

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA QUIMICA



CINÉTICA DE CONVERSIÓN DE LOS CARBOHIDRATOS PRESENTES EN LA CÁSCARA DE
PLÁTANO (*Musa Cavendishi*) PARA LA OBTENCIÓN DE ETANOL

TESIS

PRESENTADA POR:

EDITH DANITZA PARI PANCCA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PUNO - PERÚ

2013

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

"CINÉTICA DE CONVERSIÓN DE LOS CARBOHIDRATOS
PRESENTES EN LA CÁSCARA DE PLÁTANO (*Musa Cavendishi*)
PARA LA OBTENCIÓN DE ETANOL"

TESIS

Presentado a la Dirección de Investigación de la Facultad de Ingeniería Química, de la Universidad Nacional del Altiplano, como requisito para optar el título profesional de:

INGENIERO QUÍMICO
PRESENTADO POR LA BACHILLER:
EDITH DANITZA PARI PANCCA

SUSTENTADA Y APROBADA ANTE EL SIGUIENTE JURADO CALIFICADOR:

PRESIDENTE DEL JURADO

Ing. M.Sc. Nazario Villafuerte Prudencio

PRIMER MIEMBRO DEL JURADO

Dr. Edwin Boza Condorena

SEGUNDO MIEMBRO DEL JURADO

Ing. Wile Mamani Navarro

DIRECTOR DE TESIS

Ing. M.Sc. Salomón Ttito León

ASESOR DE TESIS

Ing. M.Sc. Edith Tello Palma

PUNO - PERÚ
2013

AREA: PROCESOS INDUSTRIALES

TEMA: CINÉTICA QUÍMICA

DEDICATORIA

A Dios, por ser la luz que ilumina mi camino, a mis padres Andrés y Virginia por el apoyo y esfuerzo que hicieron para que continúe mi estudio profesional.

A mis hermanos Alex, Jorge y Fredy por su comprensión y aliento y pueda servir de ejemplo y motivación en su vida como estudiante.

A mi esposo Henry por su apoyo y a mi hijo Mathias, que es la fuerza y motivo principal de mi superación cada día.

A todos ellos con mucho cariño va dedicado el presente trabajo.

Edith

AGRADECIMIENTOS

- *A Dios, por darme salud, sabiduría y paciencia durante la elaboración de esta tesis y por permitirme llegar hasta este momento tan importante en mi vida y lograr una meta más.*
- *A la Universidad Nacional del Altiplano y a la Facultad de Ingeniería, a todos los docentes y personal administrativo, quienes hicieron posible mi formación profesional.*
- *A los miembros del jurado Ing. M.Sc. Nazario Villafuerte Prudencio, Dr. Edwin Boza Condorena, Ing. Wile Mamani Navarro; por sus sabias observaciones e indicaciones, por el apoyo brindado para la ejecución y término de este trabajo de investigación.*
- *Al Ing. M.Sc. Salomón Tito Leon, director de tesis, por su acertada conducción del trabajo de investigación*
- *Al Ing. M.Sc. Edith Tello Palma por su asesoramiento y estímulo para seguir creciendo profesionalmente.*
- *Al Ing. Elías Escobedo Pacheco, por colaborar con sus conocimientos en la realización de este trabajo de tesis*
- *A mis padres, por tener paciencia y comprensión para la culminación de esta tesis. A mis hermanos y a mi familia entera.*
- *A todos mis amigos y amigas por su amistad por el ánimo que permanentemente me infundieron para la culminación de esta tesis.*

Edith Danitza Pari.Pancca.

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE CUADROS

LISTA DE GRAFICOS

LISTA DE FIGURAS

RESUMEN

INTRODUCCION

CAPITULO I

1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES, OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	14
1.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.1.1	PROBLEMA GENERAL.....	15
1.1.2	SUB PROBLEMAS	15
1.2	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	16
1.2.1	A nivel internacional.....	16
1.2.2	A nivel nacional.....	18
1.2.3	A nivel local.....	20
1.3	OBJETIVOS.....	22
1.3.1	OBJETIVO GENERAL	23
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.4	HIPÓTESIS.....	23
1.4.1	HIPÓTESIS GENERAL	23
1.4.2	HIPÓTESIS ESPECÍFICOS	23
1.5	VARIABLES.....	23
1.5.1	VARIABLE DEPENDIENTE	24
1.5.2	VARIABLES INDEPENDIENTE	24

CAPITULO II

2	MARCO TEÓRICO, MARCO CONCEPTUAL	25
2.1	MARCO TEÓRICO	25
2.1.1	PLÁTANO.....	25
2.1.1.1	Descripción taxonómica.....	25
2.1.1.2	Generalidades	25
2.1.1.3	Carbohidratos	27
2.1.1.3.1	Clasificación de los carbohidratos:.....	27
2.1.2	APLICACIÓN DEL ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE FERMENTACIÓN	29
2.1.2.1	FERMENTACIÓN	29
2.1.2.2	FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA	30
2.1.2.3	SUSTRATOS UTILIZADOS EN LA FERMENTACIÓN	31
2.1.2.3.1	Tipos de sustrato	31
2.1.2.4	MICROORGANISMOS DE FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA	32
2.1.2.4.1	Sacharomyces cerevisiae.....	32
2.1.2.5	CONDICIONES NECESARIAS PARA LA FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA	32
2.1.2.6	CINÉTICA DE FERMENTACIÓN.....	34
2.1.2.6.1	CINÉTICA DE CRECIMIENTO MICROBIANO.....	35
2.1.3	MODELAMIENTO MATEMÁTICO	37
2.1.3.1	MODELOS CINÉTICOS.....	37
2.1.3.1.1	MODELO DE MONOD	38
2.1.4	XPLORER GLX	39
2.1.4.1	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.....	40
2.1.4.2	SENSOR DE ETANOL	41
2.1.5	DESTILACIÓN.....	41
2.1.5.1	TIPOS DE DESTILACIÓN	42
2.1.6	ETANOL	42
2.1.6.1	GRADO ALCOHÓLICO	43
2.2	MARCO CONCEPTUAL.....	44

CAPITULO III

3	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	46
3.1	ÁMBITO DE ESTUDIO.	46
3.2	MATERIALES Y MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN	46
3.2.1	MATERIALES Y EQUIPOS	46
3.2.1.1	Materia experimental.	46
3.2.1.2	Material de vidrio.....	46
3.2.1.3	Equipos e instrumentos	46
3.3	METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	47
3.3.1	Descripción de cada una de las etapas de la obtención de etanol de cáscara de plátano (<i>Musa Cavendishi</i>).....	47
3.4	DISEÑO DEL PROCESO EXPERIMENTAL.....	52
3.4.1	PLANIFICACIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN	53
3.4.2	DISEÑO DEL EXPERIMENTO	53
3.4.3	APLICACIÓN DEL DISEÑO FACTORIAL.....	54

CAPITULO IV

4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
4.1	BALANCE DE MATERIA EN EL PROCESO DE FERMENTACIÓN	56
4.2	BALANCE DE ENERGÍA DEL ETANOL EN EL FERMENTADOR	57
4.3	RENDIMIENTO Y CONCENTRACIÓN EN LA FERMENTACIÓN	59
4.4	CINÉTICA DE FERMENTACIÓN.....	61
4.5	RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS EN LA EXPERIMENTACIÓN	74
4.6	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA FERMENTACIÓN DE CÁSCARA DE PLÁTANO	77
4.6.1	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	77
4.6.2	Resumen del diseño experimental para el desarrollo de las pruebas:	78
4.6.3	EFFECTOS ESTIMADOS PARA EL RENDIMIENTO DE ETANOL	78
4.6.4	ANÁLISIS DE VARIANZA PARA RENDIMIENTO DE ETANOL.....	79
4.6.5	COEFICIENTES DE REGRESIÓN PARA RENDIMIENTO DE ETANOL	80

4.6.6	ESTIMACIÓN PARA EL RENDIMIENTO	81
4.6.7	RESPUESTA OPTIMIZADA.....	81
4.6.8	GRÁFICOS ESTADÍSTICO PARA EL RENDIMIENTO DE ETANOL	82

CAPITULO V

5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
5.1	CONCLUSIONES.....	84
5.2	RECOMENDACIONES.....	86
5.3	BIBLIOGRAFÍA.....	87



LISTA DE CUADROS

CUADRO 1.1	Operacionalización de variables	12
CUADRO 2.1	Taxonomía del plátano	13
CUADRO 2.2	Características químicas de la cáscara de plátano.....	15
CUADRO 3.1	Factores y Niveles	47
CUADRO 3.2	Experimento factorial con dos factores, dos niveles, dos puntos centrales: Fermentación alcohólica	48
CUADRO 4.1	Rendimiento y concentración del etanol obtenido en la fermentación	54
CUADRO 4.2	Resultados experimentales del análisis para la 1ra Prueba (20°C y pH 4).....	57
CUADRO 4.3	Resultados experimentales del análisis para la 2 da Prueba (20°C y pH 5).....	59
CUADRO 4.4	Resultados experimentales del análisis para la 3 ra Prueba (30°C y pH 4).....	60
CUADRO 4.5	Resultados experimentales del análisis para la 4 ta Prueba (30°C y pH 5).....	62
CUADRO 4.6	Resultados experimentales del análisis para la 5 ta Prueba (25°C y pH 4.5).....	64
CUADRO 4.7	Resultados experimentales del análisis para la 6 ta Prueba (25°C y pH 4.5).....	66
CUADRO 4.8	Resumen de parámetros cinéticos de fermentación de cáscara de plátano a una concentración inicial de 16 ° brix.....	68
CUADRO 4.9	Porcentaje de etanol obtenido durante la fermentación de cáscara de plátano en el equipo Xplorer GLX a una concentración inicial de 16 °brix..	69
CUADRO 4.10	Resumen de datos obtenidos del paquete estadístico Statgraphics Centurion XVI para el desarrollo de las pruebas.....	71
CUADRO 4.11	Resumen de diseño experimental	72
CUADRO 4.12	Resumen de efectos estimados para rendimiento (%)	72

CUADRO 4.13 Resumen del Análisis de Varianza para Rendimiento	73
CUADRO 4.14 Resumen de Coeficientes de regresión para rendimiento	74
CUADRO 4.15 Resultados estimados para rendimiento	75
CUADRO 4.15 Respuesta optimizada para los factores de la experimentación ...	76

LISTA DE GRÁFICOS

4.1 Correlación lineal velocidad de crecimiento vs concentración de sustrato para la 1 ^{ra} Prueba (20°C y pH 4)	57
4.2 Correlación lineal velocidad de crecimiento vs concentración de sustrato 1/u vs 1/S, para la 2 ^{da} Prueba (20°C y pH 5)	59
4.3 Correlación lineal velocidad de crecimiento vs concentración de sustrato, para la 3 ^{ra} Prueba (30°C y pH 4)	61
4.4 Correlación lineal velocidad de crecimiento vs concentración de sustrato para la 4 ^{ta} Prueba (30°C y pH 5)	63
4.5 Correlación lineal velocidad de crecimiento vs concentración de sustrato para la 5 ^{ta} Prueba (25°C y pH 4.5)	64
4.6 Correlación lineal velocidad de crecimiento vs concentración de sustrato para la 6 ^{ta} Prueba (25°C y pH 4.5)	66
4.7 Diagrama de Pareto estandarizada para rendimiento de etanol	77
4.8 Efectos principales para rendimiento	78
4.9 Contornos de la superficie de respuesta estimada	79

LISTA DE FIGURAS

2.1 Curva de crecimiento de microorganismos	27
2.5 Xplorer GLX	31
2.6 Sensor de etanol	31
3.1 Diagrama de flujo cualitativo para la obtención de etanol a partir de cáscara de plátano	43
3.2 Diagrama de flujo cuantitativo para la obtención de etanol a partir de cáscara de plátano	44

RESUMEN

En la presente tesis se ha estudiado la cinética de conversión de los carbohidratos presentes en la cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*) para la obtención de etanol. El problema de investigación se formuló a través de la siguiente pregunta: ¿Cuál será el modelo cinético de la fermentación alcohólica de cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*)?. Asimismo los objetivos de esta tesis fueron: Determinar el modelo cinético que se ajuste a la fermentación de la cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*), determinar los parámetros físico-químicos (°Brix, temperatura y pH) de la fermentación de cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*) para la obtención de etanol, determinar el porcentaje de etanol producido en la fermentación de cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*) utilizando el equipo Xplorer Glx y determinar los parámetros cinéticos para ajustar el modelo matemático.

Se desarrolló la cinética de conversión de carbohidratos fermentando la cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*) con la levadura *Sacharomyces Cerevisae* para transformar el mosto compuesto por carbohidratos en etanol utilizando un bioreactor operando a temperaturas de 20°C, 25°C y 30°C y pH de 4, 4.5 y 5 a una concentración inicial de azúcares de 16 °Brix, el análisis de estas variables se realizó mediante un diseño factorial 2^K. Durante la fermentación se monitoreó el porcentaje de etanol en el equipo XPLOREER GLX. Las cinéticas se llevaron a cabo en 6 fermentaciones.

El porcentaje máximo de etanol obtenido en el bioreactor medido con el equipo Xplorer GLX durante la fermentación fue de 13.1% a 25°C Y pH 4 en 85 horas. De los datos analizados se ajustó la cinética de fermentación al modelo de Monod, obteniendo los parámetros cinéticos: velocidad máxima de crecimiento microbiano $\mu_{\max} = 0.0278 \text{ h}^{-1}$ y constante cinética $K_s=23.315 \text{ g/L}$. Se realizó la separación del etanol por destilación obteniendo un porcentaje máximo de 13 % de etanol.

PALABRAS CLAVES: Cáscara de plátano, cinética de fermentación, etanol, modelo cinético de Monod

INTRODUCCIÓN

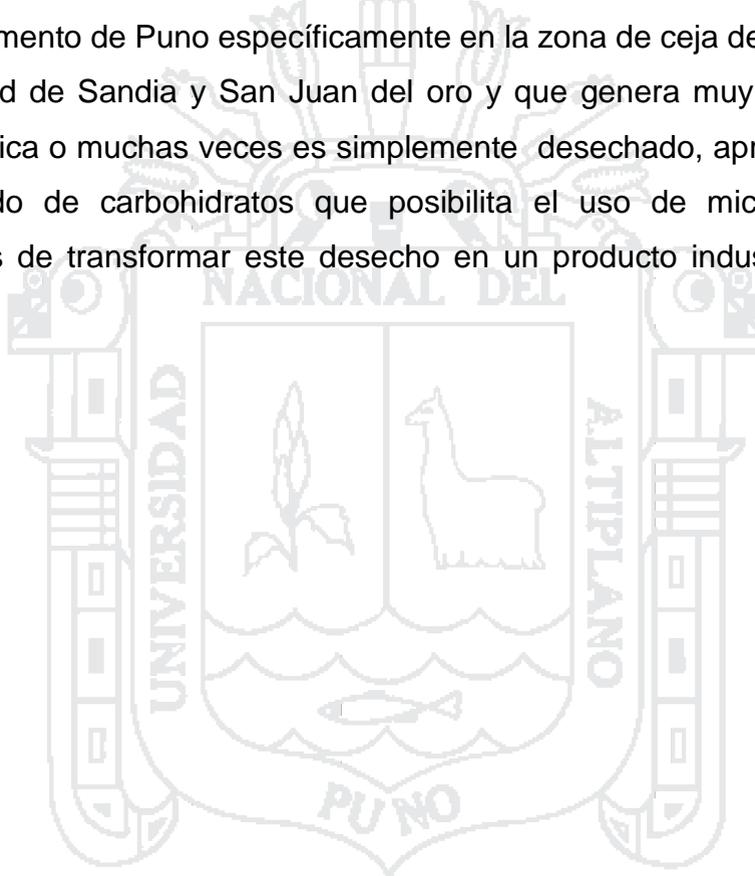
En el Perú y el mundo en la actualidad se hacen numerosos esfuerzos para recuperar desechos orgánicos y minimizar el impacto ambiental que el proceso de descomposición produce. Las investigaciones se dirigen más a determinar nuevos procesos y nuevas fuentes para la obtención de etanol como es la cinética de la conversión de los carbohidratos que nos brinda parámetros cinéticos necesarios que hacen posible hipotetizar acerca del comportamiento de un microorganismo en un ambiente celular y predecir cómo responderá frente a un cambio de esas condiciones, estas investigaciones han tenido un auge muy grande en Sudamérica, pues la obtención de etanol, tiene mucha importancia como combustible, teniendo como materia prima los residuos de fruta, constituye de por sí una alternativa viable, que amplía las posibilidades de solución a la contaminación ambiental al ser una fuente de energía de costo ambiental bajo.

Las tecnologías actuales de producción de etanol a partir de cereal son tecnologías maduras y comerciales, pero no ofrecen todavía soluciones competitivas desde el punto de vista de su coste. Para cumplir los objetivos, deberá estar unido a la búsqueda de materias primas de bajo coste como alternativas a las tradicionales, como pueden ser las de origen residual. El residuo de frutas es un gran potencial de utilización como sustrato en procesos bioquímicos para la obtención de etanol

El proceso de fermentación alcohólica, nos permite aprovechar los carbohidratos presentes en la cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*) que pueden transformarse en azúcares fermentables, para ello se realizó el presente trabajo de investigación utilizando *Sacharomyces cerevisiae* para

poder maximizar la conversión de azúcar en etanol para lo cual se utilizó el equipo Xplorer GLX implementado con sensor de etanol y temperatura el cual permitió obtener el porcentaje de etanol durante la fermentación.

El presente trabajo de investigación tiene por finalidad aprovechar la cáscara de plátano (*Musa Cavendishii*) que es un recurso disponible en el departamento de Puno específicamente en la zona de ceja de selva que es la ciudad de Sandia y San Juan del oro y que genera muy poca utilidad económica o muchas veces es simplemente desechado, aprovechando el contenido de carbohidratos que posibilita el uso de microorganismos capaces de transformar este desecho en un producto industrial como el etanol.



CAPÍTULO I

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES, OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente trabajo busca nuevos mecanismos biotecnológicos tales como la fermentación alcohólica que permitan mitigar los daños ocasionados por la degradación de productos naturales, esta degradación da lugar a la producción de gases tóxicos y de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global del planeta, una de las alternativas a este problema es utilizar microorganismos capaces de aprovechar estos desechos y transformarlos en productos de interés.

Teniendo en cuenta los residuos de plátano que se generan buscamos así la forma de aprovechar la cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*) producido en la zona como una alternativa para dar solución a este problema y además dar un valor agregado a este residuo y pueda ser utilizado como sustrato para la degradación microbiana debido a su contenido en carbohidratos lo que lo convierte en un sustrato altamente productivo de azúcares fermentables y posibilita el uso de microorganismos capaces de transformar dichos desechos en un producto industrial como el etanol el cual se emplea en la elaboración de algunas bebidas alcohólicas, aunque en la actualidad es empleado como biocombustible.

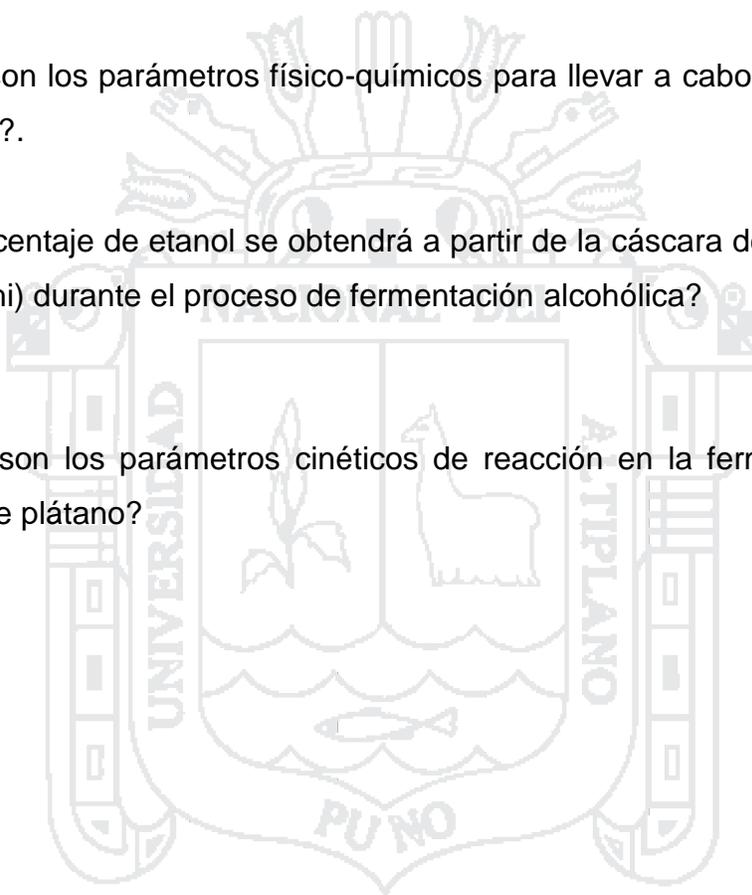
Con el fin de obtener mejores resultados en cuanto a la fermentación se estudio la velocidad de reacción, parámetros más adecuados tomando en cuenta las variables como el pH, la temperatura y concentración de azúcar. Por todo lo mencionado el problema general puede ser planteado realizando la siguiente interrogante.

1.1.1 PROBLEMA GENERAL:

- ¿Cuál será el modelo cinético de la fermentación alcohólica de cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*)?

1.1.2 SUB PROBLEMAS:

- ¿Cuáles son los parámetros físico-químicos para llevar a cabo la fermentación alcohólica?
- ¿Qué porcentaje de etanol se obtendrá a partir de la cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*) durante el proceso de fermentación alcohólica?
- ¿Cuáles son los parámetros cinéticos de reacción en la fermentación de la cáscara de plátano?



1.2 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Las investigaciones en fermentación alcohólica se iniciaron desde 1815 con Gay Lussac y continúan actualmente en varios laboratorios del mundo.

1.2.1 A nivel internacional

-) **FARAH AHMAD (2011)** En un artículo de investigación denominado “Estudio de la cinética de crecimiento y el modelado de etanol producción por *Saccharomyces cerevisiae*” la producción de etanol a partir de sustrato de la glucosa se llevó a cabo. por lotes de cepa de *Saccharomyces cerevisiae* en 10 L de biorreactor de tanque agitado durante 72 horas a Este estudio investigado la S. cinética de crecimiento *cerevisiae* a la fermentación se le agrego, 0.5% (w / w) de urea y 0,05% (w / w) de NPK (nitrógeno, fósforo y potasio) fue añadido La concentración inicial de 240 g / L había producido 206 g/L de etanol después de 72 h de fermentación por lotes Los parámetros cinéticos de este experimento son μ max 0.084 h⁻¹ Ks 23,6 g / L
-) **OVIEDO ET. AL.** (2009). En un artículo de investigación “Levaduras autóctonas con capacidad fermentativa en la producción de etanol a partir de pulpa de excedentes de plátano *Musa (AAB Simmonds)* en el departamento de Córdoba, Colombia” Reporta que Se evaluó la capacidad fermentativa de levaduras nativas de la zona costanera del departamento de Córdoba, Colombia, para la obtención de etanol a partir de la pulpa de excedentes de plátano *Musa (AAB Simmonds)*, con el objetivo de encontrar cepas eficientes. Los microorganismos utilizados correspondieron a las especies: *Kloeckera sp*, *Candida guilliermondii*, *Candida albicans* y *Candida guilliermondii* (nativas), y una cepa comercial de referencia, *Saccharomyces cerevisiae*. La fermentación se realizó a diferentes concentraciones de sustrato, siendo la concentración del 40% la mejor; se evaluó la producción de etanol mediante el método colorimétrico del dicromato de potasio utilizando un equipo espectrofotómetro. Se observó que la levadura *Candida guilliermondii* nativa fue la más eficiente con una producción promedio de 3,45% v/v de etanol a

las 72 horas de fermentación; no se encontraron diferencias estadísticamente significativas con la producción de etanol a partir de la cepa de referencia, la cual produjo 3,59% v/v. Estos resultados sugieren la existencia de levaduras nativas con capacidad para ser utilizadas en la obtención de etanol a partir de material residuo de plátano.

-) **MORALES ESTHER, ET. AL.** (2007). En su trabajo sobre la “Obtención de Bioetanol a partir de naranja (*Citrus spp*) aplicando ozono” Evaluó el rendimiento en la producción de bioetanol, a partir de jugo y cáscara de naranja y jugo de piña, empleando ozono como una alternativa de pretratamiento para los materiales con compuestos lignocelulósicos.
-) Se prepararon 5 sistemas que se mencionan a continuación: 1) jugo de naranja (JN), 2) JN- jugo de piña (JP) (1:1 v/v), 3) JN-cáscara de naranja (CN) (1:1 m/v), 4) JN- ozonizado y 5) JN-CN-ozonizado. Todos los sistemas tuvieron un volumen de 250 mL adicionando 50 mg de levadura *Saccharomyces cerevisiae*, en matraces Erlenmeyer con capacidad de 1 L, durante 168 h, a una temperatura de 25°C y a un pH de 3.5 + 2. Se realizó una toma de la muestra de 10 mL en 72 y 96 h, que fue destilado y se determinó alcoholes por cromatografía de gases. Los sistemas que mostraron mejores resultados a las 168 h fueron: JN 44.8%, JN-CN 46.8 % y JN-CN ozonizado 48.8 %.
-) **MONSALVE F. ET. AL.** (2006). En una investigación denominada “Producción de etanol a partir de la cáscara de banano y de almidón de yuca” se ajustaron los medios de fermentación para los microorganismos *Saccharomyces cerevisiae* y *Zymomonas mobilis* Se caracterizó la cáscara de banano, la cual posee un contenido de almidón, celulosa y hemicelulosa que representan más del 80 % de la cáscara ameritando el estudio de ésta como fuente de carbono. Para la fermentación realizada con *Sacharomyces cerevisiae* se logra una concentración de etanol de 0.31% y no se aprecia

una producción considerable de etanol (menor de 0.1 g/l) para ninguno de los medios fermentados con *Zymomonas mobilis*.

- J) **RAMIREZ Y MOLINA** (2005). En la “Evaluación de parámetros cinéticos para la *Sacharomyces cerevisiae* utilizando agua de coco como sustrato”, Para un sistema “batch” de 2 L, se encontró que al aumentar la concentración de levaduras, a una temperatura de 28 °C, se obtuvieron algunos parámetros cinéticos, la velocidad específica máxima de crecimiento (μ_{max}) fue de 0,038 h⁻¹, la constante de saturación (Ks) fue de 1,35 g/L, a una temperatura de 28°C y pH 4,5.
- J) **CARDONA CARLOS** (2004). En el estudio de “Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado de Manizales de Caldas en Colombia”, eligió transformar el almidón y la celulosa presentes en los residuos de tubérculos y frutas enteras de mala calidad o con diferente grado de descomposición (papas, mango, naranjas, mandarinas, papaya, plátano, pina, cebolla repollo, tomate) en azúcares fermentable. Realizó el estudio cinético de la hidrólisis de almidón empleando el modelo de Michaelis-Menten mediante el procedimiento de linealización Lineweaver-Burk donde obtuvo los parámetros cinéticos $K_M=0.8205$ g/mL y $V_{m\acute{a}x}=0.1048$ g/(100mL*min). A partir de la nueva materia prima (azúcares reductores) se obtuvo etanol. La mayor conversión obtenida fue de 1.44% de etanol que correspondió al medio de cultivo con 23 °Brix.

1.2.2 A nivel nacional

Se llevarón a cabo trabajos aplicados para aprovechar la caña de azúcar, maíz, arroz. En las Universidades Nacionales y Privadas del Perú, se realizó el estudio de la cinética de fermentación de frutas, en la Universidad Nacional de san Antonio de Abad de Cuzco se realizó el trabajo de obtención de etanol a partir de arroz y de maíz, en la Universidad de Piura se obtuvo alcohol de diferentes variedades de plátano, en la Universidad Federico Villarreal se realizó el estudio cinético de la fermentación alcohólica del jugo de caña de

azúcar (*saccharum officinarum*) para la obtención de etanol; pero sobre el estudio de la cinética de fermentación de cáscara de plátano no se encuentran trabajos realizados.

- J) **MARLO GARCÍA ET. AL.** (2012). En el “Estudio cinético de la fermentación alcohólica del jugo de caña de azúcar (*saccharum officinarum*) proveniente de la Cooperativa Laredo, sito en Trujillo para la obtención de etanol” se uso la levadura *Saccharomyces cerevisiae* para la fermentación alcohólica en lo cual determinó las constantes cinéticas del respectivo proceso, aplicando el modelo matemático de Taylor.

Las unidades experimentales utilizadas fueron a través del empleo del bioreactor operando a temperatura de 30°C y pH de 5.5. De los datos analizados se obtuvieron los valores cinéticos la constante de velocidad de consumo de sustrato (k , dia^{-1}) se encuentra ente 0,0922 y 0,1457 dia^{-1} , a un nivel del 95% o 5% de nivel significancia LC [0,0922, k , dia^{-1} , 0.11457], 5%.

También se determino la ecuación que interpreta el experimento, a través de un análisis de probabilidades, mostrando como varia la concentración en función del tiempo $C = 12,00 \cdot e^{10899(t)}$

- J) **ROQUE y CABANILLAS** (2008). En un artículo denominado “Producción de alcohol de residuos lignocelulósicos – cáscaras de arroz (*Oriza sativa*)” investigaron un método rentable a nivel industrial de obtención de etanol a partir de cáscaras de arroz. A través de procesos químico-biológicos obtuvieron etanol de residuos celulósicos como la cáscara de arroz rica en celulosa en un 70 %. El diseño de las experiencias se realizó teniendo como variables, presión y temperatura, y como constantes, la concentración de ácido y el tiempo.

Como resultado se obtuvo una concentración de alcohol del 7 % a las 48 horas de fermentación, un rendimiento de 25 litros de alcohol (etanol) de 96° G.L. a partir de 100.00 Kg. de cáscaras de arroz.

-) **CARRIL y CRUZ.** (1996). “Alcohol obtenido de diferentes variedades de plátano”. Obtuvieron etanol a partir de plátanos maduros (guineos) con 16 a 20 % de azúcar. Para la obtención del zumo, los frutos pelados y cortados se sulfitan y transforman en pasta, la cual es tratada con óxido de calcio. El zumo obtenido se ajusta a pH 4,5 y 16,5 °Brix. Este mosto listo para la fermentación alcohólica se somete a pasteurización a 85 °C por 5 minutos. Luego se deposita en caliente en el reactor y una vez alcanzada la temperatura de 24 °C se le agrega el inóculo preparado con la cepa de *Sacharomyces ellipsoideus*, poniéndose enseguida en marcha la fermentación a 27 – 30 °C. A los cinco días de fermentación se obtiene un líquido alcohólico con un aproximado de 8,5 % del alcohol en volumen y 3°Brix.
-) **BAUTISTA C. MARIO** (2005). Realizó un trabajo de investigación para la “Obtención del alcohol a partir de polvillo de arroz”. Describe el proceso tecnológico seguido para obtener alcohol a partir del polvillo de arroz. El proceso fermentativo se produjo empleando levadura de panificación a un pH de mosto de 4.5, temperatura de 30°C El porcentaje de etanol fue de 37.51 % obteniéndose un tiempo óptimo de fermentación de 27 horas.

1.2.3 A nivel local

-) **COILLO Y COPA** (2010). En la investigación Cinética de fermentación de plátano (*musa cavendishi*), en el equipo multilog - pro implementado con sensores de CO₂, presión, temperatura y pH; estudiaron el comportamiento de la cinética de fermentación del plátano, utilizando sustrato en tres diluciones (agua- sustrato) con la levadura *saccharomyces cerevisae* a diferentes valores de pH, y concentraciones de azúcar (°brix), los mayores rendimientos se obtuvieron con la mezcla de 21 g plátano diluido con 10 ml

de agua (sustrato/ agua 2 : 1), manteniendo la temperatura entre 30 a 35 °C, un pH de 4.15; y 15 °Brix.

A partir del tratamiento cinético se encontró la velocidad de reacción ajustándose adecuadamente con la cinética de Michaelis Menten y se determinó los parámetros cinéticos de Michaelis Menten $K_m = 2E+12$; $V_{max} = 3E+08$ mol/ s. L, para de esta forma tener el modelo cinético de

Michaelis Menten :

$$Zr_A X \frac{3 | 10^8 \text{ s}'}{2 | 10^{12} \Gamma \text{ s}'}$$

-) **SILLO CASTILLO** (2010). Realizó un trabajo de investigación denominado “Cinética de reacción en la obtención de bioetanol a partir de residuos de producción de zumo de frutas” para lo cual utilizó los residuos de un proceso de extracción de zumo de frutas (naranja, mandarina), tales como pulpa, cáscara para someterlos a fermentación anaeróbica usando *Saccharomyces cerevisiae* como biocatalizador, recuperando su contenido en material fermentable para obtener bioetanol de tipo combustible luego de un proceso de rectificación y deshidratación.

La fase experimental tiene por estudio a seis relaciones de porcentajes en masa de mezcla (100% naranja, 90% naranja - 10% mandarina, 80% naranja - 20% mandarina, 70% naranja - 30% mandarina, 60% naranja - 40% mandarina, 50% naranja - 50% mandarina), a dos temperaturas (25°C y 30°C) de las cuales se obtienen doce pruebas experimentales.

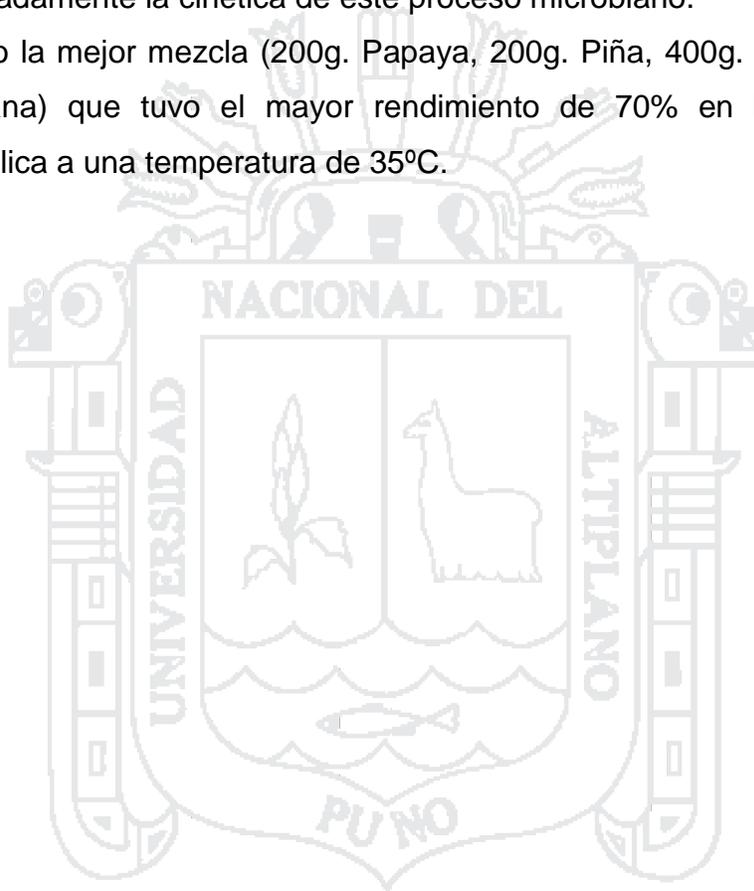
Del estudio cinético realizado se obtienen los parámetros cinéticos del modelo de Monod linealizado el cual se encarga de la cinética de crecimiento microbiano de acuerdo a la tasa de consumo específico de sustrato. Teniendo como resultados $\mu_{max} = 0.0344 h^{-1}$, $K_s = 31.422$ g/L (porcentaje de naranja 100% a 30°C).

En cuanto a rendimiento de las doce pruebas realizadas van del 86.23% al 90.55% según el rendimiento teórico.

-) **CUTIMBO QUISPE** (2004). Realizó un trabajo de investigación sobre la “Optimización de fermentación alcohólica de frutas en estado extremal de

maduración”, para lo cual uso frutas próximas a iniciar su descomposición, sometiéndolo a fermentación usando *Sacharomyces cerevisiae* como biocatalizador. Del estudio cinético realizado con cuatro mezclas de frutas (papaya, piña, plátano y manzana) a diferentes proporciones en peso a partir de 1Kg de mezcla en el rango de 25 - 35 ° C, determinando los parámetros del modelo de Monod, $\mu_m = 0.2179$ y $K_s = 22.3554$; con el cual se ajusta apropiadamente la cinética de este proceso microbiano.

Obtuvo la mejor mezcla (200g. Papaya, 200g. Piña, 400g. Plátano y 200g. Manzana) que tuvo el mayor rendimiento de 70% en la fermentación alcohólica a una temperatura de 35°C.



1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL:

- Determinar el modelo cinético para el proceso de fermentación de cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*).

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Determinar los parámetros físico-químicos de la fermentación de cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*) para la obtención de etanol.
- Determinar el porcentaje de etanol producido en la fermentación de cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*) utilizando el equipo Xplorer GLX.
- Determinar los parámetros cinéticos del modelo matemático.

1.4 HIPÓTESIS

1.4.1 HIPÓTESIS GENERAL:

- El proceso de fermentación de cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*) puede ser representado utilizando el modelo cinético de Monod.

1.4.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICOS:

- La determinación de los parámetros físico-químicos para la fermentación de la cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*) son temperatura, pH, concentración de azúcar
- El porcentaje que se obtiene en el bioreactor medido con el Xplorer GLX varía de 65% a 65.5%
- Los parámetros cinéticos son velocidad máxima de crecimiento (μ_{max}) y la constante de reacción (K_s).

1.5 VARIABLES

1.5.1 VARIABLE DEPENDIENTE

- Rendimiento

1.5.2 VARIABLES INDEPENDIENTE

- Temperatura
- pH

CUADRO 1.1 OPERACIONALIZACION DE VARIABLES

VARIABLE	INDICADORES	UNIDAD
VARIABLE DEPENDIENTE Rendimiento	- Porcentaje de etanol	%
VARIABLES INDEPENDIENTE Parámetros de operación de la fermentación	- pH - Temperatura	--- °C
VARIABLE INTERVINIENTE	- Tiempo - Concentración de azúcar	Minutos °Brix

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO, MARCO CONCEPTUAL

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 PLÁTANO

2.1.1.1 Descripción taxonómica

Nombre científico: *Musa Cavendishi*

Nombres comunes: banano, plátano.

CUADRO 2.1 TAXONOMIA DEL PLATANO

Reino:	Plantae
Clase:	Angiospermae
Subclase:	Monocotyledoneae
Orden:	Scitamineae
Familia:	Musaceae
Género:	Musa
Especie:	Sapientum
Variedad:	Cavendishi

Fuente: Terranova, 1995

2.1.1.2 Generalidades

El plátano es un fruto nativo del Sudeste asiático, de una región situada en la India y al este de la península de Malaya comprendiendo a Papúa, Nueva Guinea y Borneo, Filipina.

En el Perú las zonas de producción están en toda la amplitud de la selva, en la costa norte y centro, con una elevación no mayor de 1,000 m.s.n.m. San Martín, Tumbes, Loreto.

Tiene un periodo vegetativo de tres años, siendo la primera cosecha al primer año de realizado el trasplante, requiere de climas tropicales, con temperaturas que están en el rango de 20°C y 32°C. Humedad relativa de 60% con precipitaciones pluviales más o menos distribuidas uniformemente durante todo el año.

El suelo apropiado es de textura franca, arcillo-arenosos profundo, de buen drenaje con pH entre 5.0 y 7.5. (MINAG, 2013)

El plátano pertenece a la familia de las Musáceas, la cual incluye a los plátanos comestibles crudos (*Musa Cavendishi*), los bananitos o plátanos enanos (*Musa x paradisiaca*) y los plátanos machos o para cocer (*Musa paradisiaca*). (Gil, 2010)

En la composición del plátano destaca su riqueza en hidratos de carbono, (hasta un 21%). En el plátano inmaduro están formados mayormente por almidón. A medida que madura, ese almidón se va convirtiendo en azúcares como la sacarosa (66%) glucosa (20%) y fructuosa (14%). En el plátano maduro queda alrededor de un 1% de almidón (Pamplona, 2006)

La característica fundamental de los plátanos es que son una fuente importante de carbohidratos que en condiciones de inmadurez están en forma de almidón, que se transforma en sacarosa cuando las frutas maduran (Ketiku, 1973). Encontró carbohidratos simples en la cáscara del plátano, como se muestra en el cuadro 2.2

CUADRO 2.2 Características de los carbohidratos durante la maduración de los plátanos:

Componente	Cáscara (% base seca)	Pulpa (% base seca)
Almidón	35.0	66.4
Azúcares solubles ¹	31.6	17.3
Hemicelulosa	10.5	1.3
Celulosa	14.0	0.8

¹ Glucosa, fructuosa y sacarosa

Fuente: Ketiku (1973)

2.1.1.3 Carbohidratos

Los carbohidratos también se denominan glúcidos o hidratos de carbono. Los carbohidratos son compuestos orgánicos químicamente formados por la unión de átomos de carbono (C), hidrogeno (H) y oxígeno (O) Estructuralmente en su molécula química contienen dos átomos de hidrogeno por cada átomo de carbono y de oxígeno. (Marin, 1996)

En la naturaleza los carbohidratos actúan como almacén; representan el material que capta la energía del sol y permite que la utilicen los seres vivos. Los azúcares son el producto inmediato de la fotosíntesis; con la energía solar, y a partir de CO₂ y H₂O se sintetiza la glucosa como primer producto. En los vegetales se sintetiza la glucosa por fotosíntesis a partir de dióxido de carbono y agua y luego se almacena como almidón o forma parte de la estructura de soporte vegetal como celulosa. Los frutos acumulan almidón durante su desarrollo y se transforman o degradan en azúcares más sencillos durante la maduración por acción de las enzimas (Peña, 2004)

2.1.1.3.1 Clasificación de los carbohidratos:

a) Monosacáridos:

Los monosacáridos se clasifican según el número de carbonos en su molécula, que va de tres a seis. Los monosacáridos que tienen mayor importancia son las hexosas o azúcares de seis átomos de carbono. Las hexosas más sencillas son: glucosa, fructosa y galactosa.

El etanol o alcohol etílico se produce por la fermentación de la glucosa, la fructuosa al unirse con la glucosa, forma el disacárido llamado sacarosa (Marin, 1996).

b) Disacáridos:

Los disacáridos están formados por la unión de dos unidades de monosacáridos. Los disacáridos más importantes son: sacarosa, maltosa y lactosa. Los disacáridos se desdoblán a monosacáridos por enzimas específicas.

La sacarosa está formada por glucosa más fructosa. Casi todas las frutas, hierbas, raíces y verduras contienen sacarosa.

c) Polisacáridos:

Los polisacáridos son carbohidratos complejos formados por cadenas de monosacáridos, que van desde tres hasta cientos de moléculas de monosacáridos, iguales o diferentes, por ejemplo una sola molécula de celulosa contiene varios miles de unidades de glucosa, son mucho menos solubles en agua que los azúcares. (Marin, 1996)

Los polisacáridos se producen en los vegetales, mediante la fotosíntesis; constituyen una reserva de energía para la planta, además de que le dan sostén. Los polisacáridos más comunes son: almidón, celulosa y lignina

El almidón está formado por dos compuestos: La amilosa y la amilopectina ambas se encuentran formadas por moléculas de glucosa unidas entre sí por

enlaces glucosídicos. Es insoluble en agua fría, pero al hidratarlo y calentarlo su aspecto se vuelve gelatinoso, presentan el cambio más importante de los frutos climatéricos, el almidón es convertido casi en su totalidad en azúcares esta transformación altera el sabor, la textura y consistencia del fruto; haciéndolo más dulce y con mayor aceptabilidad; la celulosa es el principal constituyente de hojas, tallos y cascaras de frutas es insoluble en agua y de consistencia fibrosa. (Marin, 1996)

2.1.2 APLICACIÓN DEL ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE FERMENTACIÓN

2.1.2.1 FERMENTACIÓN

Un proceso de fermentación es un proceso que se lleva a cabo en un recipiente llamado fermentador. El microorganismo va aumentando la concentración de su biomasa en el transcurso del proceso al mismo tiempo que el medio se va modificando y se forman productos nuevos como consecuencia de las actividades catabólicas y anabólicas.

El comportamiento de un microorganismo en crecimiento es el resultado de la interacción que se produce entre la célula y el medio ambiente dentro del biorreactor. La respuesta del microorganismo a las condiciones de operación en el fermentador es el resultado de la influencia de las variables de naturaleza física y química que afectan directamente el proceso. Los factores que pueden afectar la operabilidad del proceso están vinculados con las condiciones de operación que se utilizan en los biorreactores, un ejemplo de estos son, la temperatura, la velocidad de agitación, la concentración de oxígeno disuelto, el pH, etc (Fiechter, 1984).

La fermentación es un proceso catabólico de oxidación incompleta, totalmente anaeróbico, siendo el producto final un compuesto orgánico. Estos productos finales son los que caracterizan los diversos tipos de fermentaciones.

El proceso de fermentación es anaeróbico ya que se produce en ausencia de oxígeno. Fue descubierta por Louis Pasteur, que la describió como *la vie sans l'air* (la vida sin el aire). La fermentación típica es llevada a cabo por las levaduras. (Fiechter, 1984).

Podemos también definir la fermentación como la oxidación incompleta de carbohidratos, aminoácidos y sustancias similares por la acción de los microorganismos.

2.1.2.2 FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

La fermentación alcohólica es el proceso a través del cual los azúcares contenidos en el mosto o medio de cultivo se convierten en alcohol etílico en un medio anaerobio y por la acción de la levadura, con la presencia de nutrientes, temperatura, pH y acidez óptima, de manera que la levadura pueda actuar correctamente sobre los azúcares y la fermentación, para obtener un rendimiento esperado. (Barrera, 2010).

El proceso simplificado de la fermentación alcohólica es el siguiente:

Azúcares+ levaduras = Alcohol etílico+CO₂+Calor+Otras sustancias

Los rendimientos moleculares de la reacción son:



Puede definirse como el proceso metabólico que transforma los hidratos de carbono (carbohidratos) en alcoholes, ácidos orgánicos, aldehídos o cetonas con la formación de dióxido de carbono. Esta denominación está dada sobre la base de las alteraciones que en presencia de levaduras ocurren en los jugos azucarados de frutas. (Ward, 1991)

Si el alimento (sustrato), es adecuado para las células (levaduras) se alimentan, se multiplican y en el proceso se produce un residual (alcohol). En algunos casos la presencia del producto (alcohol), inhibe la acción de las células, a medida que la concentración de alcohol aumenta, las

células se multiplican más lentamente y para un 12% de alcohol las células se detienen. (Burgeois, 1995)

2.1.2.3 SUSTRATOS UTILIZADOS EN LA FERMENTACIÓN

Los sustratos más comúnmente usados para la fermentación son los azúcares, en especial la D-glucosa. Una clase de fermentación importante de la glucosa es la fermentación alcohólica. Para muchas levaduras en un medio adecuado, la fermentación significa la conversión de hexosas, principalmente glucosa, fructosa, manosa y galactosa, en ausencia de aire, en etanol los siguientes productos finales:



Alrededor del 70 % de la energía es liberada como calor; el resto es preservado en dos enlaces fosfatos terminales de ATP (trifosfato de Adenosina), para usarlo en las reacciones de transferencia, tales como la activación de la glucosa (fosforilación) y de aminoácidos antes de la polimerización (Muller, 1981)

2.1.2.3.1 Tipos de sustrato

Están definidos tres tipos de materias primas para la producción de etanol (Palacio, 1956) las cuales son:

Materiales portadores de azúcares simples: Contienen carbohidratos en forma de mono, di o tri sacáridos como fuentes de azúcares. Los azúcares fermentan directamente.

Almidones: Contienen carbohidratos en formas de almidón (polisacárido cuya unidad estructural más sencilla es la D - glucosa) como fuente de azúcares. Primero se deben convertir en azúcares fermentables mediante la acción de enzimas (sacarificación).

Celulosas: Contienen carbohidratos en formas más complejas y deben ser convertidos en azúcares fermentables por previo proceso de sacarificación.

2.1.2.4 MICROORGANISMOS DE FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA.

Los microorganismos presentes en el medio ambiente, responsables de los procesos vitales para nuestra existencia y permanencia, se están estudiando de tal forma que han permitido realizar investigaciones que despertaron interés biotecnológico en la producción de etanol como aporte no solo económico y energético, sino ambiental.

Hoy en día, la investigación y el desarrollo tecnológico han permitido que a través de la biotecnología y específicamente de la micro biotecnología optimizar el papel que cumplen los microorganismos en la generación de etanol. (Bullock, 2003)

2.1.2.4.1 *Sacharomyces cerevisiae*.

Es un hongo eucariotico unicelular comúnmente conocido como levadura. *La Sacharomyces cerevisiae*, q ha sido tradicionalmente usada en la producción de bebidas alcohólicas y alimentos ya que fermenta y asimila la glucosa y normalmente también la sacarosa, maltosa y galactosa, no así la lactosa. (García, 2004)

La capacidad de producción de alcohol y la tolerancia ala mismo son dos características relacionadas desde el punto de vista funcional ya que la segunda puede limitar a la primera; sin embargo, son independientes en su origen fisiológico, es decir, la habilidad de una levadura de producir alcohol a partir de un carbohidrato no necesariamente implica que esta tenga una alta tolerancia y viceversa. La producción de alcohol es un fenómeno complejo cuyo rendimiento depende de diversos factores la concentración del inóculo, la composición del medio, las condiciones de fermentación, etc. (García, 2004)

2.1.2.5 CONDICIONES NECESARIAS PARA LA FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

A. Concentración de azúcares.

Determina el tiempo de la fase de multiplicación celular (crecimiento exponencial), de la fase estacionaria y de la fase de muerte. La concentración de azúcares debe mantenerse en niveles bajos para la multiplicación inicial de la levadura.

De 10 °Brix a 18 °Brix de concentración de azúcar es satisfactoria, en ocasiones se emplean concentraciones demasiado altas que inhiben el crecimiento de las levaduras (Betancourt, 2001)

Fajardo y Sarmiento (2007). Estudiaron el efecto de la adición del azúcar en la producción de alcohol para la obtención de licor en un proceso artesanal, las concentraciones de azúcares en el mosto se evaluaron por refractómetro, y el contenido de alcohol del licor por hidrometría. Los resultados in situ evidenciaron un efecto favorable de la elevación del contenido de azúcar (18 a 20 °Brix) para la fermentación.

B. pH

Es un factor importante en la fermentación, debido a su importancia en el control de la contaminación bacteriana como también el efecto en el crecimiento de las levaduras, en la velocidad de la fermentación y en el rendimiento de etanol con *Sacharomyces cerevisiae*

La reacción óptima para un proceso fermentativo con levaduras se debe realizar a un pH de 4,5 y 5,0. (Carpenter, 1988)

Según Gonzales R. (1978). La fermentación continúa satisfactoriamente cuando el pH del mosto ha sido ajustado entre 4 y 4.5. Este pH favorece a las levaduras y es lo suficientemente bajo para inhibir el desarrollo de muchos tipos de bacteria.

C. Temperatura.

Otro de los parámetros que habitualmente se mide en la fermentación alcohólica, es el control de temperatura siendo una determinación muy fácil de realizar, y que de manera indirecta determina la actividad de las levaduras, sirviendo además para predecir la posible parada de la fermentación por exceso de temperatura (Hidalgo, 2002)

La temperatura puede tener lugar en un rango de temperatura desde los 13°C-35°C. Las levaduras son microorganismos mesófilos.

Cuanto mayor sea la temperatura dentro del rango establecido mayor será la velocidad del proceso fermentativo siendo también mayor la proporción de productos secundarios.

Sin embargo, a menor temperatura es más fácil conseguir un mayor grado alcohólico, ya que a altas temperaturas hacen fermentar más rápido a las levaduras llegando a agotarlas antes. Gonzales R. (1978).

Las levaduras son menos resistentes a los cambios de temperatura que las bacterias ya que no aguantan temperaturas por debajo del punto de congelación. Siendo 20 - 30 °C el intervalo óptimo para su crecimiento. A los 45 - 47°C mueren, por lo que si las quiere eliminar de cualquier alimento o bebida basta calentarla a 50 – 60 ° C por 5 minutos. (Madrid *et al.*, 1994).

2.1.2.6 CINÉTICA DE FERMENTACIÓN

Los estudios cinéticos son necesarios para entender el comportamiento de cualquier fermentación y en general consiste en la medición o estimación de velocidades de síntesis celular, de la formación de producto y de los efectos del medio ambiente sobre estas velocidades (Illanes, 1986).

Las velocidades de formación de etanol y CO₂ están ligadas directamente al crecimiento de la levadura; de este modo, la cinética de formación de cada producto puede representarse en un cultivo discontinuo

La velocidad de reacción varía también con la temperatura. Para facilitar el estudio de los reactores microbianos, se admite frecuentemente que existe

una relación constante, para un sistema microorganismo-sustrato determinados, entre la velocidad de consumo de sustrato y la velocidad de producción metabólicos (Illanes, 1986)

Para seguir la cinética de fermentación alcohólica basta con medir periódicamente la concentración de azúcares del mosto, siendo el etanol el principal metabolito formado en este proceso

2.1.2.6.1 CINÉTICA DE CRECIMIENTO MICROBIANO

Cuando una pequeña cantidad de células vivas (inoculo) se añade a una solución de sustrato, en unas condiciones óptimas de temperatura y pH, se produce un proceso de crecimiento microbiano. Una curva típica de crecimiento microbiano en un reactor Batch y en un medio definido, se ilustra en la Figura 2.1 y puede desglosarse en las siguientes etapas:

A. Fase de adaptación

Inicialmente se produce un proceso de adaptación celular o fase de retraso en el que no hay crecimiento. Este periodo es tanto más largo cuanto más dispares son las nuevas condiciones en las que las células deben crecer respecto a las que tenían originalmente.

B. Fase de crecimiento exponencial.

Se produce una aceleración hasta producirse un crecimiento exponencial del número de células. Es una fase de crecimiento balanceado, debido a que todos los constituyentes celulares experimentan un incremento proporcional durante un mismo periodo de tiempo. (Izquierdo, 2004)

C. Fase estacionaria

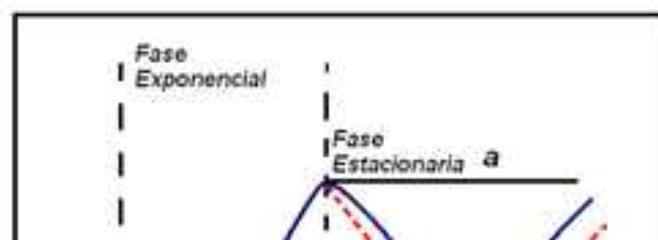
La fase estacionaria ocurre cuando las células han dejado de dividirse, o cuando las variables han alcanzado equilibrio con las células muertas. El crecimiento es nulo debido al agotamiento del substrato o de algún otro componente necesario para el crecimiento o debido a la acumulación de productos inhibidores tóxicos para las células. Si la presencia de la fase estacionaria se debe a la extinción del substrato, la dilución no altera la situación. Contrariamente, si el proceso es debido a la acumulación de una toxina, la dilución permitirá un posterior crecimiento.

Debido al agotamiento de los nutrientes y a la concentración de productos tóxicos, como resultados metabólicos la población no puede sustentarse por sí misma y la fase de muerte empieza. (Izquierdo, 2004)

D. Fase de muerte

Cuando la población microbiana haya alcanzado un tamaño determinado, el medio de cultivo será alterado ya sea por el agotamiento de alguno de los nutrientes, por la escasa disponibilidad de oxígeno en el caso de microorganismos aeróbicos, o por acumulación de productos tóxicos. (Sancho, 1980)

El número de células es probable que decaiga. Alternativamente, como la viabilidad decrece la lisis celular puede ocurrir, consecuentemente la masa celular caerá. (Izquierdo, 2004)



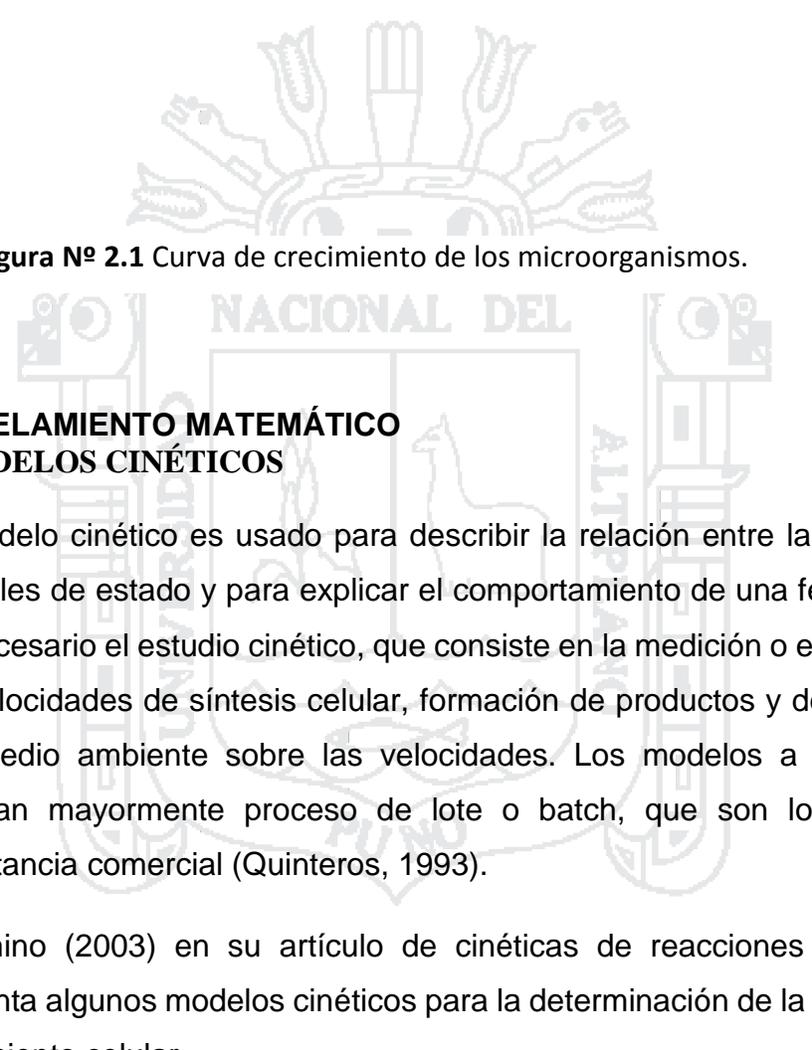


Figura Nº 2.1 Curva de crecimiento de los microorganismos.

2.1.3 MODELAMIENTO MATEMÁTICO

2.1.3.1 MODELOS CINÉTICOS

El modelo cinético es usado para describir la relación entre las principales variables de estado y para explicar el comportamiento de una fermentación. Es necesario el estudio cinético, que consiste en la medición o estimación de las velocidades de síntesis celular, formación de productos y de los efectos del medio ambiente sobre las velocidades. Los modelos a nivel celular abarcan mayormente proceso de lote o batch, que son los de mayor importancia comercial (Quinteros, 1993).

Palomino (2003) en su artículo de cinéticas de reacciones bioquímicas presenta algunos modelos cinéticos para la determinación de la velocidad de crecimiento celular.

Aquí alguna de ellas:

1. Modelo Cinético de Monod Linealizado:

$$\frac{1}{r_s'} X \frac{1}{\sim_{\max}} \Gamma \frac{1}{S} \frac{K_s}{\sim_{\max}} \quad (1)$$

2. Modelo Cinético de Tessier:

$$\frac{1}{\sim_{\max}} \frac{d\sim}{ds} X \frac{1}{K_s} 1 Z \frac{\sim}{\sim_{\max}} \quad (2)$$

3. Modelo Cinético de Moser:

$$\frac{1}{\sim} X \frac{1}{\sim_m} \Gamma \frac{k}{\sim_m} \Gamma \frac{1}{S^n} \quad (3)$$

4. Modelo de Haldane:

$$\sim X \frac{\sim_m S}{K_s \Gamma S \Gamma S^2 / K_1} \quad (4)$$

5. Modelo de inhibición competitiva de producto:

$$\sim X \frac{\sim_m S}{K_s 1 \Gamma \frac{S}{K_1} \Gamma S} \quad (5)$$

6. Modelo Cinético de Michaelis Menten:

$$r_s X \frac{r_{\max} S}{K_m \Gamma S} \quad (6)$$

2.1.3.1.1 MODELO DE MONOD

Cuando un nutriente ejerce una acción limitante sobre el crecimiento de la biomasa, por ejemplo el sustrato que actúa como fuente de carbono o nitrógeno, o la concentración de oxígeno u otro oxidante en el medio, la velocidad específica de crecimiento puede expresarse mediante la ecuación de Monod, de naturaleza similar a la expresión de Michaelis-Menten. (Gonzales J. 2005)

La velocidad de utilización del sustrato depende de la concentración del sustrato. Varios tipos de ecuaciones han sido propuestas para describir esta relación. Sin embargo, el modelo de Monod es simple y puede ser aplicado en la práctica.

Este modelo expresa que la tasa de crecimiento (μ) de un microorganismo es función de la concentración de un sustrato limitante (por lo general la fuente de carbono) cuando los demás se encuentran en concentraciones en exceso o por arriba de las necesidades del microorganismo, como se muestra en la siguiente ecuación (Wong et al., 2009)

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S}$$

Donde:

μ : velocidad de crecimiento h^{-1}

μ_{\max} : velocidad de crecimiento máximo

K_s : constante de saturación g/L

S : Concentración de sustrato limitante g/L

2.1.4 XPLORER GLX

El Xplorer GLX es un equipo de adquisición de datos, gráficos y análisis diseñada para investigación científica.

El Xplorer GLX, es un dispositivo electrónico que permite recolectar datos sobre fenómenos físico químico y biológico. Actúa como interface de comunicación entre los sensores y el usuario a través de una pantalla de cristal líquido permitiendo interacción mediante un teclado alfanumérico.

El Xplorer GLX admite hasta cuatro sensores PASPORT simultáneamente, además de dos sensores de temperatura y un sensor de tensión conectadas directamente a los puertos correspondientes. Opcionalmente, en los puertos USB del Xplorer GLX se puede conectar un ratón, un teclado o una impresora. El Xplorer GLX lleva un altavoz integrado para generar sonido y un puerto de salida de señal estéreo para conectar auriculares o altavoces amplificados. (Xplorer GLX, 2002)

2.1.4.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Toma datos directamente del medio a través de dispositivos electrónicos llamados sensores, los cuales convierten parámetros medibles en variaciones de voltaje. Es capaz de registrar 250,000 datos por segundo, para cada sensor. Permite trabajar con 8 sensores simultáneamente posee una memoria interna de almacenamiento de 11.5 MB, expandible mediante memoria USB externa puede conectarse a una PC, impresora, teclado y Mouse a través de un puerto USB posee una pantalla en escala de grises. El Xplorer GLX es un sistema informático de mano totalmente autónomo para las ciencias. (Xplorer GLX, 2002)

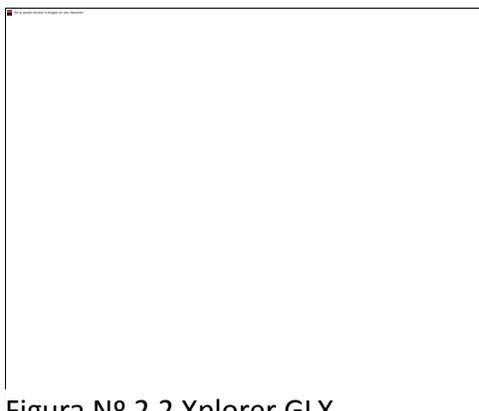


Figura N° 2.2 Xplorer GLX

2.1.4.2 SENSOR DE ETANOL

El sensor de etanol mide la concentración de etanol en un gas o indirectamente en un líquido.

La sonda de sensor contiene un material cuya resistencia disminuye en presencia de etanol. El sensor traduce esta resistencia en una concentración de etanol, medición que se registra y se muestra por el ordenador o Datalogger conectado. (PASCO, 2002)

El sensor de etanol es muy adecuado para grabación continua.



Figura Nº 2.3 Sensor de etanol

2.1.5 DESTILACIÓN

La destilación es una de las operaciones ampliamente empleada en la industria química, bien para separar distintos componentes de una corriente, o en la purificación de productos intermedios o finales.

La operación de destilación y rectificación busca separar el alcohol producido durante la fermentación de los otros compuestos presentes en el mosto, tales como aldehídos, ésteres y metanol que se presentan durante el proceso, así como los otros compuestos propios del mosto que no han sido asimilados por las levaduras, tales como azúcares residuales, sustancias nitrogenados, fosfatos y otros. (Vian y Ocon, 1991).

2.1.5.1 TIPOS DE DESTILACIÓN

A. DESTILACIÓN SIMPLE:

Se realiza en una única etapa, se parte de una mezcla de dos sustancias en la que sólo una de ellas es volátil, se pueden separar ambas mediante una destilación de 80 °C por lo menos. El componente más volátil se recogerá por condensación del vapor y el compuesto no volátil quedará en el matraz de destilación. (León, 2007)

B. DESTILACIÓN FRACCIONADA:

La destilación fraccionada o rectificación, incorpora una columna de fraccionamiento (o de rectificación) entre la disolución y el refrigerante, lo que equivale a realizar etapas consecutivas de destilación simple. (Pantoja, 2005)

C. DESTILACIÓN A VACIO

En el caso de la destilación a vacío, se trata de una destilación sencilla o fraccionada realizada a presión reducida; donde este hace que las temperaturas de ebullición sean más bajas, lo que permite separa sustancias con puntos de ebullición elevados y/o que pueden descomponerse a temperaturas elevadas (Pantoja, 2005)

2.1.6 ETANOL

El alcohol etílico o etanol cuya fórmula química es C_2H_5OH es un alcohol que se presenta como un líquido incoloro e inflamable con un punto de ebullición de 78°C. Es el componente activo de las bebidas alcohólicas. Se puede obtener a través de dos procesos de elaboración: la fermentación o descomposición de los azúcares contenidos en distintas frutas, y la destilación, consistente en la depuración de las bebidas fermentadas. (Morrison, 1992).

También se produce etanol por fermentación de productos naturales ricos en hidratos de carbono tales como la caña de azúcar, papa, yuca, maíz, arroz, trigo, bananas, otros cereales y productos con alto contenido de almidón. Los cultivos microbianos tales como las levaduras, operando en ausencia de aire (anaeróbica). Convierte los carbohidratos en una mezcla de etanol y CO₂. En el proceso las bacterias obtienen la energía necesaria para su crecimiento (Morrison, 1992).

2.1.6.1 GRADO ALCOHÓLICO

Es el porcentaje de alcohol en el producto, indica la pureza del producto, generalmente se reconoce como Grados Gay Lussac (°GL) cuando se expresa en porcentaje volumen/volumen. (García, 1990)

El grado alcohólico de una bebida se define como el tanto por ciento en volumen de alcohol etílico (etanol) contenido en la misma. Así el grado alcohólico de agua – etanol según (Pantoja, 2005) es la siguiente:

$$\text{Grado alcohólico} = \% \text{V. Etanol} = (\text{V etanol} / \text{V disolución}) * 100$$

El mercado del etanol puede subdividirse en tres, de acuerdo a sus destinos fundamentales como: combustible, uso industrial y bebidas. El uso como combustible representa el 61% de la producción mundial, ya sea para mezclar o reemplazar petróleo o derivados, alrededor del 23% se destina a la industria procesadora (cosméticos, farmacéutica, química, entre otros) y el 16% restante se destina a la industria de bebidas (Henry y Claire, 1998).

2.2 MARCO CONCEPTUAL

Sustrato

Sustancia sobre la que se ejerce la acción de un fermento.

Saccharomyces cerevisiae

Tipo de levadura unicelular produce la fermentación, aproximadamente el 95% de la fermentación de etanol se lleva a cabo mediante esta levadura.

Medios de cultivo

Desde el punto de vista de la fermentación, requieren encontrarse en un medio adecuado, tanto la temperatura y pH.

Fermentación:

Proceso anaeróbico realizado básicamente por las levaduras, mediante el cual el ácido pirúvico en ausencia de oxígeno puede convertirse en etanol.

Reactores discontinuos

Representa el crecimiento en un sistema cerrado puesto que no se añade medio nuevo al cultivo.

Fermentador

Es la de proporcionar un medio ambiente controlado que permita el crecimiento eficaz de las células y la formación del producto.

Cinética Química

Es el estudio de la velocidad de reacción química y de los distintos factores que influyen en ella.

Destilación

Es la operación de separar, mediante calor, los diferentes componentes líquidos de una mezcla fermentada (etanol/agua).

Modelo de Monod

El modelo matemático de Monod asume que la rapidez de asimilación del sustrato, y en consecuencia la rapidez de producción de biomasa, está limitada por la rapidez de reacción de las enzimas involucradas en el compuesto alimenticio que está en menor cantidad con respecto a sus necesidades.

Equipo Xplorer GLX

El primer Datalogger gráfico autónomo para ciencias que toma, analiza, anota, almacena datos rápidamente, sin ser conectado a un ordenador. O, conecta el Xplorer GLX al ordenador y “da rienda suelta” al poderoso software Data Studio en el laboratorio.

Sensor

Dispositivo electrónico que mide una cantidad física como puede ser temperatura, pH, presión, etanol, CO₂, etc.

Rendimientos de biomasa y de producto

Son parámetros muy importantes, ya que representa la eficacia de conversión del sustrato en biomasa y productos.

Diseño experimental

Basadas en la estadística son particularmente útiles en el mundo de la ingeniería en lo que toca en la mejora del rendimiento de los procesos de manufactura que se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores.

CAPÍTULO III

3 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

3.1 ÁMBITO DE ESTUDIO.

El presente trabajo de investigación se realizó en el Departamento de Puno – Perú, las pruebas experimentales se desarrollaron en laboratorios de la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, bajo las condiciones ambientales a una presión atmosférica de 486 mm Hg, a una altitud de 3828 m.s.n.m. y a una temperatura promedio de 15°C.

3.2 MATERIALES Y MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1 MATERIALES Y EQUIPOS

3.2.1.1 Materia experimental.

a) Materia prima

-) La materia prima a usar fue la cáscara de plátano (*Musa cavendishi*)

b) Insumos

-) Microorganismo (*Sachoromyces cerevisiae*)
-) Azúcar
-) Ácido cítrico
-) Agua destilada

3.2.1.2 Material de vidrio

-) Matraz erlenmeyer de 100 mL
-) Probeta de 500 mL

3.2.1.3 Equipos e instrumentos

-) Balanza de plato

-) Balanza analítica (Marca Mettler Toledo Made in Switzerland precisión +/- 0.0001)
-) Licuadora
-) Brixómetro
-) Termómetro
-) pH-metro (Marca Pen S96275A, Made in China)
-) Fermentador discontinuo capacidad de 4 litros (Batch)
-) Destilador
-) Equipo Xplorer GLX Marca PASCO PS-2002 Made in U.S.A.
-) Sensor de etanol Marca PASCO PS-2194 Made in U.S.A.

3.3 METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Basado en los trabajos de Carril y Cruz (1996), se tomaron las siguientes consideraciones para el procedimiento experimental.

3.3.1 Descripción de cada una de las etapas de la obtención de etanol de cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*)

A continuación se detalla la descripción de las operaciones unitarias para la obtención del etanol a partir de cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*), siguiendo el flujo grama que se muestra en la figura 3.1

A. MATERIA PRIMA

La materia prima con la que se trabajó fue cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*), procedente del departamento de Puno, provincia de Sandía. Que fue adquirido en el mercado de la ciudad de Puno.

B. SELECCIÓN

Se llevó a cabo de acuerdo a la calidad y al estado en que se encontraban las cáscaras de plátano a utilizar, se eliminaron aquella materia prima en mal estado; es importante señalar que la calidad de la materia prima es un factor importante para la obtención de la glucosa.

C. LAVADO

Se realizó el lavado con el fin de eliminar la suciedad, tierra, bacterias superficiales, moho y otros contaminantes como insecticidas y fertilizantes.

D. REDUCCIÓN DE TAMAÑO

El proceso de reducción de tamaño de la cáscara de plátano se realizó en la licuadora con la finalidad de debilitar las fibras y tener acceso a las moléculas de celulosa y almidón para obtener azúcares fermentables.

Se realizó la preparación del mosto licuando la cáscara de plátano y agua, para obtener una mezcla homogénea con el fin de facilitar el proceso de fermentación.

Esta operación hace que varíe el grado de azúcar y acidez por lo que es necesario corregirla.

E. CORRECCIÓN DEL MOSTO

La corrección del mosto se realizó con la finalidad de obtener parámetros óptimos como la concentración de azúcar ($^{\circ}$ Brix) y el pH, para que la fermentación se realice en buenas condiciones.

➤ Corrección del pH o acidez

El mosto de la cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*), que posee inicialmente un pH de 6.5 se corrige a un pH de 4, 4.5 y 5 agregando 3g, 3.5g y 4g de ácido cítrico respectivamente.

Esta corrección a la acidez del mosto se hace para evitar daños que otros organismos pudieran ocasionar.

➤ **Corrección de °Brix**

El mosto de la cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*), que posee inicialmente 5 °Brix se corrige a 16 °Brix agregando sacarosa como fuente de carbono suplementario

F. ACTIVACIÓN DE MICROORGANISMO *Saccharomyces cerevisiae*.

Para la fermentación alcohólica se utilizó levadura seca, que primero debe ser activada, con el siguiente procedimiento:

Se toma una proporción de 0,3% del peso total del mosto. Se disuelve 5.1 g de levadura, en 100 ml del mosto, luego es cubierto y dejado en reposo en un lugar para que estas se activen a una temperatura de 30°C por espacio de 10-15 minutos. La activación se notará por la formación de burbujas en la superficie.

G. INOCULACIÓN DE MICROORGANISMOS

Una vez activada la levadura se inocula al fermentador que contiene el mosto alcohólico corregido.

H. FERMENTACIÓN

Se agita el mosto alcohólico antes de iniciar la fermentación alcohólica para homogenizar luego se deja en reposo hasta obtener los resultados.

Una vez que el mosto alcohólico se encuentra como el producto a controlar, se hace un control de las siguientes variables temperatura (°C), pH,

concentración de azúcar ($^{\circ}$ Brix) y % de etanol con el equipo Xplorer Glx, se toman los datos para analizar la cinética de fermentación.

Para esta fermentación se utilizó un bio reactor de 4 L con los puertos necesarios para la toma de muestras.

I. FILTRACIÓN

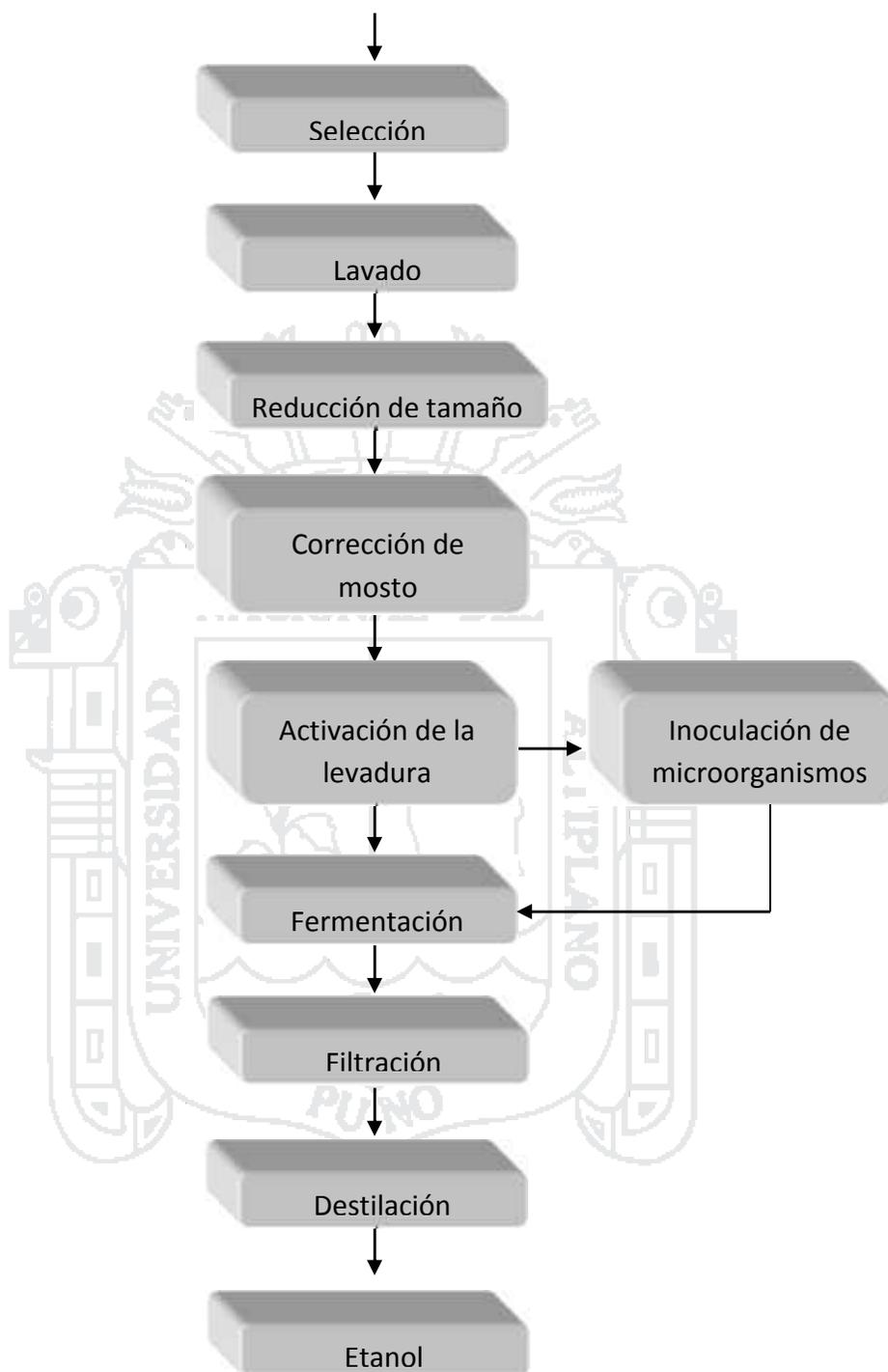
Transcurrida la fermentación alcohólica se procede a separar los sólidos; el descube se realiza por la parte superior del reactor, el cual será recibido en un recipiente. Dejamos en reposo el producto filtrado por un lapso de 24 horas para que éste pueda decantar y posteriormente pasar al proceso de destilación.

J. DESTILACIÓN

Esta operación se realizó para separar el alcohol producido por la fermentación de otros componentes menos volátiles y que no han sido asimilados por la levadura, realizando una destilación, por un tiempo de 45 a 50 min, de esta manera se obtuvo el porcentaje de etanol a 45°C .

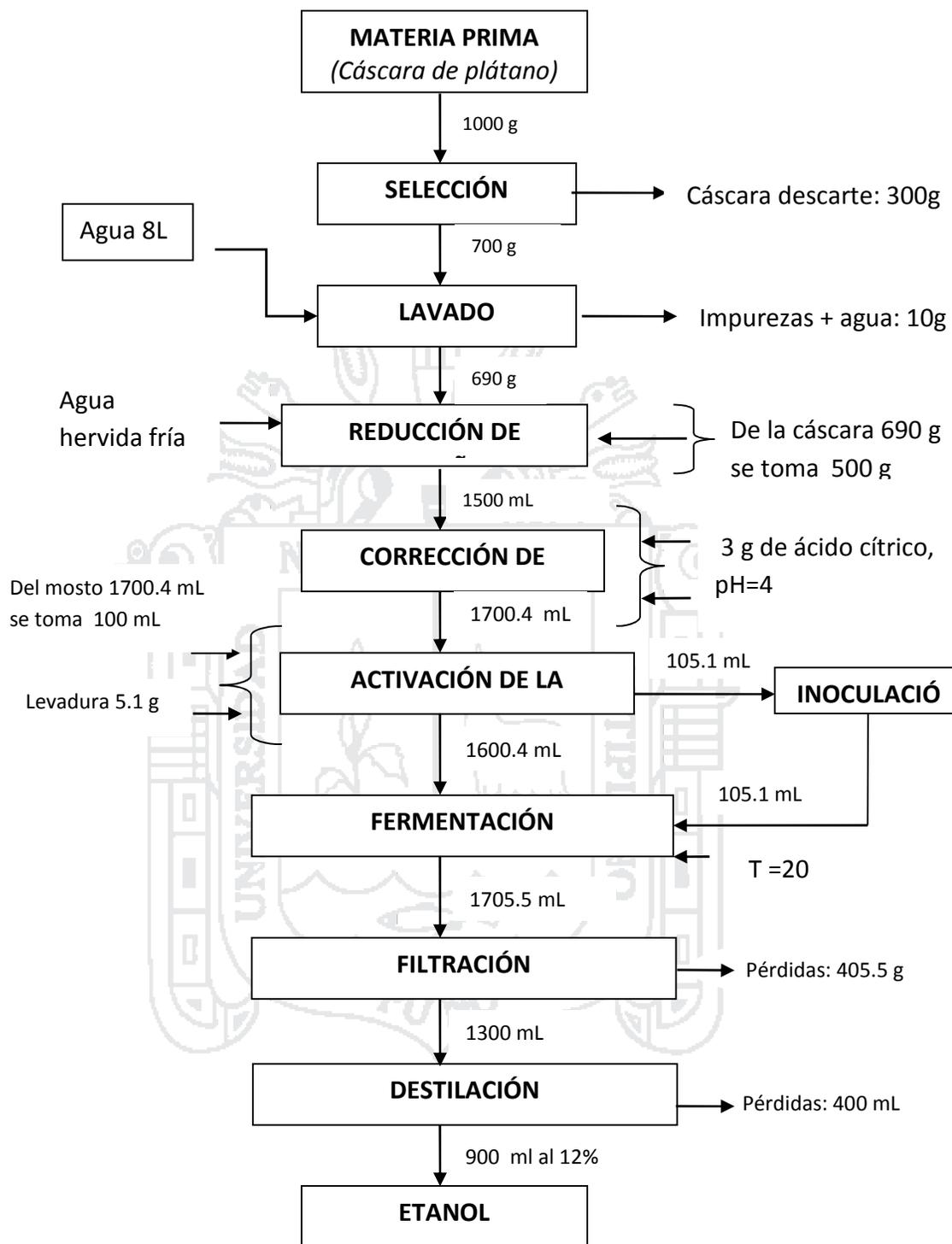
Figura N° 3.1 DIAGRAMA DE FLUJO CUALITATIVO PARA LA OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE CÁSCARA DE PLÁTANO.





Fuente: Elaboración propia

Figura Nº 3.2 DIAGRAMA DE FLUJO CUANTITATIVO PARA LA OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE CÁSCARA DE PLÁTANO.



Fuente: Elaboración propia

3.4 DISEÑO DEL PROCESO EXPERIMENTAL

Puede ser considerado como parte del proceso científico y una de las formas en que aprendemos acerca de la forma en que funcionan los sistemas o procesos. Por lo general, este aprendizaje se da a través de una serie de actividades en las cuales hacemos conjeturas sobre un proceso, realizamos experimentos para generar datos a partir del proceso, y entonces usamos la información del experimento para establecer nuevas suposiciones, que llevan a realizar nuevos experimentos, y así sucesivamente, comportándose cíclicamente

El diseño de la experimentación es un medio de importancia, el campo de la ingeniería que nos sirve para mejorar el rendimiento del proceso y aplicando a nuestra investigación esperando obtener lo siguiente:

3.4.1 PLANIFICACIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN

Al inicio del diseño estadístico de la experimentación, cuando todavía no se tiene un buen conocimiento del comportamiento del proceso, la lista de factores variables que pueden ser variables seleccionadas (temperatura, tiempo, pH). El objetivo principal será una primera etapa será la identificación de aquellas variables que tengan gran influencia en el proceso de fermentación.

Para esto el diseño de experimentos más adecuado corresponde al diseño factorial 2^k que permite evaluar las interacciones que resultan como consecuencia de las combinaciones de los factores.

3.4.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

DISEÑO FACTORIAL 2^k

Este diseño 2^k es de particular utilidad en la etapa inicial del trabajo experimental, este diseño proporciona el menor número de corridas con las que se puede estudiarse K factores en un diseño factorial completo, por consiguiente, estos diseños se usan ampliamente en los experimentos. Puesto que solo hay dos niveles para cada factor, se supone que la respuesta es aproximadamente lineal en el rango elegido para los niveles de los factores, este diseño de la serie 2^k es el que solo tiene dos factores, por ejemplo, A y B; cada uno se corre a dos niveles. A este diseño se le llama diseño factorial 2^2 , Los niveles de los factores pueden denominarse arbitrariamente “Bajo” y “Alto”. (Montgomery, 1991)

Diseño factorial a 2 niveles.

$$N = 2^K$$

Donde:

K = Número de variables o factores

N = Número total de experimentos

3.4.3 APLICACIÓN DEL DISEÑO FACTORIAL

Un experimento factorial puede ser de diferente cantidad de factores y cada factor clasificados en distintos niveles, siendo nuestro caso:

Con el propósito de analizar la influencia de las variables (pH, y Temperatura), frente al porcentaje de etanol, así como también el efecto que producen estos, se procedió a realizar un bloque de pruebas de acuerdo con un diseño experimental estadístico de segundo orden – diseño factorial

2² para dos factores o variables a dos niveles, con 6 corridas, incluido 2 puntos centrales.

El diseño experimental se llevará a cabo tomando en cuenta las siguientes variables.

Variables de la investigación:

➤ **Variables dependientes**

Rendimiento

➤ **Variables independientes**

A = pH

B = Temperatura

CUADRO 3.1 factores y niveles

FACTORES	NIVELES	
	Mínimos	Máximos
A: pH	4	5
B: Temperatura	20	30

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 3.2 Experimento factorial con dos factores, dos niveles, dos puntos centrales: Fermentación alcohólica

N° de pruebas	pH	Temperatura (°C)	Rendimiento %
1	4.0	20	
2	4.0	30	
3	5.0	20	
4	5.0	30	
5*	4.5	25	
6*	4.5	25	

Fuente: Elaboración propia

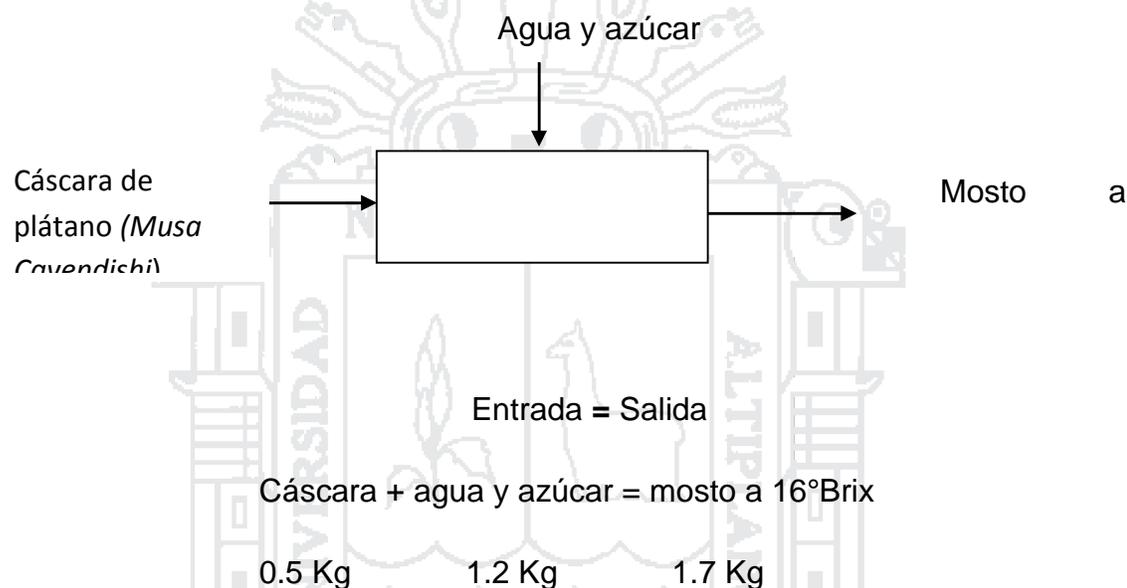
(*) Puntos centrales

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 BALANCE DE MATERIA EN EL PROCESO DE FERMENTACIÓN

La cantidad de mosto que ingresa a 16°Brix se obtuvo del balance en el fermentador.



La proporción de materia prima a usar para obtener 1.7 kg de mosto a 16° brix es la siguiente:

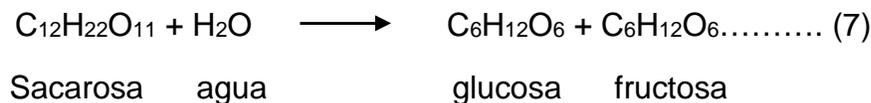
Cáscara: 500 g

Azúcar: 200g

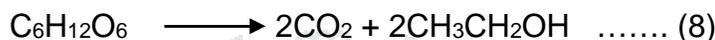
Agua: 1000 mL

Tomando en cuenta la densidad del agua a 15°C (999.19 Kg/m³) se tiene un peso de 1000 g de agua

Para obtener alcohol etílico a partir del mosto a 16°Brix, se llevó a cabo las siguientes reacciones:



La sacarosa se hidroliza con la enzima invertasa que se encuentra en la levadura para formar D-glucosa y D- fructosa en cantidades iguales para luego ser fermentados. (Fiezer, 1985)



Según la reacción 1 mol de glucosa produce 2 moles de etanol y 2 moles de CO₂

Esta ecuación se da a conocer en la sección 2.1.2.1 fermentación alcohólica (Burgeois, 1995)

Entonces 1 mol de glucosa produce 2 moles de etanol y 2 moles de CO₂

4.2 BALANCE DE ENERGÍA DEL ETANOL EN EL FERMENTADOR

Para obtener el balance de energía en la reacción de fermentación partimos de la ecuación



Entalpias estándar de formación de la glucosa, etanol y CO₂

Glucosa C₆H₁₂O₆ = H₁ = -2815 kJ / mol

Etanol C₂H₅OH = H₂ = -1372 kJ / mol

Dióxido de carbón CO₂ = H₃ = -393.5 kJ / mol

De la reacción de fermentación



Entalpia de fermentación

$$H^\circ = (2 \text{ H}_2 + 2 \text{ H}_3) - 1 \text{ H}_1$$

$$H^{\circ} = (2 (-1372 \text{ kJ}) + 2 (-393.5 \text{ kJ})) - 1 (-2815 \text{ kJ})$$

$$H^{\circ} = -716 \text{ kJ}$$

Al resultar la entalpía negativa nos está indicando que es una reacción exotérmica a condiciones estándar.

$$H = H^{\circ} + H_{Rx}$$

$$H_{Rx} = Q$$

Calor requerido Según Perry's (1999)

$$Q = mC_p \Delta T$$

$$H_{Rx} = Q = mC_p \Delta T$$

$$Q = mC_p (T_f - T_i)$$

Temperatura de trabajo:

$$T_1 = 20^{\circ}\text{C} = 293^{\circ}\text{K}$$

$$T_2 = 30^{\circ}\text{C} = 303^{\circ}\text{K}$$

La capacidad calorífica específica del sustrato a 16° Brix es:

$$C_p = 3.7772 \text{ KJ/Kg-K} \quad \text{Fuente: (Singh Y Heldman, 2009).}$$

$$Q = mC_p (T_f - T_i)$$

$$Q = (1.7 \text{ kg}) (3.772 \text{ KJ/Kg -K}) (303^{\circ}\text{K} - 293^{\circ}\text{K})$$

$$Q = 64.124 \text{ KJ}$$

$$H = H^{\circ} + H_{Rx}$$

$$H = -716 \text{ kJ} + 64.124 \text{ KJ}$$

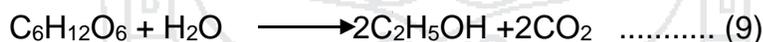
$$H = - 651.876 \text{ KJ}$$

Entalpía resultante negativa igual a -651.876 KJ nos está indicando que es una reacción exotérmica.

Se realizó este balance de energía para saber el calor que se genera o no en el fermentador ya que el resultado nos indica que es una reacción exotérmica este tiende a generar calor , fue por ello que en el proceso de fermentación se utilizó un reactor de 4 litros en donde se hizo la fermentación y como fuente de calor se construyó un sistema tipo incubadora con un dimer para regular la temperatura y obtener una temperatura adecuada entre 20°C y 30°C para que los microorganismos tengan un buen rendimiento y puedan generar el etanol deseado.

4.3 RENDIMIENTO Y CONCENTRACIÓN EN LA FERMENTACIÓN

Para hallar el rendimiento de la fermentación frente a valores teóricos partimos de la siguiente ecuación:



$$PM (C_6H_{12}O_6) = 180 \text{ g}$$

$$PM (C_2H_5OH) = 46 \text{ g}$$

Gramos de glucosa en 1.7 Kg de mosto a 16° Brix:

$$1700g \text{ de mosto} * \frac{16g \text{ azúcar}}{100g \text{ mosto}} = 272g \text{ de glucosa}$$

PLANTEAMIENTO:

Según la reacción

180 g de glucosa \longrightarrow * 46 g de alcohol

272 g de azúcar \longrightarrow X g de alcohol

X = 139 g de alcohol a 100%

Para poder hallar el porcentaje en mililitros y posterior rendimiento usamos la tabla de densidades a 20° C

Densidad de alcohol al 100% de pureza = 0.78934 g/ml

139 g de alcohol * $\frac{1\text{mL}}{0.7893\text{g}}$ = 176 ml de alcohol al 100%

Valor teórico obtenido de 1700 g de sustrato a 16 °Brix = 176 ml de alcohol al 100%

Rendimiento del etanol obtenido en la experimentación

Para la 1^{ra} Prueba: Con 500 g de cáscara de plátano a una concentración de 16 °Brix inicial y una concentración final de 4.8 °Brix, con un pH inicial de 4 a una temperatura de 20°C y con un tiempo de fermentación de 80 horas; el alcohol obtenido fue de 800 mL con una concentración de 12 %

Para hallar el rendimiento

Una solución de 800 ml de etanol y agua a 12% tiene

800 ml \longrightarrow 100%

X \longrightarrow 12% de etanol

X= 96 mL de etanol al 100%

De la ecuación de rendimiento

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{valor real}}{\text{valor teorico}} * 100$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{96 \text{ mL}}{176 \text{ mL}} * 100$$

$$\text{Rendimiento} = 54.5\%$$

El rendimiento práctico es del 54.5% del rendimiento teórico

La exposición de los resultados se encuentra en el cuadro 4.1 Rendimiento y concentración del etanol obtenido en la fermentación.

CUADRO 4.1 Rendimiento y concentración del etanol obtenido en la fermentación

N° pruebas	pH	Temperatura (°C)	Rendimiento (%)	Volumen de etanol (ml)	Concentración de alcohol (alcoholímetro) (%)
1	4.0	20.0	54.5	800	12.0
2	5.0	20.0	50.0	800	11.0
3	4.0	30.0	65.7	890	13.0
4	5.0	30.0	61.3	900	12.0
5	4.5	25.0	64.8	950	12.0
6	4.5	25.0	67.4	950	12.5

Fuente: Elaboración propia.

4.4 CINÉTICA DE FERMENTACIÓN

En el proceso de fermentación se han evaluado varios parámetros que sirvieron como punto de referencia para realizar la fermentación a mayor escala. En primer lugar se determinó los parámetros fisicoquímicos en el proceso de fermentación como son pH, concentración de azúcar (°Brix), temperatura y tiempo.

Para la evaluación de parámetros cinéticos con el modelo matemático de Monod se adecuó la cinética de fermentación de cáscara de plátano a la ecuación de Monod mediante la linealización de Lineaweaver – Burk que es una ecuación de tipo: $y=mx+b$, que grafica los recíprocos de ambos lados de la expresión. (Wong et al 2009)

MODELO CINÉTICO DE MONOD

$$\mu_{max} \frac{S}{K_s + S} \dots\dots\dots (10)$$

Donde:

μ: velocidad específica de crecimiento h⁻¹

μmax: velocidad máxima de crecimiento h⁻¹

Ks: constante de saturación g/L

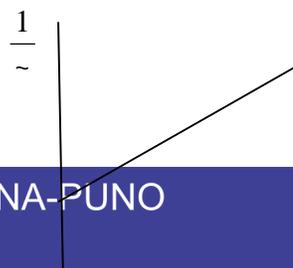
S: Concentración de sustrato limitante g/L

LINEALIZACIÓN DEL MODELO DE MONOD LINEWEAVER-BURK

La ecuación de Monod se puede linealizar tomando los recíprocos correspondientes. La ecuación resultante de la linealización es la siguiente:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_{max}} + \frac{K_s}{\mu_{max}} \frac{1}{S}$$

Una gráfica de 1/μ contra 1/S produce una línea recta con pendiente Ks/μmáx,



$$\frac{1/\mu_{\max}}{m=K_s/\mu_{\max}} = \frac{1}{S}$$

$$\sim X \frac{1}{S} \frac{dS}{dt}$$

$$\sim X \frac{1}{S} * \frac{S - Z}{t - Z} \frac{S_0}{t_0}$$

CUADRO 4.2 Resultados experimentales del análisis para la 1^{ra} Prueba
(20°C y pH 4)

t (horas)	S (° Brix)	ds/dt	μ	1/S	1/μ
0	16	0.1833	0.0115	0.0625	87.289
6	14.9	0.1667	0.0112	0.0671	89.382
15	13.4	0.1345	0.0100	0.0746	99.628
44	9.5	0.0750	0.0079	0.1053	126.667
56	8.6	0.2250	0.0000		
72	5	0.0250	0.0050	0.2000	200.000
80	4.8	0.0656	0.0000		

Fuente: Elaboración propia (en base a ficha de observación C1, ver anexo C)

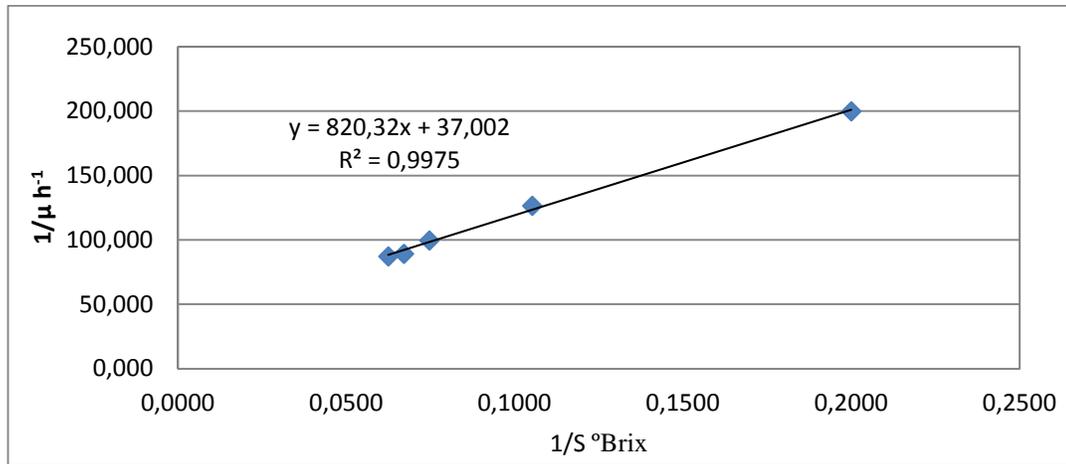


GRAFICO 4.1 Correlación lineal velocidad de crecimiento vs concentración de sustrato para la 1^{ra} Prueba (20°C y pH 4)

Fuente: Elaboración propia

Del gráfico se obtuvo:

Pendiente=820.32

Intercepto =37.002

De donde se obtuvieron las constantes cinéticas.

$$\tilde{\mu}_{\max} \frac{1}{\text{intercepto}}, \quad K_s \text{ X Pendiente}^* \tilde{\mu}_{\max}$$

$$\mu_{\max}=0.027 \text{ h}^{-1}, \quad K_s=22.170 \text{ g/L}$$

$$\tilde{\mu} \sim X \frac{\tilde{\mu}_{\max} S}{K_s \Gamma S}; \quad \tilde{\mu} \sim X \frac{0.027 S}{22.170 \Gamma S}$$

Hallando la forma lineal de la ecuación del modelo de Monod separamos las variables $\tilde{\mu}$ y S

$$\mu (22.170 + S) = 0.027 * S$$

Obteniendo el recíproco $\frac{1}{\sim (22.170\Gamma S)} \times \frac{1}{0.027 * S}$

$$\frac{1}{\sim} \times \frac{22.170\Gamma S}{0.027 * S}$$

$$\frac{1}{\sim} \times \frac{22.170}{0.027 * S} \Gamma \frac{S}{0.027 * S}$$

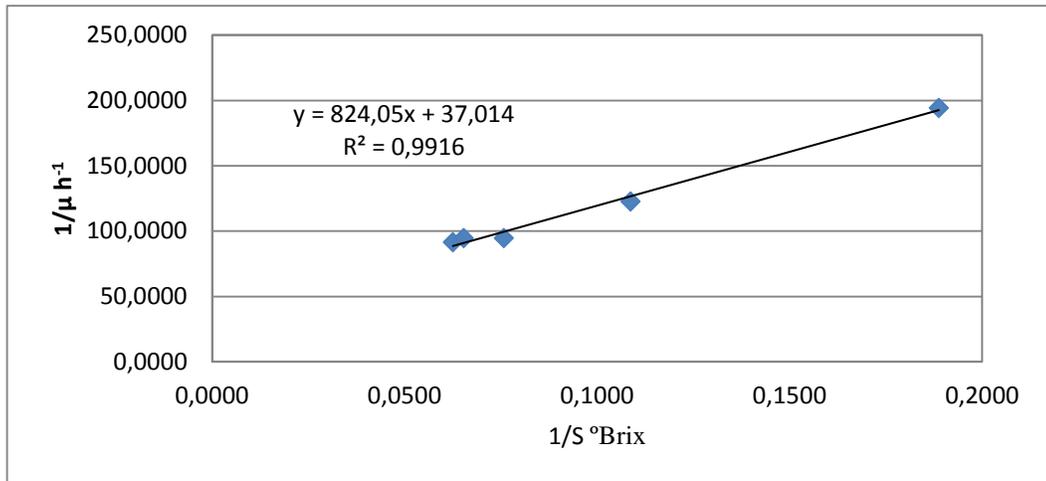
$$\frac{1}{\sim} \times \frac{22.170}{0.027} * \frac{1}{S} \Gamma \frac{1}{0.027}$$

Del gráfico 4.1: Para la 1^{ra} prueba con 500 g de cáscara de plátano a 16°Brix, 20 °C y pH 4 se observó que durante la fermentación la velocidad de crecimiento va aumentando conforme disminuye la concentración de sustrato ya que es ajustado a la linealización del modelo de Monod, obteniéndose una correlación de 99.75%; donde la velocidad máxima de crecimiento es de $\mu_{max}=0.027 \text{ h}^{-1}$ y la constante de reacción es $K_s=22.170 \text{ g/L}$; esto nos muestra que para una concentración inicial de sustrato, la velocidad es aceptable.

CUADRO 4.3 Resultados experimentales del análisis para la 2^{da} Prueba (20°C y pH 5)

t (horas)	S (° Brix)	ds/dt	μ	1/S	1/ μ
0	16	0.1750	0.0109	0.0625	91.4286
4	15.3	0.1615	0.0106	0.0654	94.7143
17	13.2	0.1429	0.0106	0.0758	94.7692
45	9.2	0.0750	0.0082	0.1087	122.6667
53	8.6	0.1737	0.0000		
72	5.3	0.0273	0.0051	0.1887	194.3333
83	5	-0.0624	0.0000		

Fuente: Elaboración propia (en base a ficha de observación C2, ver anexo C)



Fuente: Elaboracion propia

GRAFICO 4.2 Correlación lineal velocidad de crecimiento de biomasa vs concentración de sustrato 1/u vs 1/S, para la 2^{da} Prueba (20°C y pH 5)

Del gráfico se obtuvo:

Pendiente=824.05

intercepto =37.014

De donde se obtuvieron las constantes cinéticas.

$$\tilde{X}_{\max} \frac{1}{\text{intercepto}}, \quad K_s \times \text{Pendiente} * \tilde{X}_{\max}$$

$$\mu_{\max}=0.0270 \text{ h}^{-1}, \quad K_s=22.263 \text{ g/l}$$

$$\tilde{X} \frac{\tilde{X}_{\max} S}{K_s \Gamma S}$$

$$\tilde{X} \frac{0.0270 S}{22.263 \Gamma S}$$

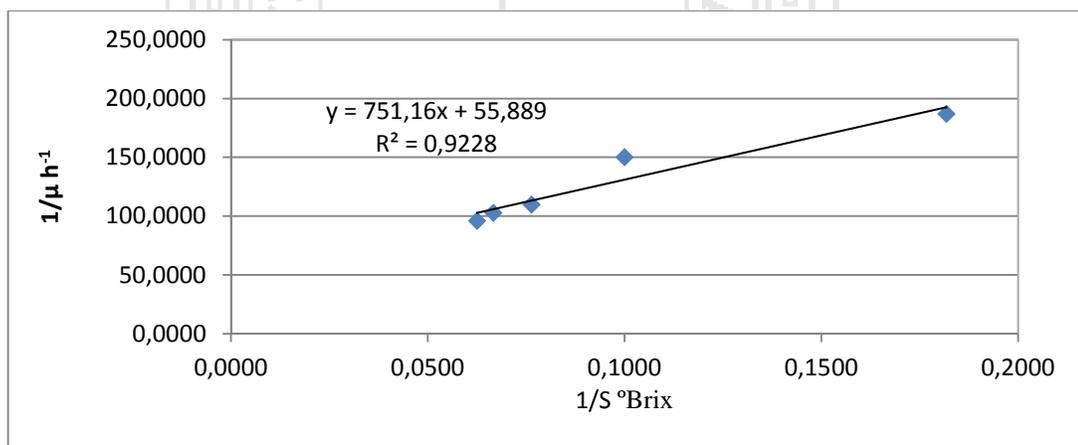
Del gráfico 4.2 Para la 2^{da} prueba con 500 g de cáscara de plátano a 16°Brix, 20 °C y pH 5 se observó que durante la fermentación la velocidad de

crecimiento va aumentando conforme disminuye la concentración de sustrato ya que es ajustado a la linealización del modelo de Monod, obteniéndose una correlación de 99.16%; donde la velocidad máxima de crecimiento es de $\mu_{max}=0.0270 \text{ h}^{-1}$ y la constante de reacción es $K_s=22.263 \text{ g/L}$; esto nos muestra que para una concentración inicial de sustrato, la velocidad es aceptable.

CUADRO 4.4 Resultados experimentales del análisis para la 3^{ra} Prueba (30°C y pH 4)

t (horas)	S (° Brix)	ds/dt	μ	1/S	1/ μ
0	16.0	0.1667	0.0104	0.0625	96.0000
6	15.0	0.1462	0.0097	0.0667	102.6316
19	13.1	0.1192	0.0091	0.0763	109.8710
45	10.0	0.0667	0.0067	0.1000	150.0000
57	9.2	0.3083	0.0000		
69	5.5	0.0294	0.0053	0.1818	187.0000
86	5.0	0.1279	0.0000		

Fuente: Elaboracion propia (en base a ficha de observación C3, ver anexo C)



Fuente: Elaboracion propia

GRAFICO 4.3 Correlación lineal velocidad de crecimiento de biomasa vs concentración de sustrato, para la 3^{ra} Prueba (30°C y pH 4)

Del gráfico se obtuvo:

Pendiente=751.16,

intercepto =55.889

De donde se obtuvieron las constantes cinéticas.

$$\mu_{\max} X \frac{1}{\text{intercepto}} , K_S X \text{Pendiente} * \mu_{\max}$$

$$\mu_{\max}=0.0179 \text{ h}^{-1} , K_S=13.440 \text{ g/l}$$

$$\mu_{\max} X \frac{S}{K_S + S}$$

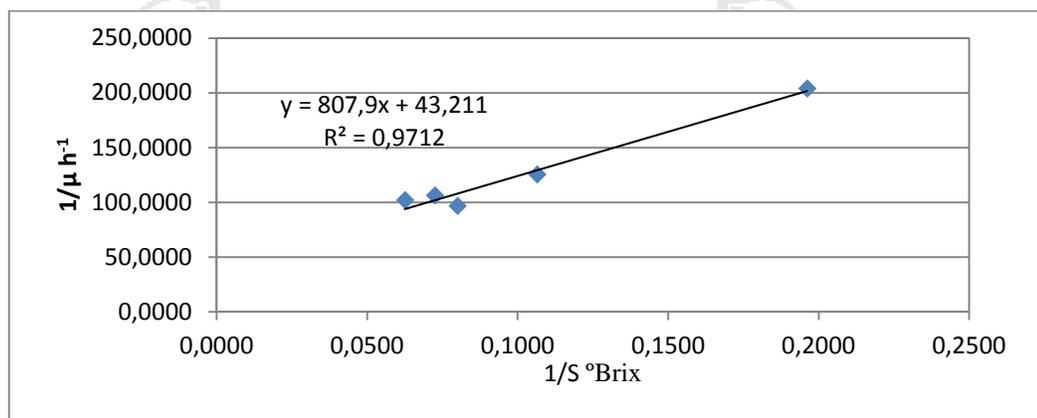
$$\mu_{\max} X \frac{0.0287 S}{23.449 + S}$$

Del gráfico 4.3 Para la 3^{ra} prueba con 500 g de cáscara de plátano a 16°Brix, 30 °C y pH 4 se observó que durante la fermentación la velocidad de crecimiento va aumentando conforme disminuye la concentración de sustrato ya que es ajustado a la linealización del modelo de Monod, obteniéndose una correlación de 92.28%; donde la velocidad máxima de crecimiento es de $\mu_{\max}=0.0179 \text{ h}^{-1}$ y la constante de reacción es $K_S=13.440 \text{ g/L}$; esto nos muestra que para una concentración inicial de sustrato, la velocidad es aceptable

CUADRO 4.5 Resultados experimentales del análisis para la 4^{ta} Prueba (30°C y pH 5)

t (horas)	S (° Brix)	ds/dt	μ	1/S	1/μ
0	16	0.1571	0.0098	0.0625	101.8182
14	13.8	0.1300	0.0094	0.0725	106.1538
24	12.5	0.1292	0.0103	0.0800	96.7742
48	9.4	0.0750	0.0080	0.1064	125.3333
56	8.8	0.2313	0.0000		
72	5.1	-0.0250	0.0049	0.1961	204.0000
80	4.9	-0.0613	0.0000		

Fuente: Elaboracion propia (en base a ficha de observación C4, ver anexo C)



Fuente: Elaboracion propia

GRAFICO 4.4 Correlación lineal velocidad de crecimiento de biomasa vs concentración de sustrato para la 4^{ta} Prueba (30°C y pH 5)

Del gráfico se obtuvo:

Pendiente=807.9

intercepto =43.211

De donde se obtuvieron las constantes cinéticas:

$$\mu_{\max} X \frac{1}{S_{\text{int excepto}}} , K_s X \text{Pendiente} * \mu_{\max}$$

$$\mu_{\max}=0.0231 \text{ h}^{-1} , K_s=18.697 \text{ g/l}$$

$$\mu_{\max} X \frac{S}{K_s + S}$$

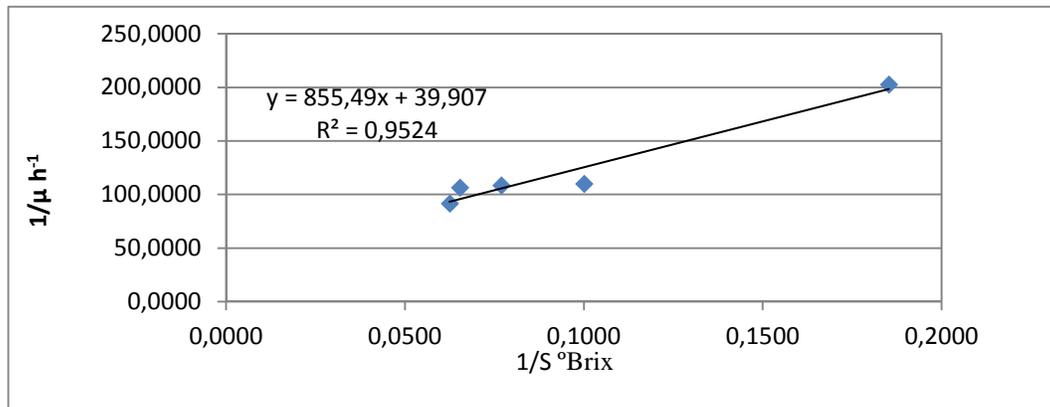
$$\mu_{\max} X \frac{0.0231 S}{18.697 + S}$$

Del gráfico 4.4 Para la 4^{ta} prueba con 500 g de cáscara de plátano a 16°Brix, 30 °C y pH 5 se observó que durante la fermentación la velocidad de crecimiento va aumentando conforme disminuye la concentración de sustrato ya que es ajustado a la linealización del modelo de Monod, obteniéndose una correlación de 97.12%; donde la velocidad máxima de crecimiento es de $\mu_{\max}=0.0231 \text{ h}^{-1}$ y la constante de reacción es $K_s=18.697 \text{ g/L}$; esto nos muestra que para una concentración inicial de sustrato, la velocidad es aceptable.

CUADRO 4.6 Resultados experimentales del análisis para la 5^{ta} Prueba (25°C y pH 4.5)

t (horas)	S ° Brix	ds/dt	μ	1/S	1/ μ
0	16	0.1750	0.0109	0.0625	91.4286
4	15.3	0.1438	0.0094	0.0654	106.4348
20	13	0.1200	0.0092	0.0769	108.3333
45	10	0.0909	0.0091	0.1000	110.0000
56	9	0.2571	0.0000		
70	5.4	0.0267	0.0049	0.1852	202.5000
85	5	0.0804	0.0000		

Fuente: Elaboración propia (en base a ficha de observación C5, ver anexo C)



Fuente: Elaboración propia

GRAFICO 4.5 Correlación lineal velocidad de crecimiento de biomasa vs concentración de sustrato para la 5^{ta} Prueba (25°C y pH 4.5)

Del gráfico se obtuvo:

Pendiente=855.49,

intercepto =39.907

De donde se obtuvieron las constantes cinéticas.

$$\mu_{\max} \times \frac{1}{\text{intercepto}} , K_s \times \text{Pendiente} \times \mu_{\max}$$

$$\mu_{\max}=0.0250 \text{ h}^{-1} , K_s=21.437 \text{ g/l}$$

$$\sim X \frac{\mu_{\max} S}{K_s \Gamma S}$$

$$\sim X \frac{0.0250 S}{21.437 \Gamma S}$$

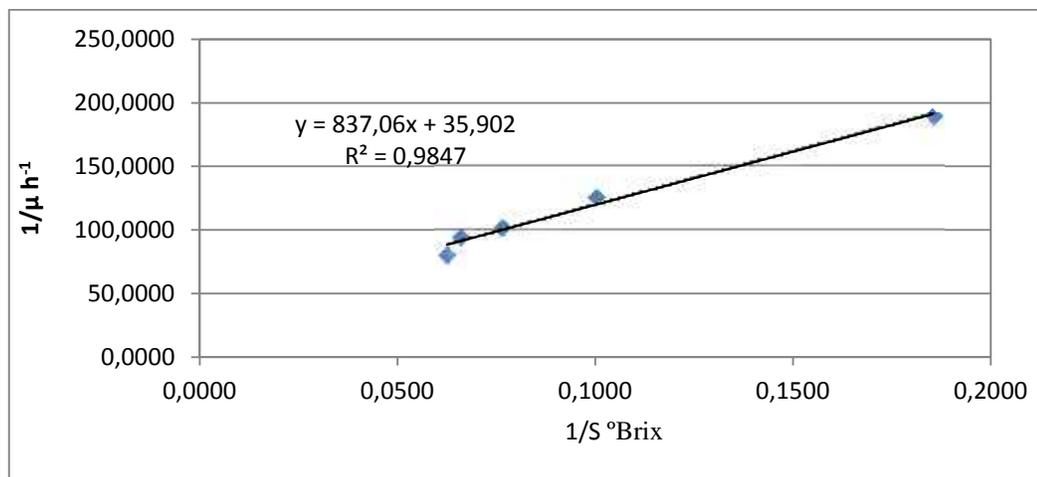
Del gráfico 4.5 Para la 5^{ta} prueba con 500 g de cáscara de plátano a 16°Brix, 25 °C y pH 4.5 se observó que durante la fermentación la velocidad de crecimiento va aumentando conforme disminuye la concentración de sustrato ya que es ajustado a la linealización del modelo de Monod, obteniéndose una correlación de 95.24%; donde la velocidad máxima de crecimiento es $\mu_{\max}=0.0250 \text{ h}^{-1}$ y la constante de reacción es $K_s=21.437\text{g/L}$; esto nos muestra que para una concentración inicial de sustrato, la velocidad es aceptable.

CUADRO 4.7 Resultados experimentales del análisis para la 6^{ta} Prueba (25°C y pH 4.5)

t (horas)	S (° Brix)	ds/dt	μ	1/S	1/ μ
0	16	0.2000	0.0125	0.0625	80.0000
4	15.2	0.1615	0.0106	0.0658	94.0952
17	13.1	0.1292	0.0099	0.0763	101.4194
41	10.0	0.0800	0.0080	0.1000	125.0000
66	8.0	0.5200	0.0000		
71	5.4	0.0286	0.0053	0.1852	189.0000
85	5.0	0.1007	0.0000		

Fuente: Elaboración propia (en base a ficha de observación C6, ver anexo

C)



Fuente: Elaboracion propia

GRAFICO 4.6 Correlación lineal velocidad de crecimiento de biomasa vs concentración de sustrato para la 6^{ta} Prueba (25°C y pH 4.5)

Del gráfico se obtuvo:

Pendiente = 837.06,

intercepto = 35.902

De donde se obtuvieron las constantes cinéticas.

$$\tilde{X}_{\max} \frac{1}{\text{intercepto}}, \quad K_s \times \text{Pendiente} * \tilde{X}_{\max}$$

$$\mu_{\max} = 0.0278 \text{ h}^{-1}, \quad K_s = 23.315 \text{ g/l}$$

$$\tilde{X} \sim \frac{\tilde{X}_{\max} S}{K_s \Gamma S}$$

$$\tilde{X} \sim \frac{0.0278 S}{23.315 \Gamma S}$$

Del gráfico 4.6 Para la 6^{ta} prueba con 500 g de cáscara de plátano a 16°Brix, 25 °C y pH 4.5 se observó que durante la fermentación la velocidad de crecimiento va aumentando conforme disminuye la concentración de sustrato ya que es ajustado a la linealización del modelo de Monod, obteniéndose una correlación de 98.47%; donde la velocidad máxima de crecimiento es $\mu_{\max}=0.0278 \text{ h}^{-1}$ y la constante de reacción es $K_s=23.315 \text{ g/L}$; esto nos muestra que para una concentración inicial de sustrato, la velocidad es aceptable.

4.5 RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS EN LA EXPERIMENTACIÓN

CUADRO 4.8 Resumen de parámetros cinéticos de fermentación de cáscara de plátano a una concentración inicial de 16 ° brix.

N°	pH	Temperatura (° C)	Cinética		Rendimiento (%)
			$\mu_{\max} \text{ (h}^{-1}\text{)}$	$K_s \text{ g/L}$	
1	4	20	0.0270	22.170	54.5
2	5	20	0.0270	22.263	50.0
3	4	30	0.0179	13.440	65.7
4	5	30	0.0231	18.697	61.3
5	4.5	25	0.0250	21.437	64.8
6	4.5	25	0.0278	23.315	67.4

Fuente: Elaboración propia.

Se determinaron las constantes μ_{\max} (h^{-1}) y K_s (g/L) en base a los resultados experimentales para hallar el valor de estos coeficientes de la ecuación Monod, se toma la pendiente de la línea recta resultante de la linealización de la ecuación de Monod al graficar $1/u$ VS $1/S$, para ello fue necesario hallar el valor de μ en función al tiempo en el programa Excel. Se observa que el **mejor resultado** fue de la muestra N°6 con 500g de cáscara de plátano y una concentración inicial de 16°brix a un pH de 4.5, a una temperatura de 25°C, con un tiempo de fermentación de 85 horas.

Resultados similares han sido señalados por otros autores, Ramírez y Molina (2005). En la Evaluación de parámetros cinéticos para la *Sacharomyces cerevisiae* utilizando agua de coco como sustrato, obtuvieron parámetros cinéticos, de velocidad máxima de crecimiento $\mu_{\max} = 0,038 \text{ h}^{-1}$, y constante de saturación $K_s = 1,35 \text{ g/L}$, a una temperatura de 28°C y pH 4,5.

Farah Ahmad (2011) en el Estudio de la cinética de crecimiento y el modelado de etanol producción por *Saccharomyces cerevisiae* obtuvo parámetros cinéticos a 72 h de fermentación $\mu_{\max} = 0.084 \text{ h}^{-1}$ y $K_s = 23,6 \text{ g/L}$

Sillo Castillo (2010). En la investigación denominado “Cinética de reacción en la obtención de bioetanol a partir de residuos de producción de zumo de frutas” obtuvo parámetros cinéticos $\mu_{\max} = 0.0344\text{h}^{-1}$, $K_s = 31.422 \text{ g/L}$ esto debido a que en su investigación utilizo como sustrato residuos de fruta de naranja y mandarina (cáscara y pulpa)

Cutimbo Quispe (2004). En la “Optimización de fermentación alcohólica de frutas en estado extremal de maduración”, determinando los parámetros del modelo de Monod, $\mu_{\max} = 0.2179$ y $K_s = 22.3554$ para lo cual uso frutas próximas a iniciar su descomposición, sometiéndolo a fermentación (papaya, piña, plátano y manzana)

CUADRO 4.9 Porcentaje de etanol obtenido durante la fermentación de cáscara de plátano en el equipo Xplorer GLX a una concentración inicial de 16 ° brix.

N°	pH	Temperatura (° C)	Etanol en Xplorer GLX (%)
1	4	20	13.00
2	5	20	12.00
3	4	30	13.04
4	5	30	13.06
5	4.5	25	13.00
6	4.5	25	13.10

Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje de etanol en el equipo Xplorer GLX es parecido a los resultados obtenidos en el alcoholímetro. Se observó que el **mejor resultado** fue de la muestra N°6 con 500g de cáscara de plátano y una concentración inicial de 16°brix a un pH de 4.5, a una temperatura de 25°C, con un tiempo de fermentación de 85 horas.

Estos resultados fueron comparados con el trabajo de investigación de Roque y Cabanillas (2008), que obtuvieron etanol a partir de cáscara de arroz, con una concentración de alcohol del 7% a las 48 horas de fermentación, un rendimiento de 25 litros de alcohol (etanol) de 96° G.L. a partir de 100.00 Kg. de cáscaras de arroz.

Carril y Cruz. (1996). Obtuvieron alcohol de diferentes variedades de plátano con un aproximado de 8,5 % del alcohol en volumen y 3 °Brix, a los cinco días de fermentación con un pH 4,5 y 16,5 °Brix.

Morales Esther, et. al. (2007). Obtuvo un rendimiento de 44.8% de etanol a partir de jugo y cáscara de naranja a las 168 h, a una temperatura de 25°C y a un pH de 3.5

4.6 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA FERMENTACIÓN DE CÁSCARA DE PLÁTANO

Para esta parte de la investigación se utilizó el paquete estadístico Statgraphics, de acorde al planteamiento experimental que se realizó para un diseño factorial.

$$N \times f_2^k A$$

4.6.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se efectuó el análisis de acuerdo al diseño experimental propuesto, de acuerdo al siguiente cuadro:

CUADRO 4.10 Resumen de datos obtenidos del paquete estadístico Statgraphics Centurion XVI para el desarrollo de las pruebas

PRUEBAS: Dos factores cada una con dos niveles y dos puntos centrales:

Fermentación alcohólica

$$N \times f_2^2 A \times 4$$

Nº PRUEBAS	Factor A	Factor B	Variable Respuesta
	pH	TEMPERATUR A (°C)	RENDIMIENTO (%)
1	4	20	54,5
2	5	20	50,0

3	4	30	65,7
4	5	30	61,3
5*	4.5	25	64,8
6*	4.5	25	67,4

Fuente: Elaboración Propia

(*)Puntos centrales

4.6.2 Resumen del diseño experimental para el desarrollo de las pruebas:

- Clase de diseño: de cribado
- Nombre del diseño: factorial 2²
- Número de factores experimentales: 2
- Número de bloques: 1
- Número de respuestas: 1
- Número de corridas: 6, incluyendo 2 puntos centrales por bloque
- Grados de libertad para el error: 2
- Aleatorizar: No

CUADRO 4.11 Resumen de diseño experimental

<i>Factores</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Unidades</i>	<i>Continuo</i>
pH	4	5		Sí
Temperatura	20	30	° C	Sí
<i>Respuestas</i>	<i>Unidades</i>			
Rendimiento	%			

Fuente: Elaboración propia.

Se ha creado un diseño factorial el cual estudio los efectos de 2 factores en 6 corridas. El diseño deberá ser ejecutado en un solo bloque.

4.6.3 EFECTOS ESTIMADOS PARA EL RENDIMIENTO DE ETANOL

CUADRO 4.12 Resumen de análisis de efectos estimados para rendimiento (%)

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
promedio	60,6167	2,28015	
A:pH	4,45	5,5852	1,0
B:Temperatura	11,25	5,5852	1,0

Errores estándar basados en el error total con 3 g.l.

Fuente: Elaboración propia.

➤ **Interpretación:**

Esta tabla muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones.

También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.), mas grande es igual a 1,0. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serian igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

4.6.4 ANÁLISIS DE VARIANZA PARA RENDIMIENTO DE ETANOL

CUADRO 4.13 Resumen del Análisis de Varianza para Rendimiento

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:pH	19,8025	1	19,8025	0,63	0,4838
B:Temperatura	126,563	1	126,563	4,06	0,1374
Error total	93,5833	3	31,1944		
Total (corr.)	239,948	5			

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados de la tabla anterior se puede afirmar lo siguiente:

1. R-cuadrada = 60,9985 porciento
2. R-cuadrada (ajustada por g.l.) =34,9976 porciento
3. Error estándar del est. = 5,5852
4. Error absoluto medio = 3,65556
5. Estadístico Durbin-Watson = 0.566038 (P=0.0184)
6. Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.424209

➤ **Interpretación:**

La tabla de análisis de varianza divide la variabilidad de rendimiento de etanol en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos.

Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su media cuadrada contra un estimado del error experimental. En este caso observamos que las variables pH y temperatura, tienen valores de P-value mayores que 0.05 (5%), indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 60,9985 % de la variabilidad en rendimiento de etanol

El estadístico R-Cuadrado ajustado, el cual es más adecuado para la comparación de números diferentes de variables independientes, es 34,9976 %. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar es 5.5852.

El error absoluto de la media (MAE), de 3.65556 es el valor promedio de los residuos

4.6.5 COEFICIENTES DE REGRESIÓN PARA RENDIMIENTO DE ETANOL

CUADRO 4.14 Resumen de Coeficientes de regresión para rendimiento

Coeficiente	Estimado
constante	52,5167
A:pH	-4.45
B:Temperatura	1.125

Fuente: Elaboración propia

➤ **Interpretación:**

Se muestra la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Rendimiento} = 52,5167 - 4,45 \cdot \text{pH} + 1,125 \cdot \text{Temperatura}$$

4.6.6 ESTIMACIÓN PARA EL RENDIMIENTO

CUADRO 4.15 Resultados estimados para rendimiento

	<i>Observados</i>	<i>Ajustados</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
<i>Fila</i>	<i>Valores</i>	<i>Valores</i>	<i>para Media</i>	<i>para Media</i>
1	54,5	57,2167	42,7038	71,7296
2	50,0	52,7667	38,2538	67,2796
3	65,7	68,4667	53,9538	82,9796
4	61,3	64,0167	49,5038	78,5296
5	64,8	60,6167	53,3602	67,8731
6	67,4	60,6167	53,3602	67,8731

Fuente: Elaboración propia.

Promedio de 2 puntos centrales = 66,1

Promedio de las predicciones del modelo al centro = 60,6167

➤ **Interpretación:**

Esta tabla contiene información acerca de los valores de rendimiento de etanol que se han generado usando el modelo ajustado. La tabla incluye:

- (1) los valores observados de rendimiento de etanol.
- (2) el valor pronosticado de rendimiento de etanol usando el modelo ajustado.
- (3) intervalos de confianza del 95.0% para la respuesta media.

4.6.7 RESPUESTA OPTIMIZADA

Meta: maximizar rendimiento

Valor óptimo = 68,4667

CUADRO 4.16 Respuesta optimizada para los factores de la experimentación

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
pH	4.0	5.0	4.0
Temperatura	20.0	30.0	30.0

Fuente: Elaboración propia.

Interpretación:

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza el rendimiento de etanol, nos da a conocer entre el nivel bajo y alto el mas óptimo es a pH 4 y a una temperatura de 30°C.

4.6.8 GRÁFICOS ESTADÍSTICO PARA EL RENDIMIENTO DE ETANOL

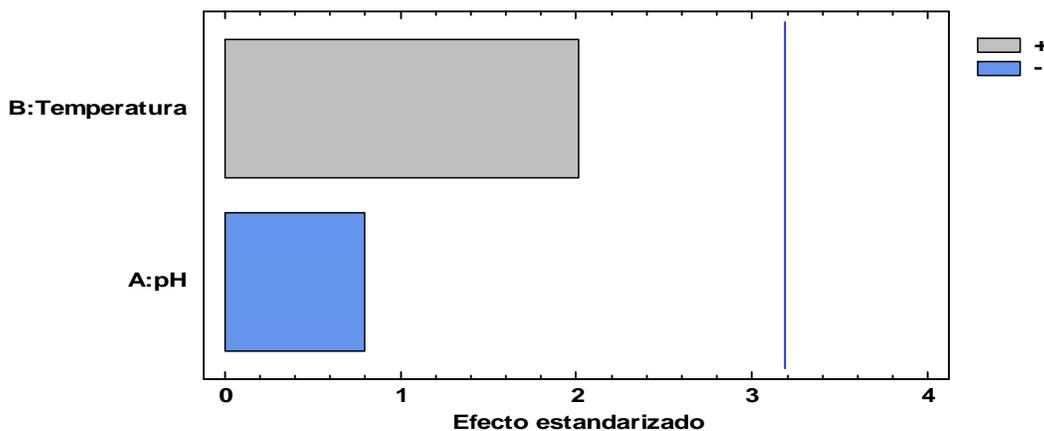


GRAFICO 4.7 Diagrama de pareto estandarizada para rendimiento de etanol.

➤ **Interpretación:**

Este gráfico nos muestra todos los efectos estimados para el rendimiento, siendo así el más importante la temperatura para el proceso de fermentación luego el pH es decir a mayor temperatura mejor obtención de rendimiento.

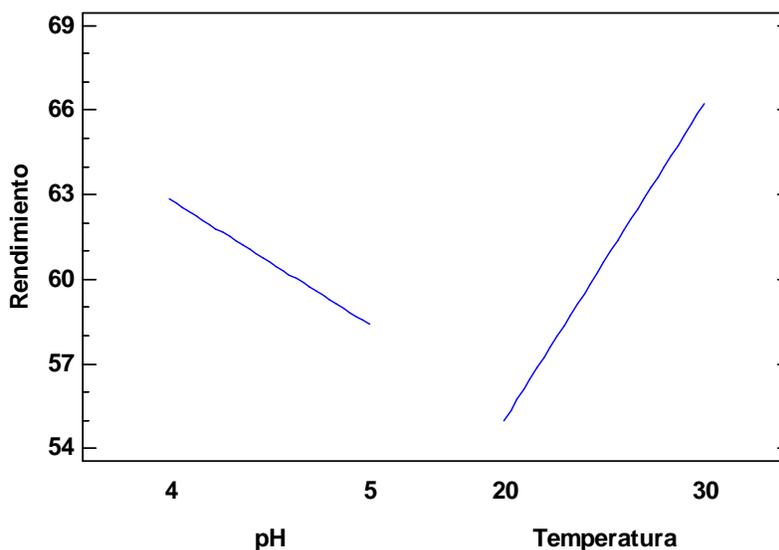


GRAFICO 4.8 Efectos principales para rendimiento



Interpretación:

El gráfico de efectos principales muestra las dos variables independientes temperatura y pH y como su incremento afecta a la variable respuesta: rendimiento.

Para el caso el pH se observa que a menor pH se incrementa el rendimiento, para el caso de la temperatura se observa que a mayor temperatura se incrementa el rendimiento en la fermentación.

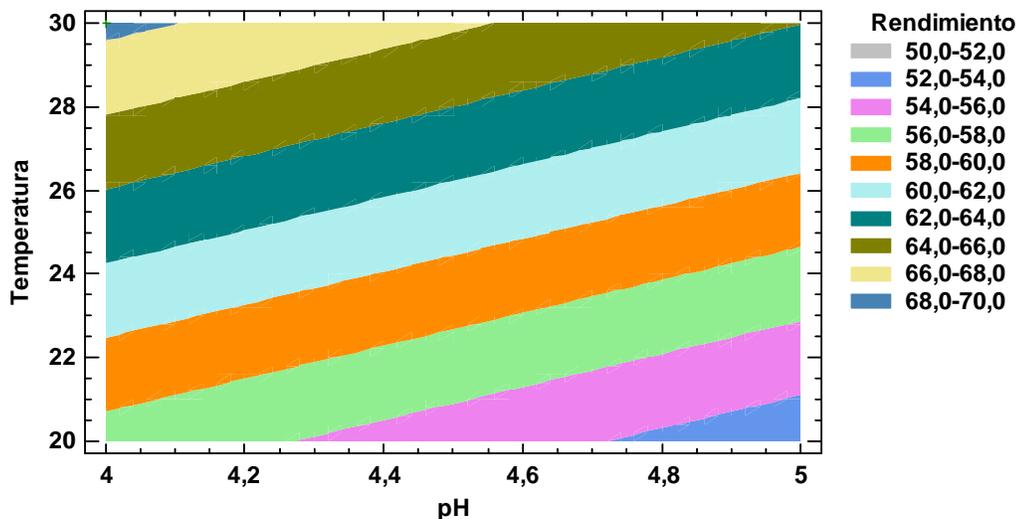


GRAFICO 4.9 Contornos de la superficie de respuesta estimada

➤ **Interpretación:**

El gráfico de la superficie de respuesta para el rendimiento nos permite observar cómo debemos mover los parámetros de las variables independientes para obtener la respuesta esperada del proceso. Para nuestro caso se observa que para una temperatura de 29.5°C y pH 4.1 es donde se obtienen los mayores rendimientos

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El modelo cinético de Monod ajusta apropiadamente a los datos experimentales, proporcionando las constantes cinéticas de reacción para cada proceso de fermentación.

Por lo tanto el modelo cinético de Monod es:

$$\sim X \frac{0.0278 S}{23.315 \Gamma S}$$

- Los parámetros de °Brix, Temperatura y pH que tuvieron mayor influencia para obtener el mejor porcentaje de etanol a partir de cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*) fue de 16° Brix, pH 4.5 y Temperatura de 25°C; obteniéndose un porcentaje de etanol de 13 % en un tiempo de 85 horas.
- El uso del equipo Xplorer GLX junto al sensor de etanol, permitió obtener rápidamente el porcentaje de etanol durante la fermentación registrando los datos en el equipo, el tiempo de respuesta de los datos físicos permitió monitorear mejor el proceso fermentativo.
El porcentaje de etanol en Xplorer GLX va de 60% a 65.5% lo que nos demuestra un porcentaje aceptable para el proceso de fermentación de cáscara de plátano (*Musa Cavendishi*).
- Los parámetros cinéticos de constante de Monod calculados mediante la linealización de Lineweaver – Burk son: constante de saturación (**Ks** =23.315 g/L), velocidad de crecimiento máximo (**μmax**= 0.0278 h⁻¹)



5.2 RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar estudios comparativos de diferentes métodos y condiciones de fermentación para la determinación de parámetros cinéticos en la fermentación de cáscaras de frutas.

- ✓ Para mejorar el proceso de fermentación se recomienda utilizar un reactor agitado discontinuo que permita mejorar la eficiencia de la levadura *Sacharomyces cereviciae* y obtener un mayor rendimiento fermentativo.

- ✓ Comparar el uso de diferentes tipos de microorganismo (levaduras, mohos y bacterias), diferenciando sus comportamientos en cuanto a su eficiencia como biocatalizador

- ✓ Se recomienda utilizar el uso del equipo Xplorer GLX en diferentes tipos de investigación con respecto al etanol con diferentes sustratos de esa manera se dé utilidad al investigador, y los futuros trabajos de investigación busquen trabajar a diferentes condiciones que permitan optimizar el rendimiento de etanol

5.3 BIBLIOGRAFÍA

1. Bautista C. Mario (2005). Obtención de etanol a partir de arroz en planta piloto. Rev. Per. Quím. Ing. Quím. Vol. 8 N.º 1, pp 64-67
2. Betancourt, R. (2001); Guía de laboratorio de operaciones unitarias III;UNM, Manizales.
3. Bourgeois, C. M., y Larpent. J. P. (1995). Microbiología alimentaria 2. Fermentaciones alimentarias. Zaragoza: Acribia,
4. Bullock, John. (2003). Biotecnología Básica. Zaragoza: Acribia.
5. Cardona Alzate, Carlos. (2004).Investigación Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado de Manizales de Caldas en Colombia. Revista Colombiana de Biotecnología 7(2).78-89

6. Carril Fernández Víctor. y Cruz Martínez José (1996). Alcohol obtenido de diferentes variedades de plátano. Tesis. Universidad Nacional de Tumbes.
7. Carpenter, P. (1979); Microbiología; Mexico:Interamericana.
8. Copa Roque, Maby y Coillo Valero, Hercilia, (2010). Estudio de la cinética de fermentación del plátano, en el equipo MULTILOG-PRO implementado con sensores de CO₂, presión, temperatura y pH. Tesis. Universidad Nacional del Altiplano. Perú
9. Cutimbo Quispe, Mario. (2004). Optimización de fermentación alcohólica de frutas en estado extremal de maduración. Tesis. Universidad Nacional del Altiplano. Perú
10. Erazo, Raymundo. (1999). Estudio de simulación de un fermentador continuo usando células inmovilizadas. Tesis. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima - Perú
11. Fajardo C. y Sarmiento F. (2007). Estudio de la Evaluación de Melaza de Caña como Sustrato para la Producción de *Sacharomyces cerevisiae*. Tesis. Pontificia Universidad Javeriana – Bogota.
12. Fiechter A. 1984. Physical and chemical Parameters of Microbial Growth. *Advances in Biochemical Engineering* Vol. 30, 7-60. Springer: Verlag,
13. García Barcelo, Juan. (1990). Técnicas analíticas para vinos. España:Penedés
14. García, Garivay (2004) *Biología alimentaria* Mexico: Limusa
15. Gil Hernandez A. (2010) *Tratado de nutrición 2. composición y calidad nutritiva de los alimentos* Madrid: Medica panamericana
16. González Suarez, Erenio. (2005). Vías para el diseño de nuevas instalaciones de la industria de procesos químicos fermentativos y farmacéuticos. Cuba:Científico-Técnica.
17. Gonzales Sosa Reymundo (1978); *Microbiología de las bebidas*.Cuba:Pueblos y educación.
18. Izquierdo, Felipe (2004). *Cinética de las reacciones químicas* . España:Universidad de Barcelona

19. Henry, F. y Claire, J. (1998). Introducción a la Bioquímica y Tecnología de los Alimentos. España: Acribia.
20. Hidalgo Togoeres J. 2002 tratado de enología I Mexico: Mundi-Prensa
21. Illanes, A. (1986). Biotecnología de las enzimas. Chile: Universitaria de Valparaiso,.
22. Farah Ahmad (2011). Study of growth kinetic and modeling of ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* African Journal of Biotechnology Vol. 16(81), pp. 18842-18846
23. Jorgensen, A y Hansen A. (1991). Microbiología de las Fermentaciones Industriales. 7. España: Acribia
24. Ketiku, A.O. (1973) Chemical composition on unripe (green) and ripe plantain (*Musa paradisiaca*). Journal of the Science of Food and Agriculture, 24:703-706
25. Levenspiel Octave. (1981). Ingeniería de las Reacciones químicas. México: Reverte
26. Madrid, A, Cenzano, L. y Vicente, J. (1994). Nuevo Manual de Industrias Alimentarias. España: Mundi – Prensa.
27. Morrison Robert. (1992). Química Organica. Mexico: Iberoamericana
28. León, T. Chalela, G. Roa, A. (2007). sistema semicontinuode producción de etanol. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander.
29. Marin Rodriguez Z. (1996). Elementos de nutrición humana. Costa Rica: Euned
30. Marlo García, Pamela; Saravia Rivera, Evelyn; Shiroma Tolentino, Sandra; Taype Gonzales, Alina (2012). Estudio cinético de la fermentación alcohólica del jugo de caña de azúcar (*saccharum officinarum*). Tesis. Universidad Nacional Federico Villareal .Perú
31. Montgomery, D. (1991). Diseño y análisis de experimentos. México: Iberoamérica.
32. Morales Esther, (2007). "Obtención de Bioetanol a partir de naranja (*Citrus spp*) aplicando ozono. VII Simposio Internacional de Alcoholes y Levaduras. México

34. Muller. G. (1981). Microbiología de los alimentos vegetales. España: Acribia.
35. Oviedo Z. Luis (2009). Levaduras autóctonas con capacidad fermentativa en la producción de etanol a partir de pulpa de excedentes de plátano Musa (AAB Simmonds) en el departamento, Colombia Revista Colombiana de Biotecnología, XI (1), 40-47
36. Pacheco Leal Daniel. (2001). Bioquímica Aplicada., Instituto Politécnico Nacional. España.
37. Palomino Infante Alfredo. 2003 Cinéticas de reacciones bioquímicas Lima-Perú.
38. Palacio Llanes, Hernan. (1956). Fabricación de alcohol. España: Salvat
39. Pamplona Roger (2006). Salud por los alimentos España: Safeliz
40. Pantoja, Lilian. (2005). Aprovechamiento Biotecnológico de la Guanábana en la elaboración de las bebidas alcohólicas fermentada utilizando levadura inmovilizada en aginato de calcio. Brazilian Journal of Food Technology - V SIPAL (Simpósio Internacional de Producción de Alcoholes y Levaduras):96-102.
41. Peña, Antonio (2004). Bioquímica 2 Mexico: limusa
42. Perry, R. 1(992). Manual del Ingeniero Químico 6, México: McGraw Hill.
43. Pirt, J (1975). Principles of microbe and cell cultivation . New York: Wiley.
44. Quinteros, Ramirez. (1990). Ingeniería Bioquímica 3^{ra} Ed. Mexico: Alhambra.
45. Ramirez, Oscar. y Molina, Manuel., (2005). Evaluación de Parámetros Cinéticos para la Saccharomyces Cerevisiae Utilizando agua de Coco como Sustrato. Revistas Ingeniería Universidad San José. Costa Rica. 15 (1,2). 91-102
46. Roque Rojas B. y Cabanillas Aguilar J. (2008). Producción de alcohol de residuos lignocelulósicos – cáscaras de arroz (Oriza sativa). Revista Redesma 1-13
47. Sancho, Juan. (1980). microbiología analítica básica. España: Jims.

48. Sillo Castillo Ever (2010). Cinética de reacción en la obtención de bioetanol a partir de residuos de producción de zumo de frutas. Tesis Universidad Nacional del Altiplano. Perú
49. Trevan, M. Boffey S. (1990). Goulding K.H. y Stanbury P. Biotecnología: Principios Biológicos. España: Acibia
50. Terranova (1995). Enciclopedia agropecuaria (2). Bogotá: Terranova
51. Vian, R. y Ocon, J. (1991). Elementos de Ingeniería Química. España: Águila.
52. Wong Y S, Kadir M O, Teng T T. (2009) Biological Kinetics evaluation of anaerobic stabilization pond treatment of palm oil effluent. Bioresource Technol.

WEB GRAFIA

1. PASCO (2002) Ethanol Sensor Extraído de: http://www.pasco.com/prodCatalog/PS/PS-2194_pasport-ethanol-sensor/index.cfm
2. Xplorer GLX – PS - (2002) Extraído de :http://www.pasco.com/prodCatalog/PS/PS-2002_xplorer-glx/index.cfm
3. MINAG. Ministerio de agricultura. Lima 2013 Sector agrario. Fichas técnicas. Extraído de: <http://www.minag.gob.pe/portal/download/pdf/sector-agrario/agricola/lineasdecultivosemergentes/platano.pdf>



ANEXOS



DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO XPLORER GLX

Es un sistema potente debido a que cuenta con 65 sensores para usos científicos diversos con la gran variedad de sensores que provee mediciones de alta precisión y de alto rendimiento, con una gran variedad de parámetros por lo que los estudiantes pueden desarrollar cualquier tipo de experimento en las diferentes áreas.

➤ **Utilización del equipo aplicados a la industria**

- Control de calidad
- Monitoreo del estado de plantas y maquinarias
- Estaciones de monitoreo de campo
- Exámenes de automóvil
- Calefacción ventilación aire acondicionado
- Identificación de problemas en la planta
- Monitoreo de condiciones ambientales
- Producción almacenamiento y transporte de alimentos
- Condición de almacenaje de alimentos
- Examen de calidad de agua
- Investigación
- Y más.....

➤ **SENSORES PARA EL USO CON EL EQUIPO XPLORER GLX**

- Sensor de pH
- Sensor de presión
- Sensor colorimétrico de calidad del agua
- Sensor de temperatura
- Sensor de dióxido de carbono
- Sensor de conductividad
- Sensor cuenta gotas
- Sensor de etanol
- Sensor de turbidez
- Sensor de oxígeno disuelto

- Sensor de caudal
- Sensor de fuerza
- Sensor de presión absoluta
- Sensor de aceleración
- Sensor de humedad/temperatura/pto. Condensación
- Sensor de temperatura sin contacto
- Sensor de oxígeno gaseoso
- Sensor de movimiento rotatorio
- Humedad del suelo
- Sensor meteorológico
- Sensor intensidad luminosa amplio espectro
- Sensor de voltaje-corriente 100 kHz y 1 MHz
- Sensor de ritmo cardiaco en ejercicio
- Sensor de presión sanguínea
- Sensor de ritmo respiratorio
- Sensor corriente alta
- Sensor de intensidad luminosa
- Sensor de campo magnético
- Sensor de movimientos
- Sensor de nivel de sonido

ANEXO B

GUIA PARA EL USO Y CALIBRACION DEL SENSOR DE ETANOL

Inicio Rápido

1. Conecte el amplificador a su interfaz PASPORT.
2. Conectar la sonda al amplificador.
3. Si usted está usando un ordenador, conectar la interfaz PASPORT a él y empezar a DataStudio.

4. Asegúrese de que la membrana se instale perfectamente. No debe existir roturas ni decoloraciones.
5. Coloque el extremo de la sonda en el gas sobre una solución que contiene menos del 3% de etanol.
6. Pulse o haga clic en el botón de inicio para iniciar el registro de datos.

La sonda se estabiliza después de unos 10 minutos de tiempo de calentamiento.

Precauciones

- No exponga el sensor al gas que contiene más del 3% etanol, incluyendo el gas por encima de las bebidas alcohólicas.

Las concentraciones más altas de etanol agotará el elemento de detección.

Tenga en cuenta que el gas sobre un líquido contiene aproximadamente el misma concentración de etanol como el propio líquido.

- Asegúrese de que la membrana se instale intacto antes de usar la sonda. La membrana evita que el elemento de detección se moje. Si el elemento de detección entra accidentalmente enjuague húmedo y séquelo rápidamente. Tenga en cuenta que la sonda puede ser deteriorada o destruida.
- No sumerja la sonda. La membrana (si está en buena condición) protege la sonda en caso de inmersión accidental.

Sin embargo, la sonda está diseñada para su uso en gas sólo.

Calibración

Para mediciones de precisión, primero calibrar el sensor. Lo harás necesita una solución de 1% de etanol en agua. La solución debe ser menos la misma temperatura que las soluciones a medir. Los datos de calibración se

almacenan en la memoria del sensor y persiste hasta que el sensor se calibra de nuevo, incluso si el sensor está desconectado de la interfaz.

1. Conectar el sensor a una interfaz como se ha descrito anteriormente.
2. Coloque la sonda por encima de la solución de etanol al 1%.
3. Observe la lectura de la concentración de etanol en el software o en el registrador de datos.
4. Espere hasta que la lectura se estabilice.
5. Mantenga pulsado el botón CAL 1% en el sensor durante 4s. Inmediatamente después de una calibración satisfactoria, la salida del sensor lee 1%, y el botón se ilumina.

Acerca de la membrana

Un rollo de material de la membrana se incluye con el sensor. La material es hilo de PTFE cinta de sellado, de unos 25 mm de ancho, por lo general utilizado por los fontaneros. La membrana protege el elemento de detección de líquido, pero es permeable al gas etanol.

Membrana de repuesto

Cambiar la membrana cuando está rota o decolorada.

1. Tire del anillo de retención de la punta de la sonda.
2. Retire y deseche el viejo de la membrana.
3. Corte un cuadrado de 25 mm de material de la membrana nueva.
4. Coloque la membrana de nuevo sobre el extremo de la sonda.
5. Empujar el anillo de retención sobre el extremo de la sonda sobre la membrana.

6. También puede utilizar un cuchillo afilado para cortar el exceso de membrana de todo el anillo de retención.

Factores que afectan la medición

Temperatura y humedad: temperatura del sensor es determinada tanto por su calentador interno y la temperatura de su entorno. Permitir el tiempo de sonda para alcanzar una temperatura estable después de que usted lo enchufa en o después de que la temperatura de su entorno cambie. Mantenga la temperatura y la humedad constante durante la calibración y medición.

Flujo de aire: El flujo de aire alrededor o dentro de la sonda afecta a su temperatura. Minimizar el flujo de aire durante la calibración y medición.

Otros gases: Además de gas etanol, el sensor responde a hidrógeno, isobutano, monóxido de carbono y metano.

Especificaciones

Precisión: 20% de la lectura

Rango: 0-3% etanol en gas

ANEXO C

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

Nombre: Edith Danitza Pari Pancca

FICHA DE OBSERVACIÓN C1

Fecha	t (h)	pH	T (°C)	S (°Brix)	etanol Xplorer GLX (%)
24/09/2012	9:00 a.m	4	20	16.0	0.00

24/09/2012	3:00 p.m	4	20	14.9	0.24
24/09/2012	12:00 p.m	4	20	13.4	1.30
26/09/2012	5:00 a.m	4	20	9.5	3.20
26/09/2012	5:00 p.m	4	20	8.6	7.00
27/09/2012	9:00 a.m	4	20	5.0	8.40
27/09/2012	5:00 p.m	4	20	4.8	13.00

Etanol Alcoholímetro: 12 °GL

FICHA DE OBSERVACIÓN C2

Fecha	t (h)	pH	T (°C)	S (°Brix)	etanol Xplorer GLX (%)
01/10/2012	12:00 a.m	5	20	16.0	0.00
01/10/2012	4:00 p.m	5	20	15.3	0.20
02/10/2012	5:00 a.m	5	20	13.2	1.20
02/10/2012	9:00 a.m	5	20	9.2	3.00
02/10/2012	5:00 p.m	5	20	8.6	6.00
03/10/2012	12:00 a.m	5	20	5.3	8.00
04/10/2012	11:00 p.m	5	20	5.0	12.00

Etanol Alcoholímetro: 11 °GL

FICHA DE OBSERVACIÓN C3

Fecha	t (h)	pH	T (°C)	S (°Brix)	etanol Xplorer GLX (%)
11/10/2012	10:00 a.m	4	30	16.0	0.00
11/10/2012	4:00 p.m	4	30	15.0	0.32
12/10/2012	5:00 a.m	4	30	13.1	1.28
13/10/2012	7:00 a.m	4	30	10.0	3.12
13/10/2012	7:00 p.m	4	30	9.2	7.40
14/10/2012	7:00 a.m	4	30	5.5	9.00
14/10/2012	12:00 p.m	4	30	5.0	13.04

Etanol Alcoholímetro: 13 °GL

FICHA DE OBSERVACIÓN C4

Fecha	t (h)	pH	T (°C)	S (°Brix)	etanol Xplorer GLX (%)
15/10/2012	10:00 a.m	5	30	16.0	0.00
15/10/2012	12:00 p.m	5	30	13.8	0.30
16/10/2012	10:00 a.m	5	30	12.5	1.38
17/10/2012	10:00 a.m	5	30	9.4	3.08
17/10/2012	6:00 p.m	5	30	8.8	7.20
18/10/2012	10:00 a.m	5	30	5.1	9.00
18/10/2012	6:00 p.m	5	30	4.9	13.06

Etanol Alcoholímetro: 12 °GL

FICHA DE OBSERVACIÓN C5

Fecha	t (h)	pH	T (°C)	S (°Brix)	etanol Xplorer GLX (%)
22/10/2012	11:00 a.m	4.5	25	16.0	0.00
22/10/2012	3:00 p.m	4.5	25	15.3	0.30
23/10/2012	7:00 a.m	4.5	25	13.0	1.20
24/10/2012	8:00 a.m	4.5	25	10.0	3.00
25/10/2012	7:00 p.m	4.5	25	9.0	7.20
25/10/2012	9:00 a.m	4.5	25	5.4	8.40
25/10/2012	12:00 p.m	4.5	25	5.0	13.00

Etanol Alcoholímetro: 12 °GL

FICHA DE OBSERVACIÓN C6

Fecha	t (h)	pH	T (°C)	S (°Brix)	etanol Xplorer GLX (%)
12/11/2012	12:00 a.m	4.5	25	16.0	0.00
12/11/2012	4:00 p.m	4.5	25	15.2	0.26
13/11/2012	5:00 a.m	4.5	25	13.1	1.30
14/11/2012	5:00 a.m	4.5	25	10.0	3.06
15/11/2012	6:00 a.m	4.5	25	8.0	7.24
15/11/2012	11:00 a.m	4.5	25	5.4	8.44
15/11/2012	1:00 a.m	4.5	25	5.0	13.10

Etanol Alcoholímetro: 12.5 °GL

Etanol Xplorer GLX (%): obtenido durante el proceso de fermentación

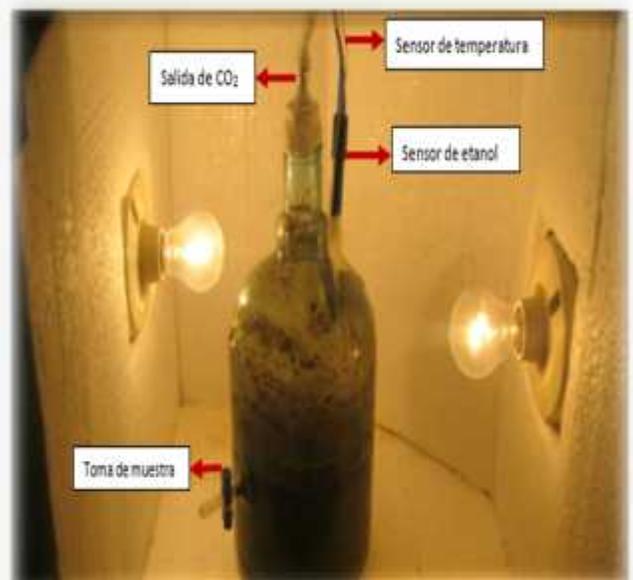
Etanol Alcoholímetro (%): obtenido del proceso de destilación

ANEXO D
FOTOGRAFIAS

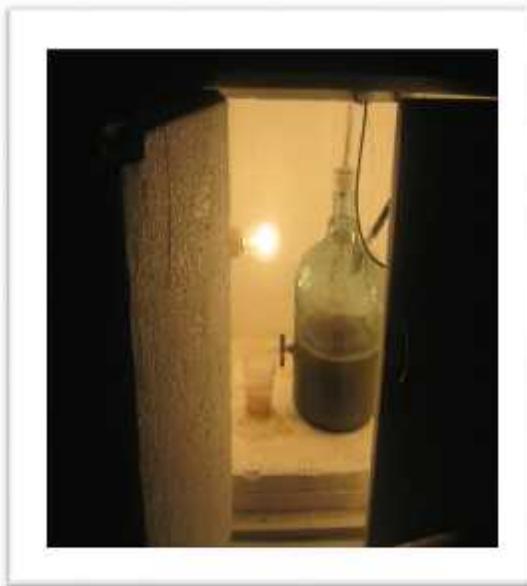
1.- Materia Prima - Selección



2.- Sistema de instalación del equipo Xplorer GLX en el proceso de fermentación alcohólica



3.- Fermentación alcohólica



4.-Equipo de destilación para obtener Plátano etanol

5.-Etanol de cáscara de

