	13	13	-20	200	200	25	25	25	25	
Presión (barg)	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	5	1.01	1.01	1.01	5	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	
Flujo Másico(Kg/h)	25758	1312	163.09	1475	1475	1475	1475	944	531	531	531	531	12879	12879	339.87	191.2	339.87	191.18	
Componente (%Wt)																			
Sangre	0	1	0	0.889	0.889	0.889	0.889	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Citrato	0	0	1	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0	0	0	0.307	0	0.3071	
Plasma	0	0	0	0	0	0	0	0	0.789	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Hemoglobina	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.889	0.889	0.889	0.889	0	0	0	0.693	0	0.6929
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
Vapor	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE DESENGRASE DE AUTOPARTES CON FINES DE REUSO

*Sebastián Arango Gómez - Andrés López Gutiérrez
Edison GilPavas (Asesor del proyecto)*

RESUMEN

Este estudio presenta los resultados obtenidos al utilizar la electrocoagulación con el fin de remover las grasas y aceites, la demanda química de oxígeno, el carbono orgánico total, surfactantes y aumentar la biodegradabilidad de aguas residuales provenientes de un proceso de desengrase de autopartes, de una planta ensambladora de autos de la ciudad de Medellín. Se utilizaron cuatro electrodos conectados en paralelo, configuración bipolar, usando hierro como electrodo de sacrificio y aluminio como cátodo. Se realizaron ensayos preliminares con pH de 4, 8 y 12, además se evaluaron dos combinaciones de electrodos Al-Fe y Fe-Al, esto con el fin de dejar fijas estas variables para los ensayos experimentales finales. Los experimentos se programaron con ayuda del software estadístico Statgraphics 5.1. Se utilizó un diseño de experimentos multivariable, donde se estudiaron los factores voltaje, pH y distancia entre electrodos, y la variable de respuesta, la remoción de grasas y aceites. Se determinaron las condiciones óptimas: voltaje 13.2, pH 12, distancia entre electrodos de 1.5 cm, y el tiempo de operación fue de tres horas. Se realizó un estudio cinético con las condiciones óptimas de operación y se obtuvieron los porcentajes de remociones: grasas y aceites 94.96%, DQO 87.44%, COT 70.59%, surfactantes aniónicos 25.62% y se alcanzó un valor de la biodegradabilidad de 0.54. Adicionalmente, con el fin de reducir costos en el consumo de energía del proceso, se realizó un estudio cinético alternativo con pH 12, separación entre electrodos 2 cm, ánodo hierro, cátodo aluminio, 5 voltios, en el cual se

obtuvieron los porcentajes de remociones: grasas y aceites 90.57%, DQO 81.93%, COT 50%, surfactantes aniónicos 20.38% y se alcanzó un valor de la biodegradabilidad de 0.56.

Palabras clave

Electroquímica, electrocoagulación, aguas residuales aceitosas, DQO, COT, reactor electroquímico, tratamiento de aguas residuales.

ABSTRACT

This project presents the results obtained in a wastewater treatment study, where electrocoagulation is used to remove the chemical oxygen demand (COD), total organic carbon (TOC), and grease. The wastewater comes from an auto parts degreasing process, in an automotive assembly plant, at Medellín, Colombia. For this study, the following setup was utilized: four electrodes connected in parallel, with a bipolar configuration; iron as the sacrificial electrode; and aluminum as the cathode. The intermediate electrodes were aluminum and iron, placed between the anode and the cathode. Preliminary experiments were at a pH of 4, 8 and 12 pH, with two different combinations of electrodes, Al-Fe and Fe-Al, to keep these variables constant for the experimental trials. In order to find the optimum conditions for COD, TOC, and grease removal, a multivariable design of experiments was employed, using Statgraphics 5.1. The optimum conditions were: Voltage: 13.2, pH: 12, conductivity: 15 mS/cm, distance between electrodes:

1.5cm, and processing time: 3 hours. A kinetics study was done using optimum conditions found previously by DCE and the removal percentage findings were: oils and greases 94.96%, COD 87.44%, TOC 70.59%, anionic surfactants 25.62% y and 0.54 biodegradability was reached. Additionally, in order to reduce costs in the consumption of energy of the process, another kinetics study was developed with pH of 12, iron electrode, aluminum catode and 5 volts, in which the following removal were found: greases and oils 90.55%, COD 81.93%, TOC 50%, anionic surfactants 20.38%, and a biodegradability value of 0.56.

Key Words

Electrochemistry, electrocoagulation, oily wastewater, COD, TOC, electrochemical reactor, wastewater treatment.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural no renovable, patrimonio común de la humanidad, por esto, es nuestro deber hacer un buen uso de ésta.

Los tratamientos convencionales como coagulación química, han sido utilizados en el tratamiento de aguas residuales, la cual consiste en la formación de lodos debido a la unión de coloides formando masas de tamaño considerable, para luego separarlas del agua mediante la adición de más químicos como el Sulfato de Aluminio, Cloruro Férrico, entre otros (Brown, 2001). También han sido utilizado en el tratamiento de aguas residuales procesos biológicos y biotecnológicos. (Farré, 2007)

El uso de la electricidad para el tratamiento de agua fue propuesto por primera vez en el Reino Unido en 1889. En 1904 fue patentado el uso de la electrólisis para el tratamiento de agua mineral (Elmore, 1905). La electrocoagulación con electrodos de aluminio y hierro fue patentada en 1909 en Estados Unidos y fue aplicada por primera vez en una planta de potabilización de agua a gran escala en 1946. Debido al alto costo de inversión y el costo de la electricidad, la electroquímica no tuvo mucha acogida en la industria a mediados del siglo XX, sin embargo, en Estados Unidos y Rusia se realizó una gran cantidad de

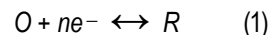
investigaciones y se logró acumular gran cantidad de conocimiento (Chen, 2004).

En las últimas dos décadas el tema del medio ambiente ha cobrado gran importancia. Por esta razón la electroquímica ha recuperado la importancia en el tratamiento de aguas. (Chen, 2004)

Consiste en la generación de coagulantes in situ disolviendo eléctricamente los iones del material utilizado como electrodo.

Los iones de metal son generados en el ánodo, y del cátodo es liberado hidrógeno gaseoso, el cual ayuda a la flotación de las partículas a la superficie del agua, este proceso también puede ser llamado electrofloculación. La electrocoagulación, utiliza corriente continua para desprender el catión activo del ánodo de sacrificio, el que reacciona con los iones Hidroxilos que se forman en el cátodo, desestabilizando los contaminantes suspendidos, emulsionados o disueltos en medio acuoso. Finalmente, los materiales coloidales se aglomeran para ser eliminados por flotación o por decantación. (Chen, 2000).

Como se puede observar en la figura 1, (Mollah et al, 2004), en la electrocoagulación ocurren reacciones de oxidación, estas reacciones son (Rejeshwar, 1997):



En donde:

O , es la especie oxidada

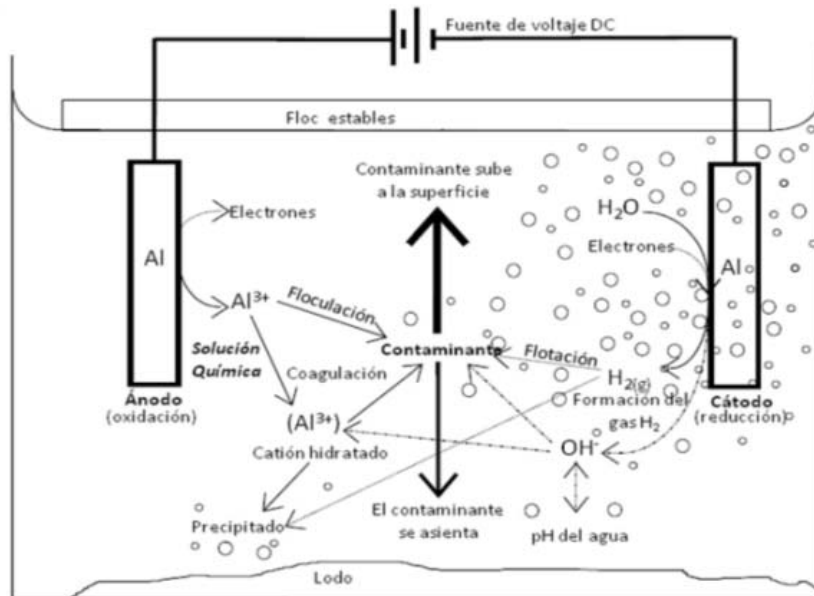
R , es la especie reducida

ne^- , el número de electrones transferidos por mol.

Cuando los electrodos son de aluminio la disolución del ánodo produce especies como Al^{3+} , $Al(OH)_2^+$, los cuales producen espontáneamente los respectivos hidróxidos o polihidróxidos; esto depende del pH de la solución iónica (Mollah et al, 2001). Los hidróxidos y polihidróxidos formados en estas reacciones electroquímicas tienen una gran afinidad por partículas dispersas e iones, lo que permite la coagulación de especies. Y los gases formados, como el hidrógeno y el oxígeno son los que realizan la flotación del

material coagulado (Mollah et al, 2004). Si los electrodos son de hierro lo que se forma es $Fe(OH)_n$ y polihidróxidos como: $Fe(H_2O)_6^{3+}$, $Fe(H_2O)_5(OH)^{2+}$, $Fe(H_2O)_4(OH)^{2+}$, $Fe_2(H_2O)_8(OH)_2^{4+}$, $Fe_2(H_2O)_6(OH)_4^{4+}$ (Mollah et al, 2004).

FIGURA 1
Esquema de una celda electroquímica



Los electrodos pueden tener un arreglo mono-polar o bi-polar, y en serie o en paralelo, según la conexión eléctrica.

En este proyecto se plantea la utilización de la tecnología de electrocoagulación utilizando electrodos de hierro (ánodo, electrodo de sacrificio) y aluminio, como cátodo. Los electrodos se usaron de forma intercalada, y se conectaron en configuración bipolar en paralelo. Para la realización de cada uno de los experimentos se empleó el diseño de experimentos y para la su programación y análisis estadístico se utilizó el software estadístico Statgraphics 5.1.

El proyecto se realizó con el fin de encontrar un tratamiento adecuado, que permita recuperar el agua utilizada en el proceso de desengrase de autopartes de una planta ensambladora de carros, con el fin de reducir costos, evaluar posibilidades de reuso, y finalmente, contribuir de manera significativa con el mejoramiento del medio ambiente.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 MUESTRA

El efluente tratado en el proyecto proviene de los baños de desengrase de autopartes de una ensambladora en Antioquia. El agua residual de dicho proceso se caracteriza por su gran concentración de grasas provenientes de hidrocarburos y surfactantes. Estas concentraciones sobrepasan los límites de vertimiento impuestos por el área metropolitana.

Entre las sustancias que contienen dichas aguas podemos encontrar potasa cáustica, surfactantes aniónicos, grasa Kemokote, sales de fosfatos y cloruros, polvo, arenas y residuos metálicos como Hierro, Aluminio y Zinc (limallas).

Las principales características de la muestra se presentan en la tabla 1.

TABLA 1
Característica de la muestra

Parámetro	Unidades	Valor
Conductividad	(mS/cm)	15
Aluminio	(mg/l)	1,97
Hierro	(mg/l)	0,029874
Grasas	(mg/l)	800
Surfactantes	(mg/l)	368
DQO	(mg/l)	5582
DBO ₅	(mg/l)	919
COT	(mg/l)	800
pH	-	12
Salinidad	%	7.9
Viscosidad	cP	1.07
Densidad	g/cm ³	1.0195.

2.2 Celda electrolítica

La electrocoagulación ha sido llevada a cabo en un reactor de vidrio, de 2.7 L de capacidad, utilizando configuración monopolar, empleando electrodos de hierro y aluminio, de dimensiones 10 cm * 10 cm, con espesor de 2 mm y área efectiva de 65 cm². Utilizando una fuente de poder de corriente directa (1671A BK Precision, Protek).

El proceso fue llevado a cabo a través de tres etapas, los ensayos preliminares, los ensayos finales, y la cinética de remoción de contaminantes.

2.3 Experimentación

2.3.1 Ensayos preliminares

El diseño de experimentos para los ensayos preliminares se realizó con ayuda del programa estadístico Statgraphics 5.1. Se establecieron dos variables (pH y tipo de electrodo), en la cual el pH fue analizado en tres niveles (4, 8 y 12), y el tipo de electrodo en dos niveles (Fe-Al y Al-Fe) y se dejaron fijas las variables de voltaje en 10 V, distancia entre

electrodos 2 cm, agitación 450 rpm y tiempo de residencia 3 horas.

Como variable de respuesta se empleó el % de remoción de grasas y aceites.

2.3.2 Ensayos finales

Una vez obtenidos las condiciones óptimas de pH y tipo de electrodos en los ensayos preliminares, se pasó a realizar un diseño de experimentos que permita analizar las condiciones óptimas de voltaje y separación entre electrodos. El diseño de experimento se realizó con la ayuda del programa estadístico Statgraphic 5.1, usando un diseño multivariable, con dos variables (voltaje y separación entre electrodos), y cada uno de las variables fue analizada en tres niveles, voltaje (5, 10 y 15) y separación entre electrodos (1, 2 y 3 cm).

Como variable de respuesta se empleó el % de remoción de grasas y aceites.

2.3.3 Estudios Cinéticos

Con el fin de determinar la cinética de degradación de los contaminantes encontrados en las aguas residuales provenientes de un proceso de desengrase de una planta ensambladora de autos se realizaron dos estudios cinéticos, un estudio con las condiciones óptimas encontradas en el diseño de experimentos del proyecto y otro estudio con unas condiciones que permitan realizar un análisis en cuanto a un posible ahorro del recurso energía.

Tanto el estudio cinético con las condiciones óptimas como el segundo estudio cinético, se realizaron con un tiempo de residencia de 7 horas con toma de muestra en los 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 y 420 minutos, para ello se dejaron constantes el área sumergida de electrodos, volumen, pH, conductividad, voltaje, distancia entre electrodos y tipo de electrodos.

2.3.3.1 Estudio cinético para las condiciones óptimas

Este estudio se realizó con las condiciones óptimas halladas en el diseño de experimentos, un voltaje de 13.2

y una separación entre electrodos de 1.5 cm, empleando un reactor de 2 L operado en modo batch, hierro como el ánodo de sacrificio, pH 12, agitación 450 rpm, con el fin de analizar el porcentaje de remoción de grasas, remoción de DQO, remoción del COT, análisis de biodegradabilidad.

2.3.3.2 Estudio cinético alternativo

Con el fin de realizar un análisis de reducción de costos, se llevó a cabo una segunda cinética, con los valores de distancia de electrodos de 2 cm. y voltaje de 5, empleando un reactor de 2 L operado en modo batch, hierro como el ánodo de sacrificio, pH 12, agitación 450 rpm). En este segundo estudio cinético se realizó el montaje para la medición de remoción de grasas y aceites, remoción de DQO, remoción de COT, remoción de surfactantes y análisis de biodegradabilidad, además del análisis de hierro y aluminio, lo cual permite identificar la cantidad de hierro y aluminio liberado por los electrodos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para los ensayos preliminares se obtuvo un % de remoción máximo de grasas y aceites de 98.87, para un pH 12 y utilizando hierro como ánodo de sacrificio.

Para los ensayos preliminares se obtuvo un % de remoción máximo de grasas y aceites de 98.41%, para un voltaje de 10 y una separación 2 cm.

En el estudio cinético con las condiciones óptimas de operación se obtuvieron los porcentajes de remociones: grasas y aceites 94.96%, DQO 87.44% como se puede observar en la figura 2 y 3, para el COT 70.59%, surfactantes aniónicos 25.62% y se alcanzó un valor de la biodegradabilidad de 0.54.

Para el estudio cinético alternativo, con pH 12, separación entre electrodos 2 cm, ánodo hierro, cátodo aluminio, 5 voltios, se obtuvieron los porcentajes de remociones: grasas y aceites 90.57%, DQO 81.93% como se puede observar en la figura 2 y 3, para el COT 50%, surfactantes aniónicos 20.38% y se alcanzó un valor de la biodegradabilidad de 0.56.

FIGURA 2
Remoción de grasa y aceites en el tiempo

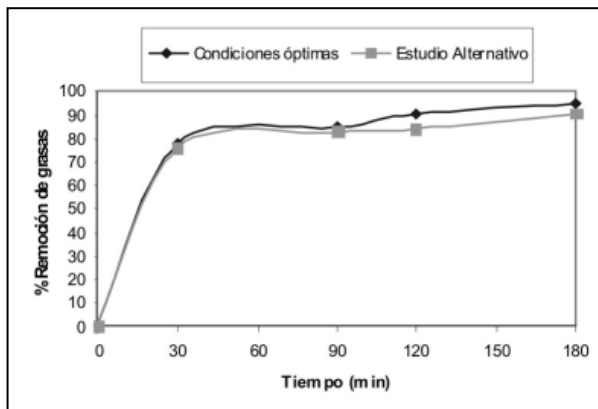
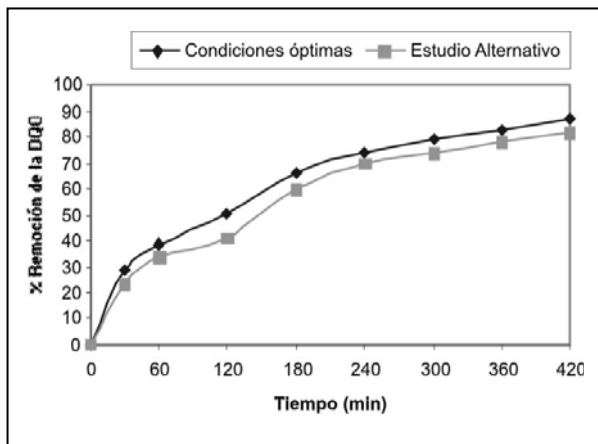


FIGURA 3
Remoción de la DQO en el tiempo



Los resultados obtenidos cumplen satisfactoriamente las expectativas del proyecto, exceptuando el porcentaje de remoción de surfactantes, ocasionado porque el proceso se desarrolla en un medio en las condiciones para que las grasas y aceites se saponifiquen.

Actualmente la legislación ambiental colombiana no es muy estricta con los vertimientos de contaminantes, aunque este motivo, no es óbice para que un proyecto se descarte en un largo plazo. En el análisis económico se puede observar que el proyecto no es viable financieramente. Sin embargo, teniendo en cuenta los convenios ambientales internacionales, se prevé un incremento en las restricciones de los vertimientos de contaminantes, convirtiéndose de esta manera en un proyecto de un alto impacto social, ambiental; y viable financieramente.

Mediante el proceso de electrocoagulación, se logró una alta recuperación del agua residual del proceso de desengrase de autopartes, logrando una reutilización del 90% aproximadamente, lo cual genera un ahorro significativo en el consumo del agua, evitando el consumo desmedido de este recurso natural.

4. BIBLIOGRAFÍA

Brown, T; LeMay, H; Bursten B. Química la ciencia central. Séptima Edición, Editorial Pearson. 1998. ISBN: 970-170169-0.

Farré, María José, Doménech, Xavier, Peral, José, "Combined photo-Fenton and biological treatment for Diuron and Linuron removal from water containing humic acid", Journal of Hazardous Materials, Vol. 147, Pp 167-174, 2007.

Elmore, F.E., "A process for separating certain constituents of subdivided ores and like substances, and apparatus therefore", Br. Patent 13,578, 1905.

Chen, Gouhua, "Electrochemical Technologies in wastewater treatment", Separation and Purification Technology. Vol. 38, pp. 11-41, 2004.

Mollah M. Yousuf; Morkovsky P; Gomes J.A; Kesmez M; Parga J; Cocke D.L. "Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation". Journal of Hazardous Materials. Vol. 114, pp. 199-210, 2004.

Rajeshwar, Krishnan e IBANEZ, Jorge. "Environmental Electrochemistry: Fundamentals and Applications in Pollution Abatement". San Diego: Academic Press, 1997. ISBN 0125762607.

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DE HIGUERILLA Y ACEITE DE PALMA MIL PESOS

Jacqueline Uribe - Natalia Pérez

RESUMEN

Se desarrolla un diseño de experimentos de tres factores y dos niveles sin replicas para la producción de Biodiesel a escala de laboratorio a partir de dos fuentes oleaginosas, aceite de Higuierilla (*Ricinus communis*) y aceite de palma mil pesos (*Oenocarpus bataua*). La producción de Biodiesel se lleva a cabo a partir de la reacción de transesterificación alcalina usando como catalizador hidróxido de sodio y metanol para obtener finalmente alquilesteres y como subproducto glicerina. Con el diseño de experimentos se pretende comparar las propiedades del biodiesel producido con la norma ASTM 6751, usando como variables la Temperatura de reacción, la relación molar alcohol/aceite y la relación másica catalizador/aceite. Los resultados muestran que el biodiesel a partir del aceite de higuierilla no cumple con los parámetros de viscosidad, índice de cetano ni punto de inflamación exigidos por la norma ASTM mencionada, mientras que para el aceite de palma mil pesos se obtienen buenos resultados para cuatro tratamientos.

Palabras clave

Biodiesel, aceite de higuierilla, aceite de palma mil pesos, transesterificación.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles de origen petroquímico ha despertado preocupaciones debido al incremento de la contaminación ambiental. Es por esto que se sugiere utilizar otro tipo de combustibles de origen vegetal (Biodiesel), que se degrada más rápidamente que el liberado por combustibles fósiles.

No obstante, uno de los más grandes inconvenientes de introducir Biodiesel como fuente de energía es su alto costo, debido al precio de las materias primas, representado mayormente en aceites vegetales. Esta dificultad posiblemente se verá mitigada por políticas ambientales del gobierno de Colombia, en las cuales se estima que el consumo de biodiesel aumentará en los próximos años con el uso de mezclas de biodiesel y diesel (Arias, 2007).

Este proyecto busca plantear un sistema de producción de biodiesel a partir de dos fuentes de triglicérido, aceite de Higuierilla (*Ricinus communis*) y aceite de palma mil pesos (*Oenocarpus bataua*) por transesterificación alcalina con metanol.

2. PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

2.1 Materias Primas para la producción de Biodiesel

Para la producción de Biodiesel se requiere, además del Aceite vegetal un alcohol y un catalizador para convertir los aceites y grasas en ésteres alquílicos. Los alcoholes más usados son el metanol y el etanol, debido a su alta reactividad pero en casos como la transesterificación enzimática se usa butanol. En cuanto a los catalizadores se encuentran los ácidos, los básicos, los enzimáticos y los heterogéneos. En la transesterificación básica, los catalizadores usados son hidróxido ó metóxido de sodio o potasio.

a. Aceite de higuera

El aceite de higuera está formado por monoglicéridos, cada uno de 18 carbonos hidrolizado y un doble enlace. Esto representa varias ventajas en comparación a otros aceites como una alta viscosidad, solubilidad parcial en alcohol, estabilidad a altas y bajas temperaturas y una solubilidad parcial en solventes alifáticos derivados del petróleo lo que permite mezclas de diesel y biodiesel (Najib, 2007).

Adicional a esto, el aceite de higuera contiene aproximadamente un 90% de ácido ricinoleico (Ácido 1,2-hidroxilinoico), convirtiéndolo en un producto con un número de cetano alto. Además el aceite no es tóxico, es biodegradable y es una fuente de energía renovable. (Gerpen, 2004).

En Colombia se han desarrollado diferentes trabajos para producir Biodiesel a partir de Aceite de Higuera: La Universidad Nacional de Colombia a través del grupo de investigación de Combustibles Alternativos en su sede de Medellín, realizó un estudio para la producción de Biodiesel a partir de Aceite de Higuera y se hicieron mezclas con el Diesel para determinar su rendimiento. Se encontraron las condiciones que permiten obtener los mayores rendimientos de biodiesel de aceite de higuera mediante un diseño de Experimentos de tres factores y tres niveles,

sin realizar todas las pruebas de calidad requeridas por la norma. De acuerdo con los resultados obtenidos las condiciones óptimas son temperatura ambiente (25°C), una relación metanol/aceite de 9 y un porcentaje de 0.8% en peso de NaOH. El hecho de que la reacción transcurra a temperatura ambiente es muy ventajoso ya que implica una reducción importante en los costos de producción (Benavides, 2007).

b. Aceite de palma mil pesos

La Palma mil pesos es una planta de la selva tropical, que se encuentra en la Costa Pacífica colombiana, en el Amazonas y a orillas del río Magdalena. Es una especie con muchas alternativas de uso y comercialización entre las palmas americanas, tanto por sus frutos como por su capacidad de crecer en suelos pobres. El aceite extraído por evaporación con solvente posee las siguientes propiedades: Índice de acidez de 0,58, índice de peróxido de 3,7 e índice de yodo de 97,68, estos valores son bajos comparados con otros aceites comerciales. En cuanto a su composición química el aceite es insaturado en un 82%, su mayor componente es el ácido oleico y sus moléculas están unidas en forma trioleína en un 45%. (Ríos, 1997).

El aceite de Palma Mil pesos es reconocido por su calidad nutricional y medicinal. Es usado en regiones no interconectadas como combustible aunque su principal uso es como alimento (Ríos, 1997). A nuestro mejor entender no se han realizado investigaciones para utilizar este aceite como materia prima para la producción de Biodiesel.

c. Alcohol

Para producir Biodiesel se consume alrededor de 10-15% de alcoholes como metanol, etanol y el propanol. Normalmente el alcohol se usa en exceso para aumentar la eficiencia de la reacción, al desplazar el equilibrio de la reacción hacia los productos (Demirbas, 2006).

El metanol es el más usado debido a su bajo costo y bajo peso molecular. Al ser el más corto de todos los alcoholes puede reaccionar rápidamente con triglicéridos y al tener un grupo hidroxilo (OH-) puede disolver fácilmente catalizadores alcalinos. Este alcohol no posee azeótropo

como en el caso del etanol y por lo tanto se puede usar con una alta pureza, disminuyendo la formación de jabones debido a la presencia de agua (Castillo, 2007). La principal desventaja del Metanol es que se obtiene del gas natural que es una fuente no renovable, por lo que el biodiesel obtenido no sería totalmente una fuente renovable (Demirbas, 2006).

d. Catalizador básico

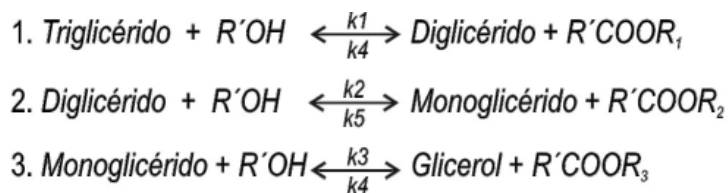
Este tipo de catalizador es el más común para la producción de biodiesel, debido a que la reacción es más rápida, se utilizan temperaturas bajas y se alcanzan rendimientos del orden de 98% (Meher, 2004). Los hidróxidos de sodio y de potasio, son más baratos pero menos activos que el metóxido de sodio. Sin embargo, son una buena alternativa ya que se pueden obtener rendimientos del orden del 98% si se emplean en una concentración de 0,8 a 2% (Arbelaez, 2007).

Para la transesterificación alcalina, se usan reactivos anhidros, porque el agua favorece la saponificación de los ésteres en medio alcalino, produciendo jabones. Estos jabones, dificultan la separación de la glicerina del biodiesel, debido a la formación de emulsiones y por lo tanto se debe minimizar (Zhang, 2003).

2.2 Transesterificación

La transesterificación consiste en una serie de reacciones consecutivas reversibles, que transforman triglicéridos paso a paso en diglicéridos, monoglicéridos y finalmente en glicerol, produciendo en cada etapa alquil ésteres que se les conoce como Biodiesel. Ver figura 1: (Gerpen, 2005).

FIGURA 1. Reacciones de la transesterificación



Estas reacciones se aceleran usando catalizadores ácidos o básicos. Los beneficios de trabajar con catalizadores alcalinos es que permiten una mayor conversión, la reacción es mucho más rápida y el glicerol obtenido es de mayor pureza que con catalizadores ácidos (Ma y Hanna, 1999).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Compuestos

El aceite de higuera fue suministrado por INCORP. El aceite de palma mil pesos fue suministrado por la fundación ESPAVÉ. El metanol anhidro y el Hidróxido de Sodio (NaOH) fueron suministrados por ENKA. La arcilla fue donada por la Dra. Gloria Sierra del departamento de Geología de la Universidad EAFIT, la cal y el ácido fosfórico fueron suministrados por el laboratorio de Ingeniería de procesos de la misma universidad.

3.2 Refinación del aceite

Para disminuir la cantidad de ácidos grasos libres y poder mejorar la eficiencia de la reacción, se utilizó cal en una relación entre un rango de 0,05-0,5 %. También se realizó un blanqueamiento en una relación de 0,2% (arcilla/aceite).

En el proceso de refinación los factores que se evaluaron para determinar los cambios obtenidos en este proceso fueron el índice de acidez y el índice de saponificación. El índice de acidez se define como el número de miligramos de KOH que se requieren para neutralizar los ácidos grasos libres contenidos en 1 g. de grasa y el índice de saponificación es el número de miligramos de hidróxido de potasio, requeridos para saponificar 1 g de sustancia grasa. Estos índices son importantes porque pueden interferir con la reacción de transesterificación, un índice de acidez alto disminuye la eficiencia de la reacción y un índice de saponificación alto disminuye la cantidad de jabones obtenidos aumentando la cantidad de biodiesel. Cabe aclarar que estas condiciones de refinación no se tuvieron en cuenta dentro del diseño de experimentos realizado.

3.3 Proceso de transesterificación

Para la reacción de transesterificación se utilizó un reactor tipo batch de vidrio con salidas para monitorear la temperatura y un condensador para recircular el metanol. Esta reacción se llevo a cabo con agitación constante. (Figura 2)

FIGURA 2
Montaje del equipo de transesterificación

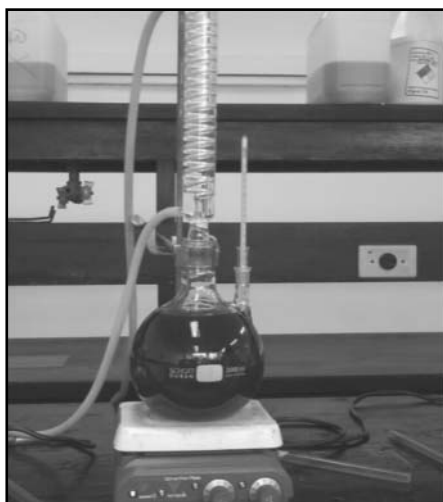


FIGURA 3
Separación de fases



Inicialmente se agregó el aceite al reactor para llevarlo a la temperatura deseada; simultáneamente se preparó el metóxido de sodio mezclando el hidróxido de sodio con el metanol, teniendo precaución con el aumento de temperatura en esta reacción. Cuando el aceite alcanzaba la temperatura deseada se adicionaba el metóxido y se continuaba agitando por 30 minutos. Esta reacción se llevo a cabo a presión atmosférica.

Posteriormente el producto de la reacción se llevó a un decantador para separar las dos fases: Los metilésteres y la glicerina (Fig. 3). Los metilésteres se sometieron a un proceso de lavado con agua caliente en una relación 1:1 en volumen (Fig. 4) hasta que el agua agregada saliera transparente, y finalmente el biodiesel fue secado en un horno a 110°C hasta observar una disminución en el número de burbujas por un tiempo aproximado de 2 horas. Las condiciones de secado del biodiesel no se tuvieron en cuenta para la formulación del diseño de experimentos.

FIGURA 4
Lavado del biodiesel



El biodiesel obtenido se caracterizó bajo la norma ASTM 6751 en el Laboratorio de Crudos y Derivados de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

3.4 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos seleccionado es de 2 niveles y 3 factores como se muestra en la tabla 1, para ambas fuentes de triglicérido.

TABLA 1
Diseño de experimentos

Factores		-1	1
Temperatura	A	25	60
Concentración molar Alcohol/Aceite	B	6	12
Concentración másica Catalizador/Aceite	C	0.8	1

Para el diseño de experimentos se tuvo en cuenta las normas de calidad que pide la legislación colombiana para Biodiesel presentadas en la tabla 2 (Resolución 182087 del 2007).

TABLA 2
Legislación Colombiana para biodiesel

Parámetro	Unid.	Valores (Feb. 1º De 2007)	Método De Ensayo
Densidad a 25°C	Kg/m ³	860 – 900	ASTM D 4052 ISO 3675
Número de cetano	Cetanos	47 mínimo	ASTM D 613 ISO 5165
Viscosidad (cinemática a)	mm ² /s	1,9 – 6,0	ASTM D 445 ISO 3104
Contenido de agua	mg/kg	500 máximo	ASTM E 203 ISO 12937
Punto de inflamación	°C	120 mínimo	ASTM D 93 ; ISO 2719
Corrosión lámina de cobre	Unidad	1	ASTM D 130 ISO 2160
Destilación (PFE)	°C	max 360	ASTM D 86 ISO 3405
Punto de nube/enturbiamient	°C	Reportar (4)	ASTM D 2500 ISO 3015
Punto de fluidez	°C	Reportar (4)	ASTM D 97

Para analizar este tipo de diseños con una sola replica se utilizó el método de Daniel (1959), donde se sugiere examinar la gráfica de la probabilidad normal para estimar los efectos. Los efectos son insignificantes cuando se distribuyen normalmente y los efectos significativos están por fuera de la línea normal (Montgomery, 2001). Para el análisis estadístico se empleó el software STATGRAPHICS Plus 5.1.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Refinación del aceite

Los resultados de la refinación del aceite de higuera se muestran en la tabla 3 y del aceite de palma mil pesos en la tabla 4.

TABLA 3. Caracterización Aceite de Higuierilla

Análisis Físico Químico	Resultado	Valor de Comparación (Benavides, 2007)	Método
Índice de acidez	3,05	2,1	USP 29/ Norma técnica Col. 218
Índice de saponificación	184,75	187,4	USP 29/ AOAC 920, 160 Ed. 15

TABLA 4. Caracterización Aceite de Palma mil pesos

Análisis Físico Químico	Resultado	Valor de comparación (Agudelo, 2004)	MÉTODO
Índice de acidez	0,44	Máx. 5	USP 29/Norma técnica Colombiana 218
Índice de saponificación	193,55	195-205	USP 29/ AOAC 920, 160 Ed. 15

4.2 Caracterización del Biodiesel de higuierilla

A continuación se presenta la tabla 5 con la respuesta del diseño de experimentos para el Biodiesel de higuierilla, donde se incluye la norma aplicable (los datos señalados con gris son los que cumplen la norma) y en la tabla 6 se tiene la respuesta para el biodiesel de palma mil pesos. Las variables son codificadas así:

- Y1: Agua por destilación
- Y2: Gravedad API
- Y3: Índice de cetano
- Y4: Punto de inflamación
- Y5: Punto de fluidez
- Y6: Poder calorífico
- Y7: Punto de nube
- Y8: Viscosidad

Nivel de confianza: 95%

TABLA 5
Tabla respuesta del diseño de experimentos para Biodiesel de Higuierilla (BH)

Tratamiento	A	B	C	Y1	Y2	Y3	Y4
1	1	1	1	2.4	20.9	35.8	97
2	1	1	-1	0.2	21.2	35.4	69
3	1	-1	1	1	20.7	35.58	76
4	1	-1	-1	1.2	20.2	32.88	72
5	-1	1	1	0	21.2	35.74	84
6	-1	1	-1	0.6	21.2	36.3	80
7	-1	-1	1	0	20.9	35.33	67.5
8	-1	-1	-1	0	21	35.38	110
Norma Colombiana				0.5	-	47	93

Tratamiento	A	B	C	Y5	Y6	Y7	Y8
1	1	1	1	-6	15734	2	4.148
2	1	1	-1	-27	16052	4	11.3
3	1	-1	1	-21	15928	-1	18.65
4	1	-1	-1	-24	15976	8	15.87
5	-1	1	1	-18	16140	15	14.26
6	-1	1	-1	-3	16015	3	14.6
7	-1	-1	1	-18	16041	8	18.33
8	-1	-1	-1	-15	16129	7	22.19
Norma Colombiana				-	-	-	1.9-6.0

TABLA 6

Tabla respuesta del diseño de experimentos para Biodiesel de Palma mil pesos (PMP)

Tratamiento	A	B	C	Y1	Y2	Y3	Y4
1	1	1	1	0.4	33.1	52.84	53
2	1	1	-1	0	29.8	47.71	88
3	1	-1	1	0.2	29.7	47.80	94
4	1	-1	-1	0.2	29.2	46.8	74
5	-1	1	1	0.4	31.2	50.07	90
6	-1	1	-1	0.4	35	55.80	76
7	-1	-1	1	0.2	29.2	47.06	112
8	-1	-1	-1	0	29.5	47.22	70
Norma Colombiana				0.5		47	93

Tratamiento	A	B	C	Y5	Y6	Y7	Y8
1	1	1	1	-12	16659	5	4.532
2	1	1	-1	-3	16724	12	4.726
3	1	-1	1	-6	16836	3	4.113
4	1	-1	-1	-3	17174	5	5.162
5	-1	1	1	-21	17167	6	5.042
6	-1	1	-1	-9	17171	8	4.200
7	-1	-1	1	-18	17167	7	5.238
8	-1	-1	-1	-9	17012	5	5.182
Norma Colombiana							1.9-6.0

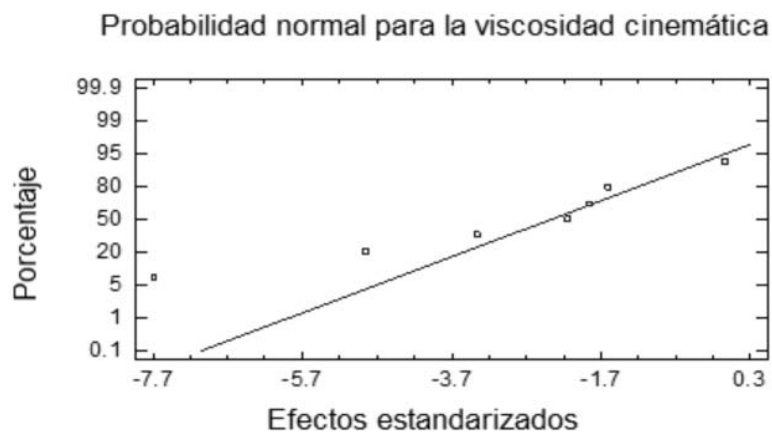
a. Viscosidad

La viscosidad es una propiedad que indica la resistencia a fluir de un líquido debido a la fricción interna de una parte del líquido en movimiento sobre otro. Entre mayor sea la viscosidad más serán los problemas causados al motor

(Gerpen, 2004). La grafica 1. Indica los efectos de los tratamientos en la viscosidad en el biodiesel de higuera, en los cuales los efectos A y B son significativos y en la gráfica 3. se muestran los efectos de los tratamientos para el biodiesel de palma mil pesos, siendo significativos B y las interacciones AC y BC.

GRÁFICA 1

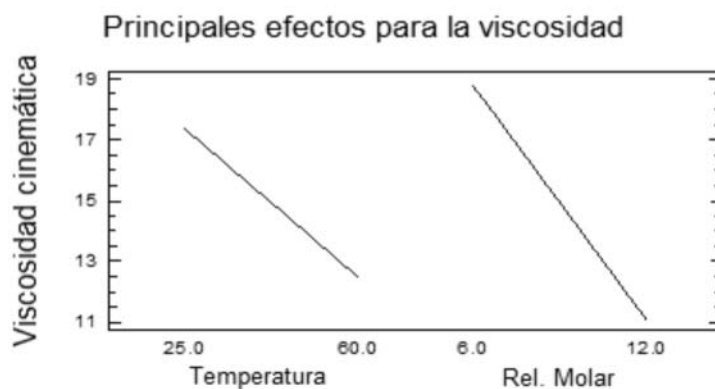
Probabilidad normal para los efectos sobre la viscosidad del Biodiesel de Higuera



En la gráfica 2 se grafican los efectos significativos para ver su efecto en la variable de estudio.

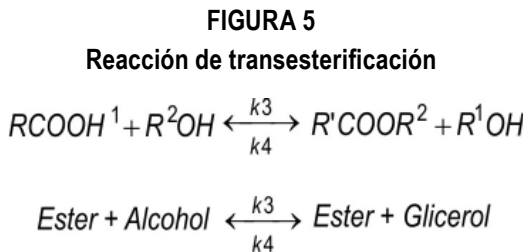
GRÁFICA 2

Principales efectos sobre la viscosidad del Biodiesel de Higuera



En las gráfica 2 se puede apreciar como el factor B (Relación molar de Alcohol/aceite) tiene mayor efecto sobre la viscosidad del biodiesel. Entre mayor es la relación Alcohol/Aceite disminuye la viscosidad del biodiesel. Normalmente el alcohol se usa en exceso para aumentar la eficiencia de la reacción, al desplazar el equilibrio de la reacción hacia los productos (Dermibas, 2006).

Al producir mayor cantidad de biodiesel se reduce la viscosidad del aceite al disminuir la cantidad de mono, di y triglicéridos que aumentan la viscosidad del biodiesel, esto se puede ilustrar con la figura 5.



La temperatura también favorece la reacción de transesterificación, al ser una reacción endotérmica, por lo tanto es otro factor significativo para la reducción de la viscosidad del producto final.

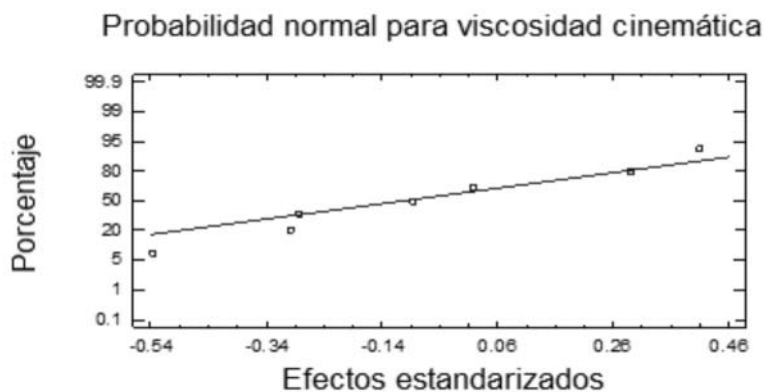
La viscosidad del biodiesel obtenido en este trabajo reportó un valor mínimo de 11.3 cSt y un valor promedio de 16.45 cSt. Se retiró la muestra 1/1/1 (60/12/1) debido a que el

valor de la viscosidad es atípico con relación al resto de datos.

Los datos son consistentes con lo hallado en la literatura donde se observa que el aceite de higuera produce biodiesel de muy alta viscosidad. Esto es debido a la naturaleza del triglicérido del mismo. El biodiesel de higuera (BH) posee un alto contenido de metilésteres del ácido ricinoléico, el cual es de carácter insaturado, además posee un grupo hidroxílico en su estructura que le confiere alta viscosidad. (Benavides, 2007)

En el gráfico 3 se puede observar que para el BPMP el efecto de la interacción AC, BC y B son significativos para reducir la viscosidad. Debido a que este aceite es menos viscoso que el aceite de higuera, la presencia de metanol en el nivel más alto para favorecer la producción de biodiesel, no es necesaria. Podemos concluir que la viscosidad del Biodiesel depende principalmente de la fuente de triglicérido y no de las condiciones de operación del proceso.

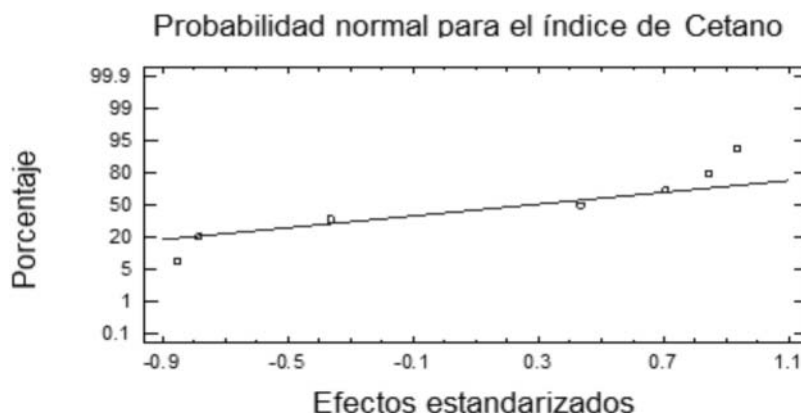
GRÁFICA 3
Probabilidad normal sobre la viscosidad del Biodiesel de Palma mil pesos



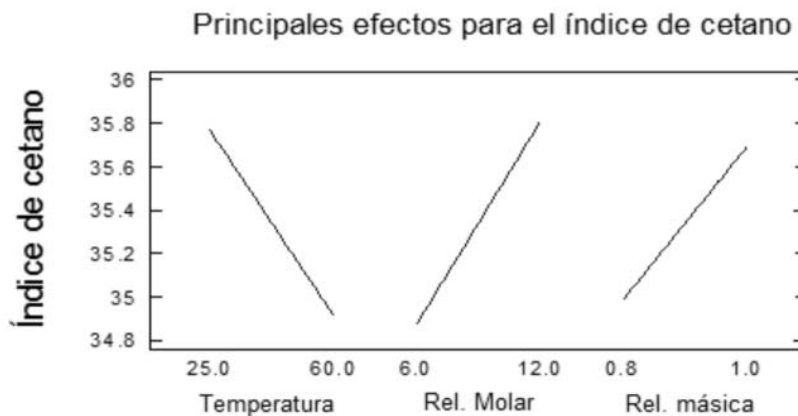
b. Índice de cetano

La calidad de la ignición del combustible está expresada en escala de cetano, un índice de cetano alto tendrá una ignición corta y con una pequeña cantidad de premezclado haciendo la combustión más eficiente. (Gerpen, 2004) En las graficas se muestra la distribución normal para el índice de cetano donde los efectos significativos son BC y AC. La gráfica 4 presenta los principales efectos de los factores estudiados sobre el índice de cetano en el biodiesel de higuera.

GRÁFICA 4
Principales efectos sobre el índice de cetano del Biodiesel de Higuierilla



GRÁFICA 5
Principales efectos sobre el índice de cetano del Biodiesel de Higuierilla

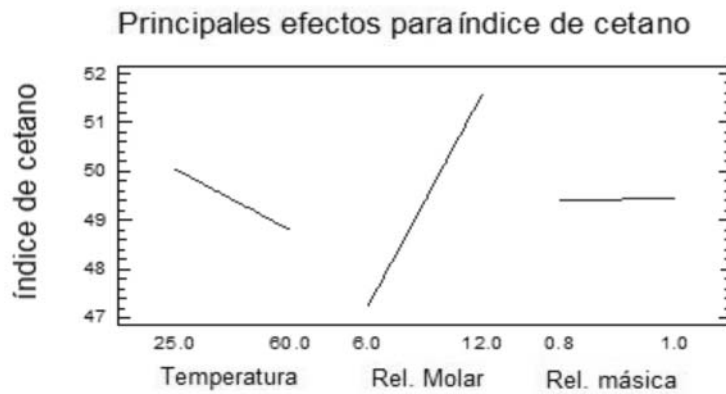


Para esta propiedad el 100% de los resultados incumplen la norma, ninguna prueba reporta un índice de cetano mayor a 47. Esta propiedad está directamente relacionada con la estructura del aceite, entre más saturado esté el aceite tendrá un índice de cetano mayor (Castillo, 2007). En el caso de la higuierilla al tener varios enlaces dobles y grupos hidroxilos, aumenta la viscosidad del aceite disminuyendo el índice de cetano. El valor promedio de los tratamientos fue de 35.30 que es comparable con otros trabajos que reportan un índice de cetano de 38 (Benavides, 2007).

En la gráfica 6 se presentan los principales efectos para el índice de cetano, donde se puede observar que para

el BPMP el índice de cetano depende principalmente de la concentración molar de Alcohol/aceite, además a mayor cantidad de alcohol en la reacción, el índice de cetano aumenta de forma significativa, este comportamiento se relaciona con el equilibrio de la reacción, a mayor metanol se producirá mayor cantidad de biodiesel lo que a su vez aumenta el número de cetano. Además, el tipo de fuente de triglicérido aumenta el efecto sobre el índice de cetano. El aceite de palma mil pesos está compuesto principalmente por ácido oleico (Briceño, 2005), este ácido graso al tener menor número de insaturaciones que el aceite de higuierilla, permitirá obtener un biodiesel con mayor número de cetano (49.41). (Castillo, 2007).

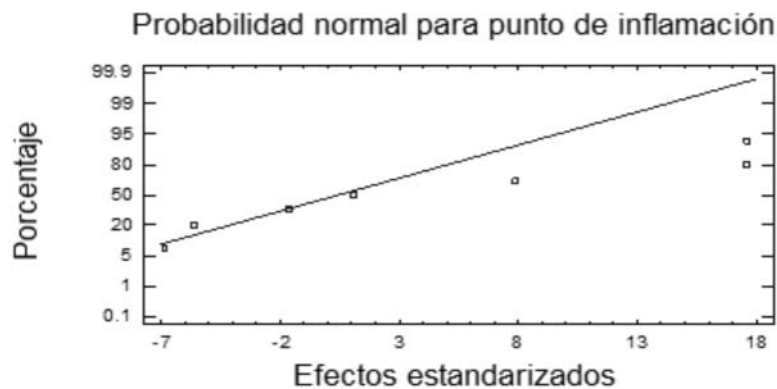
GRÁFICA 6
Principales efectos para índice de cetano de BPMP



c. Punto de inflamación

El punto de inflamación está definido como la temperatura a la cual el combustible dará suficiente vapor para producir una mezcla inflamable, estos valores varían entre 52 - 66°C para diesel, un mayor punto de inflamación indica menor riesgo de inflamación (Gerpen, 2004), en la gráficas 7 de probabilidad normal se presentan los principales efectos de esta propiedad en el biodiesel de higuera, donde los efectos significativos son las interacciones AC y BC.

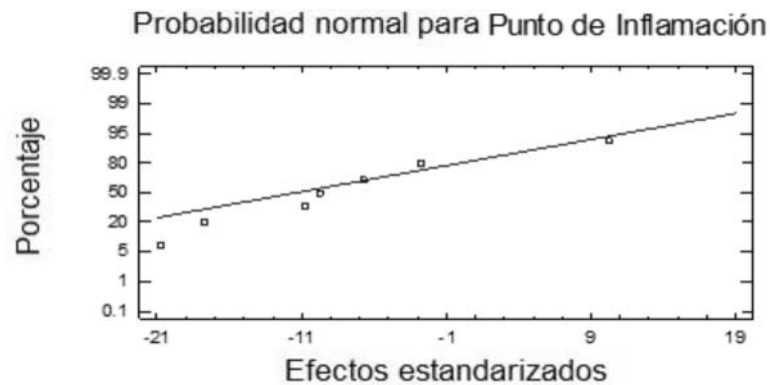
GRÁFICA 7
Principales efectos sobre el punto de inflamación del Biodiesel de Higuera



El punto de inflamación está directamente relacionado con la cantidad de metanol en la muestra que se debe eliminar en el proceso de secado de biodiesel (Castillo, 2007).

Como se mencionó anteriormente las interacciones BC y AC tienen un efecto significativo en el punto de inflamación del biodiesel, sin embargo el comportamiento de los efectos de los factores está directamente asociado con el proceso de secado.

GRÁFICA 8
Principales efectos sobre el punto de inflamación del Biodiesel de Higerilla



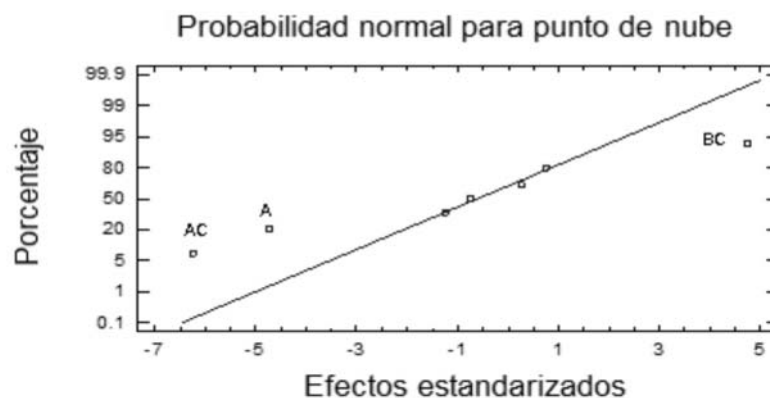
El comportamiento del punto de inflamación para el biodiesel de Palma mil pesos es análogo al comportamiento del Biodiesel de Higerilla.

Durante las pruebas experimentales se observó que se debía mejorar el proceso de secado ya que las muestras presentaban muy bajos puntos de inflamación, por lo tanto se procedió a aumentar el tiempo de secado y la temperatura, de esta manera se mejoró esta propiedad.

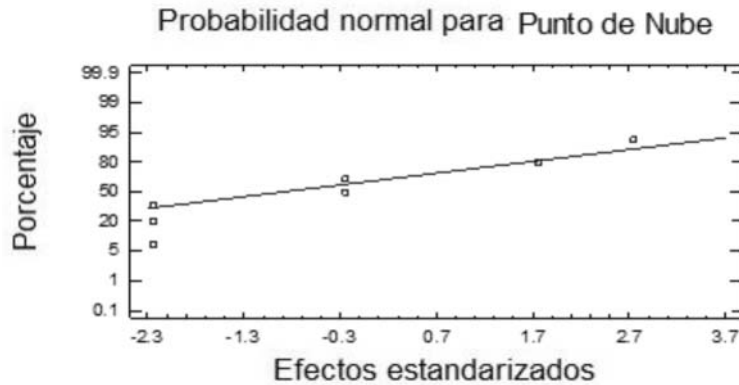
d. Punto de nube

Es la temperatura a la cual algunas de las cadenas pequeñas de carbono contenidas (cera) en el combustible comienzan a aglomerarse y a precipitarse formando cristales, normalmente esta en el rango normal de operación del diesel (Gerpen, 2004). En los gráficos 9 y 10 se presentan los efectos en el punto de nube con los tratamientos trabajados, para el BH y el BPMP, respectivamente y de los cuales el más significativo es la temperatura.

GRÁFICA 9
Probabilidad normal sobre el punto de nube del Biodiesel de Higerilla



GRÁFICA 10
Probabilidad normal sobre el punto de nube del Biodiesel de Palma mil pesos



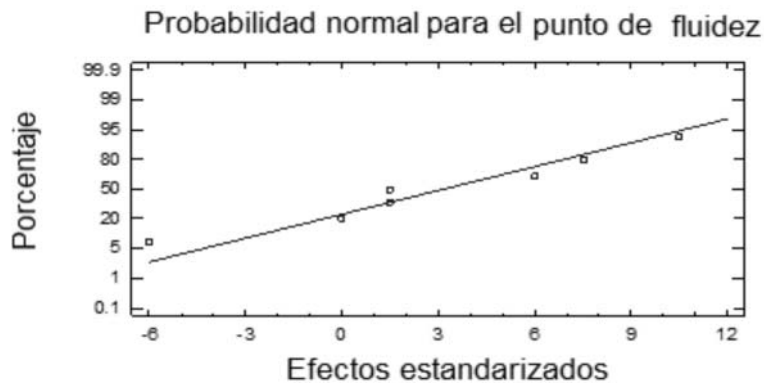
El punto de nube es una propiedad que se ve afectada por la calidad de la refinación del aceite. Una buena refinación del aceite elimina mayor cantidad de compuestos coloreados y material particulado que podría aumentar el punto de nube.

El punto de nube también puede disminuir dependiendo del tipo de triglicérido, es por esto que cadenas largas de la fuente oleaginosa produce un punto de nube menor que aquel que tiene triglicéridos de cadenas cortas de carbono, que precipitan a mayores temperaturas, generando así un punto de nube mayor (Gerpen, 2004).

e. Punto de fluidez

Es una propiedad extrema del punto de nube pues se trata de la temperatura más baja a la cual el combustible es capaz de ser vaciado del recipiente (Gerpen, 2004). El gráfico 11 presenta los principales efectos del punto de fluidez para el biodiesel de higuera bajo los tratamientos trabajados, ningún es significativo para esta propiedad.

GRÁFICA 11
Probabilidad normal sobre el punto de fluidez para el Biodiesel de Palma mil pesos



No hay interacciones significativas sobre el punto de fluidez, todos los efectos siguen una distribución normal, para ambos aceites. El comportamiento de esta propiedad es análogo al punto de nube, por lo tanto dependerá principalmente del proceso de refinación del aceite.

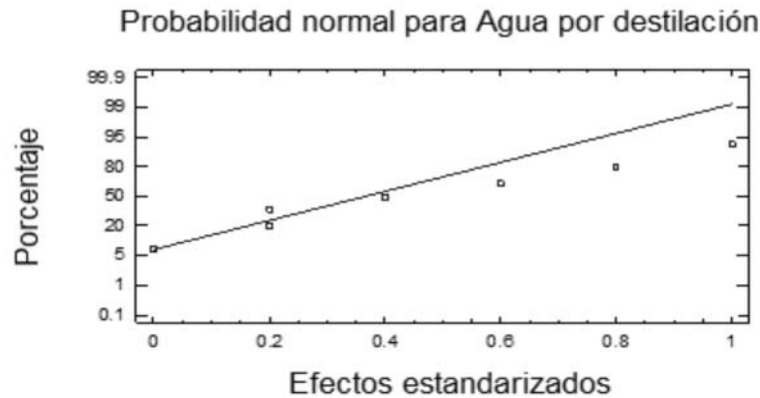
f. Agua por destilación

El contenido de agua en el combustible puede afectar la estabilidad del mismo, el agua libre está asociada a la corrosión (Gerpen, 2004).

La gráfica 12 presenta los efectos individuales de los tratamientos y las interacciones entre ellos para la cantidad

de agua por destilación en el biodiesel de higuera, donde estadísticamente se observan tres efectos significativos, sin embargo experimentalmente se determinó que el efecto principal del agua contenida en el biodiesel final estaba directamente asociado al proceso de secado del mismo, para ambos aceites.

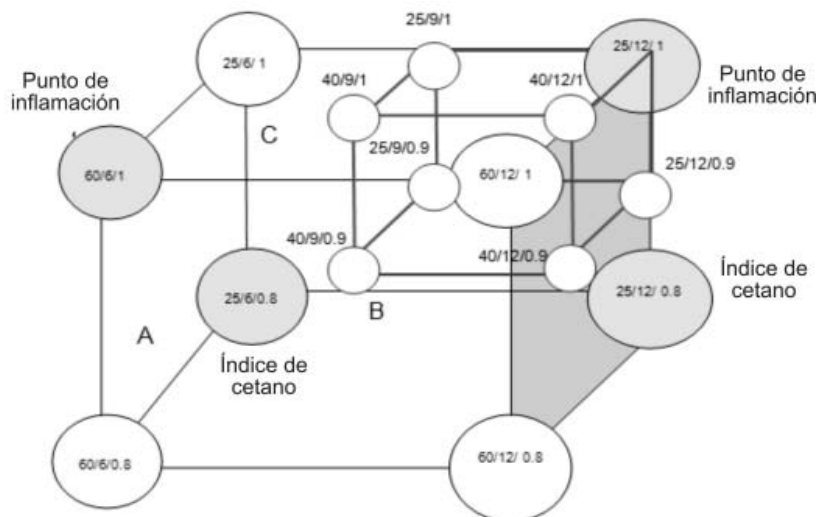
GRÁFICA 12
Probabilidad normal sobre el agua por destilación Biodiesel de Higuera



4.3 Optimización del diseño

En la figura 5 se observa la optimización del diseño para el sistema estudiado, el cuadro rojo indica la región en donde se obtiene mejores resultados en las propiedades del biodiesel. Los círculos azules son los puntos en donde se obtuvieron los mejores resultados para las propiedades analizadas, a partir de estos puntos se seleccionó la región optimizada.

FIGURA 5
Representación gráfica del diseño de experimentos



5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Las propiedades del biodiesel obtenido en este trabajo son similares a otros estudios realizados, como se muestra en la tabla 7 que indica que la transesterificación alcalina no ha podido mejorar las propiedades finales del biodiesel de higuera. De esta manera se sugiere trabajar con otro tipo de catalizadores o con otras fuentes

de triglicéridos, debido a que las propiedades del aceite de higuera como viscosidad e índice de acidez influyen negativamente en las propiedades finales del biodiesel como índice de cetano y viscosidad y que pueden ser más favorables para otros usos como lo es la lubricación.

TABLA 7
Comparativo de propiedades para biodiesel de higuera

Parámetro	Unidad	Resultado BH	Biodiesel higuera (Bena-vides, 2007)	ASTM 6751
Número de cetano	Cetanos	35.35	38	>47
Viscosidad (cinemática a 40 °C)	mm ² /s	16.46	14.89	1.9 – 6.0
Contenido de agua	mg/kg	0.8	0.8	0.5
Punto de inflamación	°C	82	84.3	120
Punto de nube/ enturbiamiento	°C	5.6	8	N/A

En la tabla 8 se muestra una comparación con otros trabajos realizados y los mejores resultados de este trabajo con aceite de palma mil pesos.

TABLA 8
Comparativo de propiedades para biodiesel de palma mil pesos

Parámetro	Unidad	Resultado BPMP	Biodiesel Palma Africana (Arbe-laez,2007)	ASTM 6751
Número de cetano	Cetanos	47,06	46.42	>47
Viscosidad (cinemática a 40 °C)	mm ² /s	5,24	4.72	1.9 – 6.0
Contenido de agua	mg/kg	0.2	0.2	0.5
Punto de inflamación	°C	112	39	120
Punto de nube/ enturbiamiento	°C	47,06	15	N/A

6. CONCLUSIONES

La producción de Biodiesel se ve afectada por la calidad de la refinación de la materia prima y la fuente de triglicéridos. El número de insaturaciones incrementa la viscosidad y el número de cetano del biodiesel.

Las interacciones entre factores para el punto de inflamación representan ruido en el diseño de experimentos. Experimentalmente se encontró que mejorando el proceso de secado se mejora esta propiedad.

La región optimizada en donde se obtienen las mejores propiedades para el Biodiesel de Higuierilla fueron temperaturas entre 25 y 40 °C, relación molar alcohol/aceite entre 9 y 12 y relación másica catalizador/aceite entre 0.9 y 1.

Las propiedades obtenidas bajo las condiciones de proceso utilizadas en este trabajo para el BH son comparables con otros trabajos realizados de transesterificación alcalina y en el punto de inflamación se obtuvieron mejores resultados.

7. BIBLIOGRAFÍA

AGUDELO, John R., BENJUMEA, Pedro Nel. (2004). Biodiesel de aceite crudo de palma colombiano: Aspectos de su obtención y utilización. Imprenta Universidad de Antioquia. Pág. 37.

ARIAS, Andrés Felipe. (2007). Los Biocombustibles en Colombia. En: Congreso Nacional de Biocombustibles. Conferencia Magistral. Centro de Convenciones, Cartagena de Indias.

ÁRBELAEZ, Ángela M., RIVERA, Marcela P. (2007). Diseño conceptual de un proceso para la obtención de Biodiesel a partir de algunos aceites vegetales colombianos. Medellín, Colombia. Trabajo de grado (Ingeniero de Procesos). Universidad EAFIT. Escuela de Ingeniería. Ingeniería de

Procesos.

BENAVIDES, Alirio., *et al.* (2007). El biodiesel de aceite de higuierilla como combustible alternativo para motores diesel. En: DYNA. Edición 153, Pág. 141 – 150.

BENJUMEA N., Pedro H., (2004). Estudio experimental de las variables que afectan la reacción de transesterificación del aceite crudo de palma para la producción de biodiesel. En: Scientia et Technica. N° 24. P 169 -173

BHALE, Purnanand., *et al.* (2008). Improving the low temperature properties of biodiesel fuel. En: Renewable Energy. P. 1-7.

BRICEÑO M. , Juan V. and NAVAS H. Petra Beatriz (2005). Comparación de las características químicas, físicas y perfil de ácidos grasos de los aceites de seje, oliva, maíz y soja. En: Revista Facultad de Agronomía. N°31. P, 109 – 119

CASTILLO, Liliana., *et al.* (2007). Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú. Soluciones Prácticas. Lima, Perú. 1 ed. 171 p.

CHAVANNE, C.G. (1937) Belgian Patent 422,877, Aug. 31. Procedure for the transformation of vegetable oils for their uses as fuels.

CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Por medio de la cual se subsanan los vicios de procedimiento en que incurrió en el trámite de la Ley 818 de 2003 y se estimula la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal para uso en Motores diesel y se dictan otras disposiciones.

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA (CORPOICA). www.corpoica.org.co. [Día de acceso: 2 de febrero de 2008]

DEMIRBAS, Ayhan. (2006). Progress and recent trends in Biofuels. En: Progress in Energy and Combustion Science. No.33, p. 1-18.

DEMIRBAS, Ayhan. (2007). Comparison of transesterification methods for production of biodiesel from vegetable oils and fats. En: Energy Conversion and Management. No. 49, p. 125 -130

GEMMA, Vicente y MARTÍNEZ, José. (2004). Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems. En: Bioresource Technology. P 228.

GERPEN, Jon Van, *et al.* (2004). Biodiesel Production Technology. En: National Renewable Energy Laboratory. 110 p.

GERPEN, Jon Van. (2005). Biodiesel processing and production. En: Fuel Processing Technology. No.86, p. 1097-1107.

KNOTHE, Gerhard. (2001). Historical perspectives on vegetable oil-based diesel fuels. En: Industrial Oils. Vol 12, (Nov, 2001), p. 1103 – 1107.

MA, Frangui y HANNA, Milford A. (1999). Biodiesel Production: A review. En: Bioresource Technology. No.70, p. 1-15.

MARRÓN, Guillermo M. (2002). GASOIL, Características y Manejo a campo. Buenos Aires, Argentina. Trabajo de Investigación. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Agropecuaria Balcarce. Ingeniería agrónoma.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, (2007). El programa de biodiesel en Colombia, un verdadero programa con visión de futuro. Colombia. Fedepalma. Bogotá, Colombia. En: http://www.fedepalma.org/document/2007/Biodiesel_MinMinas.pdf. (Consulta: 20 de agosto de 2007).

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 18 2087 de 2007. Por la cual se modifican los criterios de calidad de los biocombustibles para su uso en motores diesel como componente de la mezcla con el combustible diesel de origen fósil en procesos de combustión.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 182087 de 2007. Por la cual se modifican los criterios de calidad de los biocombustibles para su uso en motores diesel como componente de la mezcla con el combustible diesel de origen fósil en procesos de combustión.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. (2007). Política del Subsector hidrocarburos. En: [http://www.minminas.gov.co/minminas/sectores.nsf/2a84e89f4d73f130052567be0052c75a/598f95f20ca495bb052573d800733ce1/\\$FILE/OBJETIVOS_METAS_HIDROCARBUROS_2006-%202010.pdf](http://www.minminas.gov.co/minminas/sectores.nsf/2a84e89f4d73f130052567be0052c75a/598f95f20ca495bb052573d800733ce1/$FILE/OBJETIVOS_METAS_HIDROCARBUROS_2006-%202010.pdf). (consulta: 29 de septiembre de 2008)

MEHER, *et al.* (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification – a review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol 10. pag 248 – 268.

MONTGOMERY, Douglas C. Design and Analysis of Experiments. Quinta edición: 2001. Arizona State University. Ed.: John Wiley and Sons, INC. p:258 - 270.

NAGIB, Já Carlos. (2007). Métodos de producción de biodiesel. En: Primer Congreso Internacional Del Cultivo, Procesamiento Y Aplicaciones De La Higuera. Conferencia Magistral. Universidad EAFIT. Medellín.

OGUNNIYI, D.S. (2006). Castor oil: A vital industrial raw material. En: Bioresource Technology. N°97. Pag, 1086–1091

POSADA, Cristian M.. (2007). Determinación de las condiciones óptimas de la reacción de transesterificación del aceite de ricino para la obtención de ésteres etílicos (Biodiesel). Medellín, Colombia. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.

TAMALAMPUDI, *et al.* (2007). Enzymatic production of biodiesel from Jatropha oil: A comparative study of immobilized-whole cell and commercial lipases as a biocatalyst. En: Biochemical Engineering Journal.

TURTON, R. *et al.* Analysis, síntesis, and design of Chemicals process. Segunda edición: 2003. New Jersey.

Ed.: Prentice hall PTR. p:154.

ROYON, D., et al. Enzymatic production of biodiesel from cotton seed oil using t-butanol as a solvent. En: Bioresource Technology. Vol 98. p 648 – 653.

RIOS, *et al.* (1997). Proceso de germinación, transplante y características del fruto de la palma milpesos *Jessenia batua*. Quibdo, Choco. Trabajo de Investigación. Universidad Tecnológica del Chocó D.L.C. Vicerrectoría de Investigaciones.

ZHANG, Y., *et al.* (2003). Biodiesel production from waste cooking oil: Process design and technological assessment. En: Bioresource Technology. No.89, p. 1-16

DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCION DE SALES PARA LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

Daniel Guerra V.

ABSTRACT

The production of a salt for the food industry was carried out in the laboratory and in an anonymous industry. The production began with the selection of the salt, this selection was made keeping in mind the production of the actual industry, the salt was calcium citrate. After that, a variables analysis was made to know which constants needed control. The actual design was completed with the use of the constants found and an observation of the plant in an industrial scale. When all the design was finalized an economic study was made to know if the plant was viable and the study show that with only 12 batch the plant can be paid.

1. INTRODUCCIÓN

Las sales en la industria alimenticia son utilizadas principalmente como aditivos, estabilizantes, conservantes, emulsionantes y reguladores de pH.

Estas cumplen varias funciones tanto la de incrementar la actividad de varios antioxidantes y adicionalmente exhiben por sí mismos cierta actividad antioxidante, como agentes reguladores de acidez y compuestos aromáticos [Wageningen].

El Citrato de Calcio o sal amarga, el cual se usó como objeto de diseño para la realización de éste diseño se

conoce en la industria por su alto contenido de calcio, el cual ayuda a suplir las necesidades diarias de las personas por medio de su uso en perseverantes, bebidas carbonatas y en la condimentación de alimentos.

Por otra parte, el diseño de procesos es una herramienta para dar solución a un problema, necesidad o deseo encontrados por personas o por la industria misma. Cuando se realiza el diseño del proceso de producción de un bien o servicio se hace la selección y ordenamiento de las etapas que lo conforman además de la determinación de las condiciones que lo rigen.

Por medio del diseño conceptual de una planta piloto para la producción de Citrato de Calcio se pretende presentar una alternativa para la elaboración de diferentes productos para la empresa ABC. Para hacerlo, se empieza por obtener que tipo de sal se va usar en una escala laboratorio para determinar las variables del proceso de elaboración y fijar las condiciones de operación del proceso a escala planta piloto, teniendo en cuenta que estas se deben de encontrar dentro de la capacidad de la planta industrial de la empresa ABC. Diseñar conceptualmente este proceso también requiere seleccionar y ordenar las etapas del mismo y, por supuesto, hacer un diseño preliminar de los equipos necesarios para el proceso acompañándolos con los correspondientes diagramas de proceso básicos (BFD y PFD).

TABLA 1
Resultado de los diferentes ensayos

Ensayo	Citrato de calcio		Citrato de Sodio		Citrato de Potasio	
	I	II	I	I ¹	I ²	II
Producto	15,0017	15,0138	14,7275	14,9347	14,6845	15,0039
FCC	Si	Si	Si	Si	Si	Si
pH al 1,0%	6,02	6,1	6,5	6,44	8,47	8,4

Así mismo, se debe tener en cuenta el factor económico, es decir, hacer un costeo preliminar general que evidencie una posible factibilidad y rentabilidad económica del proyecto.

2. Pruebas Experimentales

2.1 Ensayos de Laboratorio

Se realizó una serie de ensayos de laboratorio para conocer el comportamiento de diferentes citratos y seleccionar uno como base para el diseño de este proyecto.

El ensayo se realizó con el fin de producir 15gr (teórico) de tres diferentes citratos. Los ensayos fueron realizados siguiendo la siguiente metodología.

La síntesis de cada una de las fases se realizó utilizando el siguiente procedimiento: se preparó una solución con la base, la cual se homogenizó con un agitador magnético durante 5 min, para así obtener una solución al 50% peso; a esta solución se le adicionó rápidamente el ácido, con agitación permanente durante 25 min para dar como resultado una pasta uniforme y soluble.

Esta pasta se llevó a un horno de 2.6Kw marca Terrígeno para su secado, donde se calentó a 100°C durante una hora y a 90°C durante otra, luego de se retiró y se dejó enfriar en un desecador durante 30 minutos. El producto de color blanco se pesó y luego se disolvió en agua en una

proporción del 1% para tomar su pH. Los datos obtenidos se pueden observar en la tabla 1.

Luego de los ensayos se escogió el citrato de calcio como producto base para la realización de la planta, ya que este posee propiedades similares a los productos elaborados actualmente y también lo otros productos presentaron un nivel de complicación el cual la empresa no está dispuesto a sumir en el momento

2.2 Pruebas de Caracterización

La densidad de tanto las materias primas como del producto final fue medida en el laboratorio para determinar el volumen de los equipos a dimensionar.

El equipo utilizado para medir la densidad del material fue un picnómetro, el cual es un frasco con un cierre sellado, de vidrio con un tapón con un finísimo capilar, de tal manera que un volumen puede obtenerse con gran precisión. Esto permite determinar la densidad de un fluido y de líquidos no viscosos. Para los resultados ver la tabla 2.

Se realizó una breve observación del proceso a escala industrial de la elaboración del gluconato de calcio.

Este sirve como base para el desarrollo de éste proyecto ya que el proceso de elaboración es similar a la del Citrato de Calcio.

	Densidad (gr/ml)
Agua	0,9951
Hidróxido de calcio	1,1280
Ácido cítrico	1,2461
Citrato de calcio	1,4851

3. PROCESO A ESCALA INDUSTRIAL

Con el fin de obtener el rango de las variables más importantes (i.e., capacidad, temperaturas, presiones, flujos, composiciones) se tomaron diferentes mediciones en el proceso de producción. Se incluyen diagramas del proceso (ver figura 1).

3.1 Descripción del Proceso

3.1.1 Mezclado

En esta etapa se realiza el mezclado del producto seco con agua, lo cual facilita la reacción y el transporte de este

adentro de la planta, ya que esta se lleva a cabo en fase acuosa.

Este mezclado se realiza hasta que quede aproximadamente de un 30% a 50% de sólidos disueltos en la solución.

3.1.2 Reacción

La reacción, la cual es llevada a cabo en fase acuosa, se realiza en cantidades estequiométricas, efectuando en primer lugar el vertimiento de la base, y luego el ácido para así efectuar una reacción en un medio alcalino, esto para que ésta sea menos violenta y se dé más fácil la reacción.

3.1.3 Ajuste

Luego de finalizar la reacción, se realiza un ajuste de pH para así tener listo el producto para su secado.

En la tabla 3 se puede observar los resultados de la medición de variables en la planta, estos fueron usados para el balance de materia y el diseño de los diferentes equipos.

FIGURA1
Diagrama genérico de bloques para el proceso de producción del gluconato

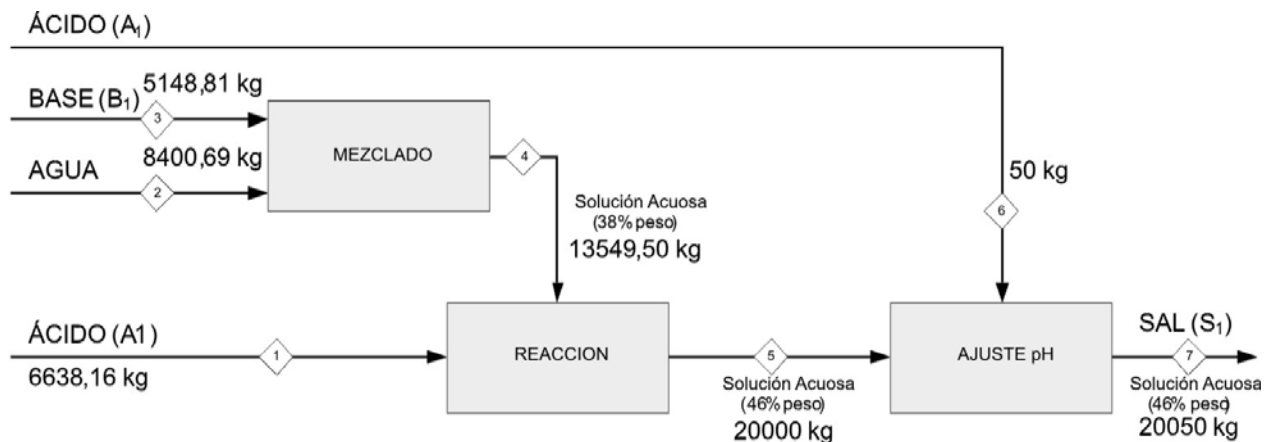


TABLA 3
Variables medidas en las corrientes de proceso actualmente

Corriente	1	2	3	4	5	6	7
Sólidos (%)	100	n.a	n.a	30-50	40-60	n.a	40-60
Concentración (%)	n.a	n.a	85	n.a	n.a	85	n.a
pH	n.a	n.a	n.a	n.a	6-7	n.a	6-7

4. ANÁLISIS DE VARIABLES DEL PROCESO

Con base en los ensayos realizados a escala laboratorio, en planta y apoyados en la literatura, se encuentra que las variables que inciden en la obtención de Citrato de Calcio son las siguientes.

4.1 Variables Medidas durante el Mezclado

4.1.1 Distribución del tamaño de partícula en polvos

Teóricamente la eficiencia del proceso de reacción será mayor cuanto menor sea el tamaño de las partículas, porque así se obtiene una mayor área de contacto con el otro reactivo. Por esta razón, se recomienda la utilización de polvos “moderadamente finos” para la gran mayoría de los materiales.

4.1.2 Sólidos

Debido a que la reacción se realiza en cantidades estequiométricas es necesario saber el porcentaje de sólidos disueltos en la corriente de entrada de la base (Hidróxido de calcio), para así realizar la formulación correcta de ácido que entra el proceso y saber qué tipos de equipos son necesarios para su almacenamiento y transporte. Entre más sea la concentración de sólidos más difícil será su mezclado y homogenización y mayor será la energía necesaria para la mezcla, como también si su valor es muy bajo, será un gasto innecesario de agua.

Esta variable debe estar entre un 25% a 50%. Para fines del diseño de los equipos usaremos la de mayor cantidad (50%), y para efectos del balance de masa usaremos la que se usa para los otros productos que es de un 38%.

4.2 Variables Medidas durante la Reacción

4.2.1 Concentración

De igual manera que en la corriente de entrada de la base, es importante saber la concentración de entrada del ácido para así lograr la formulación correcta, como también saber el tipo de material a usar para la construcción de su almacenador y el reactor. Esta variable depende del proveedor del ácido.

Se usará una concentración de 85% que es lo normal para los ácidos de la industria alimenticia.

4.2.2 Agitación

Lo que se logra agitando las sustancias en reacción (Milanese, Brenne, & Mehta, 1998) antes, es mezclar íntimamente los reactivo aumentando la superficie de contacto entre ellos, para así lograr una mejor reacción y asegurar la homogeneidad de la mezcla.

4.2.3 Tiempo de residencia

El tiempo de residencia se determina experimentalmente en función de uno de los reactivos y el equipo seleccionado. Para este diseño se utilizará un tiempo de residencia entre 15 y 24 horas ya que nos garantiza una conversión

aproximada del 70% a un 80%. En la figura 7.2 se puede apreciar que para alcanzar una conversión del 90% se requiere aproximadamente de 40 horas más de tiempo de residencia, aspecto que al investigador no le parece conveniente. (Milanese, Brenne, & Mehta, 1998)

4.3 Variables Medidas durante el Ajuste

4.3.1 Potencial de hidrógeno (pH)

Durante la fase de ajuste, el pH es el parámetro a medir para finalizar la reacción, el cual en teoría debe tener un valor de 6.5 aproximadamente.

5. DISEÑO PLANTA PILOTO

Para realizar el diseño de la planta piloto es necesario iniciar con un criterio de diseño el cual será la base para el posterior diseño de los equipos más relevantes del proceso, a continuación se describen todas las etapas del proceso con los respectivos equipos involucrados.

5.1 Criterio de Diseño

Obtener 500 Kg de Citrato de Calcio húmedo por lote, porque es la cantidad mínima para ser secada en el spray-dryer de planta y obtener resultados medibles y replicables sobre la producción.

5.2 Diagrama de Flujo (Pfd)

En la Figura 2 se presenta el diagrama de flujo de proceso de la producción de Citrato de Calcio.

5.3 Requerimientos del Proceso

Para llevar a cabo el proceso de producción de Citrato de Calcio y convertirlo en producto para consumo humano se requieren materias primas, servicios y mano de obra. En los siguientes numerales se explica cada uno de los requerimientos que se deben tener en cuenta para llevar a cabo este proceso.

5.3.1 Requerimientos de Materias Primas

Para llevar a cabo el proceso de producción del Citrato de Calcio se requieren las siguientes materias primas:

- Hidróxido de calcio: debe encontrarse en una concentración aproximada de 38% de sólidos. La concentración mínima que se recomienda en este proyecto es de 25% y una máxima del 50%.
- Ácido Cítrico: en una concentración del 85%
- Agua: se requiere el agua como materia prima en la preparación del hidróxido de calcio.

5.3.2 Servicios

Los servicios requeridos para el proceso son:

- Energía eléctrica (a 110 v y 220 v): para suministrar a las bombas, al sistema de agitación y a los equipos de medición y control.
- Agua: para lavar los tanques y equipos, para uso del personal y usos varios.

5.3.3 Mano de obra

Debido a que el proceso es batch y no requiere controles de alta complejidad durante el tiempo de residencia en el reactor se requiere un operador por turno, en turnos de 10 horas y que monitoree las condiciones de entrada de las materias primas como también las condiciones del reactor y el ajuste de la reacción.

Luego de terminado el lote, el operador se encargará de bombear el Citrato de Calcio húmedo al tanque de almacenamiento de la torre de secado; Finalizado esto, el operador debe encargarse, de ser necesario, de lavar el reactor y los equipos y realizar la adecuación para llevar a cabo el nuevo lote.

5.4 Descripción del Proceso

5.4.1 Preparación de la materia prima

El proceso de producción de Citrato de Calcio comienza cuando se alimenta agua (corriente 2) al mezclador (M-101). Posteriormente se agrega al mezclador Cal o hidróxido de calcio (corriente 3). Se agita el mezclador por unos minutos hasta que se obtiene una mezcla homogénea y con porcentaje aproximado de sólidos del 38%.

Al mismo tiempo se vierte el ácido cítrico (corriente 1) al tanque de almacenamiento (TK-101) en la cantidad estequiométrica previamente establecida.

5.4.2 Reacción

Una vez terminado el proceso de hidratación de la cal, se procede a llevar las materias primas al reactor (R-101)

donde se agrega en primera instancia la mezcla de cal con agua o Hidróxido de calcio (corriente 5).

Cuando se ha vertido aproximadamente la mitad de esta mezcla se procede con el vertimiento del ácido (Corriente 4) al mismo tiempo que se termina de verter la mezcla de cal hidratada. Se deja reaccionar entre 15 a 24 horas con una agitación continua y homogénea para asegurar una conversión mayor del 70%.

5.4.3 Ajuste

Luego que la reacción ha terminado, se procede a la fase de ajuste de pH, donde se vierte la cantidad necesaria para que la solución alcance, conservando la agitación, el pH deseado de 6.5. Aquí, la solución se encuentra en las condiciones adecuadas para su ingreso al secador.

FIGURA2

Diagrama de Flujo de Proceso de la planta piloto para la obtención de Citrato de Calcio

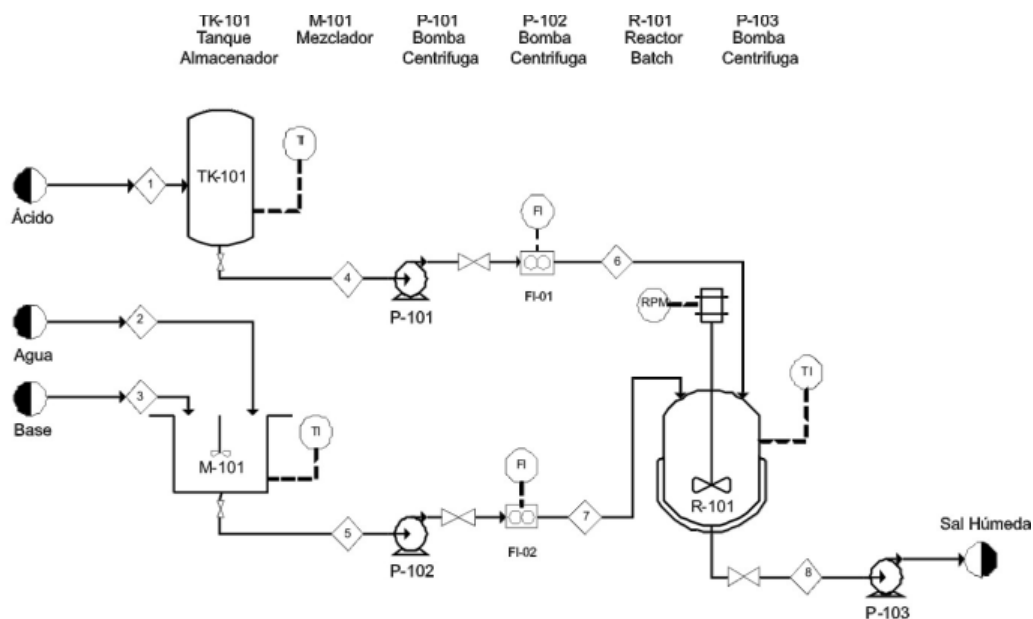


DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA PILOTO PARA LA OBTENCIÓN DE CITRATO DE CALCIO	
PREPARADO: Daniel Guerra V.	FECHA:24/09/2008
REVISADO: Pablo Restrepo F.	FECHA:24/09/2008
APROBADO: Pablo Restrepo F.	FECHA:24/09/2008
DIBUJO No. 1	REV. 0

6. DISEÑO DE LOS EQUIPOS

Durante las pruebas experimentales se realizaron mediciones de algunas propiedades del Citrato de Calcio. Estas se utilizaron para el dimensionamiento de los equipos. Las dimensiones del almacenador, mezclador y reactor se pueden observar en la

En la Tabla 4 se tomó una relación altura:diámetro de 1,5:1 para el diseño de todos los equipos

6.1 Tanque almacenador TK-101

De acuerdo a la densidad del ácido y al balance de masa, el volumen a almacenar es de 164 L debido a que la planta piloto se usará para la producción de otras sales. Se sobredimensionará en un valor aproximado del 20%.

6.2 Tanque mezclador M-101

El volumen de este tanque depende de la cantidad de sólidos disueltos. Entre mayor sea el porcentaje de sólidos,

menor será el tamaño del tanque y viceversa. Se consideró para el diseño de este equipo una concentración mínima de 25% y una máxima del 50% de sólidos disueltos, dando como resultado un volumen promedio de 289 L.

Debido a que este equipo requiere una agitación constante para evitar asentamiento de la base, se usará un agitador tipo CBT (curved blade turbine), el cual es el más recomendado en la industria para este tipo de aplicaciones. (McConville, 2004)

6.3 Reactor R-101

Debido a que este reactor no será solo para Citrato de Calcio, sino que se usará también para hacer pruebas de diferentes productos, su volumen se determinó con el uso de la menor densidad de los reactivos para hallar el volumen del reactor de acuerdo al peso del producto húmedo. Se utilizó la densidad del producto húmedo para hallar el volumen de reacción, que sirvió para determinar el diseño del agitador, el volumen del reactor es de 500 L.

TABLA 4. Dimensiones para los diferentes equipos diseñados

Descripción	Cantidad (kg)	Volumen de la solución (m ³)	Volumen del Contenedor (m ³)	Diámetro (m)	Radio (m)	Altura (m)	Galones
TK-101	204,62	0,1642	0,20	0,55	0,28	0,83	52,06
M-101	326,88	0,2898	0,38	0,68	0,34	1,03	99,52
R-101	500,00	0,5025	0,60	0,80	0,40	1,20	159,28

TABLA 5. Potencias requeridas para las diferentes bombas

	Ácido	Base	Sal
Presión de entrada (bar)	1.01325	1.01325	1.01325
Presión de salida (bar)	1.1592	1.1454	1.9863
Temperatura (°C)	25	25	80
Flujo volumétrico (m ³ /min)	0.03	0.03	0.03
Potencia min. (w)	1,48272	1,7593	30,2511
Potencia máx. (w)	17,7927	21,1127	363,0138

6.4 Bombas P-101, P-102 y P-103

Los cálculos de la potencia de la bomba P-101 se muestran en el anexo A. Para las demás bombas se usó el mismo modelo. En la tabla 5 se encuentran los valores requeridos para realizar los cálculos y las potencias obtenidas con los balances de materia y energía.

6.5 Agitador

Tanto la potencia requerida como también las dimensiones para cada impeller, se encuentran en la Tabla 6.

TABLA 6
Dimensiones y potencias para los agitadores

	Mezclador	Reactor
Diámetro (m)	0,2477	0,32
Velocidad (sec ⁻¹)	2,1707	3,3056
Volumen (m ³)	0,2152	0,5025
Potencia (W)	17,3590	185,8376

7. SELECCIÓN DE EQUIPOS

La selección de equipos se realiza de acuerdo a las necesidades del proceso y de la planta.

Debido que la mayoría de los productos de la empresa son de grado alimentario USP-FCC, y el decreto 3075 de 1997 indica que para las industria alimenticia será necesario usar acero inoxidable, vidrio o titanio para los tanques, reactores y demás equipos e instrumentación (DECRETO 3075 DE 1997).

7.1 Tanque almacenador TK-101

Se usará un tanque de acero inoxidable, preferiblemente AISI 316 de 1/16" de espesor, el cual provee una buena resistencia a la corrosión (McConville).

7.2 Tanque mezclador M-101

Su material de construcción será acero inoxidable AISI 304 de 1/16" de espesor, el mismo material se usara para el agitador.

7.3 Reactor R-101

El reactor a utilizar es un reactor batch de agitación continua, el cual nos provee una alta flexibilidad entre los reactores a un bajo costo de capital (McConville). El volumen a manejar será de 160 galones de producto húmedo. Su material de construcción será acero inoxidable AISE 316 de 1/16" de espesor, el mismo material se usara para el agitador debido que es un material resistente a la corrosión y posee alta resistencia a altas temperaturas, las cuales se generan en el reactor (100°C Aprox.).

Acabados

De acuerdo al proveedor el acabado interior de todos los tanques será con borrado de soldaduras y el exterior con decapado y pasivado de soldaduras. Todas las soldaduras han de ser radiadas.

Accesorios

Todos los tanques contarán con indicador de temperatura. Contará también con una válvula que servirá para llevar a cabo el vaciado directo para una mejor limpieza.

7.4 Bombas P-101, P-102 y P-103

Se seleccionaron las bombas que se observan en la Tabla 7.

Accesorios

Todas las bombas poseen un variador de velocidad.

7.5 Agitadores

Materiales

- Eje: Acero inoxidable AISI 316.
- Impeller: Acero inoxidable AISI 316 de 1/8" de espesor
- Los agitador contarán con un medidor y variador de RPM

Configuración

- Mezclador: Curved Blade Turbine (CBT)
- Reactor: Pitched-Blade Turbine (PBT)

Accesorios

Los agitadores poseen un motor de 1HP de velocidad variable y posee una velocidad máxima de 1770 RPM, el cual será provisto por la empresa.

TABLA 7
Bombas para la planta piloto

Bomba	Tipo	Marca	Dimensiones	Material	Potencia
P-101	Centrifuga	Western	1/2"x3/4"	Acero Inoxidable 304	0.75 HP/3600 RPM
P-102	Centrifuga	Western	1/2"x3/4"	Acero Inoxidable 304	0.75 HP/3600 RPM
P-103	Centrifuga	Western	1/2"x3/4"	Acero Inoxidable 304	0.75 HP/3600 RPM

8. CONCLUSIONES

De acuerdo a lo observado en planta, lo leído en la literatura y los ensayos de laboratorio realizados se escogió el rango de variables más importantes para la producción del Citrato de Calcio como también de otras sales orgánicas las cuales son producidas por la empresa ABC, los valores de dichas variables serán el objeto de estudio en la planta piloto, para así determinar cuál es el valor óptimo de estas y crear un estándar para los productos.

Según la experimentación en el laboratorio y lo reportado en la literatura se identifican como variables y además se definen como parámetros a controlar en el proceso de producción lo siguiente:

- El tamaño de partícula del material (malla 200) que corresponde a polvos "moderadamente finos", que nos garantizan un buen contacto con el ácido de la reacción y por lo tanto una mejor conversión y homogeneidad de la solución.

- El tiempo de reacción de 16 horas permite alcanzar una conversión entre un 70% y 75%, que según el criterio del investigador es buen tiempo con respecto a la conversión.
- El orden de vertimiento de las materias primas como también la caudal de estas, ya que utilizar un orden contrario al de la receta, y una velocidad muy alta puede generar problemas en la reacción, como gelamiento de la reacción y altos contenidos de calcio en el producto final.

En el diseño del reactor batch, se encontró que la literatura es muy escasa para la velocidad de reacción del citrato en cuestión, por lo tanto se optó por utilizar la densidad del producto húmedo como base para encontrar el volumen de éste y se le realizó una sobredimensión de un 30% más, para obtener así un tamaño que permitiera realizar la reacción de este citrato, como también las otras sales de interés de la empresa.

La selección de los equipos involucrados en el proceso, se realizó pensando en el uso de diferentes tipos de materias

primas y de productos, y se escogió un material resistente para su fabricación garantizando así un uso extenso de los equipos y el cumplimiento de la norma alimenticia actual.

Se realizaron los diagramas correspondientes al PFD del proceso de producción de Citrato de Calcio, así como el layout de la planta de producción encontrando la mejor distribución de la misma para las necesidades específicas del proceso. Se escogió la ubicación que se presenta en el anexo C debido a que se encuentra en un lugar cercano a los servicios industriales necesarios para el funcionamiento de está, como también a los contenedores de materias primas, y su cercanía a la planta de producción, con esto podemos garantizar unas condiciones de funcionamiento (temperatura, humedad) parecidas a las que se encuentran dentro de la planta de producción garantizando unos mejores resultados a la hora del escalamiento.

La receta de producción nos muestra una mejora en el tiempo de elaboración en comparación a las usadas en la planta actualmente, pero debido a que solo es un modelo conceptual, se pudo cometer algún error que pueda perjudicar la reacción; sin embargo esto no es ningún inconveniente pues la receta se puede cambiar en la producción real, ya que los equipos fueron diseñados con dicho propósito.

La capacidad de producción por lote fue fijada con base a lo mínimo que necesita la torre de secado, la cual es de 500kg/lote de producto húmedo, lo que nos genera 262Kg de citrato por lote.

De acuerdo a la demanda actual de la empresa de un producto que no fabrican como es el Citrato de Calcio, las directivas de la empresa decidieron que la producción inicial de esta sal será de 2000kg/año, que nos da como resultado 8 lotes de Citrato de Calcio al año, aunque son muy pocos lotes para una planta batch de solo 16 horas de operación por lote, nos da la utilidad suficiente para recuperar la inversión inicial en el segundo año de operación si solo se usara para la producción de dicha sal.

Según el análisis económico preliminar se sabe que el proyecto requiere una inversión baja, genera grandes utilidades, tiene bajos costos lo que lo hace muy rentable.

9. REFERENCIAS

Committee On Codex Specifications. (1981). Food Chemicals Codex. Washington, D.C.: National Academy of Sciences (1975).

Erwin, D. (2002). Industrial Chemical Process Design. McGraw-Hill.

Escobar, J. (2005). El Diseño Conceptual. Curso Diseño de Procesos. Medellín: Universidad EAFIT.

FISQ. (2004, Agosto). International Chemical Safety Cards. Retrieved Mayo 29, 2008, from <http://www.mtas.es/insh/ipsnspn/spanish.htm>

Hocking, M. B. (2008). Handbook of Chemical Technology and Pollution Control. San Diego, CA: Elsevier.

McConville, F. X. (2004). The pilot plant real book. Worcester, MA: FXM Engineering and Design.

Milanese, C., Brenne, R., & Mehta, S. (1998). Setting Reaction and synthesis of citric acid with calcium oxide. Chemical Engineering Science, 2135-2142.

NCI. (2008, Enero 10). National Cancer Institute. Retrieved Agosto 28, 2008, from <http://www.cancer.gov/Templates/drugdictionary.aspx?CdrID=41817>

OMRI. (n.d.). Organic Materials Review Institute (OMRI). Retrieved Mayo 29, 2008, from <http://www.omri.org/>

Overlack A, M. B. (1995). Potassium citrate versus potassium chloride in essential hypertension. Effects on hemodynamic, hormonal and metabolic parameters. Dtsch Med Wochenschr, 631 - 635.

Peters, M. S., & Timmerhaus, K. D. (1991). Plant design and economics for chemical engineers. Singapore: McGraw-Hill.

SAADE, M. T. (n.d.). Legicol. Retrieved Julio 09, 2008, from http://www.legicol.com/lejuro40/Decreto_3075_de_1997.pdf

Scharlau Chemie S.A. (2007). Scharlau. Retrieved Agosto 25, 2008, from <http://www.scharlau.com/>

Sigma-Aldrich. (n.d.). Sigma-Aldrich. Retrieved Septiembre 25, 2008, from http://www.sigmaaldrich.com/Area_of_Interest/The_Americas/Argentina.html

Speight, J. G. (2002). Chemical and process design handbook. McGraw-Hill.

Turton, R. (2003). Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes. Prentice Hall.

USP. (2006). USP29-NF24. Us Pharmacopeia.

Wageningen, U. d. (2008, Agosto 20). Food Info. Retrieved Septiembre 05, 2008, from <http://www.food-info.net>

White, S. (2006). Calcium Citrate Can Improve Your Life. Journal of the American Medical Association .

ALTERNATIVA PARA LA DETOXIFICACIÓN DE TORTAS DE *Jatropha curcas*. LA ESCALA LABORATORIO PARA SU EMPLEO EN ALIMENTACIÓN ANIMAL

Paola López Bertel, plopezbe@eafit.edu.co

ABSTRACT

This project was developed for the detoxification at the laboratory of *Jatropha curcas* L flour. First, the kernels of the pressed seed (cakes) of *Jatropha curcas* L product processing to obtain oil for biodiesel, was separated and preparing. For the treatment performed, a number of conditions at the lab was identified, then the kernels of *Jatropha curcas* L seeds was detoxify through dry and moist heat treatments, chemical treatments and varying the type of solvent (92% methanol, ethanol and 92% 4% NaOH combination - NaOCl 15%). The final assessment of the products are made by physicochemical characterization (particle size, moisture, ash), measurement of protein content by Kjeldahl digestion, phorbol ester content by HPLC and activity by lectin hemaagglutination bovine red blood cell.

The three options of detoxification worked were compared and made the selection of treatment with ethanol as more appropriate alternative, considering toxic, nutritional and technical aspects, to reduce the content of forbol esters in an 32% and preserve values of protein final of 52.6%. Finally based on the results defined the terms of the process of detoxification with ethanol to obtain flour *Jatropha curcas* L

RESUMEN

Este proyecto fue desarrollado para la detoxificación de harina de *Jatropha curcas* L a escala laboratorio. En

primer lugar se separaron y acondicionaron los núcleos de las semillas prensadas (tortas) de *Jatropha curcas* L producto del procesamiento para la obtención de aceite para Biodiesel. Para los tratamiento realizados, se definieron una serie de condiciones a nivel laboratorio, luego se detoxificó la harina de núcleo de *Jatropha curcas* L mediante tratamientos térmicos seco y húmedo, y tratamientos químicos variando el tipo de solvente (metanol 92%, etanol 92% y combinación NaOH 4% – NaOCl 15%). La valoración final de los productos se hizo por caracterización fisicoquímica (tamaño partícula, humedad, cenizas), mediciones de contenido de proteína por digestión Kjeldahl, contenido de ésteres de forbol por HPLC y actividad de lectina por hemaagglutinación de eritrocitos bovinos.

Posteriormente se compararon las tres alternativas de detoxificación trabajadas y se hizo la selección del tratamiento con etanol como la alternativa más adecuada, considerando aspectos tóxicos, nutricionales y técnicos, al disminuir el contenido de ésteres de forbol en un 32% y conservar valores de proteína final del 52.6%. Finalmente con base en los resultados se definieron las condiciones del proceso de detoxificación con etanol para la obtención de harina de *Jatropha curcas* L

Palabras clave

Jatropha curcas L., Detoxificación, Antinutrientes, Proteína, Esteres de forbol, Actividad de lectina, Tratamiento térmico, Tratamiento químico.

1. INTRODUCCIÓN

El interés por la producción de biodiesel a partir de especies oleaginosas, han llevado al estudio de diferentes variedades de plantas que ofrecen rendimientos satisfactorios, como Higuera, Girasol, Palma Africana, Soja, Colza, Algodón y *Jatropha*, entre otras (Madriz, et al, 2005; Singh, et al, 2008). El estudio en Colombia de éstas y otras variedades, buscan cubrir necesidades de: disponibilidad territorial, condiciones agrícolas (cultivo, recolección y extensión), factibilidad económica y seguridad alimentaria con repercusiones a nivel mundial tomando como referencia la producción de biocombustibles a partir del maíz y algunas oleaginosas comestibles (FAO, 2008b) debido a que muchas de estas semillas son de consumo humano y animal y constituyen un requerimiento nutricional básico.

De esta forma, los estudios con algunas especies tóxicas de *Jatropha* para la extracción de aceite y producción de biodiesel despiertan gran interés por sus restricciones para consumo humano y animal y resulta ventajoso frente a otras plantas.

La toxicidad de la *Jatropha curcas L.* se debe a diversos componentes presentes en un número considerable de los componentes de las plantas (incluido el aceite), en diferentes tipos de plantas, lo cual hace de la detoxificación completa un proceso complicado (Jongschaap, et al, 2007), se ha encontrado que las semillas presentan un alto valor nutritivo comparable con la de harina de soja (Singh, et al, 2008; Gandini, et al, 2007 y Makkar y Becker, 1998b), De esta manera, una de las alternativas de aprovechamiento de la torta de *Jatropha*, es para alimentación animal, debido a que pese a ser tóxica para mamíferos superiores de ganado bovino, porcino y caprino (Reyes y Flores, 1999), algunos rumiantes adultos presentan resistencia a ciertas toxinas (Luciani, 2003; Bose y Wanderley, 1988; Polo, 1998), sin embargo, este aprovechamiento no puede hacerse sin la previa detoxificación de las semillas (Gross, et al, 1997; Makkar y Becker, 1998b) y aun así solo es recomendable para consumo animal (Ferreira, 2007; Gandini, et al, 2007), debido a que la detoxificación total es bastante compleja (Jongschaap, et al, 2007) y puede restarle contenido nutricional.

Es por esto que se pretende desarrollar una alternativa para la detoxificación de la torta de *Jatropha*, que resulta de la extracción del aceite, para aprovechar la harina de la semilla de *Jatropha curcas L.* como elemento de formulación de concentrado para alimento animal por su alto contenido proteínico, reduciendo el uso de otras harinas más costosas y empleadas en otros fines, y contribuyendo así a la viabilidad, sostenibilidad y aceptabilidad de la *Jatropha* como fuente de Biocombustible, respaldando así las ventajas agronómicas de este cultivo frente a otras oleaginosas (Octagon, 2006; Coello y Gnecco, 2000) y el hecho de no afectar directamente el mercado alimenticio (Makkar y Becker, 1998b).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto se llevó a cabo mediante ensayos a escala laboratorio, tanto para el tratamiento térmico, como para los tratamientos químicos y las pruebas realizadas.

2.1 Semilla de *Jatropha curcas L.*

El material trabajado proviene de un proceso previo de extracción del aceite, el cual se realizó de forma mecánica, empleando una prensa hidráulica marca ELE, modelo 9934.1055, con adaptación de un sistema de vacío, el rendimiento de aceite obtenido se reportó en un 24.6%. La variedad de *Jatropha curcas L.* es de procedencia brasilera, cultivadas en Sopetrán – Antioquia. Suministradas por Colombiana de Biocombustibles.

2.2 Tratamiento de la muestra

Los tratamientos a realizar buscan reducir especialmente las concentraciones de compuestos tóxicos, así como desnaturalizar o desactivar algunos compuestos antinutritivos. Los tratamientos aplicados fueron adaptados de los propuestos por Makkar, et al, 1997; Trabi, et al, 1997; Gross, et al, 1997; Aregheore, et al, 1998; Aregheore, et al, 2003 y Martínez, et al, 2006.

Los tratamientos se hicieron en dos etapas: una etapa de tratamiento térmico seco y húmedo con agua, para reducir niveles de antinutrientes termolábiles y actividad de lectina.

Una segunda etapa fue requerida para la reducción en el contenido de ésteres de forbol, en esta se realizaron tratamientos químicos con etanol al 92%, metanol al 92% y combinación de NaOH 4%, NaOCl 15%. Las condiciones de los diferentes tratamientos se muestran en la tabla 1.

TABLA 1
Condiciones de tratamiento térmico y químico

Tratamiento		Solvente	Relacion Harina-Solvente	Lavados	Tiempo Calentamiento
JATROPHA	Seco				40 min Estufa
	Húmedo	Agua	1 : 2	3	90 min Cocción
QUÍMICO	Etanol	Etanol 92%	1 : 10	3	
	Metanol	Metanol 92%	1 : 2	4	30 min Autoclave 140 °C
	NaOH-NaOCl	NaOH 4% NaOCl 15%	1 : 3, 10 : 1		31 min Autoclave 140 °C

2.3 Acondicionamiento final de la harina

Posterior a todos los tratamientos, la harina se llevó a calentamiento en estufa para reducir la humedad a valores de menos del 15%. Para los tratamientos en los que se presentaban sobrenadantes, estos se retiraron por filtración antes del calentamiento, los productos de los tratamientos químicos con metanol y NaOH-NaOCl requirieron lavados adicionales para retirar el exceso de solvente tóxico en la harina, hasta llevarlos a un pH cercano a 7, y luego se secaron como las otras muestras.

Una vez seca la harina, se molió y homogenizó haciéndola pasar por una serie de tamices como en el acondicionamiento y se realizó el análisis granulométrico de las mismas.

Se hicieron los balances de masa respectivos por seguimiento gravimétrico y volumétrico del material, los solventes y reactivos empleados y desechados a lo largo de las diferentes etapas.

2.4 Caracterización fisicoquímica del material

A las harinas producto de tratamiento químico, se les hizo análisis fisicoquímico para evaluar la toxicidad del alimento determinando concentración de ésteres de forbol por HPLC según método descrito por Makkar, *et al*, 1997, empleando un equipo Agilent Technologies serie 1200, detector de diodos, con columna analítica de fase reversa 250 x 4 mm x 5 µm, las extracciones de las muestras se hicieron con diclorometano y el solvente empleado como fase móvil fue tetrahidrofurano. El equipo estaba disponible en el laboratorio de química instrumental de la Universidad EAFIT.

La medición de la actividad de lectina por hemaglutinación de eritrocitos, se hizo según el método descrito por Aregheore, *et al*, 1998 a las muestras de harina sin tratar y tratada térmicamente. Para esta prueba se emplearon muestras de sangre bovina observadas al microscopio empleando colorante de Wrigth, colocando sangre y solución de harina en PBS (Buffer fosfato salino) relación

1:2 v. Las soluciones de harina se hicieron en solución de NaCl 0.9%. La cuantificación de la actividad de lectina, se hizo por el inverso de la mínima cantidad de material del núcleo en mg/ ml que produce aglutinación observadas en un microscopio marca McAfee, modelo 400 con un lente 100X.

La medición del contenido de proteína cruda para la valoración nutricional se hizo por el Método Kjeldahl empleando un equipo acoplado de digestión Kjeldahl y destilación marca VELP Científica con extractor de gases integrado; el cálculo de contenido de nitrógeno y equivalencia a proteína cruda se hace con base en las ecuaciones 1 y 2. Las pruebas de proteína, humedad y cenizas se hicieron acorde a las normas establecidas en la NORMA CODEX PARA METODOS DE ANÁLISIS Y DE MUESTREO RECOMENDADOS - CODEX STAN 234-199, estas pruebas se le hicieron a la muestra sin tratar y a los productos de los tratamientos térmico y químico; la humedad se determinó por medio de un analizador de humedad SARTORIUS y las cenizas se determinaron por carbonización en mufla, ambos equipos disponibles en los laboratorios de análisis de alimentos de la Corporación universitaria Lasallista.

$$\text{Ecuación 1} \quad \% N = \frac{cm^3 Hcl \times N \times meq \times 100}{\text{Peso de muestra}}$$

N: Normalidad

meq: miliequivalente del Nitrógeno = 14/1000

$$\text{Ecuación 2} \quad \% \text{ Proteína Bruta} = \% N \times \text{Factor}$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

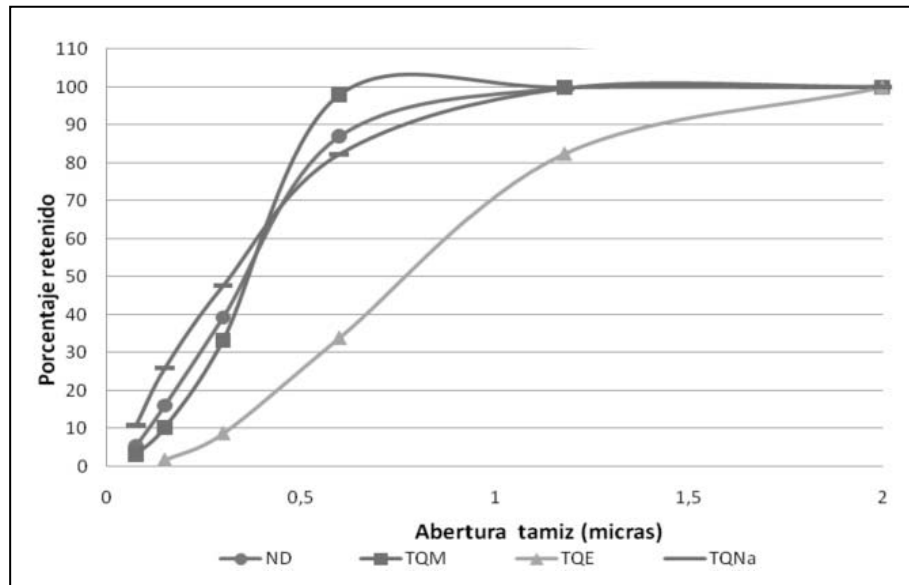
3.1 Preparación de la muestra

Después de la separación de núcleos y cáscaras, los porcentajes de núcleo respecto a la masa de torta manejada fue del 42.4% en promedio, y un 10% correspondió al material fragmentado y prensado de difícil separación.

El material obtenido luego de la molienda y el tamizado tiene un tamaño homogéneo inferior a 2 µm. Se pudo verificar visualmente y por muestreo, que la harina final

contiene menos del 0.001% de restos de cáscara. La curva granulométrica para el material a tratar se muestra en la figura 1 junto con los productos de los diferentes tratamientos. La granulometría de las muestras de harina producto de los tratamientos se realizaron acorde a la norma AOAC 965.22; del análisis granulométrico se puede observar que el tamaño de las harinas producto de los diferentes tratamientos es uniforme y mayoritariamente inferior a 1.18 micras, valor que satisface los tamaños de partículas de otro tipo de harinas vegetales de acuerdo a la NORMA DEL CODEX PARA PRODUCTOS PROTEÍNICOS DE SOJA (PPS) - CODEX STAN 175-1989 (FAO y OMS, 2007).

FIGURA 1
Análisis granulométrico de la muestra original y los productos de tratamiento químico de harina de *Jatropha curcas L.*



3.2 Tratamiento térmico

La harina mostró un alto grado de humectación (turgencia), hasta casi duplicar su volumen, formando una pasta suave y poco compacta, la cantidad de agua agregada antes de ver sobrenadante fue de $3L/kg_{HARINA}$. Para los productos de lavado de los tratamientos, se hicieron mediciones de pH y % sólidos, los registros se muestran en la tabla 2.

TABLA 2
pH y porcentaje de sólidos de los sobrenadantes de lavado en los tratamientos térmicos con agua y tratamientos químicos con metanol y etanol para harina de *J. curcas*

PARÁMETROS MEDIDOS A LOS SOBRENADANTES DE LAVADO							
TRATAMIENTO	pH Solvente	pH 1	pH 2	pH 3	% Sol 1	% Sol 2	% Sol3
TT	6.98	6.22	6.32	6.39	4.98	2.96	1.50
TQM	10.52	7.29	7.17	7.6	0.75	0.80	0.02
TQE	6.37	6.8	6.78	6.97	0.84	1.00	0.01

La numeración equivale a la secuencia de lavado con agua y solventes.

De la tabla puede verse que los valores de pH para las aguas de lavado no se desvían mucho del valor del solvente original, sin embargo, los porcentajes altos de

sólidos sugieren un proceso de decantación prolongado o centrifugación para que el solvente pueda reutilizarse en el proceso.

El volumen de agua recuperada puede aumentarse si se diera más tiempo para la decantación, si la muestra se centrifugara o filtrara, manteniendo niveles aceptables para la cocción. En este sentido se debe considerar el costo y tiempo aceptables en las actividades adicionales a las propuestas.

3.3 Tratamiento químico

La harina tratada térmicamente no mostró una absorción alta de solvente ni grandes incrementos en el volumen; las partículas son más granulares, manejables y generaron un producto menos pastoso al mezclarse con el solvente. Los valores de % sólidos en las muestras de lavado del tratamiento químico fueron significativamente menores (cerca del 98%) respecto a los de la muestra de tratamiento térmico, esto se debe a que después del secado del tratamiento térmico, el material se compacta, presentando mayor tamaño de partícula, pierde la apariencia de talco y al humectarse absorbe menos humedad.

Los valores de pH de las muestras de lavado con metanol reportados en la tabla 2, muestran valores de baja alcalinidad significativos (cerca de 7), que se desvían considerablemente del valor de pH del solvente original (pH=10.52). La baja alcalinidad de las soluciones retiradas en los lavados hace inconveniente su reutilización inmediata, esta cantidad corresponde a $0.5 \text{ L/kg}_{\text{HARINA}}$.

Los valores de pH de las muestras de lavado con etanol que se reportan en la tabla 2, muestran valores bajos de acidez (pH cercanos a 7), que no se desvían considerablemente del valor de pH del solvente original ligeramente más ácido (pH=6.37). Los valores de baja acidez y % sólido son aceptables y sugieren la conveniencia de reutilización inmediata de los volúmenes retirados sin requerir el destilado de las mismas, correspondiendo a $2.5 \text{ L/kg}_{\text{HARINA}}$.

En el tratamiento con NaOH y NaOCl se observó que la harina humectada con hipoclorito reaccionaba (mostraba efervescencia) con la adición del NaOH y desprendía a su vez gas con un fuerte olor clorado y trazas de amoníaco (valoración subjetiva). Después de sacarlo de la autoclave, el material presentaba un color amarillo fuerte. Se realizaron varios lavados para eliminar el color tostado y el

fuerte olor (el cual consumió grandes cantidades de agua), se obtuvo una mezcla de harina color crema, bastante dispersa en la solución, de consistencia muy blanda y de difícil sedimentación; la reutilización del agua de lavado se considera inadecuada para estos fines debido a que esta conserva las propiedades químicas y organolépticas que se buscaban eliminar de la masa. Al someter esta masa a calentamiento, no se obtuvo una harina, sino películas de masa muy compacta en forma de escamas algo flexibles pese al bajo contenido de humedad.

De lo anterior y de los resultados de % proteína, se tiene que la reacción NaOH y NaOCl con la harina, a temperatura ambiente e intensificado por la acción de la temperatura en la autoclave, da lugar a la degradación de las proteínas u otros compuestos presentes en la harina seguido por el desprendimiento de un olor fuerte, esta afirmación se retomará más adelante en la valoración nutricional.

3.4 Caracterización nutricional

El contenido de proteína de la harina de la especie de *Jatropha* trabajada, presenta valores representativos del 57.7%, los cuales al ser mayores del 40% cumplen con el estándar de la norma NORMA GENERAL DEL CODEX PARA PRODUCTOS PROTEÍNICOS VEGETALES (PPV) - CODEX STAN 174-1989 (FAO y OMS, 2007). La tabla 3, muestra los valores de % proteína para los diferentes tratamientos. Sin embargo, este porcentaje presenta diferencias con el reportado en la literatura, de hasta un 64% en semillas desengrasadas (Martínez, *et al*, 2006), por la naturaleza de la especie y la presencia de aceite residual en el núcleo de la semilla, el contenido de proteína de la muestra desengrasada por método soxlet presentó un incremento del 2% en el contenido de proteína, la diferencia despreciable lleva a pensar que la extracción del aceite residual que puede extraerse de las tortas es injustificado. Adicionalmente se le realizó una prueba de contenido de proteína a las cáscaras de la semilla que arrojó un valor del 4.1%, que resultó ser consistente con el valor promedio de 4.4% de la literatura (Gandini, *et al*, 2007), y que justificó la actividad de separación de núcleo y semilla previo a los tratamientos.

TABLA 3
Valores de % proteína, % humedad y % cenizas de los materiales y productos de tratamiento de *J curcas*

Muestra Harina	% Proteína Factor 5.7	% Humedad	% Cenizas	% Disminución
NT	57.74	19.64	8.22	-
TT	49.94	10.22	-	13
TAT	47.27	7.11	-	18
TQM	51.63	12.5	8.16	11
TQE	52.63	10.33	8.70	9
TQNa	4.99	12.57	9.69	91
CS	4.14	2.03	-	93
SOXLET	58.36	4.05	8.09	-1.08

NT: No tratado, **TT:** Tratamiento Térmico, **TAT:** Tratamiento alta temperatura, **TQM:** Tratamiento químico Metanol 92%, **TQE:** Tratamiento químico Etanol 92%, **TQNa:** Tratamiento químico NaOH - NaOCl, **CS:** Cascara Semilla, **SOXLET:** Extracción de aceite

Luego del tratamiento térmico de detoxificación, el contenido proteínico disminuyó sólo un 13% para tiempos moderados de exposición al calor llegando hasta un valor aún aceptable del 49.9%, esto se debe principalmente a las condiciones del tratamiento especialmente a altas temperaturas, que pueden desnaturalizar parte de las proteínas, sin embargo, la valoración proteínica de un material que fue expuesto a las mismas condiciones por 8 horas más y que presentó mayor compactación y pardeamiento, sólo mostró disminuciones del 18%, valor que es poco representativo considerando las pérdidas bajo las condiciones bases del TT.

La harina tratada químicamente muestra valores de proteína cruda inferiores a la muestra sin tratar, consecuencia de los tratamientos consecutivos a los que fue sometida, sin embargo, la influencia del solvente empleado sobre algunos de los demás constituyentes de la harina y la humedad final del producto, dan lugar a modificaciones en el porcentaje de proteína reportando valores inclusive mayores a la harina tratada térmicamente.

De los 3 tratamientos aplicados, puede verse que la diferencia entre los efectos de los tratamientos con metanol y etanol sobre el contenido nutricional son menores al no degradar en más del 11% las proteínas y presentan

valores muy cercanos; finalmente, el tratamiento de mayor incidencia negativa sobre el contenido nutricional de la harina es el de NaOH - NaOCl, disminuyendo el contenido de proteína en un 91%, hasta un valor de 5%, siendo este último un tratamiento inconveniente debido a que es muy inferior al parámetro de la norma e impensable para un producto proteínico.

Algunos factores adicionales evaluados para los materiales trabajados fueron: % humedad (necesario para el ajuste del % proteína a peso seco) y % ceniza, para ambos factores se obtuvieron valores aceptables inferiores y muy cercanos al 10%; los valores de humedad varían según los tiempos y condiciones de secado, mientras que el % cenizas depende de la composición del material y el porcentaje del mismo que está asociado al contenido de otros minerales. Los valores de humedad se desvían ligeramente del límite impuesto por la norma, sin embargo, dado que el producto es intermedio y no final, estos valores son aceptables y superan inconvenientes de primer nivel en el almacenamiento y el transporte del material. La conservación en los valores de ceniza es favorable, por la importancia de estos compuestos en términos de la capacidad para constituir un alimento animal (Akintayo, 2003).

3.5 Caracterización tóxica

El contenido tóxico de la harina se hizo con base en los valores reportados por la muestra sin tratar, tanto para las mediciones de contenido de ésteres de forbol como para actividad de lectina. La medición de contenido de ésteres de forbol se realizó a los productos de los diferentes tratamientos químicos y a la muestra no tratada para su comparación, mientras que las mediciones de actividad de lectina se le hicieron a la harina no tratada (NT) y a la de tratamiento térmico (TT), dado que ésta última era previa a los demás tratamientos inactivación de lectina es irreversible. Los cromatogramas HPLC se muestran en el anexo 3 y los valores obtenidos de las pruebas se muestran en la tabla 4.

TABLA 4
Valores de actividad de lectina y contenido relativo de ésteres de forbol determinados para productos de tratamiento de *J curcas*

Muestra	Actividad de Lectina		Contenido de Esteres de Forbol		
	Mg/MI	AI	Tiempo (Min)	% Compuesto (Área Hplc)	% Disminución Contenido
NT	0.009	111	38.8	5.9	BLANCO
TT	4.7619*	NA	-	-	-
TQM	NA	NA	39.0	3.1	48.3
TQE	NA	NA	39.0	4.0	32.2
TQNa	NA	NA	39.1	0.4	93.5

NT: No tratado, **TT:** Tratamiento Térmico, **TQM:** Tratamiento químico Metanol 92%, **TQE:** Tratamiento químico Etanol 92%, **TQNa:** Tratamiento químico NaOH – NaOCl **AL:** Actividad de lectina.
*Mayor concentración que produjo hemaglutinación en TT.

Se pudo verificar la presencia de estrés de forbol en los núcleos de *Jatropha curcas L* mediante la comparación del cromatograma obtenido con el reportado por Wink, *et al*, 1997, para aceite de *J curcas* siguiendo el mismo método de Makkar, *et al*, 1997. Los cromatogramas de Wink, muestran el pico de aparición del estandar forbol – miristato 13 – acetato (TPA) a los 54 minutos aproximadamente, y se evidencia la presencia de esterres de forbol en el aceite de *Jatropha*, asociando la huella de aparición entre los 40 y 45 minutos con el contenido de este compuesto.

El porcentaje de compuesto de ester de forbol en la muestra no tratada, entre los arrastrados por la fase móvil de Tetrahidrofurano, fué del 5.9%, porcentaje significativo considerando la elevada toxicidad del éster de forbol y el conocimiento sobre los diferentes compuestos orgánicos de la semilla.

Para las muestras tratadas químicamente, puede verse que la que reportó mayor disminución fue el TQNa con un valor del 93.5%, seguido por el TQM con un 48.3% y finalmente el TQE con 32.2%; las diferencias en las disminuciones de ésteres de forbol para los tratamientos con metanol y etanol son menores, sin embargo el TQNa es significativamente mayor.

4. SELECCIÓN ALTERNATIVA DE DETOXIFICACIÓN

La selección de la alternativa se hará con base a los criterios de la FAO (López, *et al*, 1999), para determinar si el proceso de descontaminación es apropiado o no.

Con base en los resultados de contenido de proteína, podría decirse que el tratamiento más adecuado desde el

punto de vista nutricional es el TQE, el TQM tiene efectos similares sobre la proteína degradándola un 11%, solo un 3% más que el TQE, manteniendo ambos el valor nutritivo especificado para el producto. Por lo anterior desde el punto de vista nutricional, cualquiera de los dos tratamientos sería conveniente.

Desde el punto de vista toxicológico con base en la disminución de actividad de lectina, es indiferente el tipo de tratamiento químico, pues desde la etapa de TT las lectinas son inactivadas. Sin embargo, la disminución en el contenido de ésteres de forbol es significativamente mayor en el tratamiento TQNa, los otros tratamientos no muestran una disminución tan alta siendo mayor la de TQM seguida muy de cerca por la de TQE, en este sentido el tratamiento más adecuado para la detoxificación es el de NaOH-NaOCl.

De los tres tratamientos el TQNa deja residuos alcalinos, amoniacales y sensoriales, que deben eliminarse tras varios lavados, consumiendo grandes volúmenes de agua, para reducir estos residuos que pueden resultar tóxicos y, además, le confieren características impalatables al alimento final. El producto del tratamiento con metanol también requiere un lavado ante el exceso de solvente y la toxicidad del mismo. Por lo anterior el tratamiento con etanol es el más conveniente en cuanto a la seguridad de consumo.

En cuanto a la facilidad en la aplicación de las diferentes alternativas, la del tratamiento con etanol resulta ser más fácilmente aplicable, dado que no requiere equipos especializados, como el caso de la autoclave para el TQM y TQNa, ni tampoco involucra reactivos de difícil consecución, manejo e incluso recuperación.

Por lo anterior, la alternativa más adecuada para la detoxificación de los núcleos de las semillas de *Jatropha curcas L* sería la de tratamiento con etanol dado que supera a los demás tratamientos en los aspectos de tóxico adquirido y tecnológico, es altamente aceptable en el aspecto de tóxico adquirido y medianamente aceptable en el aspecto nutricional, superando de esta forma a las demás alternativas.

5. CONCLUSIONES

El contenido de proteína de un material vegetal, depende del % de humedad, % de lípidos y especialmente de la procedencia de la especie, sin embargo, la extracción de aceite aplicada a las muestras es suficiente para que el producto luego de los tratamientos térmico y químico correspondientes tenga un % proteína aceptable de aproximadamente el 52.6%, sin requerir procesos adicionales.

El bajo contenido de proteína en la cáscara y la alta proporción de ésta en la semilla, 4.1% y 57.6% respectivamente, justifica y hace necesaria la separación de semillas y núcleos antes de los tratamientos correspondientes, evitando así el consumo de cerca del doble de los recursos empleados.

El tratamiento térmico aplicado produce una disminución menor de proteína por degradación térmica, correspondiente al 13%, sin embargo, los valores de % proteína obtenidos a diferentes tiempos de tratamiento, sugieren una mayor influencia de la temperatura que el tiempo empleado en el tratamiento.

La integración de los procesos de TT con los TQM y TQE, sin llevar el material tratado térmicamente a valores tan bajos de humedad, evita que una cantidad de proteína cercana al 4% se degrade, y sugiere la conveniencia de la integración secuencial de ambos tratamientos.

El tratamiento térmico húmedo aplicado a la harina, fue eficaz debido a que disminuyó la actividad de lectina, desde 111 hasta un valor indetectable por el método aplicado.

Los tratamientos químicos aplicados muestran disminuciones en el contenido de ésteres de forbol, la mayor eficiencia fue del tratamiento con NaOH-NaOCl y reportó una disminución del 93.5%, seguido por el tratamiento con metanol que reportó 32.2% y finalmente, el tratamiento con Etanol con 48.4% de disminución respecto al valor reportado para la muestra sin tratar.

El grado de detoxificación calculado y manejado no permite determinar el valor final de toxicidad de la muestra,

sin embargo, es una aproximación para determinar las proporciones de la misma en una formulación de concentrado animal para pruebas *in vivo*.

El tratamiento con NaOH-NaOCl, pese a ser el de mayor efecto detoxificante, no es el más conveniente para la detoxificación del material, dado que degrada el contenido nutricional del material hasta valores inaceptables de % proteína del 4.1%.

La selección de una alternativa de detoxificación debe hacerse considerando de forma integrada aspectos tóxicos, nutricionales y tecnológicos adaptados a la finalidad del material trabajado, con base en esto, la alternativa de tratamiento químico con etanol es la seleccionada por presentar niveles aceptables para estos aspectos.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Guillermo León Palacio, Docente del departamento de Ingeniería de Procesos de la Universidad Eafit, por su asesoría y acompañamiento en la realización de este proyecto. A Alzate y colaboradores, por facilitar material para pruebas de laboratorio. Al Personal de los laboratorios de Ingeniería de Alimentos - Corporación Universitaria Lasallista, María Eugenia Villada; al personal del Laboratorio Especializado de Análisis – LEA y Laboratorio de Biología, Universidad de Antioquia; y personal de los laboratorios de procesos – Universidad Eafit, por su acompañamiento y asesoría en la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

ALZATE, M; FRANDO, D e HINCAPIÉ, C (2008) Obtención de biodiesel a partir del aceite extraído de la semilla de *Jatropha curcas* L: Trabajo de grado. Medellín: Universidad EAFIT. Escuela de Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Procesos.

AREGHEORE, E.M; BECKER, K y MAKKAR, H, P.S. (1998). Assessment of Lectin Activity in a Toxic and a Non-toxic Variety of *Jatropha curcas* using Latex Agglutination and Hemagglutination Methods and Inactivation of Lectin by Heat Treatments. EN: J Sci Food Agric. Vol 77; pp 349-352.

AREGHEORE, E.M; BECKER, K y MAKKAR, H, P.S. (2003) Detoxification of a toxic variety of *Jatropha curcas* using heat and chemical treatments, and preliminary nutritional evaluation with rats. EN: S. Pac. J. Nat. Sci. Vol 21; p 50-56.

FERREIRA, N. C (2007). Caracterização de frutos, sementes e plântulas e cultivo de embriões de pinão-manso (*Jatropha curcas* L). Lavras: Universidad federal de Lavras. 78 p.

GANDINI, T.L; DESPAL y PERMANA, I.G (2007) Nutritional Properties of Three Different Origins of Indonesian *Jatropha (Jatropha curcas)* Meal For Ruminant. EN: Journal of agriculture and rural development in the tropics and subtropics. Supplement 90. pp 94-101.

GROSS. H; FOIDL. G y FOIDL. N (1997). Detoxification of *J. curcas* Press Cake and Oil and Feeding Experiments on Fish and Mice EN: GÜBITZ, G.M; MITTELBACH, M y TRABI, M. Biofuel and Industrial Products from *Jatropha curcas*. Dbv-Verlag Univ. Graz, pp 179-182.

JONGSCHAAP, R.E; CORRÉ, W.J; BINDRABAN; P.S y BRANDENBURG (2007). Claims and facts on *Jatropha curcas* L. Wageningen UR: Plant Research International B.V. [Artículo en internet] www.fact-fuels.org/media_en/Claims_and_Facts_on_Jatropha_-WUR [Consulta: Junio 2008]

LOPEZ, G.R; PARK, D.L. Y PHILLIPS, T.D (1999) Integrated mycotoxin management systems. EN: *Alimentación, Nutrición y Agricultura*. N° 23; pp.38-48.

MAKKAR, H.P.S y BECKER, K (1998a). Comparative evaluation of non-toxic and toxic varieties of *Jatropha curcas* for chemical composition, digestibility, protein degradability and toxic factors. EN: *Food Chemistry*, Vol 62, N° 2; pp 207-215.

MAKKAR, H.P.S y BECKER, K (1998b). Potential of *Jatropha curcas* seed meal as a protein supplement to livestock feed, constraints to its utilisation and possible strategies to overcome constraints EN: GÜBITZ, G.M; MITTELBACH, M y TRABI, M. Biofuel and Industrial Products from *Jatropha curcas*. Dbv-Verlag Univ. Graz, pp 190-205.

MAKKAR, H.P.S; BECKER, K; SPORER, F y M. WINK (1997) Studies on nutritive potential and toxic constituents of different provenances of *Jatropha curcas*. EN: Journal of Agriculture and Food Chem. Vol 45, N° 8; pp 3152-3157.

MARTÍNEZ, H. J; SIDDHURAJU. P; FRANCIS. G; DÁVILA, O. G y BECKER, K (2006). Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents, and effects of different treatments on their levels, in four provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. EN: Food Chemistry, Vol 96, N° 1; pp 80-89.

SINGH, R.N; VYAS, D.K; SRIVASTAVA, N.S.L y MADHURI, N (2008). SPRERI experience on holistic approach to utilize all parts of *Jatropha curcas* fruit for energy. EN: *Renewable Energy*. Vol. 33, N° 8; pp 1868-1873.

TRABI, M; GGBITZ, G.M; STEINER, W y FOIDL, N (1997). Toxicity of *Jatropha curcas* Seeds. EN: GÜBITZ, G.M; MITTELBACH, M y TRABI, M (1997). Biofuel and Industrial Products from *Jatropha curcas*. Dbv-Verlag Univ. Graz, pp 173-178.

WINK, M; KOSCHMIEDER, C; SAUERWEIN, M y SPORER, F (1997). Phorbol esters of *Jatropha curcas*-Biological activities and potential applications. EN: GÜBITZ, G.M; MITTELBACH, M y TRABI, M. Biofuel and Industrial Products from *Jatropha curcas*. Dbv-Verlag Univ. Graz, pp 160-166.

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA EXPANSIÓN DE UNA MICROEMPRESA PRODUCTORA DE LECHE DE SOYA

Ana María Ocampo Cañas, aocampo3@eafit.edu.co

José Fernando Vásquez Sánchez, jvasque3@eafit.edu.co

ASESOR PRINCIPAL: Alina María Restrepo Upegüi - EMPRESA: Leches La Bacana

RESUMEN

Para el desarrollo de este proyecto se realizó un estudio de mercado, el cual fué elaborado con respecto a tres variables que enmarcan el contenido global del estudio, estas son: identificación del mercado, situación actual del sector y análisis del consumidor.

Dicho análisis fue realizado mediante encuestas para determinar el porcentaje de mercado y las variables que influyen en la elección del producto. Entre los principales resultados de la encuesta se encuentra el gran interés manifestado por los encuestados en optar por el consumo de la leche de soya líquida.

La evaluación técnica del proceso de producción de la leche de soya fue realizada teniendo en cuenta las condiciones actuales de operación de la planta, además de hacer un análisis detallado del proceso para la determinación del tipo de equipos que se requieren para cumplir con el objetivo de triplicar la producción. Para el análisis estos equipos se tuvieron en cuenta las restricciones y variables del proceso actual, los balances de masa y energía y las instalaciones físicas de la planta.

Adicionalmente para un mejor entendimiento del proceso, se construyó el diagrama PFD de la planta de producción. La utilidad de este diagrama se basa en el hecho que su dueño y los operarios podrán entender mejor el proceso,

igualmente sirve para la solución rápida y oportuna de problemas, además de ser una herramienta utilizada ampliamente en procesos productivos de todo tipo.

La elaboración de una nueva propuesta con respecto a la distribución de la planta se hizo con respecto a las medidas actuales y el tamaño de los equipos. Se presenta el layout de la planta como una herramienta que sirve para verificar el espacio disponible.

Según la nueva estructura organizacional la empresa requerirá de un gerente, un contador público, una secretaria y 2 operarios, además de una persona encargada de la distribución. Esta nueva estructura de la empresa garantizará la buena asignación de responsabilidades y la minimización de cargas de trabajo.

El análisis financiero se realizó teniendo en cuenta todos los costos de producción y las inversiones iniciales para la ejecución del proyecto. Además se hicieron proyecciones de pérdidas y ganancias para los próximos tres años. Este estudio permitió concluir que el proyecto de expansión es viable y muy rentable.

Palabras clave

Estudio de factibilidad, leche de soya, ocará, microempresa.

ABSTRACT

For the development of this project, a marketing study was done, which was made, based in three variables that frame the overall content of the study, these are: identification of the market and current situation also analysis of the target consumer.

This analysis was conducted through surveys to determine the percentage of the market and the variables that influence the consumer to make a purchase of the product.

Among the major findings of the survey is the great interest expressed by respondents to make a choice for the consumption of soy milk.

The technical evaluation of the process of producing soy milk was made taking into account the current conditions of operation of the plant, in addition to a detailed analysis of the process for determining the type of equipment that are required to comply with the objective of tripling production. For the analysis of this machinery was necessary to evaluate the constraints and variables in the current process, the balances of mass and energy and physical facilities of the plant.

In addition to a better understanding of the process, it was built the PFD diagram of the production facility, the usefulness of this chart is based on the fact that its owner and operators can better understand the process, also serves for the rapid and timely solution of problems as well as being a tool used widely in manufacturing processes of all kinds.

The development of a new proposal regarding the distribution of the plant was made based on the existing measures and the size of the machinery. We describe the layout of the plant as a tool used to check the available space.

Under the new organizational structure will require the company to a manager, an accountant, a secretary and 2 operators, in addition to a person in charge of distribution. This new company structure will ensure the proper allocation of responsibilities and minimizing work loads.

The financial analysis was done taking into account all production costs and initial investment for the project implementation. Additionally was projected profit and loss for the next three years. This study concluded that the expansion project is viable and very profitable.

Key Words

Feasibility study, soy milk, small business, okara.

INTRODUCCIÓN

La microempresa “Leche La Bacana” nace de la necesidad de generar ingresos de un ciudadano más que se va afectado por la situación económica del país, impulsado por el proyecto de emprendimiento que se ejecuta en la ciudad, los factores limitantes para su expansión son la falta de conocimiento y la ausencia de un plan de negocios bien estructurado que facilite este proceso.

Teniendo en cuenta que la leche de soya posee diferentes características que sobresalen entre otros productos lácteos y el amplio reconocimiento de estos beneficios en la población en general, se desarrollo un estudio de factibilidad para el proyecto de expansión para la producción en “Leche La Bacana”.

Para el conocimiento de la cantidad de público a quien se quiere llegar con la leche de soya y la aceptación o no que esta tendría dentro de la población se desarrollo una investigación de mercados. Además se tuvo en cuenta la situación actual tanto del sector como de la competencia.

Luego de conocer el volumen de producción necesario para cumplir con el objetivo del proyecto se realizó un análisis técnico de la empresa para identificar los cuellos de botella y plantear una solución a estos, comparando varias opciones y tomando de estas la más conveniente para la empresa.

Una vez identificadas las necesidades técnicas se procedió a realizar un análisis de la empresa desde el punto de vista de vista organizacional, ambiental y legal; teniendo en cuenta la normatividad colombiana para la producción de alimentos.

El desarrollo de este proyecto beneficiará en primer lugar a su propietario, quien tiene en esta empresa el único sustento para él y su familia quienes con la expansión de esta empresa obtendrían mayores ingresos y así mejorarían su calidad de vida; sumado a esto, la comunidad circundante contaría con nuevas fuentes de empleo aportando en parte a la solución del problema de desempleo que se presenta en el país; además se transformará un producto proveniente del agro, lo que garantizará a los cultivadores de soya un nuevo mercado para su cosecha, dándole mayor valor agregado al incentivar la generación de empleos indirectos en el área rural.

METODOLOGÍA

Para la realización del estudio de factibilidad se comenzó con el desarrollo del estudio de mercado, el cual comprendió la descripción detallada del producto a comercializar, posteriormente se realizó la identificación del sector lo que permitió hacer un profundo análisis por medio del cual se pudo concluir que la leche de soya se encuentra ubicada en el sector de los productos lácteos, siendo el principal sustituto de la leche de vaca. Además, fue posible observar que este sector se encuentra actualmente en un período de crecimiento, especialmente para sus sustitutos, lo que redundará en mayores oportunidades para “Leches la Bacana”.

Una vez identificado el sector se procedió a la segmentación del mercado, definiendo exactamente el público objetivo, su rango de edades, y los lugares de consumo frecuente de la leche de soya. Así mismo, se realizó un estudio de la competencia para la leche de soya, teniendo en cuenta sus precios, su público objetivo, sus canales de distribución, y sus estrategias tanto de mercadeo.

Luego de contar con los anteriores elementos, se hizo un análisis cuantitativo predictivo del consumidor por medio de una encuesta realizada aleatoriamente a 150 personas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Este estudio permitió hacer un cálculo aproximado de la demanda potencial que podría tener la leche de soya.

La determinación de la demanda potencial de la leche de soya, permitió determinar que el objetivo específico de

triplicar la producción de “Leches la Bacana” era viable, por lo que se prosiguió con análisis técnico de la empresa. Este análisis comenzó con la descripción detallada del proceso de producción actual, seguido del levantamiento de los diagramas de bloques y de flujo.

Posteriormente se realizaron los balances de masa global y por componentes, este último se hizo para la proteína y la grasa contenidas tanto en la leche de soya como en la ocará. A continuación se muestran los cálculos realizados:

Consideraciones

- Sistema abierto.
- Sistema en estado estable.
- Sistema sin reacciones.
- Densidad del agua = 1 g. /ml.

Definición de variables

A continuación se definen las variables usadas para los cálculos de balance de materia, además, la figura 13 muestra el diagrama de bloques con las corrientes de entradas, salidas e intermedias.

- F1: Entrada de granos de frijol Soya.
- F2: Entrada de agua del acueducto.
- F3: Salida granos de Frijol Soya después de la etapa de remojo, y entrada de los mismos al molino.
- F4: Salida de agua usada en el remojo.
- F5: Salida de masa de soya del molino, y entrada al proceso de blanqueado.
- F6: Entrada de agua al proceso de blanqueado.
- F7: Salida de agua + masa de soya, y entrada al filtro prensa.
- F8: Salida de Leche de Soya, y entrada de la misma a la marmita.
- F9: Salida de ocará
- F10: Salida de Leche de Soya pasteurizada.

ENTRADAS = SALIDAS**BALANCE DE MASA TOTAL**

$$F1 + F2 + F6 = F4 + F9 + F10$$

$$100g + 150g + 760g = 60g + 187g + 763g$$

$$1010g = 1010g$$

BALANCE DE MASA POR COMPONENTES

Para el frijol soya:

- Proteína: 38.5%
- Grasas: 18.5%

Para la Leche de Soya:

- Proteína: 2,7%
- Grasas: 1,8%

Para la proteína:

F1: Entrada de frijol soya.

F5: Salida de o cara.

F6: Salida leche de soya.

Xprot1: Porcentaje de proteína en el frijol soya.

Xprot5: Porcentaje de proteína en la o cara.

Xprot6: Porcentaje de proteína en la leche de soya.

$$F1 \cdot X_{prot1} = F5 \cdot X_{prot5} + F6 \cdot X_{prot6}$$

$$F5 \cdot X_{prot5} = F1 \cdot X_{prot1} - F6 \cdot X_{prot6}$$

$$F5 \cdot X_{prot5} = 100gr \cdot 0.385 - 763 \cdot 0.027$$

$$F5 \cdot X_{prot5} = 38.5 - 20.601$$

$$X_{prot5} = 17.89 / 187$$

$$X_{prot5} = 9.5\%$$

Por lo tanto el porcentaje de proteína resultante en la o cara es del 9.5%.

Para la grasa:

F1: Entrada de frijol soya.

F5: Salida de o cara.

F6: Salida Leche de Soya.

Xg1: Porcentaje de grasa en el frijol soya.

Xg5: Porcentaje de grasa en la o cara.

Xg6: Porcentaje de grasa en la Leche de Soya.

$$F1 \cdot X_{g1} = F5 \cdot X_{g5} + F6 \cdot X_{g6}$$

$$F5 \cdot X_{g5} = F1 \cdot X_{g1} - F6 \cdot X_{g6}$$

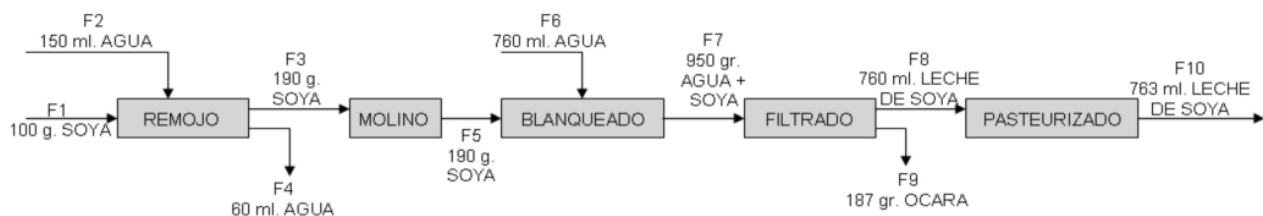
$$F5 \cdot X_{g5} = 100gr \cdot 0.185 - 763 \cdot 0.018$$

$$F5 \cdot X_{g5} = 18.5 - 13.73$$

$$X_{g5} = 4.77 / 187$$

$$X_{g5} = 2.5\%$$

Por lo tanto el porcentaje de grasa contenido en la o cara es del 2.5%.

FIGURA 1**Diagrama de bloques proceso de producción de Leche de Soya**

Después se realizó el balance de energía para la marmita en el programa POLYMATH 6.10. Esta simulación permitió cuantificar las pérdidas de energía en el proceso de pasteurización, además, permitió realizar recomendaciones más acertadas para futuras expansiones de la empresa. A continuación se presenta el modelo de cálculo para los balances de energía:

$$\frac{dT_{leche}}{dT} = \frac{q - q_{perdidoxtapa}}{\dot{m}_{leche} C_{p_{leche}}}$$

$$Q_{trnsfxagua} = U * A * \Delta(T_{agua} - T_{Leche})$$

$$\frac{dT_{agua}}{dT} = \frac{q_{comb} - q_{perdido paredes} - q_{trnsfxagua}}{\dot{m}_{agua} C_{p_{agua}}}$$

$$Q_{perdido paredes} = 0.6 * Q_{trnsfxagua}$$

$$Q_{perdidoxtapa} = 0.2 * Q_{trnsfxagua}$$

$$Q_{comb} = E * \dot{m}_{prop} \Delta H_{comb}$$

En la siguiente tabla se listan cada una de las variables y las unidades en las que fueron trabajadas.

TABLA 1

VARIABLE	DEFINICIÓN	UNIDADES
DeltaH	Entalpia de combustión del gas Propano	cal/g
Mprop	Flujo molar del gas Propano	g/min
E	Eficiencia de combustión gas Propano	
A	Área mojada por la Leche de Soya	m2
U	Coeficiente de transferencia de calor agua- agua	cal/(min*m2*°K)
Cpleche	Calor específico de la Leche deSoya	cal/(g*°K)
t	Tiempo	min
Magua	Masa del agua en la chaqueta de la marmita	g/min
Mleche	Masa de la Leche de Soya en la marmita	g/min
Cpagua	Calor específico del agua	cal/(g*°K)
Qperdidoxparedes	Calor perdido a través de las paredes de la marmita	cal
Qperdidoxtapa	Calor perdido a través de la tapa de la marmita	cal
Qtrnsfxagua	Calor transferido por el agua de la chaqueta de la marmita	cal
Qcomb	Calor de combustión de gas Propano	cal
Tagua	Temperatura del agua	°K
Tleche	temperatura de la Leche de Soya	°K

En las figuras 2, 3 y 4 se presentan las ecuaciones para los balances de energía realizadas en el software Polymath 6.10. y los resultados obtenidos.

FIGURA 2. Ecuaciones ingresadas al software POLYMATH 6.1 para los balances de energía

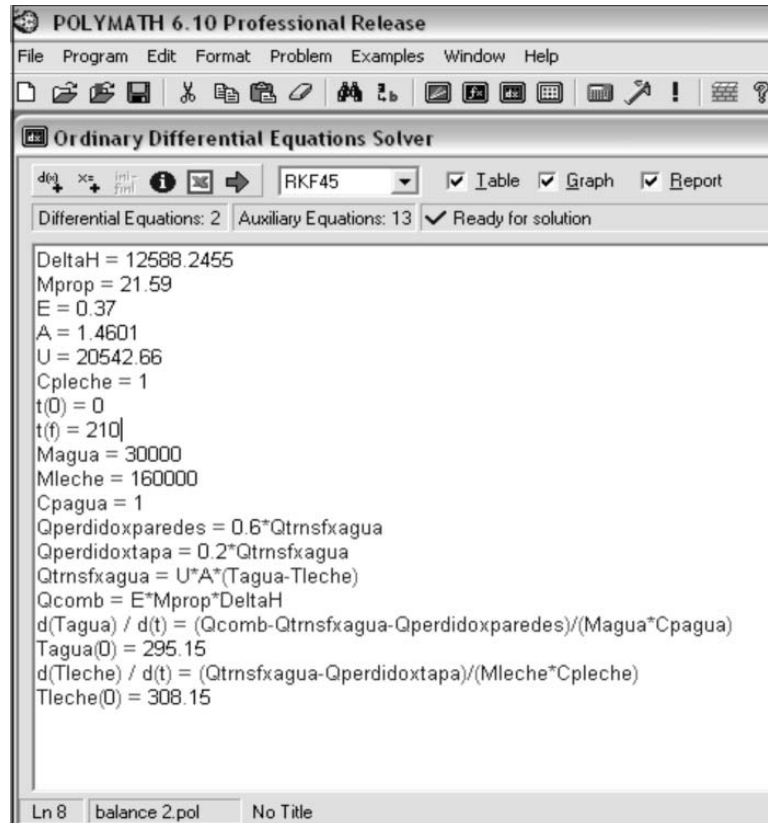


FIGURA 3. Resultados arrojados por el software POLYMATH 6.1

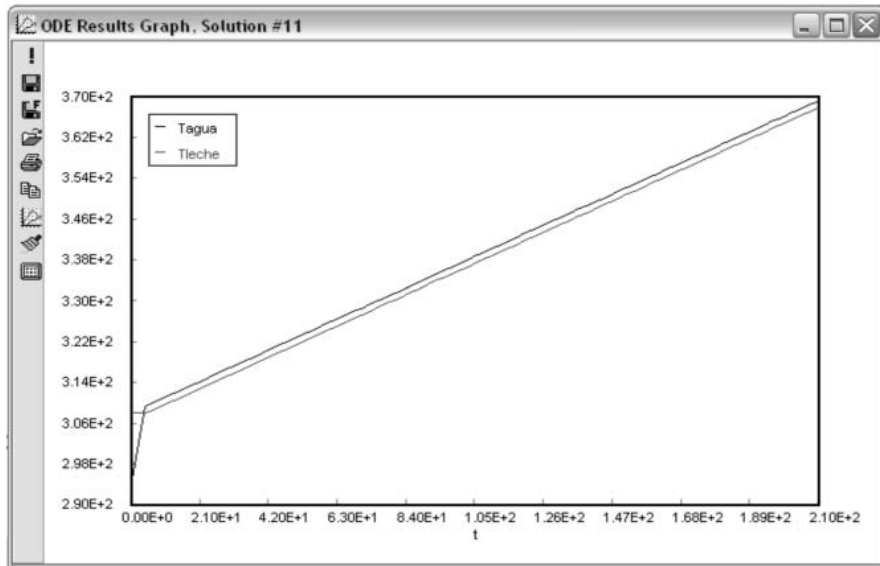
POLYMATH 6.10 Professional Release - [Differential Equations Solution #14]

File Edit Window Help

Calculated values of DEQ variables

Variable	Initial value	Minimal value	Maximal value	Final value
1 A	1.4601	1.4601	1.4601	1.4601
2 Cpagua	1.	1.	1.	1.
3 Cpleche	1.	1.	1.	1.
4 DeltaH	1.259E+04	1.259E+04	1.259E+04	1.259E+04
5 E	0.37	0.37	0.37	0.37
6 Magua	3.0E+04	3.0E+04	3.0E+04	3.0E+04
7 Mleche	1.6E+05	1.6E+05	1.6E+05	1.6E+05
8 Mprop	21.59	21.59	21.59	21.59
9 Qcomb	1.006E+05	1.006E+05	1.006E+05	1.006E+05
10 Qperdidoparedes	-2.34E+05	-2.34E+05	3.448E+04	3.448E+04
11 Qperdidotapa	-7.799E+04	-7.799E+04	1.149E+04	1.149E+04
12 Qtrnsfxagua	-3.899E+05	-3.899E+05	5.746E+04	5.746E+04
13 t	0	0	210.	210.
14 Tagua	295.15	295.15	369.1225	369.1225
15 Tleche	308.15	308.15	367.2067	367.2067
16 U	2.054E+04	2.054E+04	2.054E+04	2.054E+04

FIGURA 4. Comportamiento de la temperatura para el agua y la leche de Soya



En la simulación realizada se pueden observar los comportamientos de la temperatura tanto para el agua contenida en la chaqueta como para la leche de soya contenida en la marmita. Estos datos coinciden con los valores de temperatura medidos en la planta de producción de la empresa.

Luego de haber analizado el proceso de producción actual de la empresa se procedió a hacer un listado detallado de los nuevos equipos necesarios para la expansión de su producción. Para la selección de estos equipos no fue necesario el diseño detallado de cada uno de ellos, pero si se tuvieron en cuenta cada uno de los parámetros de diseño para dicha selección. Los equipos seleccionados fueron:

- Un filtro prensa ofrecido por COREL y CIA S.A. de número de malla 300, construido en DURAPOL que es un polímetro de alta resistencia mecánica, apto para la producción de alimentos. El material del medio filtrante es un lienzo igualmente apto para este proceso.
- Una Bomba de desplazamiento positivo de doble diafragma con un motor de 1 Hp.

- Una marmita ofrecida por IMELTRA LTDA de acero inoxidable, con una capacidad de 200 Litros, un motor para el agitador de 0.25 hp. y agitador tipo hélice.

Una vez definidos los equipos necesarios para la nueva capacidad de producción, fue necesario definir la nueva estructura organizacional para la empresa, definiendo los nuevos cargos y sus respectivas funciones. Así mismo, se tuvieron en cuenta todas las consideraciones legales para este tipo de empresa.

Finalmente se hizo un estudio financiero que permitiera definir la viabilidad del proyecto desde el punto de vista económico, teniendo en cuenta las inversiones iniciales de capital, los costos directos, costos indirectos, gastos de administración y de ventas. Las proyecciones de ventas se hicieron teniendo en cuenta los crecimientos de "Leches la Bacana" durante los últimos tres años, así como también se tuvieron en cuenta los crecimientos de la competencia. A continuación se muestra el estado de pérdidas y ganancias proyectado para los siguientes tres años:

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3
Ventas		\$ 164.764.800.00	\$ 194.465.600.00	\$ 224.952.300.00
Costo de la mercancía vendida		\$ 41.363.392.32	\$ 47.868.294.55	\$ 48.150.534.00
Utilidad bruta		\$ 123.401.407.68	\$ 146.597.305.45	\$ 176.801.766.00
Gastos de administracion		\$ 39.501.541.07	\$ 44.802.647.88	\$ 50.815.163.23
Gastos de ventas		\$ 21.802.830.00	\$ 29.749.028.10	\$ 42.135.560.07
Depreciación		\$ 4.126.997.00	\$ 4.126.997.00	\$ 4.126.997.00
Utilidad Operativa		\$ 57.970.039.61	\$ 67.918.632.47	\$ 79.724.045.71
Gastos no operacionales		\$ -		
UAII		\$ 57.970.039.61	\$ 67.918.632.47	\$ 79.724.045.71
Gastos financieros		\$ 9.904.792.80	\$ 8.250.386.16	\$ 6.198.921.92
UAI		\$ 48.065.246.81	\$ 59.668.246.31	\$ 73.525.123.79
Impuestos		\$ 15.861.531.45	\$ 19.690.521.28	\$ 24.263.290.85
U neta		\$ 32.203.715.36	\$ 39.977.725.03	\$ 49.261.832.94
Depreciación		\$ 4.126.997.00	\$ 4.126.997.00	\$ 4.126.997.00
Flujo de caja neto	-\$ 41.269.970.00	\$ 36.330.712.36	\$ 44.104.722.03	\$ 53.388.829.94

CONCLUSIONES

Gracias al estudio de mercado, se pudo establecer que los distribuidores más apropiados para el producto son los gimnasios, las tiendas naturistas y los puntos de venta aledaños a las unidades deportivas. A su vez esto proporcionó como resultado, que las ventas a pesar de ser para el público en general, deben enfocarse en las personas que frecuentan estos lugares, esto es, hombres y mujeres con edades entre los 17 y los 50 años con estilos de vida saludables, sin importar su estrato socio-económico.

El análisis de la demanda permite concluir, que el mercado de la leche de soya se encuentra en crecimiento, debido a las nuevas tendencias en la alimentación de las personas; lo anterior también se evidenció al ver que las empresas ofrecen productos con variaciones que hace algún tiempo no se encontraban en el mercado. Además, ADES actualmente realiza campañas televisivas de sus productos, lo cual es positivo para "Leche La Bacana" al promover el consumo de este producto.

El análisis del consumidor permitió descubrir el gran potencial que existe en la leche de soya. Así lo demuestran los resultados de la pregunta ocho de la encuesta realizada,

donde el 92% de los encuestados manifiestan interés por incluir el producto en su dieta, siempre y cuando se ofrezca con un sabor agradable. Además, según los resultados de la encuesta se definió que la producción de "Leches la Bacana" será de 6900 Litros/mes con una participación del mercado del 1.4%

De lo anterior, se pudo definir que el posicionamiento del producto se hará basado en su excelente sabor. A su vez, esto permitió definir que la estrategia de mercadeo más apropiada son las degustaciones.

Luego de realizar la evaluación técnica del proceso, se establece la necesidad de adquirir tres nuevos equipos para la operación de la empresa, estos son: un filtroprensa, una marmita y una bomba. Esta decisión se tomó teniendo en cuenta las nuevas proyecciones de ventas y la capacidad actual de producción de la planta. El filtroprensa en comparación con la filtración manual, reduce los tiempos de operación, a la vez que permite obtener mayor rendimiento en la extracción de la leche de soya.

El uso del software POLYMATH como herramienta de apoyo para el cálculo de los balances de energía, permitió evaluar diferentes escenarios de operación para la planta,

siendo de gran ayuda a la hora de tomar decisiones referentes a la selección de los equipos. Así, fue posible comparar el comportamiento de la marmita variando su volumen lo que evidenció que la compra de una marmita de 500 L. era inviable, ya que el tiempo requerido para que la leche de soya alcanzara la temperatura de 95°C, era de 5.25 horas.

La falta de un aislante para las paredes y la tapa de la marmita, hacen que la pérdida de calor para este equipo sea muy alta, siendo de un 60% para las paredes y de un 20% para la tapa, lo que conlleva a un elevado consumo de gas propano y un mayor tiempo utilizado en la pasteurización.

El estudio financiero, hizo posible identificar cada uno de los costos y gastos en los cuales se verá comprometida la empresa, de igual manera se identificaron cuales eran los costos de capital para determinar el monto de la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto de expansión. Las proyecciones de las ventas y de los gastos se hicieron para un período de tres años. Luego de realizadas dichas proyecciones, los resultados arrojaron una tasa interna de retorno del 84%, lo cual desde el punto de vista de la evaluación financiera, hace factible el proyecto. Según el Valor Presente Neto encontrado como valor de la empresa dentro de tres años, traído a dinero de hoy, será de \$50.530.216. confirmando la viabilidad del proyecto.

RECOMENDACIONES

ADMINISTRATIVAS

Para competir con las empresas que se encuentran posicionadas en los almacenes de cadena, se recomienda el desarrollo de una nueva marca, con una imagen impactante y de alto reconocimiento que se posicione en el mercado como una de las mejores leches de soya. Esta nueva marca podría además, tener diferenciaciones en su sabor y componentes nutricionales, presentando una leche de soya enriquecida con vitaminas, calcio, entre otros.

Se recomienda a la empresa, desarrollar una visión clara de sus objetivos en el mediano y largo plazo, permitiendo

a la empresa y a sus empleados saber hacia donde se dirigen.

Puesto que los resultados financieros esperados son excelentes y la empresa tendrá buen reporte de utilidades al final de cada período, se recomienda crear un fondo de ahorro, con el fin de tener un capital que permita desarrollar nuevos proyectos de inversión, sin tener necesidad de recurrir a préstamos bancarios. Además, estos dineros podrían disminuir los impactos negativos en la empresa en el momento de una eventual crisis.

Siempre que se plantea un proyecto de inversión como éste, es importante contar con un "plan B". Ya que no siempre las cosas salen según lo planeado y en algunos casos el mercado puede ser impredecible. Para esta empresa en caso de no cumplirse con las metas en las ventas, se recomendaría bajar el precio de la leche de soya en un 25%, lo que dejaría el valor de este producto cercano al costo de producción. Seguido a lo anterior, se abriría el portafolio de productos con los productos fabricados a partir de la ocará, como son: arepas, tortas y salchichón de soya. Estos han sido desarrollados por "Leche La Bacana" durante varios años. La fórmula y los procesos de producción para estos productos están desarrollados; los costos de producción son conocidos, ya que el proceso se ha venido realizando a pequeña escala, teniendo también muy buena aceptación por parte de los consumidores. El público objetivo sería el mismo de la leche de soya. Además, las especificaciones técnicas tanto de los equipos como de la planta son las mismas que para la producción de leche de soya líquida.

TÉCNICAS

Las pérdidas de calor en la marmita, representan mayor tiempo de producción y mayor consumo de gas. Para evitar esto, se recomienda el diseño de una marmita con aislante en sus paredes y en su tapa, lo cual permita una reducción de las pérdidas, generando así mayor eficiencia en la planta.

Para una futura expansión de capacidad de producción de la empresa, es importante tener en cuenta que la operación

de las marmitas es más eficiente si se realiza en paralelo; debido a que un mayor volumen de la marmita redundaría en mayor área expuesta al ambiente, lo que a su vez significa mayores pérdidas de calor. La opción de implementar un sistema de producción continuo no se recomienda en el mediano plazo, ya que este sistema tiene unos costos de capital muy altos y sería recomendable sólo para plantas con grandes volúmenes de producción.

BIBLIOGRAFÍA

BORELLO, Antonio. 2000. El Plan de Negocios. MCGRAW-HILL. Santafé de Bogotá. 194p.

KERN, Donald Q. 1997. Procesos de Transferencia de Calor. CONTINENTAL. México. 990p.

LÓPEZ VARGAS, Memphis. 2003. Administración: Principios de Organización y Gestión Empresarial.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE COLOMBIA Bogotá. 399p.

MARTÍNEZ BENCARDINO, Ciro. 2005. Estadística y Muestreo. 12 edición. ECOE ediciones. Bogotá DC. 624p.

MIRANDA MIRANDA, Juan José. 1997. Gestión de Proyectos. P 55. 1 ed. MB editores. Bogotá. 438p. 406p.

CIBERGRAFÍA

www.soyatech.com [6 de Agosto de 2008]

www.canadiansoybeans.com [agosto 24 de 2008]

www.dane.gov.co [3 de septiembre de 2008]

www.minagricultura.gov.co [12 de agosto de 2008]

DISEÑO DE UN TAMBOR PERFORADO DE MEZCLA PARA EL PROCESO DE COMPOSTAJE AEROBIO REALIZADO EN LA PLANTA DE BENEFICIO DE LA CENTRAL GANADERA DE MEDELLÍN

Karla Andrea Ossa Vásquez, kossavas@eafit.edu.co

Martha Rut López, martaru@latinmail.com

ASESOR PRINCIPAL: *Martha Rut López*

EMPRESA: *Central Ganadera de Medellín S.A.*

RESUMEN

En este trabajo se diseñó y construyó un tambor perforado de mezcla para la optimización del proceso de compostaje aerobio realizado en la Central Ganadera de Medellín.

Para el diseño se identificaron previamente las etapas de compostaje de este proceso, mediante mediciones de humedad, densidad y temperatura; se caracterizó cada una de ellas mediante análisis organolépticos, fisicoquímicos, microbiológicos, de tamaño de partícula y fitotóxicos. Además se identificaron los materiales y sistemas de volteo más usados en el compostaje a nivel mundial.

A continuación se llevó a cabo la construcción del equipo teniendo en cuenta el punto anterior y se realizaron las pruebas de campo. Por medio de los resultados de las pruebas se realizó una comparación de los parámetros exigidos por el Instituto Colombiano Agropecuario ICA (según la norma NTC 5167) a los productores de acondicionadores orgánicos de suelos.

Finalmente se comprobó mediante la operación del tambor perforado de mezcla que este logro optimizar el proceso aerobio de la Central Ganadera de Medellín mejorando el volteo, y con estos el contacto entre componentes, el secado, el tiempo de compostaje y el esfuerzo físico de los empleados de la planta.

Palabras clave

Compostaje, compostaje aerobio, camas de compostaje, rumen, tambor de mezclado, acondicionador orgánico de suelos, termófilos, mesófilos.

ABSTRACT

In this work a perforated tumbling drum was designed and constructed for the optimization of the aerobic composting process done at the Central Ganadera de Medellín.

For the design the composting stages of this process were identified previously through humidity, density and temperature measurements; each stage was characterized by the analysis of organoleptic, physico-chemical, microbiological, particle size and phytotoxic characteristics. Additionally the most commonly used materials and tumbling systems for composting worldwide were identified. Afterwards the device was constructed taking into account the previous point and doing site testing. Through the obtained results a comparison was made of the parameters claimed by the Colombian Agricultural Institute -ICA, Instituto Colombiano Agropecuario- (according to the Colombian standard NTC 5167) to the producers of organic soil conditioners.

Finally it was proven by the operation of the perforated tumbling drum that the aerobic composting process of the Central Ganadera de Medellín was optimized improving the tumbling, and with this, the contact between components, the drying, the composting period and the physical effort of the employees of the plant.

Key Words

Composting, aerobic composting, composting piles, rumen, tumbling drum, organic soil conditioner, thermophilic, mesophilic.

INTRODUCCIÓN

El artículo 72 del decreto 1594 de 1984, Usos del Agua y Residuos Líquidos, establece las normas de vertimiento a un cuerpo de agua, allí se dispone que la remoción de sólidos suspendidos en los vertimientos debe ser del 80%, parámetro que se estaba incumpliendo en La Central Ganadera de Medellín. Todo el barrido de bovinaza procedente de los corrales de la feria de ganados y, el contenido ruminal y agua-sangre de la planta de sacrificio eran arrojados al río Medellín, generando un impacto ambiental considerable.

Por la razón anteriormente expuesta y los costos que se generarían por el posible pago de la tasa retributiva, desde hace algunos años la Central Ganadera de Medellín viene realizando labores de compostaje como solución ambiental a este problema de contaminación.

El proceso de compostaje para la obtención de un acondicionador orgánico de suelos realizado en la Central Ganadera de Medellín, es un proceso aerobio, estructurado bajo el modelo tradicional (Madrigal, 2005). Este se desarrolla en fases mesófilas (15 a 45 °C) y termófilas (45 a 70 °C) con una duración de dos a tres meses. Está organizado mediante 51 camas de compostaje con un peso aproximado por cama de 9 toneladas en la fase inicial y 3 toneladas en el producto terminado, es decir, un acondicionador orgánico de suelos.

Semanalmente, todas las camas deben ser volteadas para garantizar el contacto de todos los componentes del compost (Bovinaza seca, contenido ruminal, cal dolomita y cisco de madera) y el secado del material orgánico. Estos volteos son realizados por 5 personas con la ayuda de palas de construcción, lo cual impide que el proceso sea óptimo (Álvarez, 2005).

Aunque el proceso de compostaje aerobio por camas, para todo tipo de residuos orgánicos, es uno de los más usados y económicos, en este proyecto se plantea el diseño de un tambor perforado de mezcla como alternativa para la optimización del proceso ya que se mejora el sistema de volteo obteniendo una mezcla más homogénea, donde todos los componentes entran en contacto, se disminuye el tiempo de secado y de esta forma el tiempo de compostaje, también se podrán controlar los olores y la presencia de moscas, y finalmente el esfuerzo físico que tiene que realizar el personal de la planta se reduce mejorando así sus condiciones laborales.

El tambor perforado es una opción adicional dentro de la oferta de equipos de compostaje disponible actualmente en el mercado.

METODOLOGÍA

Los análisis y pruebas realizadas para este proyecto se llevaron a cabo en el laboratorio de Química Orgánica de la Universidad EAFIT y en la Universidad de Antioquia a través del Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares - GIEM. Los planos para la construcción del tambor perforado de mezcla se realizaron con el apoyo del Grupo de Investigación en Estudios de Mantenimiento Industrial GEMI de la Universidad EAFIT y las correcciones de planos y construcción del prototipo en el taller Corte y Grafado-Diseños en Acero y Aluminio.

1. IDENTIFICACIÓN DE LAS ETAPAS DE COMPOSTAJE

El proceso de identificación de las etapas de compostaje se realizó en 3 pasos: estandarización de las camas de compostaje, medición de humedad y densidad, y medición de temperatura.

1.1 Estandarización de las camas

Se seleccionó una muestra aleatoria de 10 camas, donde se midió con una cinta métrica el ancho, alto y profundidad. Cada una de las dimensiones presentaba variaciones de 10 cm. por lado. En la Figura 1. se observan las dimensiones establecidas como estándar para el compostaje de la Central Ganadera de Medellín.

FIGURA 1

Dimensiones de una cama estándar para la Central Ganadera de Medellín



El volumen total de cada cama fue de 14.78 m³.

1.2 Medición de humedad y densidad

De las camas seleccionadas previamente se recolectó una muestra de 1 Kg por cama, tomando material tanto de la superficie como del interior, para realizar pruebas de humedad y densidad. La prueba de humedad en campo no fue realizada ya que no se disponía de un higrómetro especializado para este tipo de material.

Para la medición de la humedad se realizó mediante secado en horno, es decir se tomó la muestra seca para expresar el resultado en base húmeda. Se depositó cada una de las muestras en un beaker de 250 ml, se midió la masa en una balanza electrónica marca Adventurer Ohaus y posteriormente se llevó a un horno de secado marca Heraus a una temperatura de 70°C por 24 Horas. Una vez finalizado el secado se procedió a pesar nuevamente las muestras. La humedad se calculó así:

$$\%H = \frac{\text{Minicial} - \text{Mfinal}}{\text{Minicial}} \times 100\%$$

Donde:

%H: La humedad de la muestra

Minicial: Masa húmeda de la muestra

Mfinal: Masa seca de la muestra

La muestra seca se tomó nuevamente para medir la densidad, esto se realizó cuantificando la masa de producto depositado libremente por unidad de volumen, en un recipiente de volumen conocido, en este caso una probeta de 50 cm³; estos ensayos se realizaron de acuerdo con la norma técnica colombiana NTC 5167 (Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo)

1.3 Medición de la temperatura

Para la medición de temperatura se seleccionaron dos camas, la N° 34 y la N° 43, ya que en el momento de iniciar la prueba eran las que se encontraban comenzando el proceso de compostaje. Estas fueron evaluadas por un período de 3 meses; también se adicionó una medición en camas aleatorias pero siguiendo el proceso de compostaje, desde la fase mesófila hasta la fase de maduración. La temperatura se midió mediante un termómetro bimetalico marca Hawk el cual se dejó por aproximadamente 1 minuto en cada uno de los 3 puntos de medición; el valor final fue el promedio de las 3 mediciones.

Finalmente las etapas del proceso fueron identificadas con estos datos y se realizó un diagrama de bloques que permite visualizar fácilmente el proceso realizado en la Central Ganadera de Medellín.

2. CARACTERIZACIÓN DE LAS ETAPAS DEL COMPOSTAJE

Para caracterizar las etapas del proceso de compostaje se realizaron análisis organolépticos, fisicoquímicos, microbiológicos, de tamaño de partícula y fitotóxicos. Estos análisis se efectuaron en la Universidad de Antioquia a través del Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares - GIEM y teniendo en cuenta la norma técnica colombiana NTC 5167 (Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo).

En total se realizaron 3 análisis: fase mesófila, fase intermedia (Combinación de las etapas termófila y de enfriamiento) y fase de maduración.

2.1 Organolépticos

Se realizó una valoración cualitativa mediante la percepción de los sentidos. Para este caso se analizaron los parámetros de estado, color y textura de la muestra (NTC 5167, 2004)

2.2 Físicoquímicos

Se basan en metodologías de análisis de suelos y de material vegetal debido a que la aplicación directa del producto final es sobre el suelo o como sustrato para siembra. Los ensayos realizados son los siguientes:

- Cuantificación de la capacidad de retención de agua, pH y conductividad eléctrica: En esta prueba se adicionó agua a la muestra hasta un punto de equilibrio que refleja un brillo metálico sobre la superficie, en el cual la muestra no absorbe más agua ni la escurre; después de un tiempo de reposo se registraron el volumen de agua utilizado para alcanzar el punto de saturación, el peso de la muestra seca y el porcentaje de humedad, con lo que se obtuvo el porcentaje de saturación. El pH se midió sobre esta misma muestra usando un potenciómetro y obteniendo una lectura directa del equipo. Para la conductividad eléctrica, se separó una parte de la muestra, se le aplicó una filtración al vacío, y con la ayuda de un conductímetro se midió la conductividad eléctrica del filtrado expresada en dS/m (NTC 5167, 2004).
- Cuantificación de cenizas por el método de pérdidas por volatilización: Es una aproximación del contenido de materia orgánica presente en el producto, considerando que el 100% del producto menos el tope del porcentaje de cenizas, carbonatos y humedad refleja el contenido de materia orgánica (NTC 5167, 2004).
- Cuantificación de Carbonatos: Se realizó por medio de la adición de un volumen en exceso de una solución normalizada de ácido clorhídrico, el cual reacciona con

los carbonatos presentes. El exceso de ácido se valoró con una solución de hidróxido de sodio normalizada (NTC 5167, 2004).

- Cuantificación del carbono orgánico oxidable total: Se realizó por el método de Walkley Black y se fundamenta en la reducción del ión dicromato y el contenido de carbono se midió por el ión dicromato no reducido; es un método indirecto, por lo que está sujeto a interferencias tales como cloruros (NTC 5167, 2004).
- Cuantificación de la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C): Se usó el método del acetato de amonio 1N pH 7.0, este se basa en el reemplazo de las posiciones de intercambio por el ión amonio y su posterior desplazamiento con una solución de cloruro de sodio, produciendo cloruro de amonio el cual en presencia de un formaldehído forma estequiométricamente un complejo nitrogenado y ácido clorhídrico el cual se evaluó con hidróxido de sodio (NTC 5167, 2004).
- Cuantificación de fósforo y potasio: Se usó el método de mineralización por vía seca. Por este método es posible cuantificar fósforo, potasio, calcio, magnesio, sodio, hierro, cobre, manganeso, zinc, boro y azufre (NTC 5167,2004).
- Cuantificación de metales pesados: Se realizó por medio de mineralización de la muestra en una mezcla de ácido nítrico y clorhídrico y se evaluó por absorción atómica (NTC 5167, 2004).

2.3 Microbiológicos

Los análisis microbiológicos se realizan para cuantificar e identificar microorganismos patógenos que contaminan las muestras y son perjudiciales para el ser humano (Agrobiotek, 2008).

- Enriquecimiento, asilamiento y detección de Salmonella: a la muestra se le adicionó un caldo lactosado el cual pasó por un período de incubación de 24 a 48 horas y se tomó una muestra que se extiende sobre medios de cultivo sólidos (agar Bismuto Sulfito o agar Salmonella-

Shingella). La muestra no debe tener el microorganismo (NTC 5167, 2004).

- Recuento total de microorganismos mesofilos facultativos: Se mezcló la muestra con agua peptonada y se realizó la siembra. El resultado se obtuvo calculando el número de colonias visibles por gramo de muestra (NTC 5167, 2004).
- Recuento total de hongos o levaduras: Se mezcló la muestra con agua peptonada y se realizó la siembra. El resultado se obtuvo calculando el número de hongos y levaduras visibles por gramo de muestra (NTC 5167, 2004).
- Recuento de Enterobacterias: Se mezcló la muestra con agua peptonada, luego se realizó la siembra, se agregó cristal violeta rojo neutro – bilis – glucosa y se incubaron. El resultado se realizó calculando el número de Enterobacterias visibles por gramo de muestra (no debe exceder 1000) (NTC 5167, 2004)

2.4 Tamaño de partícula

Se usó la técnica de tamizado con malla de alambre tejido número 10 (2mm) (NTC 5167, 2004).

2.5 Fitotóxicos

Se realizaron pruebas donde se determina el efecto de la muestra sobre la germinación de semillas de acuerdo con el modelo biológico *Raphanus sativus* (NTC 5167, 2004).

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TAMBOR PERFORADO DE MEZCLA

Para el diseño del tambor perforado de mezcla se consideraron las características, materiales y sistemas de volteo presentados por algunos equipos de compostaje disponibles en el mercado. De acuerdo con esta información y la teoría de compostaje se decidió continuar con un proceso aerobio, ya que su manejo es el mas sencillo y mas usado de los sistemas de compostaje (Haug, 1993).

Se planteó entonces para el proceso realizado en la Central Ganadera de Medellín, el diseño de un contenedor, en este caso uno que permitiera continuar con el compostaje aerobio. La forma que mas se adaptaba para hacer una mezcla homogénea del material era la de un cilindro en este caso un tambor de mezclado.

Para garantizar la aireación del material se propuso el uso de perforaciones en la superficie del tambor, en vez de ventanas de aireación. El volteo se estableció mediante la rotación del tambor perforado conectado mediante un sistema de poleas conducidas a un motorreductor, y este a su vez conectado a un suiche on/off que permitiera la fácil operación del equipo por parte de los empleados.

Tomando como referencia los materiales mas usados en los equipos de compostaje disponibles en el mercado mundial son concreto, polietileno, plástico reciclado y acero, este último seleccionado para la construcción del tambor perforado de mezcla por su costo y adaptabilidad a la forma del equipo (Clean Merseyside Centre, 2005).

Para la carga y descarga se destaca el uso de estructuras simples, como ventanas, característica que fue identificada y adaptada para este proyecto (Green Culture Inc., 2006). Al finalizar la identificación de las características de los sistemas de compostaje comerciales se procedió a realizar el diseño del tambor perforado de mezcla. Este se llevo a cabo mediante teoría para diseño mecánico, donde se calculó el volumen del tambor, el tamaño de la lámina para la construcción del tambor, la transmisión del motor y la relación de poleas, además se seleccionaron tanto el motor como el eje y las chumaceras asociados al eje. Posteriormente esta información se introdujo al software Inventor donde se establecieron las dimensiones del tambor perforado de mezcla y se realizaron los planos iniciales de construcción. Finalmente los planos fueron ajustados en el taller Corte y Grafado-Diseños en Acero y Aluminio, donde se llevo a cabo la construcción del tambor.

3.1 Determinación Del Volumen del Tambor

Según reglas heurísticas, el volumen de material contenido en un tambor cilíndrico debe ser equivalente a la tercera

parte del volumen total del tambor. Para este caso se usaron dos fórmulas, la primera para hallar el volumen de un cuerpo y la segunda para hallar el volumen total del tambor (Stewart, 1999).

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Donde:

V : Volumen de materia prima.

m : masa de la materia prima.

ρ : Densidad de la materia prima.

En este caso la materia prima es rumen, con una humedad mayor al 80%.

$$V_{TOTAL} = 3 * V$$

Donde:

V_{TOTAL} : Volumen total del tambor.

V : Volumen de materia prima.

Se consideró que una muestra de 5 Kg. era óptima tanto para la realización de las pruebas como para construir un tambor perforado de mezcla a pequeña escala.

La densidad de la materia prima se obtuvo a través de los análisis fisicoquímicos realizados para la identificación de las etapas de compostaje.

3.2 Determinación del Tamaño de la Lámina para la Construcción del Tambor

Para calcular el tamaño de la lámina para la construcción del tambor fue necesario determinar el diámetro del tambor a partir del volumen total del mismo; con este dato junto con la longitud del tambor (que se fijó teniendo en cuenta que el tambor sería construido a pequeña escala), se calculó el tamaño de la lámina mediante la fórmula de perímetro (Stewart, 1999).

$$d = \sqrt{\frac{4 * v}{\pi * L}}$$

Donde:

d : Diámetro del tambor.

TOTAL V : Volumen total del tambor.

L : Longitud del tambor.

$$P = \pi * d$$

Donde:

P : Perímetro de la lámina.

d : Diámetro del tambor.

Debido a que comercialmente no se fabrican láminas de 1.236 m de largo se seleccionó una lámina perforada de acero Hot Rolled de 2 m de largo, 2 mm de espesor, con perforaciones de 6mm de diámetro y un área libre de 45%. Con el cambio de longitud de la lámina, el diámetro del tambor pasa de 0,618 m a 0,60m, cambiando así el perímetro, el volumen total del tambor, el volumen de la materia prima y la masa de la materia prima, que fueron recalculados.

3.3 Determinación de la Transmisión del Motor

Para calcular la transmisión del motor era necesario conocer la inercia generada por el tambor, su aceleración angular y el torque producido por el movimiento del mismo (Beer, 1993).

$$I = \frac{M}{2} * r^2$$

Donde:

I : Inercia.

M : Suma de la masa de la materia prima y la masa del tambor.

r : Radio del tambor.

$$\tau = I * \omega$$

Donde:

τ : Torque.

I : Inercia.

ω : Velocidad angular.

La masa del tambor se calculó a partir de los datos comerciales de la lámina perforada (Ferrocortes, 2001).

La velocidad angular se determinó considerando que el tambor debía girar lentamente, en este caso a 5 RPM, debido al tipo de materia prima y a que el volteo debe ser cuidadoso para no disminuir la temperatura bruscamente, y de esta forma mantener vivos los microorganismos correspondientes, según la etapa del proceso de compostaje en el que se encuentre el tambor.

El torque obtenido indica que la potencia necesaria para mover el tambor perforado de mezcla es muy baja, por lo tanto se debe seleccionar un motor pequeño. De acuerdo con la oferta del mercado, se seleccionó el motorreductor marca ASSI SK01 63 S/4, pues presenta el torque máximo mas bajo, con un valor de 91 N.m y que presenta una potencia de 0,16 hp (Variadores S.A., 2006).

3.4 Determinación de la relación de poleas

La relación de poleas se determinó a partir de la velocidad de salida del motorreductor y la velocidad deseada de giro del tambor.

$$R = \frac{V_s}{v}$$

Donde:

R : Relación de poleas.

Vs : Velocidad de salida del motorreductor.

v : Velocidad deseada de giro del tambor.

La relación de poleas obtenida indica que es una polea conducida. De acuerdo con el radio del tambor, y la distancia estimada de ubicación del tambor con respecto al suelo, el sistema de poleas que se ajustó a la relación calculada fue: una polea de 14 pulgadas y otra de 3 pulgadas respectivamente.

3.5 Selección del Eje y Chumaceras

En el mercado existe gran variedad de ejes y chumaceras, que se ajustaban al diseño del tambor, por lo que no fue

necesario hacer cálculos de diseño, pero sí de selección (Beer, 1993).

Para la selección de eje se evaluó el acero al carbono 4140; por sus propiedades mecánicas y alto uso industrial en piezas rotatorias era adecuado para la operación del tambor (Ferrocortes, 2001).

La selección se realizó a partir de las siguientes fórmulas:

$$\tau_{\max} = \frac{S_s}{2}$$

Donde:

max τ : Torque máximo del material.

y S : Esfuerzo de fluencia a la tensión del material.

Con el torque máximo del material se procede a calcular el torque, incluyendo la potencia del motorreductor seleccionado.

$$T = \frac{P}{2\pi f}$$

Donde:

T : Torque generado por el tambor.

P : Potencia del motorreductor.

f : Frecuencia.

Con esta información se precedió a calcular la relación J C que me permite seleccionar el eje a través de tablas comerciales de barras de acero (Ferrocortes, 2001).

$$\frac{J}{C} = \frac{T}{\tau_{\max}}$$

Donde:

J : Momento polar de inercia.

C : Diámetro de la barra.

T : Torque generado por el tambor.

max τ : Torque máximo del material.

Con el valor de la relación J C se buscó en las tablas comerciales el radio (C) correspondiente a la barra de acero al carbono 4140 que se ajustaba a este diseño. Además se

tuvo en cuenta el peso de la barra con respecto al peso del tambor con carga.

$$\frac{J}{C} = \frac{\pi * C^3}{2}$$

Donde:

C : Diámetro de la barra.

J : Momento polar de inercia.

Con este procedimiento se seleccionó un eje calibrado de acero al carbono 4140 de 1 pulgada de diámetro. Una vez seleccionado el eje se procedió con la selección de unas chumaceras marca SKF de 1 pulgada de diámetro.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la identificación y caracterización del proceso de compostaje realizado en la Central Ganadera de Medellín, además del diseño y construcción del tambor perforado de mezcla y sus respectivas pruebas de campo.

1. Identificación de etapas de compostaje mediante mediciones de temperatura, humedad y densidad

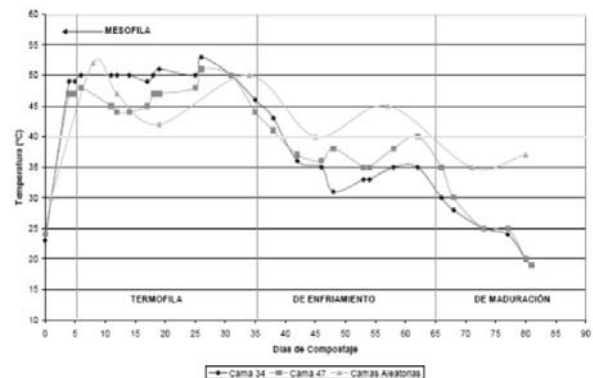
Para la identificación de las etapas del proceso de compostaje se registraron las temperaturas de 2 camas (Ver Figura 2) por un período de 80 días. Adicionalmente se tomaron 10 muestras de camas aleatorias, en puntos correspondientes, a las cuales se les midió temperatura, humedad y densidad.

FIGURA 2. Compostaje tradicional por camas



Al analizar las curvas de temperatura presentadas en la Figura 3. se encontró que las etapas del proceso de compostaje aerobio de la Central Ganadera de Medellín coinciden con la literatura de compostaje previamente consultada. Las etapas se dividen de la siguiente forma: la etapa mesófila va del día 0 al día 5 con un aumento de temperatura desde los 23°C a los 49 °C. A continuación se observa la etapa termófila que va del día 5 al 35, en ésta las temperaturas entraron en un período de oscilación, con tendencia a la estabilización, donde se dio un aumento debido a la acción de los microorganismos termófilos y una disminución por los volteos semanales (Madrigal, 2005). Posteriormente ocurrió la etapa de enfriamiento, que va de los días 35 a 65, y al igual que en la etapa anterior se presentaron oscilaciones, en este caso de forma descendente, ocupando un rango de temperaturas entre los 50°C y 32°C. La última etapa es la de maduración que transcurrió entre los días 65 y 80, con temperaturas entre los 48°C y 18°C (Madrigal, 2005).

FIGURA 3
Días de compostaje vs. temperatura



En cuanto a los factores claves, puede observarse que la humedad y la densidad, están estrechamente relacionadas; a medida que el proceso de compostaje se lleva a cabo, la humedad disminuye por el secado del material, esto se debe al aumento de temperatura provocado por la degradación de la materia orgánica - principalmente en la etapa Termófila- y los volteos semanales (Madrigal, 2005). En consecuencia el peso de las camas disminuye al igual que su volumen, y por consiguiente su densidad aumenta. Este hecho se puede observar gráficamente por

medio de la Figura 4 y la Figura 5, donde se observa todo el proceso de compostaje desde la materia prima, rumen, hasta su conversión en acondicionador orgánico de suelos (Abono).

FIGURA 4
Días de compostaje por cama vs. porcentaje de humedad

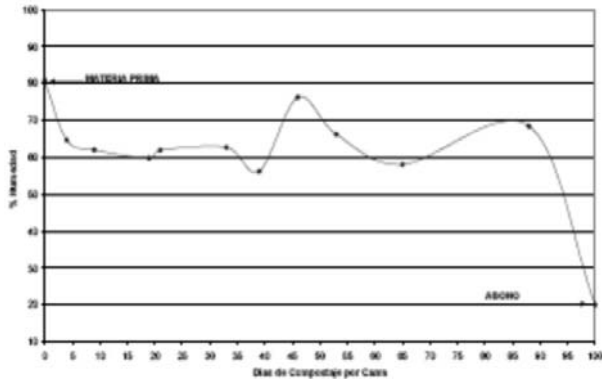
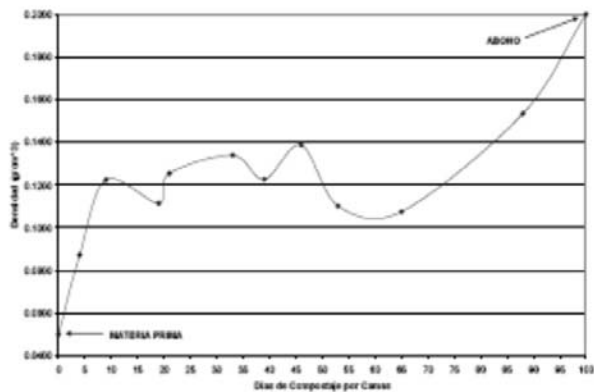


FIGURA 5
Días de compostaje por cama vs. densidad

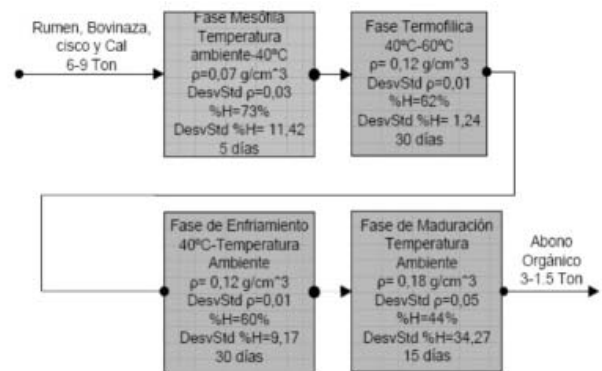


De acuerdo con en el análisis previo, se lograron identificar las etapas del proceso de compostaje de la Central Ganadera de Medellín. En la Figura 6. se pueden observar claramente las etapas, los rangos de temperatura asociados, y las humedades y densidades promedio respectivamente, con sus desviaciones estándar.

En la fase mesófila se observa un valor significativo de desviación estándar para la humedad, 11.24, esto se debe a que en esta fase el material entra con un porcentaje de humedad mayor al 80% y pierde humedad rápidamente con el aumento de temperatura. En la fase termófila la humedad

se mantiene alrededor del 62%, es la etapa que mas estabilidad presenta, esto se debe también a que el cambio de temperatura es menor. En las fases de enfriamiento y maduración la desviación incrementa nuevamente por los cambios de temperatura, presentándose desviaciones de 9.17 y 34.27 respectivamente. La densidad no presenta variaciones significativas por etapa, sin embargo desde la materia prima hasta el producto terminado, se incrementa en más del doble.

FIGURA 6
Diagrama de bloques – Etapas del compostaje aerobio por camas de la Central Ganadera de Medellín



2. Caracterización de las etapas de compostaje

Según los análisis organolépticos, fisicoquímicos, microbiológicos, de tamaño de partícula y fitotóxicos realizados se observó que las características organolépticas analizadas, es decir, color, estado y textura no presentaron variaciones a lo largo del proceso de compostaje.

Con respecto al análisis fisicoquímico, la cantidad de nitrógeno disminuye a lo largo del proceso por dos factores: en primera instancia las características innatas del material que se esta compostando, en este caso rumen, el cual no posee un alto contenido de nitrógeno; y finalmente la descomposición misma del material, donde el nitrógeno se transforma en amoníaco que se libera al ambiente tanto en emisiones gaseosas como en forma de lixiviado.

Los metales pesados solo fueron detectados en cantidades que estaban muy por debajo de aquellos permitidos por la norma.

3. Diseño y construcción del tambor

Para la construcción del tambor se tuvieron en cuenta algunas consideraciones de diseño y fue necesario rediseñar algunas partes.

Por las dimensiones comerciales de la lámina, y el proceso de rolado para la fabricación del cilindro el diámetro paso de 0,618 m a 0.600 m. Este cambio implica en consecuencia una disminución en el volumen total del tambor y en la capacidad de carga. Para la estructura se había considerado el uso de tubería rectangular de dimensiones 5X5 cm de 2,3 mm de espesor, sin embargo el taller Corte y Grafado-Diseños en Acero y Aluminio, donde se construyó el tambor perforado de mezcla, apporto al proyecto el material para la estructura, en este caso tubería rectangular de 6X4 cm calibre 18. Como consecuencia de esta modificación, se decidió cambiar la forma de la estructura, de triangular a rectangular, ya que mejoraba la estabilidad del tambor.

Para la disposición del motorreductor se rediseño la placa del soporte del motor, y se oriento en forma vertical, ya que de otra forma la polea no hubiera funcionado correctamente.

Finalmente las características definitivas del tambor se plasmaron en la hoja técnica del tambor perforado de mezcla, presentadas en la Figura 7.

FIGURA 7

Hoja Técnica del Tambor Perforado de Mezcla

DATOS DE OPERACIÓN		
Capacidad de Carga (Kg)	50	
Velocidad de Operación (RPM)	5	
Voltaje (volts)	220V, Conexión Trifásica	
Material Procesado	Compost de Rumen	
DATOS DE CONSTRUCCIÓN		
Forma de Tambor	Cilíndrico	
Diámetro del Tambor (m)	0,6	
Longitud del Tambor (m)	1	
Volumen del Tambor (m ³)	0,283	
Orientación	Horizontal	
Material de Construcción del Tambor	Lámina Hot Rolled Perforada 12" Calibre 18	
Material de Construcción Estructura	Tubería Rectangular en Acero al Carbono 1020 de 6X4 cm. Calibre 18	
	ELABORÓ	Karla Andrea Ossa Vásquez
	APROBÓ	Marta Ruth López
	FECHA	10 Julio 2008

4. PRUEBAS TAMBOR

El tambor perforado de mezcla fue llevado a la Central Ganadera de Medellín donde se realizaron las pruebas de temperatura respectivas, y al final del proceso se envió una muestra de producto terminado al Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares-GIEM de la Universidad de Antioquia para su caracterización. En la figura 8 se observa el tambor sin carga.

FIGURA 8

Tambor perforado de mezcla



En el momento de introducir el rumen crudo al tambor se comprobó que tenía mayor capacidad que la calculada teóricamente, en vez de una muestra de 4,71 Kg se tomó una 47 Kg (Ver Figura 9).

En la figura 9 se observa el tambor perforado de mezcla cargado con rumen crudo, en el momento de la primera medición de temperatura.

FIGURA 9

Tambor perforado de mezcla con carga de rumen



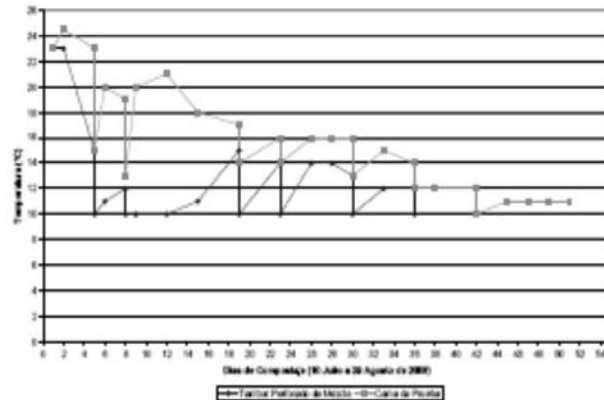
Al mismo tiempo se armó una cama de prueba con una masa igual a la muestra del tambor, es decir 47 Kg, y con unas dimensiones de 70X70X22 cm. El compostaje se realizó por un período de 51 días, durante este tiempo se llevó un registro de las temperaturas, para identificar las etapas del compostaje para este caso específico.

El compostaje en el tambor perforado se dio por terminado a los 36 días, cuando se identificó experimentalmente que el olor, color y humedad del material de tambor correspondían a un proceso finalizado de compostaje. Teniendo en cuenta este hecho se tomó una muestra del tambor y se caracterizó bajo los mismos parámetros del proceso tradicional. El compostaje en la cama de prueba tuvo una duración de 51 días.

De acuerdo con los registros de temperatura se realizó una comparación de los perfiles de temperatura del tambor perforado de mezcla con los de la cama de prueba. Por medio de la Figura 10. se comprobó que la aireación del material fue mejor en el tambor que en la cama de prueba pues la temperatura, aunque presenta la misma tendencia, registró temperaturas mas bajas, entre 2°C a 11°C de diferencia. Vemos como disminuyó la temperatura después de cada volteo, esto se ve reflejado en la figura 10 por medio de las líneas verticales de los días 5, 8, 19, 23, 30, 36 y 42. También se observó que el compostaje aunque fue aerobio no presentó una etapa termófila, esto se debe a que el tamaño de la muestra considerada fue pequeño; esto cambia los parámetros finales del producto como acondicionador orgánico de suelos, específicamente con la aparición de patógenos. Cabe resaltar que el compostaje puede llevarse a cabo a temperaturas bajas pero lleva mas tiempo en descomponer el material orgánico (Haug, 1993).

Además de lo anterior, el Instituto Colombiano Agropecuario-ICA exige a los productores de acondicionadores orgánicos de suelos garantizar ciertos parámetros de la composición del producto. Esto está establecido según la norma técnica colombiana NTC 5167 (Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo).

FIGURA 10
Comparación de perfiles de temperatura tambor perforado de mezcla vs. Cama de prueba #34



Después de haber realizado una comparación de los valores correspondientes a los parámetros exigidos por el ICA, los valores que hasta el momento puede garantizar la Central Ganadera de Medellín, y los resultados tanto del proceso tradicional por camas como del tambor perforado de mezcla, se observó:

La cantidad de cenizas cumple los parámetros exigidos por el ICA y la Central Ganadera de Medellín; en el tambor perforado el porcentaje de cenizas fue de 20,33%, menor que en el procesos por camas donde se obtuvo un valor de 33,45%. Esto se debe a que el proceso en el tambor se realizó a temperaturas bajas, minimizando la calcinación del material por el incremento de la temperatura.

La humedad en el tambor fue de 42,42%, significativamente mayor que en el proceso tradicional donde se obtuvo un 19,75%. Con respecto al valor que debe ser garantizado se presentó una diferencia del 212%. Esto refleja que la muestra necesita de una fase de maduración mayor para que el acondicionador orgánico de suelos pueda ser incorporado a la tierra (Haug, 1993).

Lo anterior tiene estrecha relación con la capacidad de retención de humedad-CRA, que en este caso fue de 405,7% superior a la presentada por el compostaje tradicional donde se observa un valor de 243,98%. Ambos valores están dentro de los parámetros requeridos. Un

buen porcentaje de CRA en un acondicionador orgánico de suelos permite que las plantas una vez tengan este material incorporado a su suelo, puedan absorber buena cantidad de agua para su crecimiento (Álvarez, 2005).

El carbono orgánico oxidable total esta dentro de los parámetros exigidos, sin embargo esta por encima del valor de las camas tradicionales, este hecho se debe a que los microorganismos presentados a bajas temperaturas, es decir los mesófilos, no alcanzan a consumir todo el carbono disponible, necesitan mas tiempo, es decir, el proceso necesitaba mas tiempo de maduración.

La capacidad de intercambio catiónico –CIC- se encuentra por debajo del valor exigido por la norma, la muestra presentó 28,46 meq/100g comparado con los 30 meq/100g de referencia. Sin embargo, la criticidad de este parámetro se observa cuando presenta valores inferiores a 11meq/100g pues su capacidad de retención de humedad es baja (no aplica en este caso) y hay mayor probabilidad de pérdidas de nitrógeno y potasio por lixiviación. El material puede aun puede usarse para acondicionamiento de suelos.

La norma establece que el pH de un acondicionador orgánico de suelos debe estar dentro de los límites de 4 a 9, la muestra está en 7,38. Un pH en este rango no afectará las condiciones del suelo o del cultivo. (NTC 5167, 2004)

Se encontró que el fósforo estaba en un 0,978%, alrededor del limite presentado en la norma que es 1%, esto indica que los microorganismos hacen uso de este compuesto para la degradación del material y además que parte de éste se pierde durante el proceso de compostaje.

La densidad del material compostado en el tambor es inferior a la de las camas proceso tradicional, esto al proceso de compostaje como tal y a la pérdida de humedad que se da por mayor contacto con el aire.

El nitrógeno se encuentra dentro de lo exigido por la norma que es mínimo 1%. La muestra presento un valor de 1.34%.

CONCLUSIONES

Las mediciones de temperatura, humedad y densidad permitieron realizar la identificación de las etapas de compostaje aerobio por camas realizado en la Central Ganadera de Medellín de acuerdo con las características presentadas en la teoría de compostaje por camas.

La caracterización del proceso se ajusto a los parámetros exigidos por la norma NTC 5167 y la Central Ganadera de Medellín, excepto en términos de humedad y capacidad de intercambio catiónico-CIC. El valor máximo de la humedad debe estar en 20%, en el tambor perforado se presentó un valor de 42,42%, esto está relacionado con el alto porcentaje de capacidad de retención de humedad que en este caso fue de 405,7% mientras que en el proceso por camas se obtuvo un 243,98%. Con respecto a la capacidad de intercambio catiónico se observa que esta por debajo del mínimo requerido (30 meq/100g) presentando un valor de 28,46 meq/100g, esto me indica que como acondicionador orgánico de suelos disminuirá su capacidad para intercambiar nutrientes.

El tamaño de la muestra fue muy pequeño para alcanzar temperaturas de fase termófila por lo cual se observó la presencia de patógenos como la salmonella; esto era predecible pues la literatura establece que si se toman muestras pequeñas hay posibilidad de no alcanzar temperaturas termófilas. En este sentido no se cumplen las garantías de acondicionadores orgánicos de suelos requeridas por el ICA y al mismo tiempo por la Central Ganadera de Medellín.

El pH mostró una tendencia alcalina, esto se debe a la poca descomposición de proteínas; estas generan ácidos orgánicos que lo disminuyen manteniéndolo generalmente entre 6 y 7.

Se evidenció que los microorganismos no consumieron todo el carbono disponible en la materia orgánica del tambor perforado comparado con el proceso tradicional, hecho que se ve reflejado en el aumento de los valores de la relación carbono-nitrógeno, que pasa de 17,88 a 27,81 y carbono orgánico, que aumenta de 32,72% al 37,26%.

Los resultados del análisis fitotóxico del material compostado en el tambor perforado indican que la muestra procesada es apta para el acondicionamiento de suelos ya que presenta un porcentaje de germinación de material vegetal del 100%.

Con las perforaciones del tambor el tiempo de secado disminuyó ya que el área de contacto del material con el aire fue mayor comparada con la de la cama tradicional; el material de construcción del tambor presenta un área libre de 45%, que aumenta el área de contacto material-aire. El tiempo de compostaje se redujo en un 30%, mientras que el acondicionador orgánico de suelos se obtuvo en 36 días en el tambor, el de la cama de prueba tuvo un proceso de 51 días.

El esfuerzo de los operarios de la planta se vio altamente disminuido; el uso de palas de construcción para esta prueba piloto se vio limitado a dos momentos, carga y descarga. Los operarios expresaron su satisfacción al hacer uso del tambor perforado de mezcla pues se facilitaba el volteo del material.

Se presentó una disminución leve de los olores y la aparición de moscas sobre el compost.

Basado en lo anterior el diseño del tambor perforado de mezcla cumplió con los objetivos propuestos para este proyecto excepto con la aparición de salmonella, el alto porcentaje de humedad y la falta de capacidad de intercambio catiónico.

RECOMENDACIONES

Experimentar con diferentes intervalos de tiempo entre volteos con el objetivo de encontrar el rango de tiempo óptimo, que permita que el proceso alcance las temperaturas termófilas y de esta forma se descomponga adecuadamente la materia orgánica y eliminar la presencia de patógenos tales como la salmonella.

Realizar un mayor número de pruebas cambiando la ubicación del tambor perforado de mezcla para identificar el lugar de la planta que presente mejores condiciones de convección libre para el secado del compost.

Verificar el gasto energético mensual de acuerdo con la cantidad de volteos programados.

Reubicar el motor en el montaje ya que en el momento de cargar el tambor si el rumen esta muy húmedo, puede escurrir directamente sobre este. También se podría proteger con una caja acrílica.

Escalar el equipo para realizar el proceso con una cantidad mayor de materia prima, que garantice la fase termófila.

BIBLIOGRAFÍA

AGROBIOTEK (2008). "Análisis Microbiológicos" http://www.agrobiotek.com/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=20. Noviembre 8, 2008.

ÁLVAREZ LOPERA, Alonso. 2005. Proceso del Abono Orgánico. Documento Central Ganadera de Medellín. Medellín.

BEER, Ferdinand P. (1993). Mecánica de Materiales. México: Mcgraw-Hill. 738p.

Clean Merseyside Centre (2005) "Guide to Selecting an In-Vessel Composting System" [http://www.envirolinknorthwest.co.uk/Envirolink/library0.nsf/0/5F43B213E63B179E8025724B004153E5/\\$file/In_vessel%20Guide.pdf](http://www.envirolinknorthwest.co.uk/Envirolink/library0.nsf/0/5F43B213E63B179E8025724B004153E5/$file/In_vessel%20Guide.pdf) Clean Merseyside Centre. Octubre 14, 2006

FERROCORTES S.A. Catálogo e Información Técnica. Medellín: FERROCORTES LTDA., 2001, 28p.

Green Culture Inc. (2006) "Compost Tumblers" http://www.composters.com/docs/tumblers_1.html Green Culture Inc. Octubre 14, 2006.

HAUG, Roger T (1993). The Practical Handbook of Compost Engineering. USA: CRC Press. 717p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Productos para la Industria Agrícola. Productos Orgánicos Usados como Abonos o Fertilizantes y Enmiendas de Suelo. Primera Actualización. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2004, 40p. NTC 5167

MADRIGAL C. Alejandro. 2005. Notas Sobre Compostaje con Énfasis en el Caso Camposol S.A. Documento Central Ganadera de Medellín. Medellín.

STEWART, James. (1999). Cálculo: Conceptos y Contextos. México: Internacional Thomson Editores. 728 p.

VARIADORES S.A. Catálogo de Motorreductores MR01-0704. Medellín: VARIADORES S.A., 2006, 52p.

TÍTULOS PUBLICADOS EN ESTA COLECCIÓN

Copia disponible en: www.eafit.edu.co/investigacion

Cuaderno 1 – Marzo 2002

**SECTOR BANCARIO Y COYUNTURA ECONÓMICA
EL CASO COLOMBIANO 1990 – 2000**

Alberto Jaramillo, Adriana Ángel Jiménez,
Andrea Restrepo Ramírez, Ana Serrano Domínguez y
Juan Sebastián Maya Arango

Cuaderno 2 – Julio 2002

**CUERPOS Y CONTROLES, FORMAS DE
REGULACIÓN CIVIL. DISCURSOS Y PRÁCTICAS
EN MEDELLÍN 1948 – 1952**

Cruz Elena Espinal Pérez

Cuaderno 3 – Agosto 2002

UNA INTRODUCCIÓN AL USO DE LAPACK

Carlos E. Mejía, Tomás Restrepo y Christian Trefftz

Cuaderno 4 – Septiembre 2002

**LAS MARCAS PROPIAS DESDE
LA PERSPECTIVA DEL FABRICANTE**

Belisario Cabrejos Doig

Cuaderno 5 – Septiembre 2002

**INFERENCIA VISUAL PARA LOS SISTEMAS
DEDUCTIVOS LBPCO, LBPC Y LBPO**

Manuel Sierra Aristizábal

Cuaderno 6 – Noviembre 2002

**LO COLECTIVO EN LA CONSTITUCIÓN
DE 1991**

Ana Victoria Vásquez Cárdenas,
Mario Alberto Montoya Brand

Cuaderno 7 – Febrero 2003

**ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS BENEFICIOS
DE LAS EMPRESAS MANUFACTURERAS EN
COLOMBIA,
1995 – 2000**

Alberto Jaramillo (Coordinador),
Juan Sebastián Maya Arango, Hermilson Velásquez
Ceballos, Javier Santiago Ortiz,
Lina Marcela Cardona Sosa

Cuaderno 8 – Marzo 2003

**LOS DILEMAS DEL RECTOR: EL CASO DE LA
UNIVERSIDAD EAFIT**

Álvaro Pineda Botero

Cuaderno 9 – Abril 2003

INFORME DE COYUNTURA: ABRIL DE 2003

Grupo de Análisis de Coyuntura Económica

Cuaderno 10 – Mayo 2003

GRUPOS DE INVESTIGACIÓN

Escuela de Administración
Dirección de Investigación y Docencia

Cuaderno 11 – Junio 2003

**GRUPOS DE INVESTIGACIÓN ESCUELA DE
CIENCIAS Y HUMANIDADES, ESCUELA DE
DERECHO, CENTRO DE IDIOMAS Y
DEPARTAMENTO DE DESARROLLO ESTUDIANTIL**

Dirección de Investigación y Docencia

Cuaderno 12 – Junio 2003

**GRUPOS DE INVESTIGACIÓN –
ESCUELA DE INGENIERÍA**

Dirección de Investigación y Docencia

Cuaderno 13 – Julio 2003

**PROGRAMA JÓVENES INVESTIGADORES –
COLCIENCIAS: EL ÁREA DE LIBRE COMERCIO DE
LAS AMÉRICAS Y**

LAS NEGOCIACIONES DE SERVICIOS

Grupo de Estudios en Economía y Empresa

Cuaderno 14 – Noviembre 2003

BIBLIOGRAFÍA DE LA NOVELA COLOMBIANA

Álvaro Pineda Botero, Sandra Isabel Pérez,

María del Carmen Rosero y María Graciela Calle

Cuaderno 15 – Febrero 2004

PUBLICACIONES Y PONENCIA 2003

Dirección de Investigación y Docencia

Cuaderno 16 – Marzo 2004

**LA APLICACIÓN DEL DERECHO EN LOS SISTEMAS
JURÍDICOS CONSTITUCIONALIZADOS**

Gloria Patricia Lopera Mesa

Cuaderno 17 – Mayo 2004

**PRODUCTOS Y SERVICIOS FINANCIEROS A GRAN
ESCALA PARA LA MICROEMPRESA: HACIA UN
MODELO VIABLE**

Nicolás Ossa Betancur

Cuaderno 18 – Mayo 2004

**ARTÍCULOS RESULTADO DE LOS PROYECTOS DE
GRADO REALIZADOS POR LOS ESTUDIANTES
DE INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN QUE SE
GRADUARON EN EL 2003**

Departamento de Ingeniería de Producción

Cuaderno 19 – Junio 2004

**ARTÍCULOS DE LOS PROYECTOS DE GRADO
REALIZADOS POR LOS ESTUDIANTES DE
INGENIERÍA MECÁNICA QUE SE GRADUARON EN
EL AÑO 2003**

Departamento de Ingeniería Mecánica

Cuaderno 20 – Junio 2004

**ARTÍCULOS RESULTADO DE LOS PROYECTOS DE
GRADO REALIZADOS POR LOS ESTUDIANTES DE
INGENIERÍA DE PROCESOS QUE SE GRADUARON
EN EL 2003**

Departamento de Ingeniería de Procesos

Cuaderno 21 – Agosto 2004

**ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS DE LA AVENIDA
TORRENCIAL DEL 31 DE ENERO DE 1994 EN LA
CUENCA DEL RÍO FRAILE Y
SUS FENÓMENOS ASOCIADOS**

Juan Luis González, Omar Alberto Chavez,

Michel Hermelín

Cuaderno 22 – Agosto 2004

**DIFERENCIAS Y SIMILITUDES EN LAS TEORÍAS
DEL CRECIMIENTO ECONÓMICO**

Marleny Cardona Acevedo, Francisco Zuluaga Díaz,

Carlos Andrés Cano Gamboa,

Carolina Gómez Alvis

Cuaderno 23 – Agosto 2004

GUIDELINES FOR ORAL ASSESSMENT

Grupo de investigación Centro de Idiomas

Cuaderno 24 – Octubre 2004

**REFLEXIONES SOBRE LA INVESTIGACIÓN
DESDE EAFIT**

Dirección de investigación y Docencia

Cuaderno 25 – Septiembre 2004

**LAS MARCAS PROPIAS DESDE
LA PERSPECTIVA DEL CONSUMIDOR FINAL**

Belisario Cabrejos Doig

Cuaderno 26 – Febrero 2005

PUBLICACIONES Y PONENCIAS -2004-

Dirección de Investigación y Docencia

Cuaderno 27 – Marzo 2005

EL MERCADEO EN LA INDUSTRIA DE LA CONFECCIÓN – 15 AÑOS DESPUÉS -

Belisario Cabrejos Doig

Cuaderno 28 – Abril 2005

LA SOCIOLOGÍA FRENTE A LOS ESPEJOS DEL TIEMPO: MODERNIDAD, POSTMODERNIDAD Y GLOBALIZACIÓN

Miguel Ángel Beltrán, Marleny Cardona Acevedo

Cuaderno 29 – Abril 2005

“OXIDACIÓN FOTOCATALÍTICA DE CIANURO”

Grupo de Investigación Procesos Ambientales y Biotecnológicos -GIPAB-

Cuaderno 30 – Mayo 2005

EVALUACIÓN A ESCALA DE PLANTA PILOTO DEL PROCESO INDUSTRIAL PARA LA OBTENCIÓN DE ACEITE ESENCIAL DE CARDAMOMO, BAJO LA FILOSOFÍA “CERO EMISIONES”

Grupo de Investigación Procesos Ambientales y Biotecnológicos -GIPAB-

Cuaderno 31 – Junio 2005

LA DEMANDA POR FORMACIÓN PERMANENTE Y CONSULTORÍA UNIVERSITARIA

Enrique Barriga Manrique

Cuaderno 32 – Junio 2005

ARTÍCULOS DE LOS PROYECTOS DE GRADO REALIZADOS POR LOS ESTUDIANTES DE INGENIERÍA MECÁNICA QUE SE GRADUARON EN EL AÑO 2004

Escuela de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánica

Cuaderno 33 – Julio 2005

PULVERIZACIÓN DE COLORANTES NATURALES POR SECADO POR AUTOMIZACIÓN

Grupo de Investigación Desarrollo y

Diseño de Procesos -DDP-

Departamento de Ingeniería de Procesos

Cuaderno 34 – Julio 2005

“FOTODEGRADACIÓN DE SOLUCIONES DE CLOROFENOL-CROMO Y TOLUENO-BENCENO UTILIZANDO COMO CATALIZADOR MEZCLA DE DIÓXIDO DE TITANIO (TiO₂), BENTONITA Y CENIZA VOLANTE”

Grupo de Investigación Procesos Ambientales y Biotecnológicos -GIPAB-

Edison Gil Pavas

Cuaderno 35 – Septiembre 2005

HACIA UN MODELO DE FORMACIÓN CONTINUADA DE DOCENTES DE EDUCACIÓN SUPERIOR EN EL USO PEDAGÓGICO DE LAS TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN

Claudia María Zea R., María del Rosario Atuesta V., Gustavo Adolfo Villegas L., Patricia Toro P., Beatriz Nicholls E., Natalia Foronda V.

Cuaderno 36 – Septiembre 2005

ELABORACIÓN DE UN INSTRUMENTO PARA EL ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE CAMBIO ASOCIADOS CON LA IMPLANTACIÓN DEL TPM EN COLOMBIA

Grupos de Investigación:

Grupo de Estudios de la Gerencia en Colombia

Grupo de Estudios en Mantenimiento Industrial (GEMI)

Cuaderno 37 – Septiembre 2005

PRODUCTOS Y SERVICIOS FINANCIEROS A GRAN ESCALA PARA LA MICROEMPRESA COLOMBIANA

Nicolás Ossa Betancur

Grupo de Investigación en Finanzas y Banca

Área Microfinanzas

Cuaderno 38 – Noviembre 2005

PROCESO “ACOPLADO” FÍSICO-QUÍMICO Y BIOTECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CONTAMINADAS CON CIANURO

Grupo de Investigación Procesos Ambientales y Biotecnológicos -GIPAB-

Cuaderno 39 – Febrero 2006

LECTURE NOTES ON NUMERICAL ANALYSIS

Manuel Julio García R.

Department of Mechanical Engineering

Cuaderno 40 – Febrero 2006

MÉTODOS DIRECTOS PARA LA SOLUCIÓN DE SISTEMAS DE ECUACIONES LINEALES SIMÉTRICOS, INDEFINIDOS, DISPERSOS Y DE GRAN DIMENSIÓN

Juan David Jaramillo Jaramillo, Antonio M. Vidal Maciá, Francisco José Correa Zabala

Cuaderno 41- Marzo 2006

PUBLICACIONES, PONENCIAS, PATENTES Y REGISTROS 2005

Dirección de Investigación y Docencia

Cuaderno 42- Mayo 2006

A PROPÓSITO DE LA DISCUSIÓN SOBRE EL DERECHO PENAL “MODERNO” Y LA SOCIEDAD DEL RIESGO

Diana Patricia Arias Holguín

Grupo de Estudios Penales (GEP)

Cuaderno 43- Junio 2006

ARTÍCULOS DE LOS PROYECTOS DE GRADO REALIZADOS POR LOS ESTUDIANTES DE INGENIERÍA MECÁNICA QUE SE GRADUARON EN EL AÑO 2005

Departamento de Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería

Cuaderno 44- Junio 2006

EL “ACTUAR EN LUGAR DE OTRO” EN EL CÓDIGO PENAL COLOMBIANO, ÁMBITO DE APLICACIÓN Y PROBLEMAS MÁS RELEVANTES DE LA FÓRMULA DEL ART. 29 INCISO 3

Susana Escobar Vélez

Grupo de Estudios Penales (GEP)

Cuaderno 45- Septiembre 2006

ARTÍCULOS DE LOS PROYECTOS DE GRADO REALIZADOS POR LOS ESTUDIANTES DE INGENIERÍA DE DISEÑO DE PRODUCTO QUE SE GRADUARON EN EL AÑO 2004 Y EN EL 2005-1

Departamento de Ingeniería de Diseño de Producto
Escuela de Ingeniería

Cuaderno 46- Octubre 2006

COMENTARIOS A VISIÓN COLOMBIA II CENTENARIO: 2019

Andrés Ramírez H., Mauricio Ramírez Gómez y Marleny Cardona Acevedo

Profesores del Departamento de Economía

Antonio Barboza V., Gloria Patricia Lopera M.,

José David Posada B. y José A. Toro V.

Profesores del Departamento de Derecho

Carolina Ariza Z. – *Estudiante de Derecho*

Saúl Echavarría Yepes-*Departamento de Humanidades*

Cuaderno 47- Octubre 2006

LA DELINCUENCIA EN LA EMPRESA: PROBLEMAS DE AUTORÍA Y PARTICIPACIÓN EN DELITOS COMUNES

Grupo de Estudios Penales (GEP)

Maximiliano A. Aramburo C.

Cuaderno 48 – Octubre 2006

GUIDELINES FOR TEACHING AND ASSESSING WRITING

Grupo de Investigación – Centro de Idiomas (GICI)

Ana Muñoz, Sandra Gaviria, Marcela Palacio

Cuaderno 49 – Noviembre 2006

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS FOTOCATALÍTICOS PARA LA DESTRUCCIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS Y OTRAS SUSTANCIAS EN FUENTES HÍDRICAS

Grupo de Investigación Procesos Ambientales y Biotecnológicos -GIPAB-

Edison Gil Pavas, Kevin Molina Tirado

Cuaderno 50 – Noviembre 2006

***PROPUESTAS METODOLÓGICAS EN
LA CONSTRUCCIÓN DE CAMPOS
PROBLEMÁTICOS DESDE EL CICLO DE VIDA DE
LAS FIRMAS Y EL CRECIMIENTO INDUSTRIAL DE
LAS MIPYMES***

Grupo de Estudios Sectoriales y Territoriales

Departamento de Economía

Escuela de Administración

Marleny Cardona Acevedo,

Carlos Andrés Cano Gamboa

Cuaderno 51 – Enero 2007

***PRODUCTO DE TELEPRESENCIA PARA
LA EDUCACIÓN SUPERIOR EN
EL ÁMBITO NACIONAL***

Departamento de Ingeniería de Sistemas

Departamento de Ciencias Básicas

Helmuth Treftz Gómez, Pedro Vicente Esteban Duarte

Andrés Quiroz Hernández, Faber Giraldo Velásquez

Edgar Villegas Iriarte

Cuaderno 52 – Febrero 2007

***PATRONES DE COMPRA Y USO DE VESTUARIO
MASCULINO Y FEMENINO EN
LA CIUDAD DE MEDELLÍN***

Departamento de Mercadeo

Belisario Cabrejos

Cuaderno 53 – Febrero 2007

***EL DEBATE SOBRE LA MODERNIZACIÓN
DEL DERECHO PENAL***

Materiales de investigación

Grupo de Investigación

Grupo de Estudios Penales (GEP)

Juan Oberto Sotomayor Acosta,

Diana María Restrepo Rodríguez

Cuaderno 54 – Marzo 2007

***ASPECTOS NORMATIVOS DE LA INVERSIÓN
EXTRANJERA EN COLOMBIA: Una mirada a la luz
de las teorías de las Relaciones Internacionales***

Pilar Victoria Cerón Zapata y

Grupo de Investigación en Inversión Extranjera:

Sabina Argáez, Lina Arbeláez y Luisa Victoria Euse

Cuaderno 55 – Abril 2007

***PUBLICACIONES, PONENCIAS,
PATENTES Y REGISTROS 2006***

Dirección de Investigación y Docencia

Cuaderno 56 – Abril 2007

***CAPITAL HUMANO: UNA MIRADA DESDE
LA EDUCACIÓN Y LA EXPERIENCIA LABORAL***

Marleny Cardona Acevedo, Isabel Cristina Montes

Gutiérrez, Juan José Vásquez Maya,

María Natalia Villegas González, Tatiana Brito Mejía

Semillero de Investigación en Economía de EAFIT

–SIEDE–

Grupo de Estudios Sectoriales y Territoriales –ESyT–

Cuaderno 57 – Mayo 2007

***ESTADO DEL ARTE EN EL ESTUDIO DE
LA NEGOCIACIÓN INTERNACIONAL***

María Alejandra Calle

Departamento de Negocios Internacionales

Escuela de Administración

Cuaderno 58 – Diciembre 2008

***ARTÍCULOS DE LOS PROYECTOS DE GRADO
REALIZADOS POR LOS ESTUDIANTES DE
INGENIERÍA MECÁNICA QUE SE GRADUARON EN
EL AÑO 2006***

Escuela de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánica

Cuaderno 59- Octubre 2007

DESARROLLO DE NUEVOS PRODUCTOS (DNP)

Jorge E. Devia Pineda, Ph.D.

Grupo de Investigación Desarrollo y Diseño de
Procesos y Productos -DDP-

Departamento de Ingeniería de Procesos

Cuaderno 60- Marzo 2008

**ARTÍCULOS DE PROYECTOS DE GRADO
REALIZADOS POR LOS ESTUDIANTES DE
INGENIERÍA DE DISEÑO DE PRODUCTO QUE SE
GRADUARON DESDE EL 2005-2 HASTA EL 2007-1**

Grupo de Investigación en Ingeniería de Diseño

Cuaderno 61- Marzo 2008

**MEMORIAS CÁTEDRA ABIERTA TEORÍA
ECONÓMICA**

Marleny Cardona Acevedo, Danny Múnera Barrera,
Alberto Jaramillo Jaramillo, Germán Darío Valencia
Agudelo, Sol Bibiana Mora Rendón

Cuaderno 62- Abril 2008

**PUBLICACIONES, PONENCIAS, PATENTES
Y REGISTROS - 2007**

Dirección de Investigación y Docencia

Cuaderno 63- Junio 2008

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN 2006

Escuela de Ingeniería

Cuaderno 64- Junio 2008

**PROYECTOS DE GRADO
INGENIERÍA DE SISTEMAS 2006-2007**

Ingeniería de Sistemas

Cuaderno 65- Junio 2008

**APLICACIÓN DE LA ELECTROQUÍMICA EN
EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Grupo de Investigación en Procesos Ambientales y
Biotecnológicos

Línea de Investigación: Procesos avanzados de Oxi-
dación

Cuaderno 66- Junio 2008

**COMPARATIVE ANALYSES OF POLICIES, LE-
GAL BASIS AND REALITY OF SME FINANCING
IN CHINA AND COLOMBIA**

Marleny Cardona A., Isabel Cristina Montes G.,
Carlos Andrés Cano G., Bei Gao

Grupo de Estudios Sectoriales y Territoriales –ESYT–
Departamento de Economía

Cuaderno 67- Septiembre 2008

**ARTÍCULOS DE LOS PROYECTOS DE GRADO
REALIZADOS POR LOS ESTUDIANTES DE
INGENIERÍA MECÁNICA QUE SE GRADUARON EN
EL 2007**

Ingeniería Mecánica

Cuaderno 68- Septiembre 2008

**EL BANCO DE LAS OPORTUNIDADES
DE MEDELLÍN**

Caso de Investigación

Ernesto Barrera Duque

Grupo de Investigación la Gerencia en Colombia

Cuaderno 69- Noviembre 2008

**LAS DIMENSIONES DEL EMPRENDIMIENTO
EMPRESARIAL: LA EXPERIENCIA DE
LOS PROGRAMAS CULTURA E Y
FONDO EMPRENDER EN MEDELLÍN**

Marleny Cardona A., Luz Dinora Vera A.,
Juliana Tabares Quiroz

Grupo de Estudios Sectoriales y Territoriales
–ESYT–

Departamento de Economía

Cuaderno 70- Diciembre 2008

**LA INSERCIÓN DE LA REPÚBLICA POPULAR
CHINA EN EL NORESTE ASIÁTICO DESDE
LOS AÑOS 1970: ¿HACIA UN NUEVO
REGIONALISMO?**

Informe Final Proyecto de Investigación

Adriana Roldán Pérez, Melissa Eusse Giraldo,

Luz Elena Hoyos Ramírez y Carolina Duque Tobón

Cuaderno 71 - Marzo 2009

PROYECTOS DE GRADO 2008

Artículos

Escuela de Ingeniería

Departamento de Ingeniería de Procesos