

Influencia de la Temperatura y Concentración sobre el Comportamiento Reológico de la Pulpa de Tuna (*Opuntia ficus Indica*)

Matos-Chamorro, Alfredo¹; Aguilar-Alata, Danny Alberth²

Resumen

El objetivo de este trabajo fue determinar la influencia de la temperatura y concentración sobre los parámetros reológicos como el índice de flujo (n) e índice de consistencia (K) de la pulpa de tuna variedad blanca. El estudio del comportamiento reológico fue estudiado a concentraciones de 13, 20 y 27 °Brix y temperaturas de 25, 45 y 65°C, la distribución de los experimentos se realizó con un diseño central compuesto centrado en las caras (DCC-CC), generado y analizado con el software STATISTICA 7.0. Las medidas reológicas se realizaron con un reómetro rotacional Brookfield DV-III+. El comportamiento reológico fue ajustado adecuadamente a la ley de la potencia ($R^2 > 0.9$), definiendo a la pulpa de tuna como un fluido pseudoplástico ($n \leq 0.881$). Existe una influencia positiva de la concentración sobre K , fue ajustado a un modelo exponencial ($R^2 > 0.9$), un efecto inverso tuvo la temperatura sobre el mismo valor. El análisis de varianza (ANVA) muestra que existe un efecto significativo de la concentración y temperatura sobre k , a valores inferiores de 25°C y concentraciones por encima de 27°Brix, se pueden obtener mayores índices de consistencia.

Palabras Clave: Pseudoplástico, ley de la potencia, pulpa de tuna, índice de consistencia, *Opuntia ficus*.

Influence of Temperature and Concentration on the Rheological Behavior of the Pulp of Prickly Pear (*Opuntia ficus Indica*)

Abstract

The aim of this study was to determine the influence of temperature and concentration on the rheological parameters of flow index (n) and consistency index (K) on the white variety of prickly pear pulp. Rheological behavior was studied at concentrations of 13, 20 and 27°Brix and temperatures of 25, 45 and 65 °C, the distribution of the experiments were performed using a central composite face-centered design (DCC-DC), which was generated and analyzed with STATISTICA 7.0 software. The rheological measurements were performed using Brookfield Rotational Rheometer DV-III +. The rheological behavior was compared to the power law ($R^2 > 0.9$), defining the flesh of tuna as a pseudoplastic fluid ($n \leq 0.881$). There is a positive influence on K concentration, was fitted with a model exponentially ($R^2 > 0.9$), had an inverse effect of temperature on the same value. The analysis of variance (ANOVA) indicates a significant effect on concentration and temperature with regards to k , at values lower than 25°C and concentrations above 27°Brix, showed higher rates of consistency.

Keywords: Pseudoplastic, power law, prickly pear pulp, consistency index.

Introducción

La tendencia de consumo de alimentos, está relacionado con la demanda de frutas procesadas, debido a que los consumidores requieren alimentos confiables y saludables con alto contenido de vitaminas. Hay un creciente interés por los productos orgánicos, frutos silvestres y exóticos.

El fruto de la tuna (*Opuntia ficus Indica*) es un fruto ovoide no climatérico, oriundo de los andes del Perú y Bolivia y de la meseta central de México. En el Perú crece en diversos climas y terrenos, es cultivado en la sierra y costa, desde el nivel del mar hasta los 3 mil metros, pero su mejor desarrollo se encuentra entre 1850 y 2920 msnm, y a temperaturas entre 12 y 34 °C, puede ser almacenada a refrigeración 7 °C durante 21 días, conservando muy bien sus características organolépticas (Condeña 1997).

¹Universidad Peruana Unión. alfredom@upeu.edu.pe

²EAP Ingeniería de Alimentos, Universidad Peruana Unión, daniel_stf@upeu.edu.pe

De las dos fracciones que componen el fruto (pulpa, cáscara), la pulpa comprende el 54 % de parte comestible, y es la más utilizada como producto fresco, procesados (jugos de conserva, cremas, mermeladas) (Chirinos 1994; Solano 2003).

Cruz (1996) indica que este fruto posee azúcares reductores (4.95 mg glucosa/ml extracto) además contiene proteínas y sales minerales apropiados para procesos de fermentación, también proporciona alta cantidad de calorías (56 - 66 calorías / 100 g).

La tuna presenta 40 mg/g de ácido ascórbico mayores que la manzana, pera, uva y banana, es buena fuente de potasio (217 mg/100g), tiene un bajo contenido de sodio (0.6 a 1.19 mg/100g) representado una ventaja para ser consumida por personas con problemas renales o de hipertensión (Sepúlveda y Sáenz, mencionados por Sáenz 2006).

Para que la pulpa se constituya un insumo apto para la industria, debe procesarse y cumplir algunas características de calidad, en especial la viscosidad o consistencia, característica física fundamental en pulpas de frutas (Rubio 1974). La calidad de un producto alimentario depende de factores, entre ellos la textura en el caso de sólidos o consistencia en líquidos y semilíquidos (Lewis 1993; Roudot y Claude 2004).

La determinación de los parámetros reológicos, permite saber la forma como el fluido alimentario fluye a través de sistemas de tuberías (Batty y Folkman 1990). Es decir, con el conocimiento de estos parámetros se pueden hacer cálculos para el diseño de equipos como bombas, intercambiadores de calor, evaporadores, deshidratadores y todos los equipos en los que existe flujo o cambios en la consistencia. Al ser involucrados como un índice de la calidad del alimento, conducen a relacionarlos con la aceptabilidad por medidas físicas (Alvarado 1996).

Comportamiento reológico

Para describir el comportamiento reológico

existen varios modelos matemáticos como el Ostwald de Waele o ley de la potencia, que permiten relacionar la tensión de cizalla (σ) y el gradiente de deformación ($\dot{\gamma}$), este modelo es representado por la ecuación 1 (Alvarado y Aguilera 2001).

$$\sigma = K \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

Influencia de la temperatura sobre el comportamiento reológico

El efecto de la temperatura sobre el índice de consistencia, se puede describir utilizando la ecuación de Arrhenius (Ecuación 2) mencionado por Ibarz y otros (2000).

$$K = n * \exp\left(\frac{Ea}{RT}\right) \quad (2)$$

Efecto de la concentración

Se han descrito dos tipos de correlaciones o modelos matemáticos para considerar el efecto de la concentración en la viscosidad o índice de consistencia, según los modelos potencial y exponencial expuestos en la ecuación 3 y 4 (Ibarz y otros 2000).

$$\eta = K_1 C^{A1} \quad (3)$$

$$\eta = K_2 \exp(A_2 C) \quad (4)$$

El objetivo de este estudio fue evaluar la influencia de la temperatura y concentración sobre el comportamiento reológico de la pulpa de tuna.

Materiales y Métodos

La materia prima utilizada fue la tuna blanca procedente de Huarochirí-Lima. Este trabajo se realizó en el laboratorio de Tecnología de Alimentos, laboratorio de Química y laboratorio del Centro de Investigación de Ciencia de los Alimentos de la Universidad Peruana Unión.

La obtención de la pulpa de tuna se llevó a cabo mediante una despulpadora mecánica marca SERVIFABR con capacidad de 200 Kg/h, luego se incrementó a 13, 20 y 27 °Brix, mediante adición de sacarosa. Las muestras fueron almacenadas en bolsas de polietileno de alta densidad (HD) bajo refrigeración entre 0 y 7°C por 2 días (Wiley 1997), hasta realizar los análisis fisicoquímicos y reológicos.

Caracterización fisicoquímica

Se han realizado los siguientes análisis fisicoquímicos a 13 °Brix: pH por el método potenciométrico (AOAC - 981.12), sólidos solubles por el método refractométrico (AOAC - 932.12) (2000), acidez total por el método de titulación AOAC – 947.05) (2000), Humedad por el método gravimétrico de pérdida de peso en estufa (AOAC – 925.09) y densidad por el picnómetro.

Medidas reológicas

Las medidas reológicas fueron realizadas mediante un reómetro rotacional Brookfield DV-III+ (Lewis 1993; Alvarado y Aguilera 2001).

Se utilizó el SPINDLE RV 1, las velocidades rotacionales del cilindro interno estuvieron dentro del rango de 0.5 a 100 RPM. A partir de los datos de porcentaje de corte y velocidad de rotación del spindle se calculó la tensión cizalla y el gradiente de velocidad mediante la metodología de Mitschka (1982).

Cálculo de los parámetros reológicos

Los valores experimentales de tensión de cizalla y gradiente de deformación fueron ajustados al modelo Ostwald de Waele (Ecuación 1) para el cálculo de los parámetros K y n. El ajuste se realizó, utilizando el software Microcalc Origin 5.0.

Efecto de la temperatura y concentración de sólidos en los parámetros reológicos

El efecto de la temperatura sobre K fue evaluado mediante la ecuación 2. El efecto de la concentración sobre el mismo parámetro se evaluó mediante las ecuaciones 3 y 4, para la

elección del modelo que mejor representa los datos experimentales se utilizó los datos de coeficiente de determinación (R^2).

Diseño experimental.

Para la distribución de los experimentos se utilizó un diseño central compuesto centrado en las caras (DCC-CC), los niveles de las variables se muestran en la tabla 1.

Tabla 1- Codificación del Diseño central Compuesto centrado en las caras

Factores	Niveles decodificados		
	-1	0	1
Temperatura (°C)	25	45	65
Concentración (°Brix)	13	20	27

El análisis de varianza de los efectos de las variables y del efecto combinado de concentración y temperatura sobre K y n, fueron analizados mediante el software STATISTICA 7.0.

Resultados y Discusión

Caracterización fisicoquímica

En la tabla 2 se muestra los resultados obtenidos de la caracterización físico química de la pulpa de tuna.

Tabla 2- Caracterización físico química del jugo de tuna de 13 °Brix

Humedad (%)	79.4 %
°Brix	13
pH	6.33
Densidad (g/ml)	1,05
Acidez total (ácido cítrico)	0.06

Repo y Encina (2008) y Catalán (1994) obtuvieron humedades de 81.7 y 82.3 % para la variedad blanca, similar a lo obtenido. El

Tabla 3- Resultados de los parámetros calculados según el diseño central compuesto centrado en las caras para la pulpa de tuna

	Concentración	Temperatura	n	k	R ²
1	-1	-1	0,793	0,096	0,945
2	-1	1	0,881	0,055	0,923
3	1	-1	0,294	1,271	0,996
4	1	1	0,237	0,807	0,979
5	-1	0	0,788	0,080	0,922
6	1	0	0,233	0,953	0,998
7	0	-1	0,556	0,334	0,963
8	0	1	0,587	0,183	0,912
9 (C)	0	0	0,636	0,184	0,925
10 (C)	0	0	0,636	0,184	0,926
11 (C)	0	0	0,643	0,180	0,926

contenido de sólidos solubles fue de 13 °Brix, pH 6.33 y acidez (% ácido cítrico) 0.06 estos datos son similares a los encontrados por Sepúlveda y Sáenz (citados por Sáenz 2006); Repo y Encina (2008) reportaron 13.2 -13.8 °Brix, pH 6.37 y acidez total de 0.06 para la misma variedad.

Valladolid (mencionado por Catalán 1994) indica que la madurez de la tuna para esta variedad puede ser relacionada con la densidad, esta debe ser 1.048 g/ml, similar a lo obtenido, por lo que se puede mencionar que el fruto estaba maduro.

Comportamiento reológico de la pulpa de tuna

Los parámetros reológicos calculados del modelo de Ostwald de Waele para cada ensayo se muestran en la tabla 3.

Como se observa los valores de n son menores a la unidad, indicando que la pulpa de tuna posee un comportamiento pseudoplástico. Rao (citado por Alvarado y Aguilera 2001) menciona que la mayoría de fluidos alimentarios son no-newtonianos presentando un comportamiento pseudoplástico, como por ejemplo, los jugos concentrados, purés, pulpa de frutas y vegetales entre otros. También puede observarse que estos datos se ajustan a la ley de la potencia ($R^2 > 0.9$), confirmando que el modelo de la ley de la

potencia es adecuado para describir el flujo de pulpa de frutas en fluidos pseudoplásticos (Alvarado 1996).

En las Figuras 1, 2 y 3 se representan los reogramas de la relación entre la tensión de cizalla y la gradiente de deformación para la pulpa de tuna de 13, 20 y 27 °Brix respectivamente, confirmando que a mayor concentración hay un esfuerzo de corte mayor.

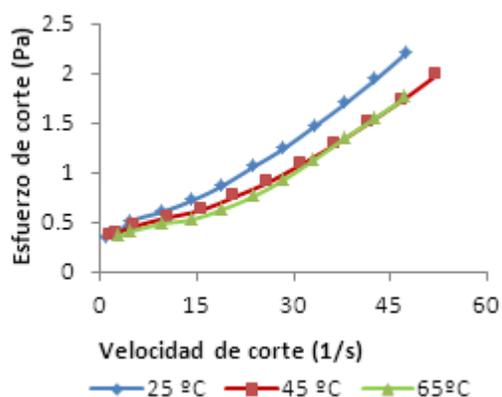


Figura 1- Reograma de la pulpa de tuna a 13 °Brix

Las pulpas con alto contenido de sólidos solubles, presentan un comportamiento más complejo

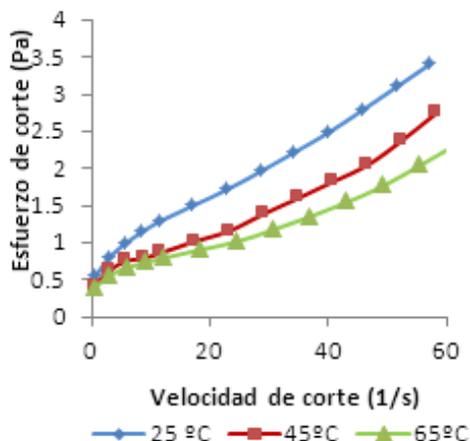


Figura 2- Reograma de la pulpa de tuna a 20 °Brix

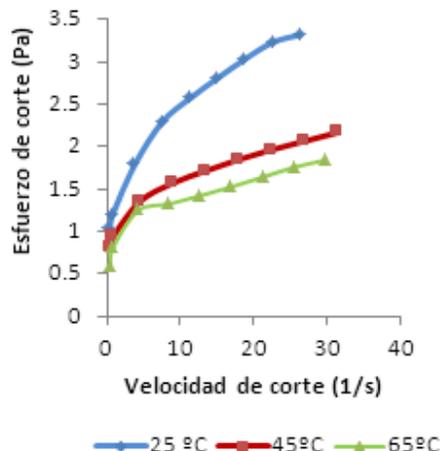


Figura 3- Reograma de la pulpa de tuna a 27 °Brix

requiriendo por ello un mayor esfuerzo de corte debido a la presencia de partículas suspendidas o formación de enlaces entre partículas sólidas que contienen protopectina (Alvarado 1996). Pero a medida que se incrementa la temperatura dentro de una misma concentración, el esfuerzo de corte va disminuyendo, dado que a elevadas temperaturas se rompen enlaces o moléculas que influyen en la viscosidad. Muñoz y otros (2009) encontraron que las pulpas de pera concentradas tienen un comportamiento pseudoplástico. Pizarro y otros (2007) encontraron similares índices de flujo para el zapote ($n=0.0392$), níspero ($n=0.2208$) y guanábana (0.2211) definiendo el dominio de la pseudoplasticidad en estas pulpas.

Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de pulpa de tuna

El efecto de la temperatura sobre el índice de consistencia se presenta en la tabla 4 y figura 4.

Tabla 4- Efecto de la temperatura en el índice de consistencia (k) en la pulpa de tuna

Temperatura (°k)	K 13 °Brix	K 20 °Brix	K 27 °Brix
298	0,096	0,334	1,27
318	0,080	0,184	0,953
338	0,055	0,183	0,81
Ea(KJ/mol)	11.59	12.86	9.48

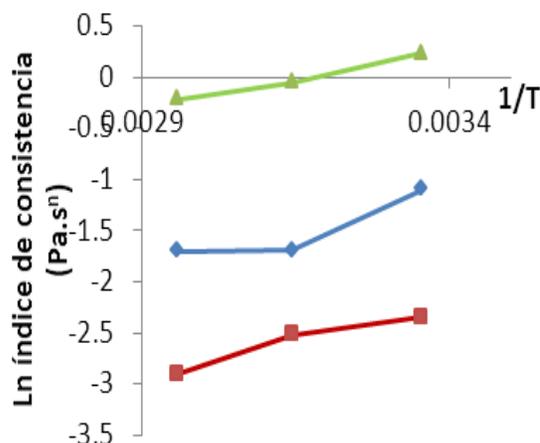


Figura 4- Efecto de la temperatura en el índice de consistencia de la pulpa de tuna

Según la ecuación de Arrhenius, al correlacionar el inverso de la temperatura absoluta contra el logaritmo del índice de consistencia, se cumple la linealidad prevista por el modelo. En la figura 4 se puede observar que los valores de energía de activación calculados están entre 9.48 y 11.59 KJ/mol, además se ve que el índice de consistencia disminuye con el incremento de la temperatura, este mismo comportamiento fue observado por Kawasoe y Lopes (2007) en pulpas de jabuticaba.

Los valores de Ea obtenidos, están entre 9.48 KJ/

mol a 12.86 KJ/mol, Muñoz y otros (sf) obtuvieron valores de E_a entre 7.25 y 20.78 KJ/mol en pulpas de durazno concentradas de 12.5 a 28 °Brix, evaluadas a temperaturas de 30 a 65°C.

Efecto de la concentración en los parámetros reológicos

El efecto de la concentración sobre el índice de consistencia fue evaluado con las ecuaciones 3 y 4. En la tabla 5 se reportan los valores de los parámetros de la ecuaciones potencial y exponencial.

Tabla 5- Parámetros del modelo potencial exponencial y ajuste del modelo

Modelo exponencial	Temperatura (°C)		
	25	45	65
a	0,007	0,002	0,002
b	0,189	0,222	0,208
R ²	0,999	0,992	0,999
Modelo potencial			
a	9,04E-7	3,29E-8	1,13E-7
b	4,29442	5,21278	4,78857
R ²	0,995	0,983	0,993

Como se observa, en ambos casos, el ajuste de los datos experimentales del índice de consistencia respecto a la concentración fue con los valores de R² superiores a 0.9, los valores ajustados al modelo exponencial son mostrados en la figura 5, donde se aprecia que al incrementar la concentración, aumenta el índice de consistencia y este disminuye al elevar la temperatura.

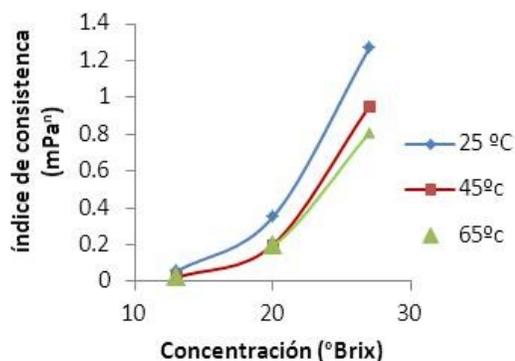


Figura 5 - Modelo Exponencial para el ajuste del índice de consistencia

Efecto combinado de la temperatura y concentración en los parámetros reológicos n y K

Según el análisis de varianza (ANVA) mostrados en la Tabla 6, existe diferencia significativa (p<0.05) de la influencia de C(L), C(Q), T(L) y T (Q), concluyendo que la temperatura tiene un efecto inverso sobre K, caso contrario ocurre con la concentración sobre el mismo valor, tal como es mostrado en la figura 6.

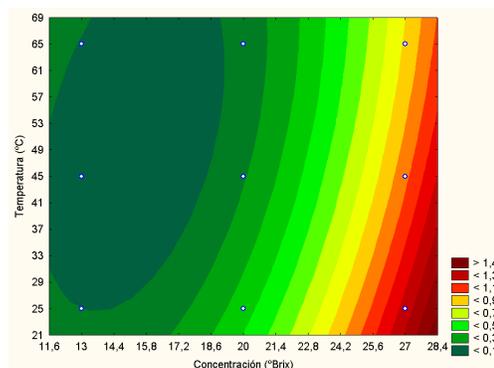


Figura 6 - Superficie de respuesta del índice de consistencia

Tabla 6. Análisis de varianza (ANVA) del efecto de la temperatura y concentración sobre el índice de consistencia

	SS	d F	MS	F	p
(1) Concentración (L)	1,309	1	1,309	945,016	0.000001
Concentración (Q)	0,253	1	0,253	182,588	0.000040
(2) Temperatura (L)	0,071	1	0,071	51,352	0.000823
Temperatura (Q)	0,008	1	0,008	6,038	0,05743
1 y 2	0,044	1	0,044	31,85	0.002424
Error	0,007	5	0,001		
Total SS	1,739	10			

Como se observa en la figura 6, para obtenerse un mayor índice de consistencia, debe aumentarse la concentración por encima de 27°Brix y disminuir la temperatura por debajo de 25°C como valores promedio

Conclusiones

Se determinaron los valores de índice de consistencia ($k \leq 1.271$) e índice de flujo ($n \leq 0.881$) para la pulpa de tuna de 13, 20 y 27 °Brix y temperaturas de 25, 45 y 65°C, determinándose el dominio de la pseudoplasticidad sobre esta pulpa, estos valores fueron ajustados a la ley de la potencia, obteniéndose un buen ajuste con la ($R^2 > 0.9$).

La concentración influye sobre el índice de consistencia, obteniéndose un mejor ajuste con la ecuación exponencial.

La concentración y temperatura tienen un efecto significativo sobre el índice de consistencia, a valores inferiores de 25 °C y concentraciones por encima de 27 °Brix, se obtienen mayores índices de consistencia.

La concentración influye sobre el índice de consistencia, obteniéndose un mejor ajuste con la ecuación exponencial.

Simbología usada

σ : es la tensión de cizalla [Pa]

γ : Es el gradiente de deformación [1/s]

K: es el índice de consistencia [mPa^n]

n: es el índice de comportamiento de flujo [Adimensional]

n_a = constante denominada viscosidad de deformación infinita.

E_a = Energía de activación [KJ/mol]

R= Constante de universal de los gases [8.314J/g.mol.K]

R=Constante de universal de los gases [8.314J/g.mol.K]

T = temperatura absoluta [°K]

K_1, K_2, A_1, A_2 son constantes.

R^2 = Coeficiente de determinación

Referencias

- Alvarado J, Aguilera J. 2001. Métodos para Medir Propiedades Físicas en Industrias de Alimentos. España: Ed. Acribia.
- Alvarado J. 1996. Principios de ingeniería aplicados a alimentos. Ecuador. 524 p.
- Batty J, y Folkman S. 1990. Fundamentos de la ingeniería de alimentos. Mexico: Editorial Continental. 319 p: 163.
- Catalán A. 1994. Determinación del punto de congelación de la pulpa, calor específico y entalpía en trozos de tuna (*Opuntia ficus indica* Mill), variedad Blanca, durante su congelación. Trabajo de Grado [Ingeniero de Industrias Alimentarias]. Facultad de industrias Alimentarias. Universidad Nacional Agraria la Molina. 149. [consultado el 14 de agosto de 2009].
- Condeña A. 1997. Manejo integral de la tuna y cochinilla para los valles interandinos de la sierra peruana. Universidad de Huamanga.
- Chirinos R. 1994. Obtención de colorante a partir de la tuna (*Opuntia ficus indica*) variedad Morada. Trabajo de Grado [Ingeniero de Industrias Alimentarias]. Facultad de Industrias alimentarias. Universidad Nacional Agraria la Molina. 188. [consultado el 14 de Agosto de 2009].
- Cruz M. 1996. Obtención de vinagre tinto a partir de tuna (*Opuntia ficus indica*) variedad Morada. Trabajo de Grado [Ingeniero de Industrias Alimentarias]. Facultad de Industrias alimentarias. Universidad Nacional Agraria la Molina. 156. [consultado el 14 de Agosto de 2009].
- Ibarz y otros 2000. Métodos Experimentales en la Ingeniería Alimentaria. España: Editorial Acribia. 283 p: 143-148.

- Lewis M. S. 1993. Propiedades Físicas de los Alimentos y de los Sistemas de Procesado. España: Editorial Acribia. 494 p.
- Muñoz y otros. s/ñ. Comparación de técnicas de Retroextrusión y viscosimetría Rotacional en Pulpas de Durazno. Universidad Nacional de Cuyo. [Consultado el 30 de Marzo del 2009]. Formato html. Disponibilidad libre en: <<http://www.encb.ipn.mx/cibia/Tomol/I-73.pdf>>.
- Muñoz y otros. s/ñ. Modelo Predictivo del Comportamiento Reológico de Pulpas de Pera. Universidad Nacional de Cuyo. [Consultado el 30 de Marzo del 2009]. Formato html. Disponibilidad libre en: <<http://www.encb.ipn.mx/cibia/Tomol/I-72.pdf>>.
- Pizarro y otros. 2007. Comportamiento Reológico de Pulpas de Frutas Tropicales: Guayaba (*Psidium guajava* L), Guanábana (*Annona muricata* L), Zapote (*Calocarpum sapota* Merr) y Níspero (*Achras sapota* L). *Revsta @limentech* . Vol. 5, No.2: 37-44 pp. [Consultado el 30 de Marzo del 2009]. Formato html. Disponibilidad libre en: <http://200.31.20.158/unipamplona/hermesoft/portallG/home_15/recursos/fac_ingenierias/15042008/vol_5_2_ok.pdf> ISSN: 1692-7125.
- Repo y Encina C. 2008. Determinación de la capacidad antioxidante y compuestos bioactivos de frutas nativas peruanas. *Revista Sociedad química del Perú*. Vol 74, no. 02: 108-124. [Consultado el 14 de agosto del 2009]. Formato html. Disponibilidad libre en: <http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2008000200004&script=sci_arttext>
- Roudot y Claude A. 2004. Reología y análisis de la textura de los alimentos. 1era edición. España: Editorial Acribia. 210 p.
- Rubio M.1974. Elaboración de mermeladas y néctares del zapote blanco o chalarina (*Casimiroa edulis*). Trabajo de Grado [Ingeniero de Industrias Alimentarias]. Facultad de Industrias. Universidad Nacional Agraria la Molina. 131. [consultado el 14 de Mayo de 2009].
- Solano R. 2003. Manejo del tunal en Atoq pampa, Ayacucho. Trabajo de Post-Grado [Mag Sc]. Esp. En Manejo Forestal. Universidad Nacional Agraria la Molina. 106. [consultado el 14 de Agosto de 2009].
- Sáenz C. 2006. Utilización Agroindustrial del Nopal. *Boletín de servicios Agrícolas de la FAO* no 162. Roma. ISSN 1020-4334.
- Kawazoe y Lopes R. Influência da temperatura no comportamento reológico da polpa de jabuticaba. *Revista de Ciencia y Tecnología de Alimentos* . Vol 27, no. 4 [Consultado el 20 de Octubre del 2009].
- Wiley R. 1997. Frutas y Hortalizas Mínimamente Procesadas. España: Ed. Acribia. 362 p.