

XXXII CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

07 al 11 de Noviembre de 2010

Centro de Convenciones del Hotel Meliá Tropical
Bávaro-Punta Cana República Dominicana

GESTIÓN INTEGRAL DE FANGOS DE FERMENTACIÓN DE UNA DESTILADORA DE ALCOHOL

Dirección de contacto: Samanes 5, manzana 933, villa 17 –Guayaquil –Provincia del Guayas – Ecuador. Tel.: (594-4) 2211 813 – Fax: (594-4) 2211 813. e-mail: pp2906@yahoo.com

INTEGRAL MANAGEMENT SLUDGE FERMENTATION OF A ALCOHOL INDUSTRY



Pedro Pablo Benites López (1)

(1)Ingeniero Químico. Maestría en Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería Química. Universidad de Guayaquil.

Abstract

It carries out the characterization of the sugar cane molasses sludge fermentation, inside the parameters analyzed it was included also macro and microelements and amino acid profile. The most representative parameters indicate that the sludge have a semi-solid appearance, an alcoholic odor, pH acid (4.57- 4.98), high values of BOD (240449 - 297346 mgO₂/kg) and COD (317227 - 371682 mgO₂/kg) and proteins (20.84 – 23.99 %); among the present minerals, the K is found in bigger proportion followed by the Ca, P and S; whereas in less proportion is found Fe, Mn, Cu, Zn and B; sludges fermentation show some amino acids that animals cannot synthesize (threonine, glycine, alanine, valine, methionine, isoleucine, leucine, phenylalanine, histidine, lysine and tryptophan). It carries out sedimentability test and subsequently the sludges submit to a thermal stabilization process by means a drum dryer. The stabilized product shows low humidity (9.99 - 13.12 %); the COD appears a reduction equivalent to 43 % and an important proteins level (26.03 – 32.32 %). The sugar cane molasses sludge fermentation thermally stabilized shows the 25.27 % less of proteins than dry yeast from national production, and the 33.91 % less of protein than dry yeast imported.

Keywords: *sludge fermentation, sugar cane molasses, sedimentability, thermal stabilization.*

Resumen

Se realiza la caracterización de los lodos de fermentación de la melaza de caña de azúcar, dentro de los parámetros analizados se incluyen también macro y microelementos y un perfil de aminoácidos. Los parámetros más representativos indican que los lodos tienen una apariencia semi-sólida, olor alcohólico, pH ácido (entre 4,57 y 4,98), altos valores de DBO5 (entre 240449 y 297346 mgO₂/kg) y DQO (entre 317227 y 371682 mgO₂/kg) y proteínas (entre 20,84 y 23,99 %); entre los minerales presentes, el K se encuentra en mayor proporción seguido del Ca, P y S; mientras que en menor proporción se encuentran el Fe, Mn, Cu, Zn y B; los lodos de fermentación presentan algunos aminoácidos que los animales no pueden sintetizar (treonina, glicina, alanina, valina, metionina, isoleucina, leucina, fenilalanina, histidina, lisina y triptófano). Se realizan pruebas de sedimentabilidad y posteriormente los lodos se someten a estabilización térmica mediante un secador de tambor. El producto estabilizado presenta baja humedad (entre el 9,99 y 13,12 %), la DQO presenta una reducción equivalente al 43 % y un importante nivel de proteínas (entre 26,03 y 32,32 %). Los lodos de fermentación de la melaza de caña de azúcar estabilizados térmicamente presentan el 25,27 % menos de proteínas que la levadura seca de procedencia nacional, y el 33,91 % menos de proteína que la levadura seca importada.

Palabras clave: lodos de fermentación, melaza de caña de azúcar, sedimentabilidad, estabilización térmica.

Introducción

Los lodos o fangos se generan durante el proceso de fermentación de los azúcares presentes en la melaza de la caña de azúcar, en esta etapa se forma el alcohol etílico previo a la etapa de destilación. La melaza de caña de azúcar es la materia prima principal que utilizan las destiladoras de alcohol en su proceso y es proporcionada por los ingenios azucareros. En la Tabla 1 se presentan algunas de las características generales de la melaza.

Tabla 1. Melaza de caña de azúcar utilizada en el proceso de fermentación

Requisito	Unidad	Resultados	Norma INEN 261	
			Mínimo	Máximo
Brix a 20 °C	°Bx	76,45 a 81,37	85	-
Azúcar reductor total	g/100 g	54,03 a 57,07	46	59

Las melazas de caña de azúcar tienen los carbohidratos en forma de azúcares los cuales no necesitan pre-tratamiento para estar disponibles para la fermentación. Situación diferente ocurre con otras materias primas como el maíz, patatas, etc. [Murtagh J.E., 1995].

Los lodos de fermentación tienen la apariencia de una masa semisólida; poseen color café claro, olor característico alcohólico y un alto contenido de humedad. Están constituidos principalmente por materia orgánica, en su mayor parte por las levaduras que se usaron en la etapa fermentativa.

Los olores característicos de los lodos de fermentación corresponden a emisiones de compuestos orgánicos volátiles ó COVs, principalmente el etanol y acetaldehído. Otros subproductos son alcoholes, tales como el butanol, alcohol isopropílico, 2,3-butanodiol, ácidos orgánicos y acetatos. De acuerdo con datos de emisiones, aproximadamente entre el 80 y 90 % del total de las emisiones

de COVs es etanol, y el restante 10 a 20 % consisten de otros alcoholes y acetaldehído [CONAMA, 1998. EPA, 1994]. El acetaldehído es un compuesto reactivo en la atmósfera, ya que sus radicales OH producen radicales de peroxiacetilo que pueden reaccionar con NO₂ para formar nitrato de peroxiacetilo ó PAN [Ocampo, 2006]. Los subproductos volátiles se forman por las condiciones anaeróbicas de la fermentación.

La práctica común es descargar los lodos de fermentación cada cierto tiempo junto con el resto de las aguas residuales de la planta con el objetivo de enviarse a riego de los cultivos de caña de azúcar. Esta acción se fundamenta en la práctica agrícola de devolver al campo todo lo extraído a través de los cultivos. La particular composición de los lodos de fermentación hace que los mismos sean una fuente potencial de generación de olores ofensivos, ya que al descomponerse la materia orgánica se ocasiona un impacto ambiental en la calidad el recurso aire que afectaría negativamente a las comunidades cercanas.

El aprovechamiento de los lodos de fermentación mediante su conversión en material estabilizado con valor agregado, crea un escenario de potencial aprovechamiento del nivel de proteínas y minerales que contiene, pudiendo emplearse el mismo como suplemento alimenticio animal o como fertilizante.

RESULTADOS

Caracterización de los lodos de fermentación

Se realiza la caracterización de los lodos provenientes de la fermentación de la melaza de caña de azúcar. En las Tablas 2, 3, 4 y 5 se presentan los resultados y en la Figura 1 se presenta la correlación entre la humedad de los lodos de fermentación y su densidad.

Tabla 2. Caracterización de los lodos de fermentación

Parámetro	Unidad	Promedio	Mínimo	Máximo	Método
Color	-	Café	-	-	Sensorial
Olor	-	Alcohol	-	-	Sensorial
Aspecto	-	Suave	-	-	Sensorial
Densidad	g/mL	1,0999	1,0618	1,1504	Picnometría
Humedad	%	77,43	74,40	84,25	Secado a 105 °C
Sólidos totales	mg/kg	225661	157515	256003	Standard Methods
Sólidos totales fijos	mg/kg	9234	4825	10631	Standard Methods
Sólidos totales volátiles	mg/kg	216427	152690	245768	Cálculo
Sólidos totales disueltos	mg/kg	71354	52741	101703	Standard Methods
Sólidos suspendidos totales	mg/kg	165775	104774	234212	Standard Methods
Sólidos suspendidos volátiles	mg/kg	147100	99949	176872	Standard Methods
Sólidos suspendidos fijos	mg/kg	18675	4825	57341	Cálculo
Sólidos sedimentables	mL/kg	1000	1000	1000	Standard Methods
DBO (5 días)	mgO ₂ /kg	240449	176500	297346	Standard Methods
DQO	mgO ₂ /kg	317227	250000	371682	Método Merck
Materia orgánica	mg/kg	300787	300787	300787	Calcinación
Carbono	mg/kg	174876	174876	174876	Calcinación
Proteína (base seca)	%	20,84	22,58	23,99	Método Kjeldahl
Potencial de hidrógeno	s. u.	4,57	4,39	4,98	Potenciometría
Conductividad eléctrica	uS/cm	11664	10100	13170	Conductimetría

Tabla 3. Macro y microelementos de los lodos de fermentación

Método de extracción: solución extractora de los dos ácidos						
	Parámetro	Unidad	Mínimo	Promedio	Máximo	Método de análisis
Macro elementos	Nitrógeno	g/100 g	4,03	4,34	4,54	Método Kjeldahl
	Fósforo	g/100 g	0,63	0,76	0,90	Espectroscopia UV-visible
	Potasio	g/100 g	3,38	3,94	5,27	EAA: Espectroscopia de absorción atómica
	Calcio	g/100 g	1,61	2,10	2,73	EAA
	Azufre	g/100 g	0,63	0,67	0,71	Espectroscopia UV-visible
	Magnesio	g/100 g	0,33	0,40	0,54	EAA
Micro elementos	Zinc	g/100 g	0,00376	0,00403	0,00442	EAA
	Cobre	g/100 g	0,00890	0,00978	0,01101	EAA
	Hierro	g/100 g	0,11820	0,20738	0,39160	EAA
	Manganeso	g/100 g	0,02751	0,03642	0,04687	EAA
	Boro	g/100 g	0,00081	0,00106	0,00134	Espectroscopia UV-visible
	Humedad	%	75,85	75,82	83,94	Secado a 105 °C
Método de extracción: Olsen modificado						
	Parámetro	Unidad	Mínimo	Promedio	Máximo	Método de análisis
Macro elementos	Nitrógeno	g/100 g	-	-	-	-
	Fósforo	g/100 g	-	-	-	-
	Potasio	g/100 g	1,31	2,81	4,03	EAA: Espectroscopia de absorción atómica
	Calcio	g/100 g	0,35	0,39	0,42	EAA
	Azufre	g/100 g	0,19	0,37	0,56	Espectroscopia UV-visible
	Magnesio	g/100 g	0,12	0,18	0,23	EAA
Micro elementos	Zinc	g/100 g	0,00116	0,00207	0,00261	EAA
	Cobre	g/100 g	0,00057	0,00087	0,00126	EAA
	Hierro	g/100 g	0,01095	0,01482	0,01877	EAA
	Manganeso	g/100 g	0,00968	0,01972	0,03223	EAA
	Boro	g/100 g	0,00066	0,00078	0,00087	Espectroscopia UV-visible

Tabla 4. Aminoácidos de los lodos de fermentación

Núm.	Aminoácidos	Código FAO	Unidad (base seca)	Mínimo	Promedio	Máximo	Método
1	Ácido aspártico	asp	%	2,03	2,52	3,41	Cromatografía líquida en digestión ácida
2	Asparagina	asn	%	ND	ND	ND	
3	Treonina	thr	%	0,82	0,91	1,11	
4	Serina	ser	%	0,82	0,93	1,19	
5	Ácido glutámico	glu	%	2,26	2,67	3,52	
6	Glutamina	gln	%	ND	ND	ND	
7	Prolina	pro	%	0,25	0,50	0,67	
8	Glicina	gly	%	0,71	0,98	1,51	
9	Alanina	ala	%	1,14	1,84	2,36	
10	Valina	val	%	1,04	1,33	1,51	
11	Metionina	met	%	0,22	0,27	0,32	
12	Isoleucina	ile	%	0,82	1,02	1,15	
13	Leucina	leu	%	1,20	2,19	3,61	
14	Tirosina	tyr	%	0,34	0,46	0,59	
15	Fenilalanina	phe	%	0,76	0,94	1,18	
16	Histidina	his	%	0,35	0,41	0,48	
17	Lisina	lys	%	0,98	1,09	1,14	
18	Arginina	arg	%	0,32	0,51	0,77	
19	Triptófano	try	%	ND	ND	ND	
20	Cisteína	cys	%	ND	ND	ND	
21	Cistina	-	%	1,02	1,47	1,92	

Tabla 5. Comparación de contenido de aminoácidos entre los lodos de fermentación de la melaza de la caña de azúcar y los lodos de fermentación de cervecerías

Núm.	Aminoácido	Código	Unidad	Lodos de fermentación	
------	------------	--------	--------	-----------------------	--

		FAO		Fuente: melaza de la caña de azúcar	Fuente: cervecerías [Chiang N. y Lucas F]	% Diferencia
1	Ácido aspártico	asp	%	2,52	ND	-
2	Asparagina	asn	%	ND	ND	-
3	Treonina	thr	%	0,91	1,66	82,4
4	Serina	ser	%	0,93	2,12	129,2
5	Acido glutámico	glu	%	2,67	5,78	116,9
6	Glutamina	gln	%	ND	ND	-
7	Prolina	pro	%	0,50	2,30	364,6
8	Glicina	gly	%	0,98	2,16	121,5
9	Alanina	ala	%	1,84	2,42	31,9
10	Valina	val	%	1,33	2,26	70,6
11	Metionina	met	%	0,27	0,64	134,9
12	Isoleucina	ile	%	1,02	2,30	126,6
13	Leucina	leu	%	2,19	2,80	28,0
14	Tirosina	tyr	%	0,46	1,02	121,7
15	Fenilalanina	phe	%	0,94	1,67	78,6
16	Histidina	his	%	0,41	ND	-
17	Lisina	lys	%	1,09	ND	-
18	Arginina	arg	%	0,51	ND	-
19	Triptófano	try	%	ND	ND	-
20	Cisteína	cys	%	ND	ND	-
21	Cistina	-	%	1,47	1,02	-30,6

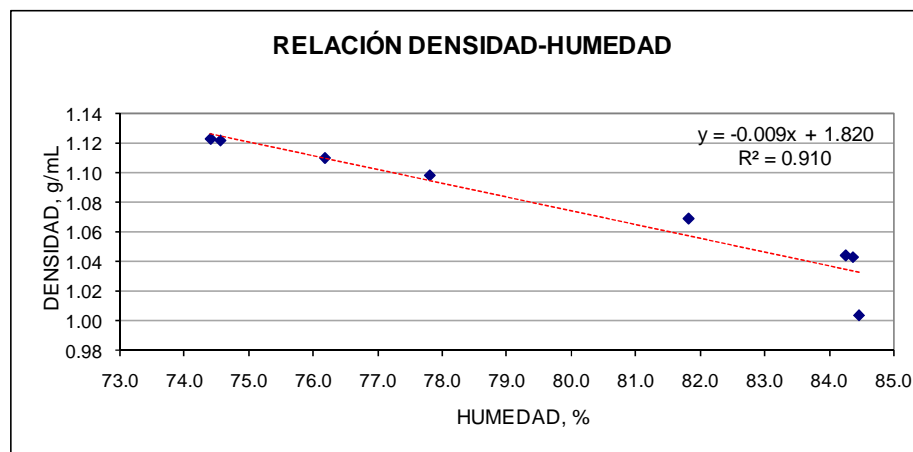


Figura 1. Correlación entre la humedad y la densidad de los lodos de fermentación

Estimación de la cantidad de lodos generados

En la Figura 2 se presentan los resultados las pruebas de sedimentabilidad de los lodos de fermentación de la melaza de la caña de azúcar, los valores graficados que incluyen los valores promedio, permiten observar la tendencia de la sedimentación de los lodos de fermentación.

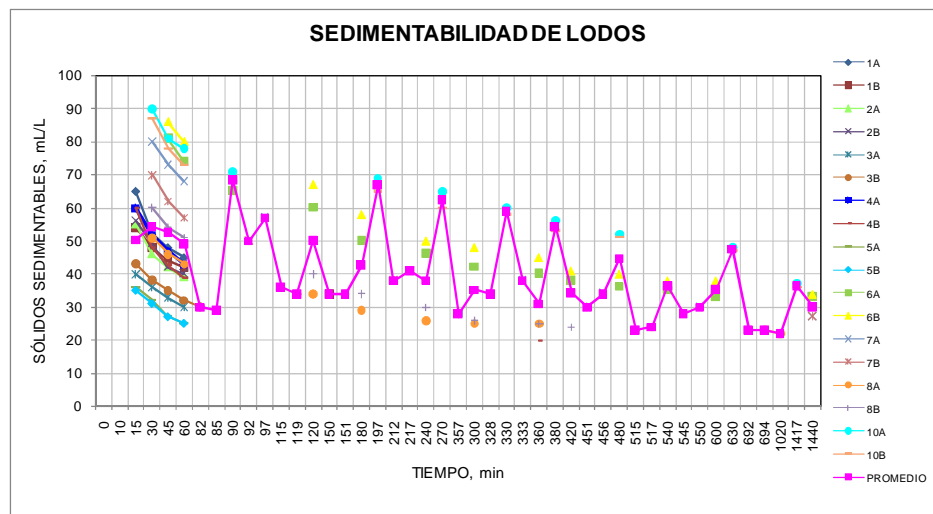


Figura 2. Sedimentabilidad de los lodos de fermentación de la melaza de caña de azúcar

Los valores promedio del conjunto de datos experimentales se someten a análisis de regresión lineal, exponencial, logarítmica, potencial y polinomial ($n=2$, $n=3$, $n=4$, $n=5$ y $n=6$) obteniéndose en todos los casos coeficientes de determinación (R^2) entre 0,200 hasta 0,306 lo que indica un bajo nivel de correlación entre las variables escogidas. Acuña (2006) indica que para que sean considerados aceptables los coeficientes de determinación (R^2) deben ser mayores a 0,75.

Para atenuar la fluctuación, se tratan los valores promediados del conjunto de datos experimentales con el modelo de tendencia tipo media móvil para diferentes intervalos de datos. En la Figura 3 se presenta el diagrama para un intervalo de datos $n = 2$.

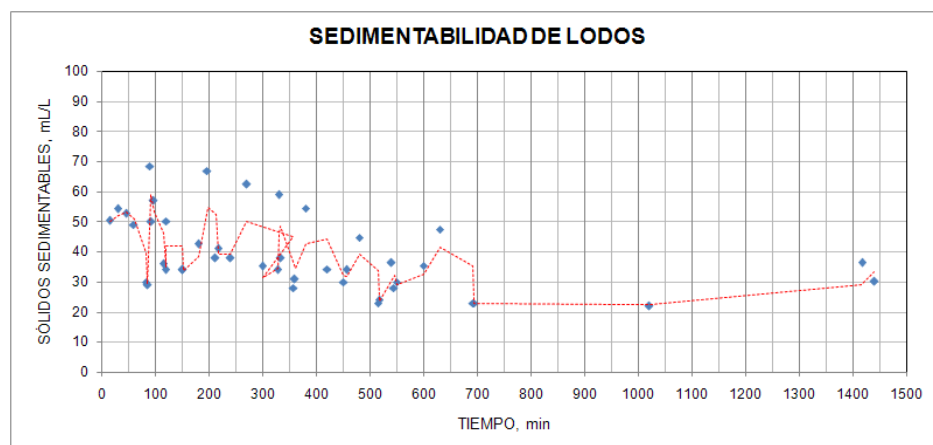


Figura 3. Correlación de los valores promedio de sedimentabilidad de los lodos de fermentación de la melaza de caña de azúcar. Tendencia media móvil, intervalo de datos $n = 2$

Estabilización térmica de los lodos

Se escoge el tratamiento térmico mediante secado indirecto como la manera práctica para realizar la estabilización de los lodos de la fermentación, para lo cual se construye un secador de tambor a

escala piloto.

En la Tabla 8 se presentan los resultados de las pruebas realizadas al producto estabilizado térmicamente y en la Tabla 9 se presenta una comparación del nivel de proteína entre el producto estabilizado con un material de procedencia local y otro importado.

Tabla 8. Resultados del análisis del lodo de fermentación estabilizado térmicamente

Parámetro	Unidad	Mínimo	Promedio	Máximo	Método
Humedad	%	9,99	11,89	13,12	Secado a 60 °C
Materia orgánica	%	86,30	86,67	87,38	Calcinación a 550 °C
Nitrógeno	%	4,17	4,66	5,17	Método Kjeldahl
Fósforo ^[1]	%	0,75	0,86	0,93	Colorimetría
Potasio ^[1]	%	2,93	3,27	3,50	Fotometría de llama
Calcio ^[1]	%	0,92	1,07	1,39	Análisis volumétrico
Magnesio ^[1]	%	0,69	0,79	0,84	Análisis volumétrico
Proteína	%	26,03	29,13	32,32	Factor N x 6,25
DQO	mgO ₂ /kg	156130	181043	224000	Interno

^[1] Para la determinación de estos parámetros se calina la muestra a 550 °C y se la disuelve en ácido clorhídrico 10N, a continuación se ejecuta el método indicado.

Tabla 9. Comparación del nivel de proteínas entre tres diferentes fuentes de levadura

Parámetro	Unidad	Lodos de fermentación estabilizados térmicamente	Levadura seca (procedencia nacional)	Levadura seca (procedencia importada)
		Fuente: lodos de fermentación de melaza de caña de azúcar	Fuente: lodos de fermentación de cervecera	Fuente: desconocida
Proteína	%	29,13	38,81	43,88

El producto desecado se almacena durante 11 meses a condición ambiente en fundas de polipropileno tipo Zip®Bag (*single zipper*).

Evaluación de los resultados y conclusiones

Los fangos de fermentación de las destiladoras de alcohol son residuos semisólidos (humedad entre 74,4 y 84,2 %) de color café, olor alcohólico y carácter ácido; están constituidos principalmente por materia orgánica (SV ~ 96 % de los ST), además presentan altos valores de DQO y la alta relación DBO₅/DQO confirma lo predominante de la materia biodegradable. Entre los minerales presentes, el K se encuentra en mayor proporción seguido del Ca, P y S; mientras que en menor proporción se encuentran: Fe, Mn, Cu, Zn y B. Entre los aminoácidos esenciales se encuentran: treonina, glicina, alanina, valina, metionina, isoleucina, leucina, fenilalanina, histidina, lisina y triptófano.

Las características de los lodos de fermentación en conjunto le confieren a este residuo propiedades altamente contaminantes si se pusieran incontroladamente afectando los recursos agua, suelo o aire. La particular composición de los lodos de fermentación hace que los mismos sean una fuente potencial de generación de olores ofensivos.

La pruebas de sedimentabilidad de los lodos indicaron que luego de un periodo de inestabilidad, a partir de 1040 minutos la velocidad de sedimentación tiende a estabilizarse quedando los sólidos sedimentables en el rango comprendido entre 30 y 40 mL/L. La extrema variabilidad durante las pruebas de sedimentación que pueden tener su explicación, entre otras razones, en las

características de la melaza, condiciones del almacenamiento de la melaza, circunstancias en que se desarrolla el proceso fermentativo, fermentación residual de azúcares presentes en el sustrato, presencia de gases ocluidos en la muestra analizada, presencia de microorganismos extraños a la fermentación, etc.

El producto estabilizado térmicamente presenta una humedad entre el 9,99 y 13,12 %, el valor promedio de 11,89 % supera ligeramente al establecido por *Metcalf & Eddy* para los fangos secos; materia orgánica entre 86,30 y 87,38 %; la DQO tiene una reducción equivalente al 43%, la disminución se debe principalmente a que durante el proceso térmico ocurre la volatilización de los compuestos orgánicos volátiles; las proteínas entre 26,03 y 32,32 %; la materia inorgánica entre 12,62 y 13,70 %, y dentro de este valor están minerales como potasio, calcio y magnesio.

Los lodos de fermentación de la melaza de caña de azúcar estabilizados térmicamente presentan el 25,27 % menos de proteínas que la levadura seca de procedencia nacional, y el 33,91 % menos de proteína que la levadura seca importada. Al respecto es razonable que exista una diferencia de este tipo ya que normalmente los lodos de fermentación de cervecías presentan mayores niveles de aminoácidos que los lodos de fermentación de melaza de caña de azúcar. Otra posible razón sería que el método empleado de estabilización térmica haya afectado el nivel proteínico, y por ende el nivel de aminoácidos de los lodos de fermentación, al respecto el objetivo de este proyecto fue estabilizar térmicamente este residuo y no optimizar el tratamiento térmico.

La gran concentración de sólidos y la amplia variedad de componentes (carbohidratos, proteínas y minerales) ocasionan que los lodos de fermentación tengan un gran potencial de aprovechamiento como un suplemento para la alimentación animal o como un producto de aplicación agrícola. En caso de dirigirse la aplicación final como mejorador de suelos aparte de la contribución de los compuestos antes mencionados se propiciará un ahorro en el uso de fertilizantes y se mejorarán algunas de las propiedades físicas de los suelos como: la estructura y la textura.

Se realiza la evaluación económica obteniendo los siguientes indicadores: TIR = 38,02 %, VAN = \$814.225, relación B/C = 2,292 y un PRCr = 3,1 años. El proyecto es económicamente rentable, recomendable y atractivo.

Referencias bibliográficas

- Acuña E. (2008) *Análisis de regresión*. Universidad de Puerto Rico, Departamento de Matemáticas, Recinto Universitario de Mayagüez. Presentación. Disponible en: <http://math.uprm.edu/~edgar/cap1sl.ppt>
- Conama (1998) *Guía para el Control y Prevención de la Contaminación Industrial. Fabricación de Levaduras*. p. 8 y 12. Documento enviado por el Sr. Roberto Patricio Molina Oliveros, Encargado OIRS - CONAMA. Correo electrónico: RMolina@conama.cl
- Chiang N. Y Lucas F. (1988) *Optimización del Proceso para la Obtención de un Concentrado de Proteínas a partir de la Levadura de Cerveza*. Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química. Tesis de grado, p. 112.
- EPA (1994) *Emission Factor Documentation for AP-42, Yeast Production*, p. 11. Disponible en: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch09/bgdocs/b9s13-4.pdf>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. *Lista 1: Clasificación de Desechos Peligrosos por Fuente Específica y Lista 2: Clasificación de Desechos Peligrosos por Fuente No Específica*. Disponible en: http://www.ambiente.gov.ec/paginas_espanol/8convocatorias/convocatoria.htm
- Murthag J. (1995) *Molasses as a Feedstock for Alcohol Production. The Alcohol Textbook*. Nottingham University Press. 1rd Edition, Chapter 3, p. 27. ISBN 1-897676-557.
- Ocampo W. (2006) *¿Es la gasolina una alternativa ambiental en Colombia?* Universidad de Antioquía. Revista Facultad de Ingeniería No. 38. pp. 7-19. Disponible en: <http://ingenieria.udea.edu.co/grupos/revista/revistas/nro038/articulos.html>