

Effect of temperature on the rheological behavior of zapote pulp (*Calocarpum sapota* Merr)

**Ricardo David Andrade Pizarro, Ramiro Torres Gallo,
Everaldo Joaquín Montes Montes, Omar Andrés Pérez Sierra,
Cindy Elena Bustamante Vargas, Bettyna Beatriz Mora Vargas**

Universidad de Córdoba, Carrera 6 No. 76-103, Colombia.
randrade@sinu.unicordoba.edu.co, rtorres@sinu.unicordoba.edu.co,
emontes@sinu.unicordoba.edu.co, operez@sinu.unicordoba.edu.co,
cindyelena506@hotmail.com, bemora12@hotmail.com

Abstract

The effect of temperature on the rheological behavior of whole zapote pulp (*Calocarpum sapota* Merr) was determined, with temperatures ranging from 10°C to 65°C. For the obtaining of the zapotes pulp, they were processed in the plant pilot fruits and vegetables section of the University of Córdoba, to this pulp were made rheological analyses to different temperatures by means of the Brookfield viscometer model Dv-II + Pro. The apparent viscosity data adjusted to properly the Power Law model ($R^2 \geq 0.9958$) with consistency index of 637 to 3800 Pa.sⁿ and flow behavior index of 0,027 to 0,133, presenting a pseudoplastic behavior. The consistency index diminished with the temperature and flow behavior index increased, which indicates that the zapote pulp loses pseudoplasticity and becomes less viscous when the temperature is increased.

Key words: Rheology, pseudoplastic, power law, consistency index, tropical fruit.

Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de zapote (*Calocarpum sapota* Merr)

Resumen

El efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa integral de zapote (*Calocarpum sapota* Merr) fue determinado, en un rango de temperatura de 10°C a 65°C. Para la obtención de la pulpa, los zapotes se procesaron en la planta piloto sección Fruver de la Universidad de Córdoba, a esta se le realizaron los análisis reológicos a diferentes temperaturas, por medio del viscosímetro Brookfield modelo Dv-II + Pro. Los datos de viscosidad aparente se ajustaron adecuadamente al modelo de Ley de Potencia ($R^2 \geq 0,9958$), con índice de consistencia entre 637 y 3800 Pa.sⁿ e índice de comportamiento al flujo entre 0,027 y 0,133, presentando un comportamiento seudoplástico. El índice de consistencia disminuyó con la temperatura y el índice de comportamiento al flujo aumentó, lo que indica que la pulpa de zapote pierde seudoplasticidad y se vuelve menos viscosa a medida que se incrementa la temperatura.

Palabras clave: Reología, seudoplástico, ley de potencia, índice de consistencia, fruta tropical.

Introducción

El zapote es una fruta nativa de Centro América de donde se difundió hacia el Caribe,

Sur América, Hawai y las Filipinas [1], hace parte de la familia *Sapotaceae* de la cual se han identificado más de cuatrocientas especies [2]. La cubierta es gruesa y leñosa y de un color anaranja-

do-rojizo, la pulpa de los frutos maduros puede ser de color salmón, naranja, roja o roja-carmelita y tiene una textura que varía entre suave y uniforme a finamente granulada [3].

La pulpa de zapote posee un alto porcentaje de carbohidratos (31,88%) y sólidos solubles (27,480°Brix), lo cual es un punto muy favorable para lograr un mejor aprovechamiento de esta fruta a nivel industrial. Su alto contenido en pectina, lo hace muy apetecido para la elaboración de mermeladas y jaleas [4]. Para la fabricación de productos de frutas, como jugos, néctares y jaleas, se utiliza la pulpa integral, la cual es sometida a varios procesos de industrialización. Para que cada etapa del proceso sea económicamente viable es fundamental el conocimiento de las propiedades físicas y químicas de las pulpas de frutas. Dentro de estas propiedades, el comportamiento reológico es muy importante, siendo útil en el control de calidad e indispensable en el diseño, evaluación y operación de equipos utilizados en el procesamiento de alimentos, tales como bombas, sistemas de agitación e intercambiadores de calor [5, 6].

Las pulpas de frutas son generalmente fluidos no newtonianos, con la viscosidad aparente disminuyendo con el incremento del gradiente de deformación. Muchos modelos han sido utilizados para caracterizar el comportamiento reológico de pulpas de frutas, el más usado es la Ley de potencia (Ec. 1).

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

donde: τ es el esfuerzo cortante, $\dot{\gamma}$ es el gradiente de deformación, k es el índice de consistencia y n es el índice de comportamiento al flujo.

Varios factores afecta el comportamiento reológico de las pulpas de frutas, destacándose la temperatura [7]; en el caso de fluidos que obedecen a la ley de la potencia, la variación con la temperatura se produce en el índice de consistencia k , pudiéndose representar por un modelo tipo Arrhenius (Ec.2), mientras el índice de comportamiento al flujo n no varía, pero en algunos alimentos se ha encontrado que este puede variar linealmente (Ec. 3) con la temperatura absoluta [8].

$$k = A \cdot e^{\frac{E_a}{RT}} \quad (2)$$

$$n = a + bT \quad (3)$$

donde: k es el índice de consistencia (Pa.sⁿ), T es la temperatura absoluta (K), R es la constante de los gases (8,314 J/mol K), E_a es la energía de activación al flujo (J/mol), A es una constante del material (Pa.sⁿ), n es el índice de comportamiento al flujo (adimensional), a y b , son constantes que se determinan experimentalmente [8].

En este trabajo experimental, se evalúa el efecto de la temperatura (10, 20, 30, 40, 50, 60 y 65°C) en el comportamiento reológico de la pulpa de zapote (*Calocarpum sapota* Merr.), adicionalmente se analizaron las características fisicoquímicas (Acidez, pH, °Brix) de la pulpa.

Parte experimental

Elaboración de la pulpa de zapote

El zapote utilizado era proveniente de la región de Los Córdoba y Valencia, en el departamento de Córdoba, Colombia. Los frutos se seleccionaron teniendo en cuenta su estado físico y de maduración, estos fueron lavados en agua clorada a 50 ppm, escaldados a una temperatura de 75°C por 5 minutos y enfriados a temperatura ambiente, posteriormente se realizó el despulpado, la homogenización y la pasteurización de la pulpa de zapote a 65°C por 30 minutos. La pulpa se empacó en bolsas de polipropileno y se almacenaron.

Caracterización de la pulpa de zapote

Para la caracterización de la pulpa se realizaron los siguientes análisis fisicoquímicos: Sólidos solubles (°Brix), medido directamente en un refractómetro (marca Mettler Toledo, modelo 30 px), pH por medio de lectura directa en un potenciómetro (marca Mettler Toledo, modelo GmbH) y acidez total por el método A.O.A.C. 942.15/90 Adaptado [9].

Determinación de parámetros reológicos

Se tomaron 400 mL de muestra de pulpa de zapote en un Beaker de 600 mL, determinando la viscosidad aparente en un viscosímetro Brookfield modelo Dv-II+ Pro. Se efectuaron pre-ensayos con los diferentes spindle, seleccionando el

que mostrara los valores de viscosidad aparente en todo la escala de velocidad de rotación, con un rango de torque del 10-100%. La muestra con la temperatura de evaluación elegida, se situó en el equipo y se le realizaron dos corridas, una en forma ascendente y otra en forma descendente, variando las velocidades de rotación desde 0,5 a 100 rpm hasta alcanzar el valor máximo, en este punto se esperaron 5 minutos, para luego realizar la corrida en forma descendente hasta llegar a 0,5 rpm. El valor de las viscosidades arrojadas por el equipo, en cada una de las velocidades de rotación, se tomó cada dos minutos. Este procedimiento se efectuó de igual manera para cada una de las temperaturas evaluadas (10, 20, 30, 40, 50, 60 y 65°C).

Cada tratamiento fue realizado por triplicado y para cada repetición se utilizó una nueva muestra. Para el mantenimiento de la temperatura de las muestras de 10 y 20°C se utilizó un baño de hielo y para las muestras de 30, 40, 50, 60 y 65°C, se utilizó un baño serológico (marca Indulab modelo Ref 009B).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos de la velocidad de rotación (rpm) y viscosidad aparente se analizaron estadísticamente por medio de un análisis de varianza para determinar si había diferencias significativas entre las curvas de ascenso y descenso de cada uno de los tratamientos y de esta manera verificar si la pulpa de zapote presentaba tixotropía. Estos datos fueron ajustados a la ec. (4) utilizando el método de Mitschka [10].

$$\eta = k_{ef} N^{n-1} \quad (4)$$

donde η es la viscosidad aparente (Pa.s), k_{ef} es el índice de consistencia efectivo (Pa.s/ rpm¹⁻ⁿ), N es la velocidad de rotación (rpm) y n es el índice de comportamiento al flujo (adimensional).

Para obtener el gradiente de deformación (s⁻¹) de cada uno de los tratamientos en las diferentes velocidades de rotación se utilizó la ec. (5), tomando los valores de n obtenidos de la ec. (4) [10].

$$\gamma = (0,263 n^{-0,771}) N \quad (5)$$

donde γ es el gradiente de deformación (s⁻¹), n es el índice de comportamiento al flujo (adimensional) y N es la velocidad de rotación (rpm).

La obtención del ajuste al modelo de la ley de Potencia se efectuó utilizando las curvas de viscosidad aparente (Pa.s) vs gradiente de deformación (s⁻¹), el análisis del ajuste de este modelo se realizó a través de los parámetros estadísticos de coeficiente de determinación (R²) y las pruebas de validación de supuestos.

La influencia de la temperatura sobre los parámetros reológicos (k y n) se determinó por medio de un análisis de varianza realizado a los modelos de regresión ajustados a dichas variables, los parámetros Índice de consistencia e índice de flujo se ajustaron a la ecuación de Arrhenius (Ec. 2) y al modelo lineal (Ec. 3) respectivamente, utilizando el coeficiente de determinación (R²) y las pruebas de validación de supuestos.

Resultados y discusión

Caracterización de la pulpa de zapote

Los valores de la caracterización fisicoquímica de la pulpa de zapote se muestran en la Tabla 1.

Los valores de pH, acidez total y °Brix, obtenidos se asemejan a los reportados por Negrete y Simanca [4] confirmando con esto, que la pulpa de zapote, tiene una acidez baja y con alto contenido en sólidos solubles, lo que representa una ventaja para el aprovechamiento de este fruto a nivel agroindustrial.

Determinación de parámetros reológicos

Para la medición de la viscosidad aparente de las muestras de pulpa de zapote el spindle del viscosímetro Brookfield modelo Dv-II + Pro seleccionado fue el N° 6, ya que todos los valores de viscosidad aparente se encontraban en un rango de torque de 10-100%.

Los análisis de varianza efectuados a la variable de viscosidad aparente (Pa.s) bajo las distintas temperaturas ajustadas a los tipos de curvas consideradas, indican que no existen diferencias significativas entre las curvas de ascenso y descenso con un nivel de confianza del 95%. Por

lo que la pulpa de zapote no presenta tixotropía en el rango de 10 a 65°C.

La pulpa de zapote en el rango de temperaturas estudiado, se ajusta adecuadamente al modelo de Ley de potencia ($R^2 \geq 0,9958$), presentando un fuerte comportamiento pseudoplástico, ya que en todos los tratamientos el valor del índice de comportamiento al flujo (n) fue menor que uno (Tabla 2). Este modelo y comportamiento ha sido reportado para muchas pulpas de frutas, como mango [8, 11-14], guayaba [15-17], cereza de las indias [18] y níspero [19]. El índice de comportamiento al flujo para todos los tratamientos es muy pequeño, esto puede deberse a que la pulpa de zapote presentó un aspecto gomoso.

Desde el punto de vista industrial, este comportamiento pseudoplástico, facilita el flujo de la pulpa y el intercambio de calor durante el procesamiento, debido a que una disminución de la viscosidad aparente ocasiona una menor pérdida de carga durante el flujo, dando como resultado una menor demanda de energía para su procesamiento.

En la Figura 1 se muestra el comportamiento reológico de la pulpa de zapote a diferentes temperaturas con la respectiva línea de ajuste al modelo de Ley de Potencia, donde se observa la disminución de la viscosidad aparente a medida que aumenta el gradiente de deformación, corroborando el comportamiento pseudoplástico de las muestras. Este comportamiento es típico para las pulpas de frutas lo que concuerda con lo expuesto por Haminiuk *et al.* [20].

Los modelos de regresión múltiple (Tabla 3) realizados para evaluar la influencia de la temperatura sobre los parámetros k y n , muestran existe una influencia de la temperatura sobre estos parámetros, con una confiabilidad del 95%. El tratamiento térmico tiene mayor efecto en el índice

Tabla 1
Caracterización fisicoquímica de la pulpa de zapote

Parámetros físico-químicos	Valor*	σ
Acidez total (% ácido cítrico anhidro)	0,0225	0,0004
pH	6,263	0,0058
Sólidos solubles (°Brix a 24°C)	29,26	0,2516

* Promedio aritmético. σ Desviación estándar.

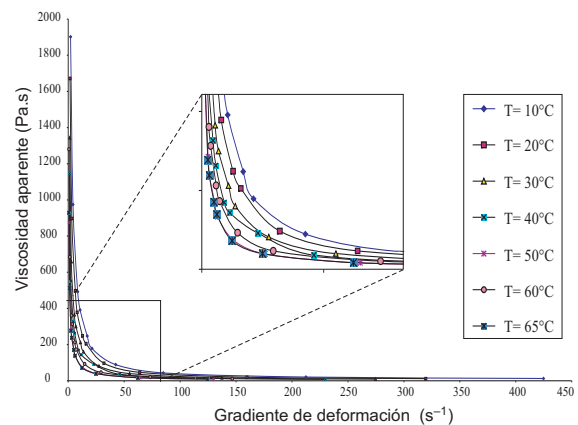


Figura 1. Reograma de la pulpa de zapote a las temperaturas de 10-65°C.

ce de consistencia que en el índice de flujo, lo que concuerda con Krokida *et al.* [21].

El efecto de la temperatura sobre el índice de consistencia se describe adecuadamente con la ecuación de Arrhenius (Tabla 4), presentando una energía de activación al flujo de 23952,5 J/mol. En la Figura 2 se observa el aumento del índice de consistencia con el inverso de la temperatura, mostrando que el índice de consistencia

Tabla 2
Parámetros reológicos de la ley de potencia para la pulpa de zapote

Parámetros	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	65°C
k (Pa.s ⁿ)	3800	2770	1860	1350	650	983	637
n	0,027	0,039	0,048	0,060	0,126	0,108	0,133
R^2	0,9969	0,9985	0,9989	0,9958	0,9986	0,9995	0,9992

R^2 Coeficiente de determinación.

Tabla 3
Regresión múltiple para los parámetros reológicos

Parámetro		Estimado	Error estándar	Valor t	Pr
k, Pa.s ⁿ	Intercepto	3860,786	382,517	10,093	0,000164***
	Temperatura	-54,456	8,767	-6,211	0,001580 **
n	Intercepto	-0,0014948	0,0146365	-0,102	0,92263
	Temperatura	0,0020050	0,0003355	5,977	0,00188**

Tabla 4
Constantes de la ecuación de Arrhenius y el modelo lineal

Modelo	Parámetros	Valores	R ²
Arrhenius (k)	Ea, J/mol	23952,5	0,9781
	A, Pa.s ⁿ	0,1435	
Lineal (n)	b	-0,5095	0,9419
	b, K ⁻¹	0,001865	

disminuye con el aumento de la temperatura, indicando que la pulpa de zapote se vuelve menos consistente a medida que se incrementa la temperatura. El índice de comportamiento al flujo se ajusta al modelo lineal (Tabla 4) y en la Figura 3 se observa que el índice de flujo aumenta con la temperatura en el rango evaluado, lo que demuestra que el fluido pierde pseudoplasticidad; esto concuerda con lo reportado para pulpa de mango [8, 13, 14, 22], pulpa de mango centrifugada [23] y con el jugo de la “cereza de las indias” [18]. Usualmente los homogeneizados de pulpas de frutas exhiben este comportamiento, y en muchos casos puede atribuirse a la presencia de sustancias de alto peso molecular en solución y/o a los sólidos dispersos en la fase líquida [24].

Conclusiones

La caracterización Físico-química de la pulpa de zapote (*Calocarpum sapota* Merr.) la clasifica como baja en acidez y con un alto valor en sólidos solubles (°Brix), lo que demuestra su alto potencial para la agroindustrialización ya que puede ser utilizada para la elaboración de diferentes productos tales como: néctares, pulpas, salsas, jugos, entre otros.

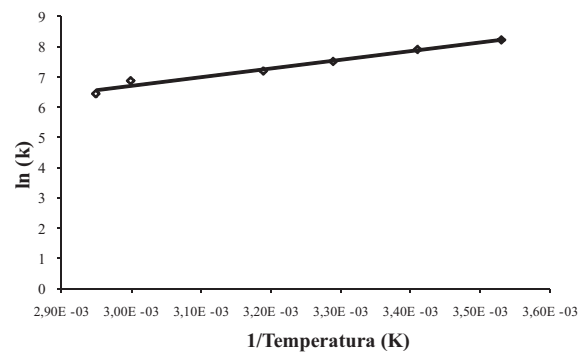


Figura 2. Efecto de la temperatura sobre el parámetro K para la pulpa de zapote.

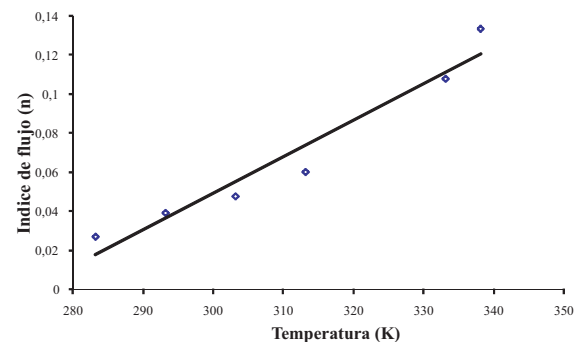


Figura 3. Efecto de la temperatura sobre el parámetro n para la pulpa de zapote.

Las propiedades reológicas de pulpas de frutas, como el zapote, son importantes para su aplicación en el tratamiento térmico, donde su integridad física y sus atributos químicos pueden ser alterados. El comportamiento pseudoplástico y la alta viscosidad aparente de la pulpa de zapote, indican que tendrá inconvenientes al iniciar el flujo, lo que se puede contrarrestar con la utilización de bombas de desplazamiento positivo.

El comportamiento reológico de la pulpa de zapote en las temperaturas de 10°C a 65°C, es representado por el modelo Ostwald de Waele o Ley de potencia, exhibiendo un fuerte comportamiento no newtoniano con características pseudoplásticas y no presentando tixotropía.

La pulpa de zapote pierde pseudoplasticidad y se vuelve menos consistente a medida que se incrementa la temperatura y sus parámetros reológicos se ven afectados por la temperatura, donde el índice de comportamiento al flujo (n) se ajusta a un modelo lineal ($n = a + bT$) y el índice de consistencia (k) al modelo de Arrhenius, con una energía de activación de 23952,5 J/mol.

Referencias bibliográficas

1. Centro nacional de tecnología agropecuaria y forestal. Guía técnica para el cultivo del zapote. El salvador. (2003). <http://www.centa.gob.sv//documentos/guias/zapote.pdf>.
2. Olaya, C. Frutas de América, Tropical y Subtropical, Historia y Usos. Santa Fe de Bogotá: Norma S.A, 1991.
3. Balerdi, C. F.; Crane J. H. El Mamey Sapote en Florida. Florida. (2005). <http://miamidadefruit.ifas.ufl.edu/programs/tropicalfruit/Publications/mamey.pdf>.
4. Negrete, E.; Simanca, M. "Evaluación de la pasterización, edulcoración, adición de conservante químico y concentración de la pulpa de zapote (*Calocarpum sapota* Merr)". Tesis de grado. Universidad de Córdoba, Facultad de Ciencias agrícolas, Montería, Colombia. (1999), 39p.
5. Ibarz, A.; Gonçalves, C. A.; Explugas, S. "Rheology of clarified passion fruit juices". *Fruit Processing*, Vol. 6 (1996) 330-333.
6. Queiroz, A. J. M.; Vidal, J. R. M.; Gasparetto, C. A. Influência dos sólidos suspensos na reología do suco de abacaxi. In: encontro sobre escoamento em meios porosos, 1996, Uberlândia, MG. p. 49-53
7. Holdsworth, S. D. "Applicability of rheological models to the interpretations of flow and processing behavior of fluid food products". *Journal of Texture Studies*, Vol. 2 (1971) 393-418.
8. Vidal, J.; Pelegrine, D.; Gasparetto, C. "Effect of the rheological behavior of mango pulp (*Magifera indica* L-Keitt)". *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Vol. 24, No. 1 (2004) 39-42.
9. A.O.A.C. Official method of analysis, 16 th edition, Washington: Association of official analytical chemists, 1990.
10. Briggs, J.L.; Steffe, J.F. "Using Brookfield data and the Mitschka method to evaluate power law food". *Journal of Texture Studies*, Vol. 28 (1997) 517-522.
11. Pelegrine, D.; Vidal, J.; Gasparetto, C. "Study of aparent viscosity of mango (*Keitt*) and pineapple (*Pérola*) pulps". *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Vol. 20, No. 1 (2000) 128-131.
12. Branco, I.; Gasparetto, C. "Response surface methodology applied to the study of temperature effect on the rheological behavior of ternaries mixtures with mango pulp and orange and carrot juices". *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Vol. 23, Supl (2003) 166-171.
13. Dak, M.; Verma, R.; Sharma, G. "Flow characteristics of juice of "Totapuri" mangoes". *Journal of Food Engineering*, Vol. 76, No. 4 (2006) 557-561.
14. Dak, M.; Verma, R.; Jaaffrey, S. "Effect of temperature and concentration on Rheological properties of "Kesar" mango juice". *Journal of Food Engineering*, Vol. 80, No. 4 (2007) 1011.-1015.
15. Ferreira, G.; Melo, A.; Silvestre, R.; Gasparetto, C. "Efeito da temperatura no comportamento reológico das polpas de caju e goiaba". *Revista Ciências Exatas e Naturais*, Vol. 4, No. 2 (2002) 175-184.
16. Sánchez, C.; Oria, R.; Sánchez-Gimeno, A. Efecto de la temperatura en las propiedades reológicas de purés de guayaba (*Psidium*

- Guajaba L.). Grupo de Investigación en Alimentos de Origen Vegetal. Universidad de Zaragoza (España), 2006.
17. Andrade, R.D.; Ortega, F.; Montes, E.; Torres, R.; Pérez O.; Castro, M.; Gutiérrez L. "Caracterización fisicoquímica y reológica de la pulpa de guayaba (*Psidium guajava* L.) variedades Híbrido de Klom Sali, Puerto Rico, D14 y Red." VITAE, Vol. 16, No 1 (2009) 13-18.
 18. Da Silva, F.; Guimaraes, D.; Gasparetto, C. "Rheology of acerola juice: effects of concentration and temperature". *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Vol. 25, No. 1 (2005) 121-126.
 19. Andrade, R.D.; Torres, R.; Montes, E.J.; Pérez, O.A.; Restan, L.E.; Peña, R.E. "Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de níspero (*Achras sapota* L.)". *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*, Vol. 26, No. 4 (2009) 591-604.
 20. Haminiuk, C.; Sierakowski, M.; Izidoro, D.; Masson, M. "Rheological Characterization of Blackberry Pulp". *Brazilian journal of food technology*, Vol. 9, No. 4 (2006) 291-296.
 21. Krokida, M. K.; Maroulis, Z. B.; Saravacos, G. D. "Rheological properties of fluid fruit and vegetable puree products: compilation of literature data". *International Journal of Food Properties*, Vol. 4, No. 2 (2001) 179-200.
 22. Vidal, J.; Gasparetto, C. "Rheological behavior of mango pulp (*Mangifera indica* L) - effect of insoluble solids". *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Vol. 20, No. 2 (2000) 172-175.
 23. Vidal, J.; Sierakowski, M.; Haminiuk, CH.; Masson, M. "Propiedades reológicas da pulpa de manga (*Magifera indica* L. cv. Keitt) centrifugada". *Ciência e Agrotecnologia*, Vol. 30, No. 5 (2006) 955-960.
 24. Medina, M.; Pagano, F. "Caracterización de la pulpa de guayaba (*Psidium guajava* L.) tipo "Criolla Roja". *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, Vol. 20, No. 1 (2003) 72-86.

Recibido el 9 de Marzo de 2009

En forma revisada el 15 de Marzo de 2010