

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS ETAPAS DE MACERACIÓN Y FERMENTACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE CERVEZA A PARTIR DE MALTA DE SORGO

EXPERIMENTAL STUDY OF MACERATION AND FERMENTATION STAGES FOR OBTAINMENT BEER FROM SORGHUM MALT

Mario Sergio Pino Hurtado^{1}, Irenia Gallardo Aguilar¹ y Margarita Pérez Pentón¹*

¹ *Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní Km 5 ½. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.*

Recibido: Octubre 23, 2017; Revisado: Noviembre 13, 2017; Aceptado: Abril 18, 2018

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio experimental para la elaboración de cerveza a partir de sorgo y arroz, la cual puede ser consumida por enfermos celíacos. Tiene como objetivo obtener esta bebida empleando solamente malta de sorgo, una enzima exógena Alfa-Amilasa y el mejor adjunto para sus producciones (arroz o sorgo), estudiando variables independientes como la concentración de enzima y el tipo de adjunto, además de analizar su efecto en la calidad final de la cerveza manifestado en las variables respuesta contenido de azúcares reductores totales, grado alcohólico y rendimiento, para esto se realiza un diseño de experimentos multinivel 2^k. El tipo de adjunto y la concentración de enzima constituyen las variables significativas en las variables respuesta. Con el ajuste realizado a la curva de la maceración se estimó el comportamiento de los azúcares reductores totales a partir de los grados Brix para cada tipo de adjunto empleado. El uso de la mayor concentración de enzima y el sorgo como adjunto determinan un mayor grado alcohólico.

Palabras clave: adjunto; celíacos; cerveza; enzima; sorgo.

ABSTRACT

An experimental study is carried out in present paper for the sorghum and rice beer elaboration, which can be consumed by celiac patients. Its objective is to obtain this beverage using only sorghum malt, an exogenous Alpha-Amylase enzyme and

Copyright © 2018. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Mario S. Pino, Email: mapino@uclv.cu

The best adjunct for its production (rice or sorghum), studying independent variables such as enzyme concentration and adjunct type, as well as analyzing its effect in the final beer quality manifested in total reducing sugars, alcohol content and yield response variables using an experimental design of multilevel 2^k. The type of adjunct and the concentration of enzyme are significant variables in response variables. With the adjustment made to the maceration curve, the behavior total reducing sugars were estimated from the Brix degrees for each type of adjunct used. The use of the highest concentration of enzyme and sorghum as adjunct determine a higher alcohol content

Key words: adjunct; celiac; beer; enzyme; sorghum.

1. INTRODUCCIÓN

La cerveza puede ser elaborada con cualquier cereal, el cual debe ser preparado para que sus azúcares sean fermentables. En el caso del maíz basta con una simple cocción y en otros es preciso maltear el cereal, siendo la cebada el mejor para ser malteado y el más utilizado en la cervecería occidental según (Gallardo y col., 2013).

La posibilidad de reemplazar la cebada por otro cereal que sea apto para la producción de esta bebida, por ejemplo el sorgo, sería la solución ideal debido a que constituye una alternativa para la dieta de los enfermos celíacos, ya que no contiene gluten como reportan Calderón (2012).

Además este cereal tolera mejor la sequía y el exceso de humedad que la mayoría y crece bien bajo una amplia gama de condiciones en el suelo. Responde favorablemente a la irrigación, lográndose excelentes resultados bajo riego según Alemán (2007).

En África, el sorgo rojo es la variedad principal usada para producir las cervezas tradicionales "opacas". Las cervezas africanas tradicionales de sorgo son muy ricas en calorías, vitaminas, incluyendo ácido fólico y nicotínico, tiamina, riboflavina y aminoácidos esenciales como lisina de acuerdo a (Lymugabe et al., 2012).

Durante el proceso de fabricación de cerveza, se transforma el almidón que contienen los granos en maltosa, glucosa, etc. que luego, serán eliminadas durante el proceso de fermentación según (Nieblas y col., 2016). Sin embargo, los granos no contienen las enzimas necesarias que harían falta para poder llevar a cabo esta transformación del almidón, por lo que se deben tratar previamente y transformarlos en malta, para conseguir así una actividad enzimática adecuada que la lleve a cabo como refiere Reyes (2013).

La cerveza debe cumplir unos requisitos mínimos a fin de ser apta para su consumo. Entre otros: acidez total no superior a 0,3 %; anhídrido carbónico superior a 3 g/L; contenido en glicerina inferior a 3 g/L; pH comprendido entre 3,5 y 5; contenido en cenizas no superior al 0,4 % en masa; contenido máximo en metales pesados (cobre: 1,0 ppm; zinc: 1,0 ppm; plomo: 0,2 ppm; arsénico: 0,1 ppm; y cobalto: 50 ppb); contenido máximo en ácido fosfórico no superior a los 0,12 g por 100 g de cerveza; hidratos de carbono no superiores a 7,5 por 100 g de cerveza de acuerdo a NTE INEN (2003).

Los ingredientes básicos que intervienen en la elaboración de esta bebida alcohólica son: la malta, el agua, el lúpulo, la levadura y el adjunto. Su proceso de producción consta de etapas como el malteado, la maceración, filtración, hervidura del mosto, fermentación, maduración, filtración y esterilización de acuerdo a (Gallardo y col., 2013).

Los objetivos de la maceración son crear y extraer, dentro de la solución, compuestos necesarios como azúcares fermentables, aminoácidos, vitaminas, etc., a partir de la malta para luego ser utilizados por la levadura en la fermentación según (Bofill y Gallardo, 2013). Altos niveles de extracto de almidón comparables a los de la malta de cebada han sido obtenidos por (Igyor et al., 2001) mediante el uso de procedimientos de maceración no convencionales.

Agregan (Tokpohozin et al., 2018) que para incrementar el rendimiento del mosto extraído se pueden adicionar enzimas externas. Generalmente, antes de la hervidura se realiza la filtración del puré. En el proceso de fabricación de las cervezas tradicionales en África la filtración se realiza por decantación simple, como describen (Lymugabe et al., 2012). La hervidura del mosto es hecha por varias razones, en particular para provocar la desnaturalización de la enzima malta y la esterilización del mosto.

La cerveza elaborada a partir de malta de sorgo puede ser fácilmente consumida por la población celíaca ya que la misma no contiene gluten y por tanto no constituye riesgo para su salud. En la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas se ha investigado por varios años en la obtención de etanol, maltina y cerveza a partir del malteado del sorgo UDG-110. Debido a esto, en el presente trabajo se continúa con el estudio de la elaboración de cerveza empleando sorgo y arroz como adjuntos, ya que los trabajos realizados anteriormente de Reyes (2013) y Díaz (2014) utilizando malta de sorgo han sido escasos y mayormente combinados con malta de cebada; por lo que este trabajo tiene como objetivo obtener esta bebida que empleando solamente malta de sorgo, enzimas exógenas y el mejor adjunto para sus producciones. Se estudian variables en la maceración y la fermentación, así como la influencia de las mismas en la calidad final de la cerveza.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la investigación se parte de maltear el sorgo para las cantidades requeridas, después de un estudio experimental de malteado. Para ello se maltearon 2,2 kg de sorgo y para complementar la baja actividad diastática de la malta se justifica la adición de una enzima exógena, ya que carece de β -amilasa, que es la enzima responsable de producir azúcares fermentables como describe Taylor (1992).

2.1. Etapas experimentales del proceso de elaboración de cerveza

2.1.1. Etapa de maceración

En el estudio de la maceración, para la obtención de cerveza, se utilizó un diseño de experimentos multinivel del tipo 2^k , siendo $k=2$, y se realizaron dos réplicas (R3 y R4), resultando 6 experimentos en total. Se estudiaron dos variables, con dos niveles cada una, donde X_1 es la concentración de la enzima Alfa-Amilasa (0,35 – 0,7 % p/p) y X_2 es el tipo de adjunto a utilizar: Sorgo (-) o Arroz (+). Los niveles de la enzima fueron superiores a los reportados en trabajos anteriores, pues se utilizó el adjunto como almidón nativo y no como jarabe dextrinizado como lo hizo Ortega (2016). Se tomaron como variables respuesta, los azúcares reductores totales (ART) del mosto macerado, el consumo de ART, el grado alcohólico de la cerveza y el rendimiento de la misma. En las tablas 1 y 2 se muestran las variables independientes con los niveles seleccionados y la matriz experimental codificada y decodificada respectivamente.

Tabla 1. Variables fijadas e independientes y sus niveles

<i>Variables fijadas</i>	
Relación adjunto / malta	30/70
Tiempo de acción enzima	1,5 h
Inóculo (levadura)	1 g/L
Tiempo de fermentación	5 días
Relación sólido / líquido	133 g/L
<i>Variables independientes</i>	
<i>Niveles</i>	
Concentración de enzima (X_1)	0,35 – 0,7 %
Tipo de adjunto (X_2)	arroz- sorgo

Tabla 2. Matriz experimental codificada y decodificada

<i>Corridas</i>	<i>Concentración de enzima (% p/p)</i>		<i>Tipo de adjunto</i>	
	<i>Matriz codificada</i>	<i>Matriz decodificada</i>	<i>Matriz codificada</i>	<i>Matriz decodificada</i>
1	-1	0,35	1	arroz
2	-1	0,35	-1	sorgo
3	1	0,7	-1	sorgo
4	1	0,7	1	arroz
R3	1	0,7	-1	sorgo
R4	1	0,7	1	arroz

En la tabla 2 los distintivos de R3 y R4 corresponden a las réplicas realizadas a los experimentos 3 y 4.

En la etapa experimental de maceración se utilizó un beaker como reactor, donde se añaden la malta y el adjunto en proporciones de 70/30 en un litro de agua y es colocado en un termostato marca U15 MLW con el propósito de regular la temperatura, acoplado a un agitador mecánico marca IKA RW-16 a 3rpm, logrando la homogenización de la mezcla. Se comenzó con un proceso de elevación y mantenimiento de la temperatura escalonadamente. Se realizó el ajuste del pH de la mezcla en un rango de 5,5 a 7 en un pH-metro marca HANNA 213. Al alcanzar los 55 °C, se agregó el adjunto, según el caso; esta temperatura se mantiene durante 30 minutos. Luego se aumentó la temperatura a un rango de 69-72 °C, donde se le adicionó la enzima Bialfa-T (α -Amilasa) y se siguió cocinando durante 30 minutos. Una vez transcurrido este tiempo se elevó la temperatura a 80 °C y se conservó por 90 minutos hasta terminar. Este proceso se realiza para lograr la sacarificación de los almidones, es decir la conversión de los almidones en azúcares fermentables. La malta se procesa como en fábrica, escalando temperaturas en el tiempo para observar el efecto de la misma, también se tomaron tiempos superiores en cada etapa con respecto a la cebada, pues (Tokpohozin et al., 2018) reportan que para el sorgo este proceso es más lento.

2.1.2. Extracción del líquido y lavado

En esta etapa comienza la separación del mosto que se convierte en cerveza, del afrecho. Con un filtro mediano, se colocó toda la mezcla, guardando el líquido o mosto en un beaker y el grano o afrecho en otro. Luego de este proceso, se devolvió el grano y se agregó más agua caliente a 78°C, agitándose para que continuara disolviéndose los azúcares presentes en dicha mezcla. Al cabo de 5 min se repitió el filtrado.

2.1.3. Hervidura del mosto

Primeramente se realizó el ajuste del pH de la mezcla en un rango de 4,8 a 5 (con el objetivo de detener la acción de la enzima) en un pH-metro marca HANNA 213. Tras el filtrado se introdujo el mosto en el beaker utilizado y se puso a hervir durante 1 hora, cuando comenzó el hervor se añadió 1g/L de lúpulo amargo y de 5-10 min antes de terminar el proceso se adicionó 1g/L de lúpulo aromático.

2.1.4. Adición de los nutrientes

Se enfrió el mosto y se estabilizó el pH de la solución en un rango de 4,8-5,2 que es en el que trabaja la levadura empleada. Se añadió 1g/L de sulfato de amonio y fosfato de amonio dibásico empleados como nutrientes. Se agregó 1 g/L de levadura *Saccharomyces cerevisiae* liofilizada, según el diseño experimental.

2.1.5. Fermentación

La muestra se introdujo en un frasco de cristal (fermentador) de dos litros de capacidad, el cual fue conectado a una bomba peristáltica marca INTEGRA, donde se aireó durante 30 minutos con el propósito de que el microorganismo adquiriese una reserva de oxígeno para desarrollarse y crecer. El proceso de fermentación duró como promedio 5 días, en este punto se apreció que el mismo había culminado cuando la levadura endureció y sedimentó.

2.1.6. Filtración

Primeramente se detuvo el proceso de fermentación, siendo necesario calentar el fermento para lo cual se empleó una hornilla marca IKA RETa temperaturas superiores a los 50°C para detener la actividad de la levadura. Luego la muestra se filtró, utilizando embudos de vidrio y papel de filtro, recopilando el líquido filtrado en un erlenmeyer de 1000 ml obteniendo así la cerveza clara.

Se pudo trabajar en rangos inferiores de concentración de enzima (0,08-0,16 % p/p) combinado con el tiempo de acción de ella, que en este estudio fue fijado a 1,5 h. Además se observa que no hay correspondencia entre los grados Brix alcanzados con los ART obtenidos, por lo que se hace necesario ajustar los mostos para la etapa de fermentación por los ART.

2.2. Determinaciones realizadas

2.2.1. Azúcares Reductores Totales

Los azúcares reductores totales (ART) fueron determinados en muestras duplicadas de filtrados con el Método de Bernfeld, utilizando el ácido 3,5-Dinitro salicílico. Este se

basa en la relación según la Ley de Lamber-Beer, siendo la absorbancia medida a 540 nm, proporcional a la concentración de azúcares reductores presentes en la muestra.

Se añade a un tubo de ensayo 1 mL del sobrenadante centrifugado y se añaden 2 mL de la solución de reactivo ácido 3,5 – Dinitrosalicílico mezclando bien. Luego se colocan los tubos de ensayo en baño de agua hirviendo durante 5 minutos, extrayéndose posteriormente y dejándose enfriar hasta temperatura ambiente (25°C).

Se enrasan todos los tubos de ensayo hasta 10 mL con agua destilada y se lee en el espectro fotocolorímetro a 240 nm contra un blanco preparado con 1 mL de agua destilada el cual debe sufrir la misma técnica operatoria. Para finalizar se confeccionó la curva de calibración donde se prepararon 10 soluciones a diferentes concentraciones de glucosa, midiéndose la absorbancia de las mismas.

2.2.2. Grados Brix

Para la determinación de los grados Brix (°Bx) se utiliza un refractómetro, marca ATAGO. La lectura anotada es el valor que corresponde al °Bx de la muestra.

2.2.3. Grado Alcohólico

El grado alcohólico da la medida de cuanto etanol presentan las cervezas al final de la fermentación, este se determina mediante un conjunto de pesadas, en una balanza electrónica marca SARTORIUS, a un picnómetro de 25 mL, primero vacío, luego con agua destilada y hervida y al final con el destilado obtenido por medio de la ebullición de 100 ml del fermento y 50 ml de agua destilada. Entonces a través de la ecuación 1se obtiene la gravedad específica y con ese valor a 15 °C se obtiene el grado alcohólico expresado en °GL.

$$S = 0,99913 * \frac{C-A}{B-A} \quad (1)$$

Donde:

S: Gravedad específica de la muestra

A: Peso del picnómetro vacío expresado en gramos

B: Peso del picnómetro con el agua destilada y hervida expresado en gramos

C: Peso del picnómetro con el destilado expresado en gramos

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Estudio del comportamiento de los ART en la maceración

A las corridas 3 y 4 se les realizó un estudio del °Brix y los ART durante todo el proceso de maceración con el objetivo de analizar el comportamiento de los ART de acuerdo al tipo de adjunto: 3 (sorgo) o 4 (arroz) y observar el comportamiento de los mismos. Los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Valores de °Brix y ART durante la maceración

Corridas	Parámetros	T= 55°C	T= 70°C	T= 80°C	Maceración final (T= 80°C)
	Tiempo (min)	0	30	60	150
3	°Brix	0,6	1	3	6,5

	ART	4,06	5,41	95,56	168,23
4	°Brix	0,4	1	3,1	6,4
	ART	0,02	1,37	90,18	195,14

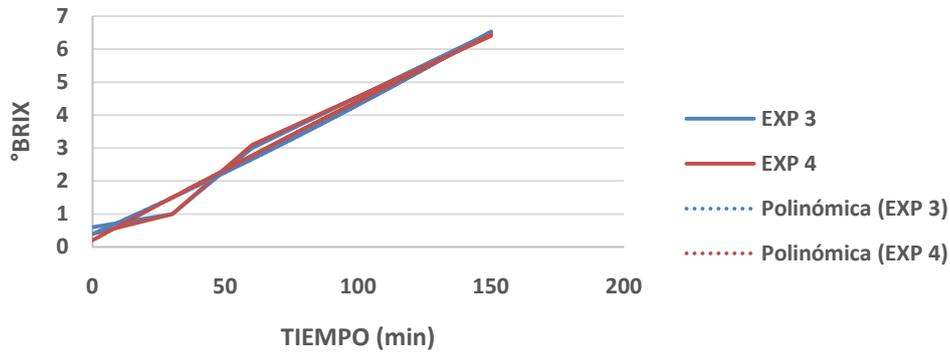


Figura 1. Comportamiento del ° Brix durante la maceración

Las ecuaciones de la curva polinómica se muestran a continuación:

$$°B_3 = -0,00001 * t^2 + 0,0436 * t + 0,2011 \quad (2)$$

$$°B_4 = -0,00003 * t^2 + 0,0357 * t + 0,3994 \quad (3)$$

Donde:

°B₃: Brix determinados en el experimento 3

°B₄: Brix determinados en el experimento 4

t: tiempo de la maceración expresado en minutos

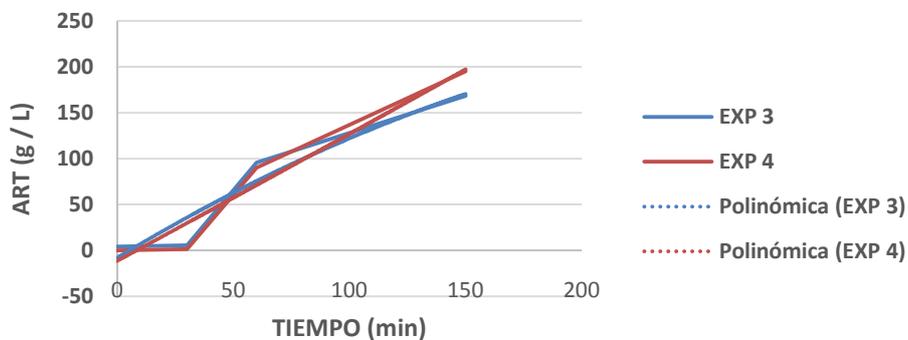


Figura 2. Comportamiento de los ART durante la maceración

Las ecuaciones de la curva polinómica se muestran a continuación:

$$ART_3 = -0,00001 * t^2 + 0,04 * t + 0,23 \quad (4)$$

$$ART_4 = -0,00003 * t^2 + 0,036 * t + 0,4 \quad (5)$$

Donde:

ART₃: Azúcares reductores medidos en el experimento 3 expresados en g/L

ART₄: Azúcares reductores medidos en el experimento 4 expresados en g/L

t: tiempo de la maceración expresado en minutos

Como puede apreciarse en las figuras 1 y 2 a medida que transcurre el tiempo de maceración tanto los grados Brix como los ART tienden a aumentar, resultado de la solubilidad y conversión de los almidones, estos valores, en el caso de los ART son más

altos al concluir la maceración que los obtenidos por Ortega (2016), lo cual se debe a la mayor cantidad de enzima añadida. Estas relaciones responden a polinomios de segundo orden, al igual que la relación entre estas dos variables, mostrada en la figura 3.

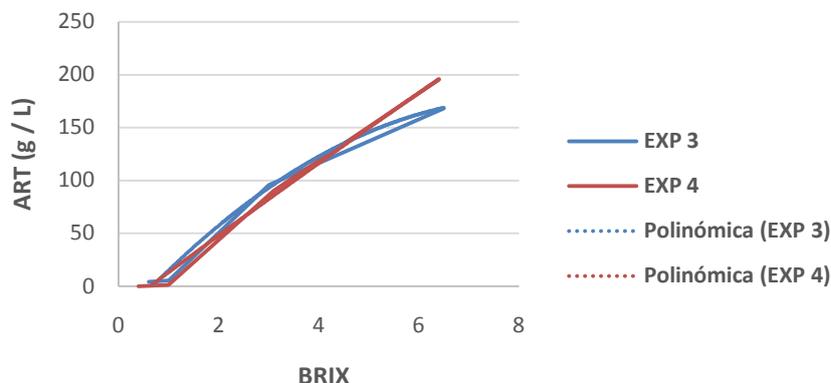


Figura 3. Correlación entre °Brix y ART en la maceración

Las ecuaciones de la curva polinómica se muestran a continuación:

$$ART_3 = -0,2547 * °B_3^2 + 35,74 * °B_3 - 22,419 \quad (6)$$

$$ART_4 = -3,1551 * °B_4^2 + 51,569 * °B_3 - 33,292 \quad (7)$$

Donde:

ART₃: Azúcares reductores medidos en el experimento 3 expresados en g/L

ART₄: Azúcares reductores medidos en el experimento 4 expresados en g/L

°B₃: Brix medidos en el experimento 3

°B₄: Brix medidos en el experimento 4

De las expresiones obtenidas se realizan estimaciones de los ART a partir del °Brix y se comparan con los reales obtenidos experimentalmente, concluyendo que existe una desviación en el comportamiento real marcando un error de un 6% como promedio en los resultados obtenidos. Los cálculos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. ART estimados y reales en la maceración

<i>Corridas</i>	<i>Concentración enzima (% p/p)</i>	<i>Tipo de adjunto</i>	<i>•Brix</i>	<i>ART estimados (g/L)</i>	<i>ARTreales (g/L)</i>
1	0,35	arroz	6,5	199,13	222,05
2	0,35	sorgo	5,4	153,18	164,19
3	0,7	sorgo	6,5	168,6	168,23
4	0,7	arroz	6,4	195,88	195,14
R3	0,7	sorgo	6,5	168,6	192,45
R4	0,7	arroz	6,6	202,37	253

Como puede apreciarse en la tabla 4 los ART son extremadamente elevados producto de la concentración de enzima empleada y del tiempo de acción de la misma. Además se pueden observar los máximos valores de ART cuando se usa el arroz como adjunto debido a su gran contenido de almidón y por tanto es lógico que al ser macerado alcance

elevados azúcares reductores. Los resultados obtenidos de los °Brix y los ART durante la hervidura del mosto se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. ART y °Brix obtenidos en la hervidura del mosto

<i>Corridas</i>	<i>Concentración enzima (% p/p)</i>	<i>Tipo de adjunto</i>	<i>°Brix</i>	<i>ART (g/L)</i>
1	0,35	arroz	6,3	261,07
2	0,35	sorgo	8	236,85
3	0,7	sorgo	9	254,35
4	0,7	arroz	8,5	293,37
R3	0,7	sorgo	8,6	222,05
R4	0,7	arroz	8,7	226,09

En las tablas 6 y 7 se muestran las variables analizadas y las respuestas obtenidas en el estudio de la fermentación así como los parámetros medidos a las cervezas.

Tabla 6. Consumo de ART y rendimientos de las cervezas

<i>Corridas</i>	<i>ART iniciales</i>	<i>ART finales</i>	<i>Consumo ART (%)</i>	<i>Volumen final (L)</i>	<i>Rendimiento volumétrico (%)</i>	<i>Rendimiento Y p/s (%)</i>	<i>Rendimiento teórico (%)</i>
1	261,07	56,54	78,34	0,8	80	26,02	51,01
2	236,85	47,12	80,11	0,78	77,5	20,12	39,45
3	254,35	65,96	74,07	0,7	70	32,74	64,21
4	293,37	87,49	70,18	0,68	68	33,77	66,22
R3	222,05	51,16	76,96	0,76	76	38,80	76,08
R4	226,09	57,89	74,40	0,78	78	32,92	64,55

En el rendimiento volumétrico resultó mejor la muestra 1 con un 80%, en el rendimiento alcohol-sustrato, alcanzó el mayor valor la réplica del experimento 3 (R3) con un 38,8 %. El cálculo de los rendimientos se muestra en las ecuaciones 8, 9 y 10 según Fabelo (1999):

$$R_v = \frac{V_f}{V_i} * 100 \quad (8)$$

$$R_{Y_{p/s}} = \frac{\%Alch * \rho_{alch}}{C_{ART}} * 100 \quad (9)$$

$$R_t = \frac{R_{Y_{p/s}}}{0,51} * 100 \quad (10)$$

Donde:

R_v: Rendimiento volumétrico expresado en %

R_{Y_{p/s}}: Rendimiento alcohol-sustrato expresado en %

R_t: Rendimiento teórico expresado en %

V_f: Volumen inicial de las cervezas expresado en L

V_i: Volumen inicial de agua utilizada expresado en L

%Alch: Porcentaje de alcohol

palch: Densidad de la cerveza expresado en kg/m³

0,51: Porcentaje de alcohol teórico

En la tabla 6 se aprecia que los porcentajes de conversión de los azúcares oscilan entre 70-80%, al igual que los rendimientos volumétricos de producto entre 70-80% y los rendimientos en base a alcohol teórico, que varían entre 39 y 76%, los cuales no son bajos, pero comparados con los ART del mosto si lo están, lo que conlleva a pensar que esté ocurriendo una inhibición por producto en el proceso, lo que debe ser tomado en cuenta en trabajos futuros.

Como se aprecia en la tabla7 los valores de grados alcohólicos son bajos pues ninguno alcanza 4 °GL y no se corresponden con el nivel alcanzado en los ART, como es lógico al estar trabajando con ART tan superiores a los que admite la levadura se debe producir una inhibición por sustrato, de ahí los no tan altos grados alcohólicos.

Tabla 7. Parámetros finales medidos a las cervezas

<i>Corridas</i>	<i>Concentración enzima (% p/p)</i>	<i>Tipo de adjunto</i>	<i>°Brix</i>	<i>pH</i>	<i>Grado alcohólico (°GL)</i>
1	0,35	arroz	5,5	4,53	2,58
2	0,35	sorgo	5	4,76	2,04
3	0,7	sorgo	6	4,66	3,07
4	0,7	arroz	5,4	4,36	3
R3	0,7	sorgo	5,5	4,81	3,78
R4	0,7	arroz	5	4,81	3,1

En los resultados mostrados en las tablas 6 y 7 puede estar influyendo que al emplear una enzima hidrolizante y no sacarificante la cantidad de maltosa y maltotriosa formada sea mayor en proporción que la glucosa formada y que, aunque son azúcares fermentables su conversión en la fermentación por no ser monosacáridos, es inferior que para la glucosa como reportan Serna y col., 2005.

3.2. Análisis estadístico de la etapa de maceración

3.2.1. Azúcares Reductores Totales(ART)

La función objetivo obtenida por el software Statgraphics para la variable respuesta ART es la siguiente:

$$ART = 199,171 + 3,03375 * CE + 24,2138 * TAdj - 2,34875 * CE * TAdj \quad (11)$$

$$R^2 = 86,5675\%$$

En la figura 4 se muestran los diagramas de pareto, efectos principales y superficie respuesta realizados para los ART.

Como se observa en el caso de los ART la única variable significativa es el tipo de adjunto empleado, en su valor positivo, es decir el arroz. Si se observa el diagrama de efectos principales se aprecia que en este caso la concentración de enzima no tiene significación para los ART ya que los mismos se mantienen prácticamente constantes, por lo que se pudiera trabajar con la menor concentración, o inferior a ésta, combinándola con su tiempo de acción.

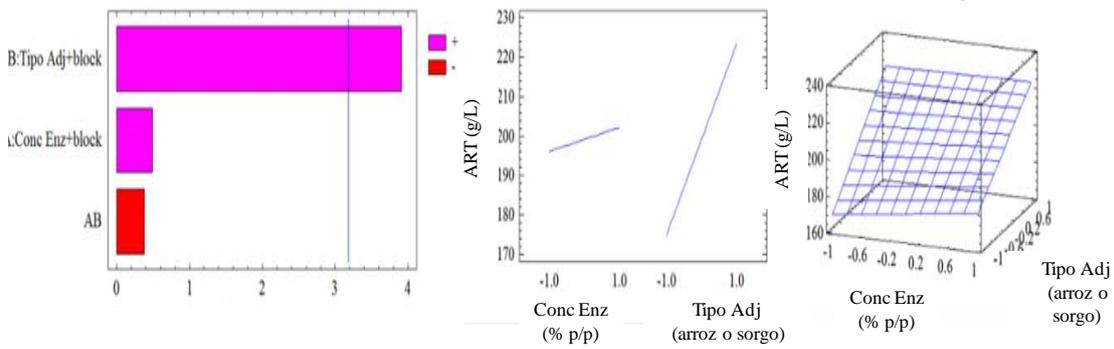


Figura 4. Diagramas de pareto, efectos principales y superficie respuesta para los azúcares reductores totales

3.2.2. Grado Alcohólico

La función objetivo obtenida por el software Statgraphics la variable respuesta grado alcohólico es la siguiente:

$$GAlch = 2,715 + 0,5225 * CE - 0,0325 * TAdj - 0,155 * CE * TAdj \quad (12)$$

$$R^2 = 86,1764\%$$

En la figura 5 se muestran los diagramas de pareto, efectos principales y superficie respuesta realizados para el grado alcohólico.

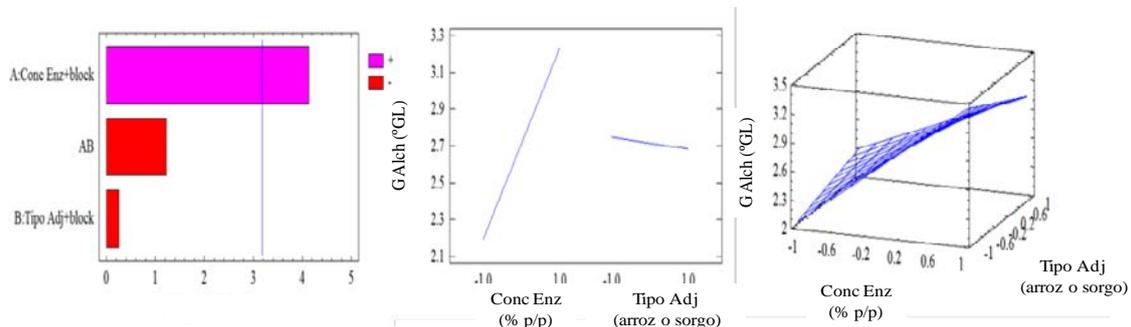


Figura 5. Diagramas de pareto, efectos principales y superficie respuesta para el grado alcohólico

En el grado alcohólico la única variable significativa es la concentración de enzima a emplear en su valor positivo. Si se observa el diagrama de efectos principales se ve como efectivamente se obtiene el mayor grado alcohólico cuando la concentración de enzima es máxima, pero para el tipo de adjunto no sucede lo mismo, ya que el grado alcohólico se mantiene casi constante destacando un leve aumento para el caso del sorgo. Estos resultados son lógicos, debido a que la levadura trabaja sobre los azúcares que ya están presentes en el mosto independiente de la procedencia de los mismos.

3.2.3. Rendimiento de la cerveza

La función objetivo obtenida por el software Statgraphics para la variable respuesta rendimiento es la siguiente:

$$Rend = 56,5523 + 11,2102 * CE + 1,61564 * TAdj - 3,99627 * CE * TAdj \quad (13)$$

$$R^2 = 95,2773\%$$

En la figura 6 se muestran los diagramas de pareto, efectos principales y superficie respuesta realizados para el rendimiento.

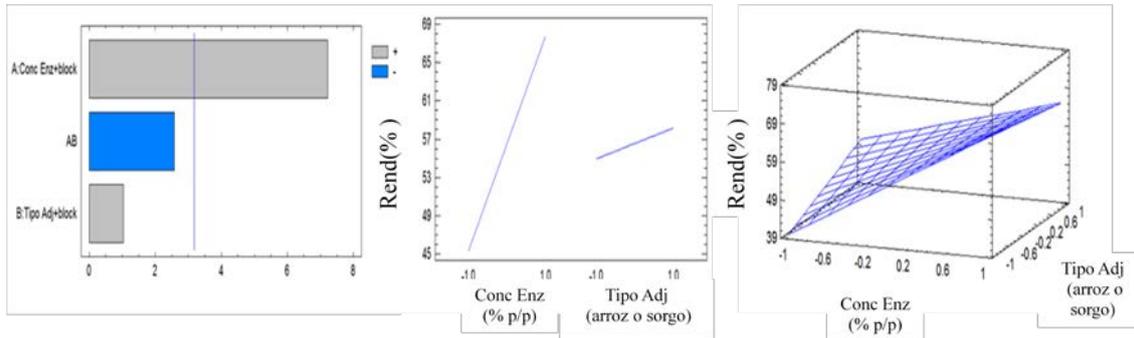


Figura 6. Diagramas de pareto, efectos principales y superficie respuesta para el rendimiento

En el rendimiento la única variable significativa es la concentración de enzima a emplear en su valor positivo. Si se observa el diagrama de efectos principales se ve como efectivamente se obtiene el mayor rendimiento cuando la concentración de enzima es máxima, pero para el tipo de adjunto no sucede lo mismo ya que el rendimiento se mantiene casi constante destacando un leve aumento para el caso del arroz.

4. CONCLUSIONES

1. En la etapa de maceración la variable significativa fue el tipo de adjunto, resultando mejor el arroz debido al elevado contenido de almidón presente en este cereal.
2. Los valores de ART en la hervidura del mosto son elevados llegando a obtener 261,07 g/L y 293,37 g/L, dada la concentración de enzima añadida, la cual no fue significativa en el estudio, por lo que se puede evaluar disminuir su concentración combinando con el tiempo de acción de la misma.
3. El ajuste de la curva de la maceración permitió con los grados Brix estimar el comportamiento de los ART para cada tipo de adjunto empleado, lo que constituye un aporte del trabajo.
4. En la etapa de fermentación, la concentración de enzima fue la única variable significativa en las variables respuesta como el contenido de azúcares reductores totales, grado alcohólico y rendimiento de la cerveza.
5. En cuanto a grado alcohólico de la cerveza, el mejor resultado fue el de la réplica del experimento 3 empleando la mayor concentración de enzima y usando sorgo como adjunto.

REFERENCIAS

- Alemán, L., Estudio de la obtención de alcohol etílico a partir de sorgo., Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, 2007.
- Bofill, Y., y Gallardo I., Ventajas de la producción de cerveza a partir de malta de sorgo.

- Revisión bibliográfica., Tecnología Química, Vol. 34, No.3, 2014, pp. 324-334.
- Calderón V.R., Celiaquía: alternativas para una dieta libre de gluten., Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología, Vol. 1, No. 23, 2012, pp. 12-15.
- Díaz, Y., Perfeccionamiento del proceso de malteado de sorgo para la producción de maltinas para enfermos celíacos., Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2014.
- Fabelo, J.A., Estudio de la etapa de fermentación alcohólica utilizando mezcla de diferentes sustratos, Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 1999.
- Gallardo, I., Boffill, Y., Ozuna, Y., Gómez, O., Pérez, M., Saucedo, O., Producción de bebidas usando sorgo malteado como materia prima para enfermos celíacos., Avances en Ciencias e Ingeniería, Vol. 4, No. 1, 2013, pp. 61-73.
- Igyor, M.A., Ogonna, A.C., Palmer, G.H., Effect of malting temperature and mashing methods on sorghum wort composition and beer flavor., Process Biochemistry, Vol. 36, No. 11, 2001, pp. 1039-1044.
- Lyumugabe, F., Gros, J., Nzungize, J., Bajyana, E. and Thonart, P., Characteristics of African traditional beers brewed with sorghum malt: a review., Biotechnology Agronomy Society and Environment, Vol. 16, No. 4, 2012, pp. 509-530.
- Nieblas, C., Gallardo, I., Rodríguez, L., Carvajal, N., González, J.F., y Pérez, M., Obtención de bebidas y otros productos alimenticios a partir de dos variedades de sorgo., Centro Azúcar, Vol. 43, No. 3, 2016, pp. 66-77.
- NTE INEN., Norma Técnica Ecuatoriana, Bebidas alcohólicas. Cerveza. Requisitos, Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador, NTE INEN 2 262:2003, 2003.
- Ortega, M., Producción de cerveza empleando integralmente el grano de sorgo., Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2016.
- Reyes, S.A., Estudio de la producción de cerveza de sorgo y cebada, a escala de laboratorio, para la implementación de una Planta Piloto., Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2013.
- Serna, S., Urías, D., del Pozo, D., y Hernández, C., Efecto de la adición de amiloglucosidasa en las propiedades de cervezas lager producidas a partir de sorgo., Revista Transferencia ITESM, Vol. 18, No. 70, 2005, pp. 1-2.
- Taylor, J.R., Mashing with malted grain sorghum., Journal of American Society of Brewing Chemists, Vol. 50, No. 0013, 1992, pp. 13-18.
- Tokpohozin, S., Fischer, S., Becker, T., Assessment of malting and mash bio-acidification on the turnover of sorghum cyanogenic glucoside and protein hydrolysis improvement., LWT - Food Science and Technology, Vol. 90, 2018, pp. 303-309.