

Licuefacción enzimática y caracterización de las propiedades reológicas de pulpa de maracuyá amarillo (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa*)

Enzymatic liquefaction and characterization of the rheological properties of pulp yellow passionfruit (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa*)

Bejarano Alva, Isabel^{1*}; Quispe Condori, Sócrates¹;
Silva Baigorria, Samuel² & Crisóstomo Gordillo, Oscar²

¹EAP de Ingeniería de Alimentos, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad Peruana Unión, Lima.

²EAP de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Química e Ingeniería Química,
Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.

Recibido 10 de febrero del 2014 - Aceptado 10 de mayo del 2014

Resumen

El objetivo de esta investigación fue realizar el proceso de licuefacción enzimática y caracterizar las propiedades reológicas en pulpa de maracuyá amarillo. Para ello, se obtuvo el mejor tratamiento enzimático a través de un diseño de superficie de respuesta, analizando la influencia de concentración de la enzima RAPIDASE® TF, temperatura y tiempo de licuefacción sobre el contenido de sólidos solubles y rendimiento. Se estudió el comportamiento reológico de la pulpa antes y luego de la licuefacción enzimática. Los mejores parámetros obtenidos en el proceso de licuefacción enzimática fueron 1.18 ml de la enzima RAPIDASE® TF /L de pulpa de maracuyá, 40.88 min a 50 °C, lo cual significó un aumento de hasta 1 ± 0.2 °Brix en los sólidos solubles y un incremento en el rendimiento hasta $9.55 \pm 0.261\%$. El fluido antes y después de la licuefacción enzimática se ajustó al modelo Ley de la Potencia, con un comportamiento dilatante. Los valores de viscosidad disminuyeron considerablemente con el tratamiento enzimático.

Palabras clave: Maracuyá, *Passiflora edulis*, flavicarpa, licuefacción enzimática, propiedades reológicas.

Abstract

The aim of this research was to accomplish the process of enzymatic liquefaction and to determine features of the rheological properties in yellow passion fruit pulp. To succeed in this the best enzymatic treatment response surface was obtained, having as independent variables the concentration of the enzyme RAPIDASE® TF (pectinase and hemicellulose), temperature and liquefaction time. The dependent variable was the content of soluble solids and yield. The rheological behavior of the pulp was analyzed before and after the enzymatic liquefaction. The best parameters obtained in the process of enzymatic liquefaction were 1.18 ml of the enzyme RAPIDASE® TF /L of passion fruit pulp, 40.88 min at 50 °C, which signified an increase up to 1 ± 0.2 °Brix in the soluble solids and an increment in performance up to $9.55 \pm 0.261\%$. The fluid, before and after the enzymatic liquefaction, was adjusted to the Power Law model with a dilatant behavior. Rheological changes in the passion fruit pulp were observed after the process of enzymatic liquefaction, with a rise in the flux behavior index and a decrease of the coefficient of consistence. The viscosity values decreased considerably with the enzymatic treatment.

Keywords: Passion fruit, *Passiflora edulis*, flavicarpa, enzymatic liquefaction, rheological properties.

*Correspondencia al autor
E-mail: ibejaranoalva@gmail.com

Introducción

La producción de maracuyá, en el Perú, es de aproximadamente 67 600 Toneladas Métricas (TM), mostrando un crecimiento del 13%, en relación al año 2012, este crecimiento se ve favorecido por la demanda mundial, mostrando una tendencia ascendente en los últimos diez años. El maracuyá es apreciado por su agradable y exótico flavor, así como sus propiedades nutricionales y medicinales. Es utilizado para la producción de yogurt, dulces, té, jaleas, néctares, entre otros productos y para generar nuevos sabores en la industria de jugos y bebidas. La importancia de la pulpa de maracuyá, como materia prima en la industria de alimentos es trascendental. Para su industrialización la microfiltración es una alternativa de ventajas significativas, pues se basa en separaciones físicas, donde el tamaño de poro de la membrana determina el punto en que son retenidos los sólidos disueltos, la turbidez y los microorganismos. Permite la obtención de un producto inocuo, sin residuos químicos, fresco y natural. Sin embargo, el maracuyá, así como todas las pasifloras, poseen semillas cubiertas por arilos constituidos por material insoluble y coloidal (Flórez et al., 2001), como pectina, celulosa, hemicelulosa, lignina (Vaillant et al., 2001), produciendo durante la microfiltración una colmatación de las membranas, causando disminución progresiva del flujo y la pérdida de la selectividad, debido a la obstrucción de los poros de la membrana (D'Souza & Mawson 2005, citado por Echavarría et al., 2011), reduce el rendimiento de producción, produce pérdida en la materia prima y aumento del tiempo de producción, provocando pérdidas económicas para la industria (Echavarría et al., 2011). La licuefacción enzimática es una alternativa útil que permite solucionar el problema de la colmatación y las consecuencias tecnológicas que esta acarrea, brindando además beneficios cuantitativos y cualitativos en el producto final. Durante el proceso de licuefacción enzimática, intervienen varios factores que permiten obtener mejores resultados, entre ellos está el tipo de enzima, concentración de enzimas, temperatura, pH, tiempo de tratamiento y velocidad de agitación. Estos parámetros influyen, de manera diferenciada, en función al sustrato, es decir, varía para cada tipo de alimento y según sus características particulares. El estudio, sobre el proceso de licuefacción enzimática de pulpa de maracuyá amarillo, identificó los mejores parámetros y su efecto sobre las propiedades reológicas, permitiendo aumentar el rendimiento de la producción, preservando y mejorando las características nutritivas y funcionales del producto, además de formar las bases para el diseño de procesos y cálculo de operaciones en los fenómenos de transferencia.

Materiales y Métodos

Materia prima

La materia prima del presente trabajo de investigación fue la pulpa de maracuyá, extraída de frutos de maracuyá (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa*) procedentes del Valle de Yaután (Ancash, Perú), recolectados en julio de 2013. La pulpa se obtuvo cortando el fruto por la mitad y sacando el contenido con una cuchara, la pulpa se separó de las pepas mediante una extractora (modelo 3157, USA) se filtró por una criba de 0.1cm.

Enzimas

RAPIDASE® TF, enzima pectinasa y hemicelulasa de *Aspergillus* sp. y *trichoderma longibrachiatum* presentación líquida. Según Padrón & Moreno (2010) la actividad estándar de la enzima Rapidase® TF es de 100.000 AVJP/g (actividades pectinasas por gramo)

Equipo de licuefacción enzimática

El equipo utilizado para la licuefacción enzimática estuvo compuesto de un baño maría (Memmert, Modelo WNE10 serie L311005, Alemania), un motor de agitación de paletas (Tipo RM 18, Janke & Kunkel, USA) sujeto a un soporte universal y un recipiente de vidrio tapado con una tapa agujereada en el centro, donde se introduce la paleta de agitación.

Análisis fisicoquímicos

Los análisis fisicoquímicos fueron realizados por triplicado. Se determinó el porcentaje de humedad, sólidos totales, rendimiento, sólidos solubles, acidez total, índice de madurez, pH y densidad de la pulpa de maracuyá antes y después de la licuefacción enzimática según la AOAC (2000).

Análisis reológico

Para el análisis reológico, se utilizó un reómetro digital Brookfield LVDV-III. Para los ensayos se utilizaron 600 ml de muestra, los datos fueron obtenidos con el software Rheocalc V. 3.2. Las medidas se realizaron en cuatro temperaturas: 10, 20, 30 y 40°C. El esfuerzo de corte, velocidad de corte y viscosidad aparente se calcularon de acuerdo a la metodología de Mitschka (1982).

Se ajustaron los datos experimentales de esfuerzo de corte y velocidad de deformación a los modelos de: (1) Ley de Newton (2) Ostwald de Waele o Ley de la Potencia, (3) Herschel Bulkley, (4) Casson y (5) Bingam, usando Excel® Solver del Software de Microsoft Excel. Se seleccionaron los modelos que representan mejor los datos experimentales, de acuerdo al coeficiente de correlación (R^2), suma de cuadrados de residuos (SRR), y chi cuadrado (X^2). Según el modelo en el que se obtuvo un mejor ajuste de los datos experimentales, se calcularon los parámetros reológicos viscosidad aparente (η_{app}), índice de comportamiento de flujo (n) y coeficiente de consistencia (k).

Licuefacción enzimática

Para determinar la cantidad de enzima a utilizar, se realizó un estudio preliminar a diferentes concentraciones de enzima (0.1; 0.4; 0.7; 1; 1.1; 1.2 ml de RAPIDASE® TF /L de pulpa de maracuyá). Todas las pruebas se realizaron a temperatura de 50°C, por 60 min, a una velocidad de agitación de 100 RPM y 3.5 de pH (pH de la pulpa). Se seleccionó tres concentraciones, de acuerdo a su efecto en los sólidos solubles y el rendimiento de la pulpa. Se tuvo como variables independientes la concentración de la enzima RAPIDASE® TF (0.1, 1 y 1.2mL de RAPIDASE® TF /L de pulpa de maracuyá). Temperatura (30, 40 y 50°C). Tiempo de incubación (40, 60 y 80 min) en baño maría. La licuefacción enzimática se realizará a una velocidad constante de agitación de 100 rpm y a pH en que se encuentra la pulpa. La inactivación enzimática se realizará por 60 segundos en baño maría a 100°C luego del tratamiento enzimático, siguiendo la metodología usada por Télesphore y He (2009). Se evaluará el efecto de las variables independientes en los sólidos solubles y el rendimiento.

Diseño estadístico

Se aplicó el diseño central compuesto centrado en las caras (CCD-CF-small). El software que se utilizó fue el Statistica 7. Los niveles para cada factor se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1
Niveles codificados de las variables independientes

Variables /Factores	Niveles		
	-1	0	1
Concentración de RAPIDASE® TF (ml/L de pulpa)	0.1	1	1.2
Tiempo (min)	40	60	80
Temperatura (°C)	30	40	50

El diseño del tipo central compuesto centrado en las caras (DCC-FC- small) se empleará para estudiar el efecto de las 3 variables independientes, cada una con tres niveles sobre la variación de los sólidos solubles en la pulpa de maracuyá. El diseño arrojará 10 corridas y 3 puntos centrales.

Validación del mejor tratamiento

Se reprodujo, en el laboratorio, la combinación del mejor tratamiento y se comparó con los valores del mejor tratamiento proyectados por la metodología.

Resultados y Discusiones

Distribución proporcional de los componentes del fruto

Se cuantificó la proporción de los componentes del fruto de maracuyá (Tabla 2). La proporción de cáscara y semillas (46.778 ± 4.623 y 11.556 ± 2.61 respectivamente) fue un poco menor a la observada por Oliveira y otros (2002) quienes registraron un 53% cáscara y 26.1% de semillas, mientras que un 20.9 % de pulpa, valor inferior a lo investigado (41.667 ± 5.25). La FAO señala que el fruto puede alcanzar hasta el 40% de jugo (pulpa) del peso de la fruta, por lo que se puede considerar que, en la investigación, se obtuvo un alto rendimiento de pulpa.

Tabla 2
Componentes del fruto de maracuyá

Componentes	Peso en gramos / 100 g de fruto
Cáscara	46.778 ± 4.623
Semillas	11.556 ± 2.61
pulpa /jugo	41.667 ± 5.25
Total	100

Licuefacción enzimática

Determinación de concentración de enzima comercial

De las pruebas, a diferentes concentraciones de enzima (Tabla 3), las concentraciones seleccionadas para el diseño estadístico que determinará los parámetros adecuados fueron 0.1; 1 y 1.2 concentración RAPIDASE® TF (ml/L de pulpa de maracuyá).

Tabla 3
Experimentos preliminares a diferentes RAPIDASE® TF

N.º de experimentos	Concentración RAPIDASE® TF (ml/L de pulpa de maracuyá)	Sólidos solubles (°Brix)	Rendimiento (%)
0	0	14	81.25
1	0.1	14	86.62
2	0.4	14.5	87.64
3	0.7	14.5	88.8
4	1	15	90.67
5	1.1	14.6	90.7
6	1.2	14.8	92.54

Obtención de los mejores parámetros en la licuefacción enzimática

Los resultados de los sólidos solubles y del rendimiento se muestran en la Tabla 4. El diseño presentó una dis-

tribución normal y con varianzas homogéneas, tanto en sólidos solubles como para el rendimiento. Los valores del coeficiente de determinación R² son mayores a 0.90 para los modelos de regresión de las variables de sólidos solubles (R²=0.9838) y rendimiento (R²=0.9748).

Tabla 4
Resultados del diseño

N.º de experimentos	Concentración RAPIDASE® TF (ml/L de pulpa de maracuyá)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Sólidos solubles (°Brix)	Rendimiento (%)
1	1	1	-1	14.2	88.195
2	0	0	-1	14.2	88.915
3	-1	-1	-1	14.0	85.408
4	-1	0	0	14.0	86.018
5	1	0	0	14.4	89.187
6	0	1	0	14.7	89.219
7	0	-1	0	14.4	87.912
8	1	-1	1	14.6	88.916
9	-1	1	1	14.1	86.921
10	0	0	1	14.8	89.928
11 (C)	0	0	0	14.4	89.201
12 (C)	0	0	0	14.5	89.020
13 (C)	0	0	0	14.5	89.092

En los sólidos solubles el R²ajust fue de 0.9676 y en el rendimiento el R²ajust fue de 0.9496. El análisis de varianza para los sólidos solubles (Tabla 5) muestra que estos fueron afectados significativamente por los parámetros lineales concentración, tiempo y la temperatura (p-value <0.05), además de

las interacción entre la concentración de la enzima Rapidase TF y la temperatura. Estos resultados se obtuvieron ignorando los efectos del parámetro cuadrático de temperatura y la interacción de temperatura-tiempo y concentración-tiempo, pues no eran significativos.

Tabla 5
ANOVA de la variable sólidos solubles

	SS	Df	MS	F	p
(1)Concentración de enzima (ml /L de pulpa)(L)	0.150	1.000	0.150	70.452	0.000
Concentración de enzima (ml /L de pulpa)(Q)	0.045	1.000	0.045	21.312	0.004
(2)Tiempo (min)(L)	0.073	1.000	0.073	34.449	0.001
Tiempo (min)(Q)	0.005	1.000	0.005	2.419	0.171
(3)Temperatura (°C)(L)	0.085	1.000	0.085	39.832	0.001
1L by 3L	0.112	1.000	0.112	52.526	0.000
Error	0.013	6.000	0.002		
Total SS	0.788	12.000			

El análisis de varianza, para el rendimiento (Tabla 6), muestra que este fue afectado significativamente por los parámetros lineales de concentración de enzima, tiempo y temperatura, los parámetros cuadráticos de concentración y tiempo; además de la interacción en-

tre concentración de la enzima y temperatura (p-value <0.05). Estos resultados se obtuvieron ignorando los efectos el parámetro cuadrático de temperatura y la interacción de temperatura-tiempo y concentración-tiempo.

Tabla 6
ANOVA de la variable rendimiento

	SS	df	MS	F	p
(1)Concentración de enzima (ml /L de pulpa)(L)	7.065	1.000	7.065	74.286	0.000
Concentración de enzima (ml /L de pulpa)(Q)	0.664	1.000	0.664	6.986	0.038
(2)Tiempo (min)(L)	0.794	1.000	0.794	8.353	0.028
Tiempo (min)(Q)	0.629	1.000	0.629	6.608	0.042
(3)Temperatura (°C)(L)	1.122	1.000	1.122	11.794	0.014
1L by 3L	0.143	1.000	0.143	1.508	0.265
Error	0.571	6.000	0.095		
Total SS	22.629	12.000			

De los ANOVA se extraen los coeficientes de regresión de los factores e interacciones que tienen significancia, siguiendo la ecuación 1.

$$SS=14.386-0.257C-0.922C^2-0.004t-0.016 T+0.045 T^2 \quad (1)$$

$$R=74.449+4.913 C-3.528C^2 +0.164t-0.001t^2+0.014T \quad (2)$$

Donde: SS = Sólidos solubles (°brix), R = Rendimiento (%), C = Concentración de la enzima RAPIDASE® TF (ml/L de pulpa de maracuyá), t=Tiempo (min), T= Temperatura (°C)

La superficie de respuesta de las variables sólidos solubles y rendimiento se muestran en la Figura 1 y Figura 2.

La Figura 1a muestra la interacción entre la concentración de enzima y el tiempo. A una concentración

intermedia (desde 0.4 hasta 1.2) y a un tiempo superior a 60 min se logra una concentración de sólidos solubles hasta 14.6°Brix. La Figura 1b describe la dependencia de los sólidos solubles con la concentración de enzima y la temperatura. A una concentración igual o superior a 0.8 ml de RAPIDASE® TF y con una temperatura superior a 44 °C se obtiene mayor concentración de sólidos solubles de hasta 14.8°brix. La Figura 1 c indica el efecto del tiempo y la temperatura sobre los sólidos solubles. A mayor tiempo y temperatura, con una concentración de RAPIDASE® TF igual a 0.823077 mayor sólidos solubles.

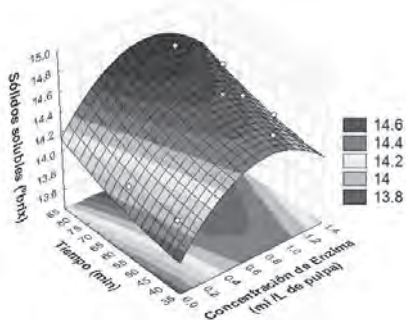
Los sólidos solubles de la pulpa sin tratamiento enzimático fueron de 14°brix, un valor similar observado por Ciabotti et al. (2000) (14.04 °brix) y Araujo et al. (2009) (14.20°brix), y mayor a los reportados por

Penteado y otros (sd) que reportaron valores mucho menores, 11.7 ± 0.4 °Brix y al igual que Domingues y otros (2011) (12.6 °Brix).

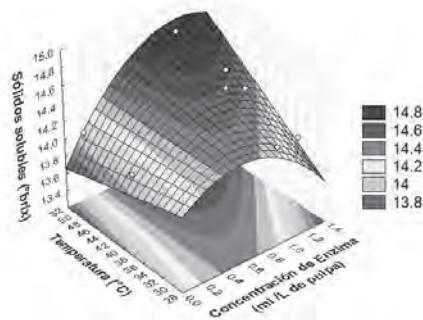
Luego del tratamiento enzimático, se tuvo un cambio en la concentración de sólidos solubles, esto se pudo explicar por la composición de la enzima RAPIDASE® TF que incluye pectinasas y la hemicelulasas. Según Kashyap et al. (2001) las pectinasas comerciales poseen principalmente niveles altos de poligalacturonasa, que hidrolizan el α ,1-4 glicosídico de la pectina desmetilada (ácido poligalacturónico) en

oligo y mono galaturonatos. Laverde (2010) analizó la enzima RAPIDASE® TF encontrando actividad pectiniliasa, endoglucanasa, celobiohidrolasa, pectinmetilesterasa y exoarabianasa, lo cual explicaría la liberación de los azúcares neutros que posee la cadena de pectina como son L-ramnosa, D-glucosa, D-galactosa, L-arabinosa, D-xilosa. Por otro lado, la hemicelulasa rompe los enlaces β ,1-4 y β ,1-3 de los componentes de la celulosa, dando como producto endo- y exo- xilosa, hexosas (glucosa, manosa y galactosa), ácidos urónicos (galacturónicos y glucurónicos) y algunos desoxi azúcares (Soriano, 2004).

a. Nivel temperatura=40 °C



b. Nivel tiempo= 60 min



c. Nivel concentración =0.823077

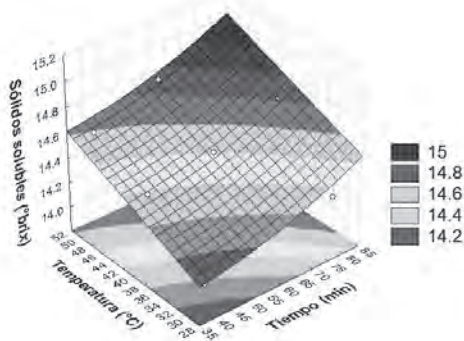


Figura 1. Superficies de respuesta de la pulpa de maracuyá sometida a licuefacción enzimática, en función a la temperatura, tiempo y concentración de enzima considerando los valores reales.

La Figura 2a muestra la variación del rendimiento de la pulpa de maracuyá, con el cambio de concentración de RAPIDASE® TF y tiempo, a una temperatura intermedia de 40 ° C. A un rango de 0.8 a 1.2 y a un tiempo superior de 45 min, se obtuvo un mayor rendimiento (hasta 89%). La Figura 2b muestra los efectos de interacción entre la concentración de RAPIDASE® TF y la temperatura. A una temperatura superior a 38°C y a una concentración intermedia (0.8

-1.2) se obtiene un rendimiento hasta 89%. La Figura 2c indica que a una concentración de RAPIDASE® TF de 0.8231, a mayor temperatura (superior a 36°C) y a mayor tiempo 70 ± 10 se obtiene mayor rendimiento.

En los resultados se obtuvo un aumento en el rendimiento hasta 8.68%, valor menor al reportado por Contreras Esquivel J et al. (2005) quienes obtuvieron hasta

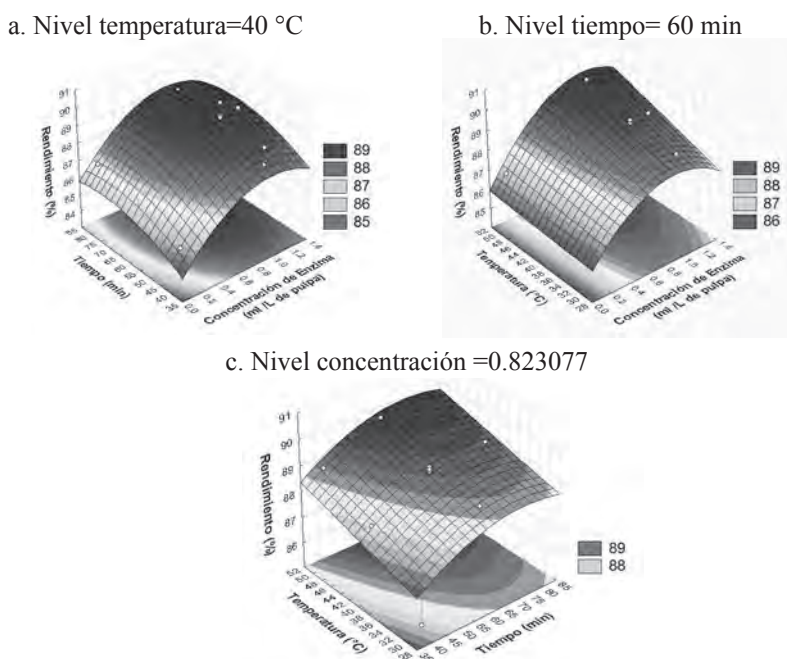


Figura 2. Superficies de respuesta de la pulpa de maracuyá sometida a licuefacción enzimática en función a la temperatura, tiempo y concentración de enzima, considerando los valores reales.

un 13%. Por otro lado Télésphore & He (2009), quienes además de pectinasas, trabajaron con enzimas amilasas obtuvieron un aumento en el rendimiento de 23%.

En la literatura, existen investigaciones con otros frutos, Laverde (2010) en el estudio de licuefacción enzimática de la pulpa de arza aplicando la enzima RAPIDASE® TF, encontró un aumento significativo del rendimiento en 18 y 51%, con el permeado y retenido del arazá. Singh et al. (2012) obtuvieron un aumento del 17.5% en el rendimiento respecto al jugo de la fruta de beal.

Los cambios en el rendimiento se pueden explicar por el efecto del tratamiento enzimático. La pectina posee la tendencia de retener el agua, con la acción de la pectinasa la pectina disminuye, produciendo que se suelte el agua libre del sistema, aumentando el rendimiento y disminuyendo la viscosidad (Kashyap et al., 2001; Lee et al., 2006; citados por Singh et al., 2012) y aumentando la claridad (Demir et al., citado por Singh et al., 2012).

El mejor tratamiento se obtuvo mediante el programa Design-Expert y la temperatura que logró mejores resultados en rendimiento y sólidos solubles fue 50°C, temperatura que coincide con diversas investigaciones con pectinasas comerciales (Ben-Shalom et al., 1986; Alkorta et al., 1996; Sakai et al., 1993, citados

por Belitz & Grosch 1997). La temperatura óptima es importante durante el tratamiento enzimático, pues define el aumento de la velocidad de reacción y el aumento de la velocidad de inactivación o muerte (Belitz & Grosch 1997).

En cuanto al tiempo y la concentración de enzimas, estas fueron de 40.88 min y 1.18 ml/L de pulpa de maracuyá. Se obtuvo que los efectos de la concentración de las enzimas, temperatura y tiempo de incubación sobre el pulpa de maracuyá fueron significativos al igual en los estudios de Télésphore & He (2009) con pulpa de maracuyá púrpura.

Validación del mejor tratamiento

El mejor tratamiento, según el diseño estadístico, fue 1.18 ml de enzima RAPIDASE® TF/L de pulpa de maracuyá, 40.88 min a 50 °C. Los valores del mejor tratamiento proyectados por la metodología fueron de 14.73 °Brix y de 89.929% de rendimiento.

En el trabajo experimental aplicando las mejores condiciones, el aumento de sólidos solubles fue de 1 punto (de 14 a 15 ± 0.2 °Brix). El valor final del rendimiento fue de 90.804 ± 0.398, obtuyéndose un aumento en el rendimiento de 9.55 ± 0.261. Estos resultados muestran un aumento significativo a nivel industrial.

Análisis físico-químico de la pulpa de maracuyá amarillo, antes y después de la licuefacción enzimática

Los resultados de los análisis físico-químico de la pulpa de maracuyá se muestran en la Tabla 7. En cuanto al porcentaje de humedad (84.694 ± 0.114) se obtuvieron valores similares a los reportados por Pentead y otros (sd) ($84.68 \pm 0.09\%$) y valores menores a los mencionados por Vaillant et al. (2001) (88 %). El porcentaje de acidez titulable total (ácido cítrico) fue de 4.032 ± 0.003 muy parecido a los valores medidos por Ciabotti et al. (2000) 4.92 ± 0.04 g ácido cítrico / 100 g. El pH inicial de la pulpa de maracuyá fue de 3.493 ± 0.006 , menos ácido que los presentados por Araujo et al. (2009) (2.87), Ciabotti et al. (2000) (2.88 ± 0.01) y Vaillant et al. (2001).

Se observó, luego de la licuefacción enzimática, un pequeño incremento de pH y acidez, así como un aumento de sólidos y disminución de la claridad. La humedad no varió de manera considerable (ver Tabla 7). En la literatura se observan las mismas tendencias, un ligero aumento de los °Brix, acidez, azúcares totales, rendimiento de jugo y claridad, y una considerable disminución de los sólidos insolubles en

alcohol, pH y viscosidad aparente debido a la licuefacción enzimática en el mango y otras variedades de frutas (Gupta & Girish 1988, Sreenath et al., 1987, Sreenath & Santhanam, 1992). El ligero incremento en la acidez de la pulpa, tratada con enzima, se debe probablemente a liberación de grupos carboxilo de las moléculas de pectina (Iboyaima et al., 1999). La turbidez en los zumos y pulpas de frutas es causada por partículas cuyo núcleo está formado por carbohidrato y proteínas. Los grupos prototrofos de la proteína tiene carga positiva al pH de la pulpa (pH 3,5 aproximadamente) a estos se le enfrentan las pectinas cargadas negativamente, que forman la parte externa de la partícula. La acción de las pectinasas produce, en un inicio, una pectinólisis parcial conduciendo a la exposición del núcleo positivo, produciendo una agregación entre policationes y polianiones y, como consecuencia, la floculación (Belitz & Grosch, 1997).

La variedad de los valores reportados en la literatura, para características físico-químicas de la pulpa de maracuyá, son afectadas por el grado de madurez del fruto; condiciones en que se encuentre la planta; la fecha de cosecha, el clima, el tamaño del fruto, tiempo y condiciones de almacenamiento (Pruthi, 1963).

Tabla 7
Características físico-químicas de la pulpa de maracuyá amarillo, antes y después de la licuefacción enzimática

Componentes	Proporción	
	Antes	Después
Humedad (%)	84.694 ± 0.114	83.960 ± 0.132
Sólidos totales (%)	15.306 ± 0.114	16.0 ± 0.132
Sólidos Solubles (°Brix)	14.000	15.000
pH	3.493 ± 0.006	3.333 ± 0.012
Acidez Titulable (% ácido cítrico)	4.032 ± 0.003	3.712 ± 0.003
Índice de Madurez	3.472	4.041
Claridad (Abs)	0.475 ± 0.006	0.079 ± 0.004

Identificación del modelo y los parámetros reológicos

El modelo que mejor representó a los datos, tanto en la pulpa antes como después del proceso de licuefacción, fue el de Ley de la Potencia (ver Tabla 8). Según los valores del índice de comportamiento de flujo ($n > 1$), se trataría de un fluido dilatante. Para confirmarlo se analizó el comportamiento del esfuerzo de corte y la viscosidad aparente vs la velocidad de deformación, observándose que el esfuerzo de corte

aumenta con el incremento de la velocidad de deformación, al igual que la viscosidad aparente con respecto a la velocidad de deformación (ver Figura 3). En un análisis comparativo de los parámetros reológicos, estos variaron con respecto a su valor antes de la licuefacción enzimática. El índice de consistencia de flujo (n) aumentó y el coeficiente de consistencia (k) disminuyó. En la literatura se observa un comportamiento similar en el caso de licuefacción enzimática en pulpa de mango (EL- Mansy et al., 2003) y acerola (Martins et al., 2000).

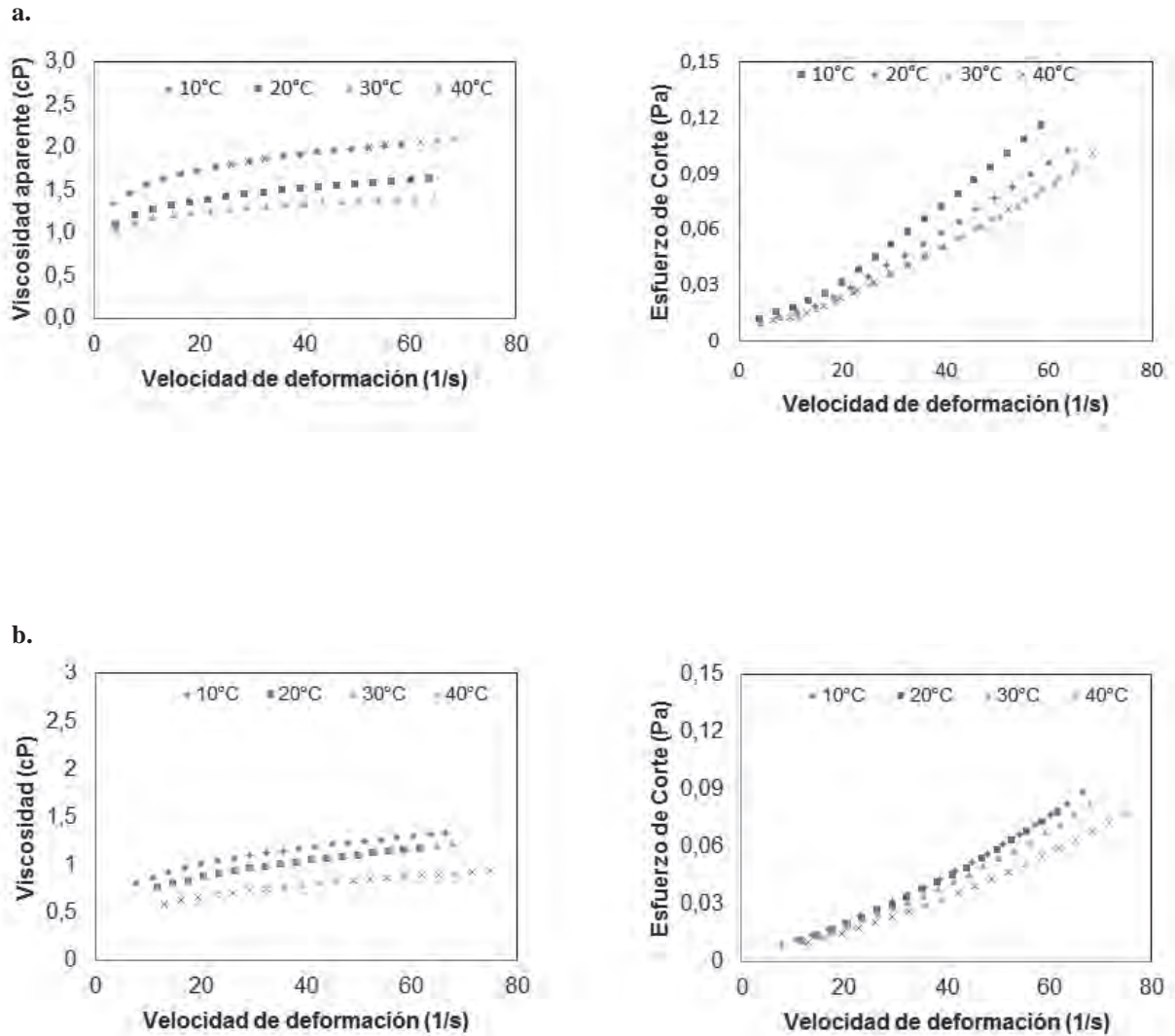


Figura 3. Comportamiento de flujo de la pulpa de maracuyá amarillo a diferentes temperaturas, antes (a) y después (b) de la licuefacción enzimática.

Tabla 8

Ajuste de los modelos y parámetros reológicos para la pulpa de maracuyá amarillo, antes y luego del proceso de licuefacción enzimática

Modelo	Antes del proceso de licuefacción				Después del proceso de licuefacción			
	10(°C)	20(°C)	30(°C)	40(°C)	10(°C)	20(°C)	30(°C)	40(°C)
Ley de Newton								
Viscosidad	0.0019	0.0015	0.0013	0.0014	0.0012	0.0012	0.0011	0.0009
x2	0.0083	0.0066	0.0058	0.0044	0.0055	0.0059	0.0064	0.0059
R2	0.9898	0.9913	0.9919	0.9919	0.99	0.9926	0.991	0.9903
SSR	0.0002	0.0002	0.0001	0.0002	0.0003	0.0002	0.0003	0.0003
Ley de la Potencia								
K (Pa.sⁿ)	0.0011	0.0009	0.0009	0.0011	0.0005	0.0004	0.0004	0.0003
N	1.152	1.1438	1.1091	1.152	1.2331	1.2602	1.263	1.2632
x2	0.0142	0.0105	0.0089	0.1006	0.0023	0.0007	0.0009	0.0011
R2	0.9962	0.9969	0.9962	0.9972	0.9979	0.9987	0.9982	0.9979
SSR	0.0001	0.0001	0.0001	0.0111	0	0	0	0
Herschel Bulkley								
Eco	0	0	0	0	0	0	0	0
K (Pa. sⁿ)	0.0019	0.0015	0.0013	0.0014	0.0012	0.0012	0.0019	0.0009
N	1	1	1	1	1	1	1	1
x2	0.005	0.0038	0.0029	0.0039	0.0055	0.0055	0.2531	0.0057
R2	0.9898	0.9913	0.9919	0.9919	0.99	0.9926	0.991	0.9903
SSR	0.0002	0.0002	0.0001	0.0002	0.0003	0.0002	0.0241	0.0003
Casson								
Eco	0.0456	0.0416	0.0456	0.0406	0.0456	0.04	0.0371	0.0353
K (Pa. sⁿ)	0.0465	0.0407	0.0465	0.0318	0.0465	0.0234	0.0216	0.0196
x2	0.0862	0.0813	0.0576	0.1868	0.0922	0.2107	0.3356	0.3359
R2	0.084	0.0659	0.0895	0.0211	0.0269	0.0126	0.0044	0.0048
SSR	0.0221	0.0186	0.0201	0.018	0.0322	0.0196	0.0171	0.0156
Bingham								
Eco	0	0	0	0	0	0	0	0
K (Pa. sⁿ)	0.0019	0.0015	0.0019	0.0019	0.0012	0.0012	0.0011	0.0009
x2	0.0044	0.0036	0.106	0.1157	0.0059	0.0043	0.006	0.0057
R2	0.9898	0.9913	0.9919	0.9919	0.99	0.9926	0.991	0.9903
SSR	0.0002	0.0002	0.0085	0.0097	0.0003	0.0002	0.0003	0.0003

Conclusiones

Los mejores parámetros obtenidos en el proceso de licuefacción enzimática fueron 1.18 ml/L de pulpa de maracuyá, 40.88 min a 50 °C.

La simulación con los mejores parámetros permitió el obtener hasta 15 ± 0.2 °Brix (lo que significó un aumento de 1 ± 0.2 °Brix) y un rendimiento hasta 90.804 ± 0.398 % (un incremento en 9.55 ± 0.261 %).

El fluido antes y después de la licuefacción enzimá-

tica se ajustó al modelo Ley de la Potencia, con un comportamiento dilatante.

Se pudo observar cambios reológicos en la pulpa de maracuyá, luego del proceso de licuefacción enzimática, con un aumento del índice comportamiento de flujo y la disminución del coeficiente de consistencia.

Los valores de viscosidad disminuyeron considerablemente con el tratamiento enzimático. La viscosidad disminuyó, con el aumento de temperatura.

Referencias

- AOAC. (2000). *Fruits and fruits products*. In K. Helrich, Official methods of analysis of the association of official analytical chemists. USA: Association of Official Analytical Chemists. 910-928 pp.
- Araujo, A., Azevedo, B., Costa, C. & Azoubel, P. (2009). *Caracterização físico-química da polpa de maracujá do Mato*. Congresso latinoamericano de analistas de alimentos 2 (SBAAL).
- Belitz, H. & Grosch, W. (1997). *Química de los alimentos*. Segunda Edición. España: Editorial Acirbia. 1087p. ISBN: 84-200-0835-4.
- Ciabotti, E., Duarte, M. & Cavalcanti, M. (2000). Alterações das características físico-químicas da polpa de maracujá amarelo submetido a diferentes técnicas de congelamento inicial. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*. 2(1):51-60.
- Contreras Esquivel, J., Charles Rodríguez, A., Renovato-Núñez, J., Montañez Saenz, J., Espinoza Pérez, J., Medina Morales, M. & Zamora Iruegas, C. (2005). *Desarrollo de un bioproceso de licuefacción de pulpa de maracuyá por vía enzimática*. XI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería.
- Domingues, R., Braz, S., Bernardes, R., Scaramal, G., Ataíde C., Cardoso, V. & Hespagnol, M. (2011). *Comportamento reológico da polpa de maracujá amarelo (Passiflora Edulis F. Flavicarpa)*. Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos (CIBIA 8).
- Echevarría, A., Conde, J., Pagán, J. & Ibarz, A. (2011). *Optimización de la eliminación de una torta de colmatación de pectina en membrana de microfiltración*. Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos (CIBIA 8).
- EL- Mansy, H., EL- Samahy, S., Askar, A., Omran, H. & AbdEl- Salam, N. (2003). *Effect enzyme treatments and concentration of mango pulp on its flow behavior*. 3rd International Symposium on food Rheology and Structure.
- FAO. (2006). *Fichas Técnicas- Maracuyá (Passiflora edulis var. Flavicarpa)*. (Consultado en agosto 15 de 2013). Formato html. Disponibilidad libre en: <http://www.fao.org/inpho_archive/content/documents/vlibrary/ae620s/pfrescos/MARACUYA.HTM>.
- Flórez, P., Fernández, A. & Martínez, N. (2001). *Hidrólisis Enzimática de los sólidos solubles de la pulpa de maracuyá*. Universidad Politécnica de Valencia: Departamento de Tecnología de Alimentos.
- Gupta, T. & Girish, K. (1988). Studies on mango pulp filtration for concentration by pectinolytic enzyme treatment. *Indian Food Packer*. 42(6):7-14
- Iboyaima, N., Dhuique-Mayer, C. & Lozano, Y. (1999). *Physico-chemical changes during enzymatic liquefaction of mango pulp (cv. Keitt)*. Centre de Cooperation Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRQD)
- Kashyap, D., Vohra, P., Chopra, S. & Tewari, R. (2001). Applications of pectinases in the commercial sector: a review. *Bioresource Technology* 77: 215- 227
- Laverde, J. (2010). *Estudio de las condiciones óptimas para la obtención de jugo clarificado de arazá (Eugenia Stipitata), mediante procesos enzimático y membranario*. [Proyecto para la obtención del título de Ingeniero Agroindustrial Escuela Politécnica Nacional]. Directora: M. Sc. Beatriz Brito Grandes/ Co directora: Ph D Jenny Ruales. Quito: Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria. Escuela Politecnica Nacional. 153p.

- Martinez, M. (2009). *Estudio cinético de la producción secuenciada de pectinasas en Aspergillus Flavipes FP-500* [Tesis de doctorado en ciencias de bioprocesos]. Asesores: Dr Juan Silvestre, Dr Guillermo Aguilar. México: Instituto Politécnico Nacional. 113p. Defendido el 2009.
- Mitschka, P. (1982). Simple conversion of Brookfield RVT readings into viscosity functions. Institute of Chemical Process Fundamental. *Rheologica Acta* 21 (2): 207-209.
- Oliveira, L., Nascimento, M., Borges, S., Ribeiro, P. & Ruback, V. (2002). Aproveitamento alternativo da casca do maracujá-amarelo (*Passiflora edulis* var. Flavicarpa) para produção de doce em calda. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas 22 (3):259-262.
- Padrón, C. & Moreno, M. (2010). Evaluation of the use of enzymes and gravity filtration for clarification of diluted mixture of cactus (*Opuntia boldinghii* Britton & Rose) fruits pulp, orange and grapefruit juices. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín* 63(1): 5429-5439.
- Penteado, D., Telis, J. & Tafari, K. (Sd). *Análises físico-químicas da polpa de maracujá amarelo azedo (Passiflora edulis flavicarpa)*. Universidade Estadual Paulista. (Consultado en Agosto 20 de noviembre de 2013). Formato pdf. Disponibilidad libre en: <http://prope.unesp.br/xxi_cic/27_00471990167.pdf>.
- Pruthi, J. (1963). Physiology, Chemistry and Technology of Passion Fruit. *Advances in Food Research* 12 (4):203-374.
- Singh, A., Kumar, S. & Sharma, H. (2012). Effect of enzymatic hydrolysis on the juice yield from bael Fruit (*Aegle marmelos Correa*) pulp. *American Journal of Food Technology* 7(2):62-72.
- Soriano, M. (2004). *Análisis de sistemas pectinolíticos bacterianos-Aislamiento y caracterización de las pectinasas-PelA de Paenibacillus sp. BP-23 e YpA de Bacillus subtilis*. [Tesis de doctorado en Biología]. Asesor: Dr. Francisco I. Javier Pastor Blasco. España: Universidad Autónoma de Barcelona. 255 p. Defendido el 2004-05.
- Sreenath, H., Nanjundaswamy, M. & Sreekantiah, K. (1987). Effect of various cellulases and pectinases on viscosity reduction of mango pulp. *Journal food Science*. 52(1): 230-231.
- Sreenath, H. & Santhanam, K. (1992). Comparison of cellulolytic and pectinolytic treatment of various fruit pulps. *Chem. Mikrobiol. Technol Lebensm* 14:46-50.
- Télesphore, M. & He, Q. (2009). Optimization of Processing Parameters for Cloudy Passion Fruit Juice Processing Using Pectolytic and Amylolytic Enzymes. *Pakistan Journal of Nutrition* 8 (11): 1806-1813. ISSN 1680-5194.
- Vaillant, F., Millan, A., Dornier, M., Decloux, M. & Reynes, M. (2001). Strategy for economical optimisation of the clarification of pulpy fruit juices using crossflow microfiltration. *Elsevier Journal of Food Engineering* 48:83-90.