

# AUMENTO DEL PUNTO DE EBULLICION DE SOLUCIONES MODELOS PARA JUGO DE CAÑA DE AZUCAR

## BOILING POINT ELEVATION OF MODEL SOLUTIONS FOR SUGAR CANE JUICE

Everaldo J. Montes<sup>1</sup>, Ramiro Torres<sup>1</sup> y Ricardo D. Andrade<sup>1</sup>

Recibido para evaluación: Junio 16 de 2006 - Aceptado para publicación: Agosto 1 de 2006

### RESUMEN

Conocer la elevación del punto de ebullición en los jugos de caña de azúcar a diferentes concentraciones, es fundamental para el diseño y operación de diversos equipos para su procesamiento, en particular evaporadores de múltiple efecto. Esta fue determinada para jugo de la caña de azúcar, utilizando soluciones modelos con cuatro componentes (sacarosa, glucosa, fructosa y dextrana), medidas en un rango de concentraciones de sólidos solubles de 30 a 60 °Brix y a presiones entre  $6.2 \times 10^3$  y  $7.6 \times 10^4$  Pa (abs.). Los datos experimentales se representaron utilizando la regla de Dühring y la ecuación de Antoine. A 30 °Brix, el aumento en la temperatura de ebullición fue independiente de la presión la cual varió con las relaciones de los componentes de las soluciones modelos. Las desviaciones considerables de este comportamiento ocurrieron a concentraciones mayores de 30 °Brix. Los datos experimentales se ajustaron satisfactoriamente a la regla de Dühring y la ecuación de Antoine.

**Palabras claves:** Regla de Dühring, ecuación de Antoine, evaporación.

### ABSTRACT

The boiling point elevation for sugar cane juice was determined using model solutions with four components (sugar, glucose, fructose and dextrana) using a 30 to 60 °Brix range and  $6.2 \times 10^3$  and  $7.6 \times 10^4$  Pa (abs) pressures. The data was presented using the Dühring rule and Antoine equation. At 30 °Brix boiling point was independent of pressure and varied according to model solution components. Variations of this behavior occurred at concentration above 30 °Brix. The experimental data readily adjusted to Dühring rule and Antoine equation.

**Keywords:** Rule of Dühring, equation of Antoine, evaporation.

---

<sup>1</sup>Universidad de Córdoba, Departamento de Ingeniería de Alimentos, Km 12 vía Cereté - Ciénaga de Oro.  
Tel (4) 894 0508, Fax (4) 786 0255, Email: emontes@sinu.unicordoba.edu.co

## INTRODUCCION

Cuando un soluto no volátil es disuelto en determinado solvente, la temperatura de ebullición de la solución es siempre mayor que la temperatura del solvente puro. Este fenómeno es denominado elevación del punto de ebullición (Westphalen y Wolf, 2000). Informaciones sobre la elevación del punto de ebullición se deben tener en cuenta para el diseño y operación de diversos tipos de equipos de la industria alimentaria, en particular evaporadores de múltiple efecto. Algunas ecuaciones pueden ser encontradas en la literatura para la predicción de este parámetro, aunque su validez sea restringida a soluciones diluidas o soluciones ideales, y no son aceptadas en la mayoría de los procesos de interés industrial. Por ejemplo en evaporación, se desea aumentar el contenido de sólidos de un determinado licor hasta valores donde una solución nunca podría ser considerada diluida. De esta forma, se hace necesario el uso de datos experimentales de la elevación de la temperatura de ebullición en función de la concentración de sólidos y la presión (Westphalen, 1998).

Trabajos anteriores han sido orientados al conocimiento del efecto de la temperatura y la concentración en las propiedades termofísicas del jugo de caña, incluyendo la densidad, calor específico, conductividad térmica, difusividad térmica, y propiedades reológicas (Telis-Romero *et al.*, 2001; Cabral, 2000; Varshney y Barhate, 1978). No obstante, no se disponen de datos publicados del aumento de la temperatura de ebullición a diferentes concentraciones y relaciones de los componentes de éste. Además, las ecuaciones teóricas tienen un uso limitado, debido a la composición compleja del jugo y falta de conocimiento de la contribución de los componentes a la elevación de la temperatura de ebullición.

En este trabajo, se determinó el aumento de la temperatura de ebullición en soluciones

modelos de jugo de caña a varias concentraciones, relaciones de componentes (sacarosa, glucosa, fructosa y dextrana) y presiones; y se compararon estas medidas con datos reportados, en la literatura, de soluciones de sacarosa que se usan a menudo como modelos para representar el comportamiento de alimentos fluidos como jugos de fruta y extractos de café.

## MATERIALES Y METODOS

### Preparación de la muestra

Las soluciones modelos de jugo de caña fueron preparadas con cuatro componentes, sacarosa, glucosa, fructosa y dextrana, obtenidas comercialmente, produciéndose extractos con concentraciones de sólidos solubles en el rango de 30 a 60 °Brix (Tabla 1). La concentración de los sólidos solubles fue medida a 25 °C con un refractómetro.

### Equipo y procedimiento

Un diagrama esquemático del equipo, similar al utilizado por Telis-Romero *et al.* (2002), usado para las medidas experimentales se muestra en la figura 1. Consiste de un balón, de vidrio, fondo plano (F) con tres bocas. Las muestras fueron introducidas en el balón por medio del tubo A y se calentaron con un calentador eléctrico provisto de un agitador magnético (Fisatom). Cuando la solución modelo de jugo de caña de azúcar alcanzó la temperatura de ebullición, se estableció un flujo de recirculación entre los tubos B y C. La mezcla líquido-vapor liberada de la superficie líquida fluyó a través del tubo B, donde se determinó la temperatura, con una termocupla, instalada en el termo pozo del tubo B, conectada a un transmisor de temperatura (modelo TT302, SMAR). Entretanto el condensado atrapado en el compartimiento D retornó al balón F y permitió al vapor entrar al condensador de reflujo R. El vapor condensado también retornó al balón F a través del tubo C, que tiene una válvula V para controlar la

**Tabla 1.** Concentraciones en °Brix de los componentes de las soluciones modelos de jugo de caña de azúcar.

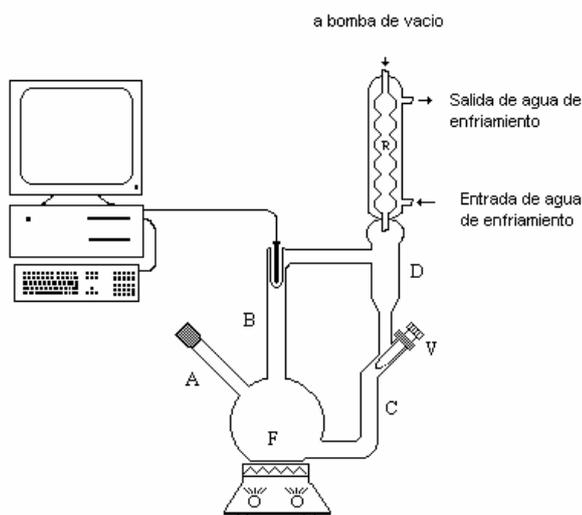
Componentes	Solución											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sacarosa	30	40	50	60	27	36	45	54	24	32	40	48
Glucosa	0	0	0	0	1	1,5	2	2,5	2,5	3,5	4,5	5,5
Fructuosa	0	0	0	0	1	1,5	2	2,5	2,5	3,5	4,5	5,5
Dextrana	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Mezcla	30	40	50	60	30	40	50	60	30	40	50	60
% de pureza de sacarosa	100	100	100	100	90	90	90	90	80	80	80	80

velocidad de flujo de recirculación y garantizar la concentración constante de la solución evaluada.

El condensador fue conectado a una bomba del vacío que permitió variar la presión en el rango de  $5.8 \times 10^3$  a  $9.4 \times 10^4$  Pa (abs.). Un transmisor de presión diferencial (modelo LD-301, SMAR) fue usado para medir la presión estática en dos posiciones diferentes del tubo a vacío. La temperatura fue monitoreada con una exactitud de  $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$  y la presión con una exactitud de  $4.3 \text{ mPa}$ , usando un transmisor de datos Modelo HP 75.000-B, una interface HP-BIRF y un PC con un programa escritos en IBASIC.

En cada experimento, se adicionaron 180 ml de solución modelo del jugo de caña de azúcar en el balón de ebullición. Se hizo recircular agua refrigerante en el condensador de reflujo, fue encendida la bomba de vacío y se reguló la presión hasta aproximadamente  $6.2 \times 10^3$  Pa (abs.), con una válvula reguladora, y el fluido se calentó suavemente. Se registraron continuamente temperatura y presión, y los valores finales, de la temperatura de ebullición de la solución y su presión asociada, fueron las lecturas más altas registradas cuando permanecieron constantes por lo menos durante 5 minutos.

El procedimiento se realizó hasta la presión atmosférica, permitiendo medidas de temperatura de ebullición, a 23 presiones diferentes, en cada una de las soluciones modelos con las composiciones mostradas en la tabla 1. Para verificar la concentración de la solución, fue interrumpido el calentamiento periódicamente, el balón se llevó hasta temperatura ambiente, y se tomaron muestras determinando las concentraciones de sólidos solubles en °Brix. Cuando la solución presentaba un incremento mayor del 1% en °Brix, ésta fue sustituida y la corrida fue repetida. Se repitió este procedimiento para las diferentes soluciones modelos evaluadas.



**Figura 1.** Diagrama esquemático del equipo usado para las medidas experimentales.

La calibración del equipo se realizó con

soluciones acuosas de LiCl y NaOH a las cuales se les conoce su temperatura de ebullición a varias concentraciones y presiones.

## RESULTADOS Y DISCUSION

La tabla 2 permite comparar los datos experimentales de la calibración del equipo y los reportados por Perry y Chilton (1986), mientras la figura 2 muestra un histograma típico de distribución de los datos. La buena concordancia entre los datos experimental y los reportados es resultado de la reproducibilidad del equipo, ya que el histograma muestras una distribución normal de las medidas alrededor de la media. Los valores de la desviación normal (sd) y el error normal (se) se incluyen en la tabla 2, calculados por las ecuaciones (1) y (2) respectivamente.

$$(1)$$

$$se = \frac{sd}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

donde  $x_n$  es el valor de cada medida,  $\bar{x}$  el valor de la media, y n el número de medidas.

En soluciones concentradas de solutos disueltos no es posible predecir la elevación del punto de ebullición debido a la presencia del soluto. Sin embargo, se puede usar leyes empíricas (Geankoplis, 1998), entre estas se tiene la regla de Dühring (Foust *et al.*, 1960) la cual establece, que la temperatura de ebullición de una solución concentrada es una función lineal de la temperatura de ebullición del agua pura a la misma presión (Mc Cabe *et al.*, 1999). Por consiguiente, a una concentración constante se tiene:

$$T_A = m_0 + m_1 T_{A0} \quad (3)$$

donde  $T_A$  y  $T_{A0}$  son las temperaturas de ebullición de la solución modelo de jugo de caña de azúcar y agua a la misma presión respectivamente;  $m_0$  y  $m_1$  son parámetros determinados por regresión lineal, característicos de cada solución, como se muestran en la tabla 3 junto con el coeficiente de la correlación,  $r^2$ .

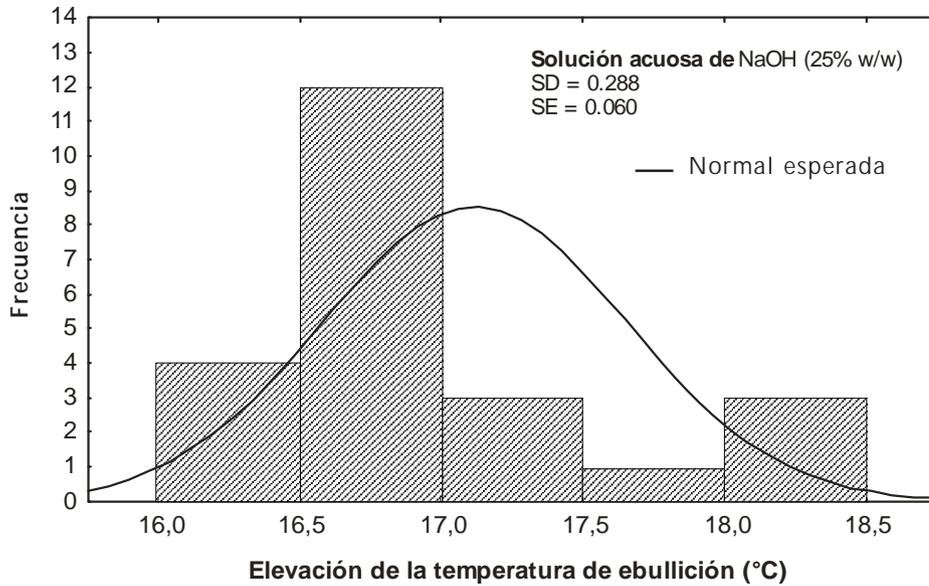
El aumento del punto de ebullición,  $\Delta T_B$ , se define como:

$$\Delta T_B = T_A - T_{A0} \quad (4)$$

**Tabla 2.** Aumento experimental del punto de ebullición de soluciones estándares.

Soluciones	Concentración %(w/w)	$\Delta T_B$ (°C) experimental	Desviación estándar (°C)	Error estándar (°C)	$\Delta T_B^*$ (°C)
NaOH	15	6.23	0.141	0.029	6.5
	25	16.95	0.288	0.060	17.3
	35	33.96	0.249	0.052	34.8
LiCl	5	1.19	0.014	0.003	1.2
	10	3.32	0.044	0.009	3.4
	20	10.95	0.061	0.013	11.0

\*Fuente: Perry y Chilton (1986).



**Figura 2.** Histograma de distribución del punto de ebullición del NaOH usado para calibrar el equipo desarrollado.

Sustituyendo la ecuación (3) en la ecuación (4), se observa que para  $m_1 = 1$ ,  $\Delta T_B = m_0$ , indicando que a esta condición el aumento del punto de ebullición sólo varía con la concentración de la solución modelo y es independiente de presión. La tabla 3 y la figura 3, evidencian que  $m_1$ , fue prácticamente igual a uno para las soluciones con concentraciones de 30 °Brix, las desviaciones considerables ocurrieron a concentraciones mayores a 30 °Brix, lo que indica que debe tenerse en cuenta la influencia de la presión para predecir la temperatura de ebullición del jugo de caña a altas concentraciones.

Una segunda manera de presentar los datos del punto de ebullición en soluciones acuosas está basada en extender el uso de expresiones convenientes para describir la dependencia de temperatura con la presión de vapor de agua pura, como en el caso de

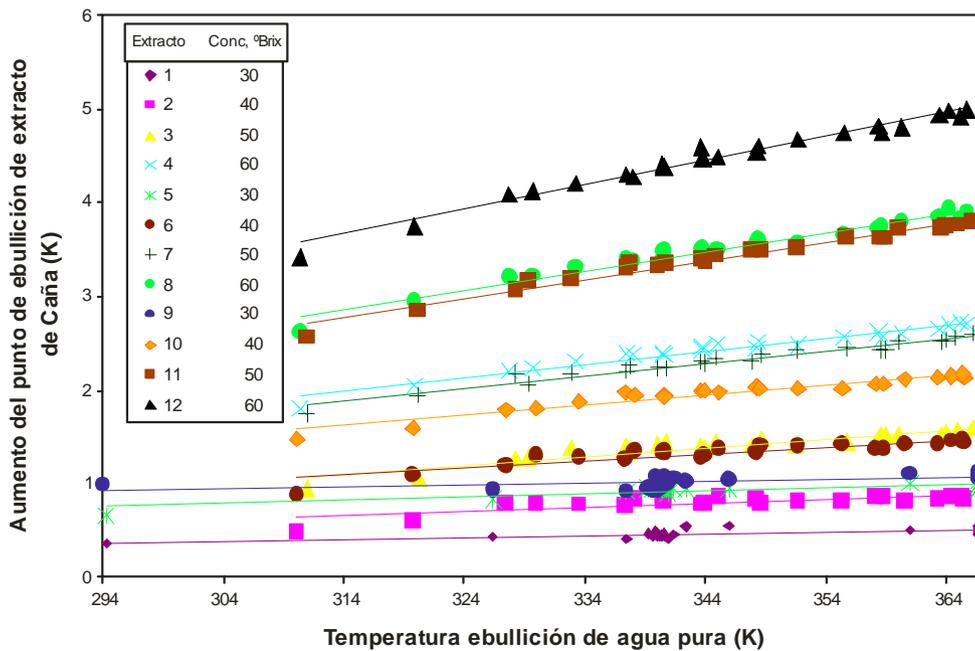
la ecuación de Antoine (Perry y Green, 2001), la cual se expresa como:

$$\ln P = A - \frac{B}{(T_A + C)} \quad (5)$$

Donde P es la presión en Pa,  $T_A$  es la temperatura de ebullición en K, y A, B, y C son constantes empíricas. La tabla 4 muestra los valores de estas constantes, para las diferentes soluciones modelos de jugo de caña de azúcar, obtenidas por regresión no lineal y los coeficientes de correlación ( $r^2$ ), los cuales indican un excelente ajuste de los datos experimentales a la ecuación de Antoine. Además, se evidencia el gran ajuste de todos los datos observados (soluciones de la 1 a la 12) con esta ecuación, por el alto valor del coeficiente de correlación ( $r^2 = 0,98994$ ) y la buena distribución de los residuos mostrados en la figura 5.

**Tabla 3.** Parámetros de la ecuación (3) para soluciones modelo de jugo de caña con diferentes componentes y composiciones

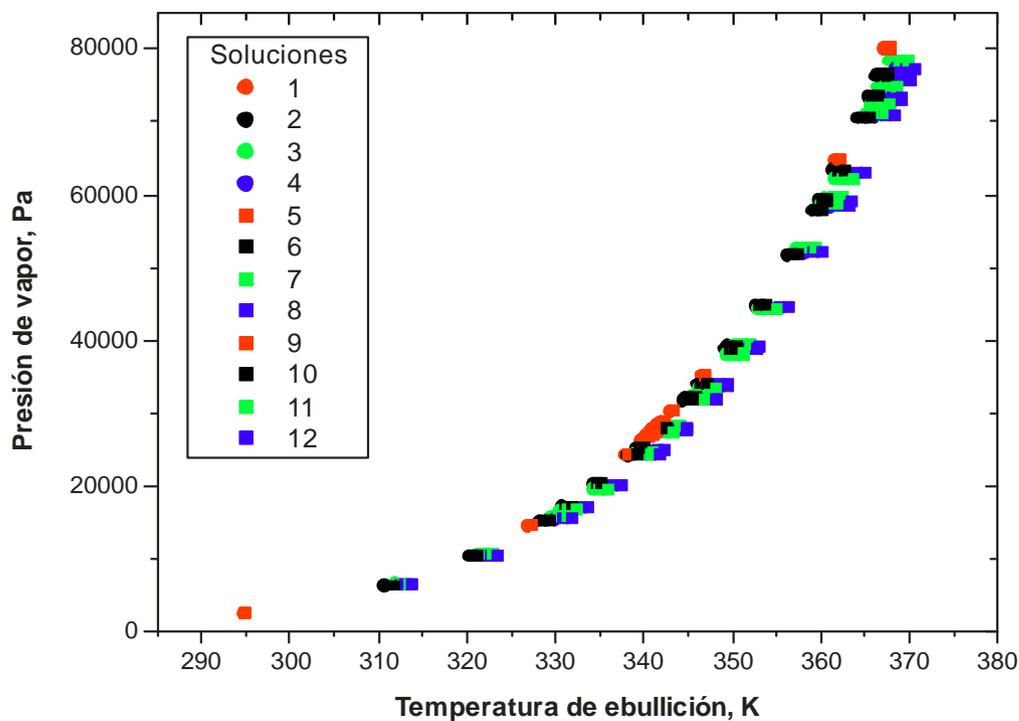
Solución modelo	$m_1$ (°C)	$m_0$	$r^2$
1	1,001875	-0,1838284	0,9999
2	1,004543	-0,770708	0,9999
3	1,009319	-1,81367	0,9999
4	1,01401	-2,40455	0,9999
5	1,003504	-0,274102	0,9999
6	1,007805	-1,37137	0,9999
7	1,013451	-2,34034	0,9999
8	1,020507	-3,58243	0,9999
9	1,002124	0,291124	0,9999
10	1,010797	-1,76654	0,9999
11	1,019969	-3,48791	0,9999
12	1,026161	-4,54899	0,9998



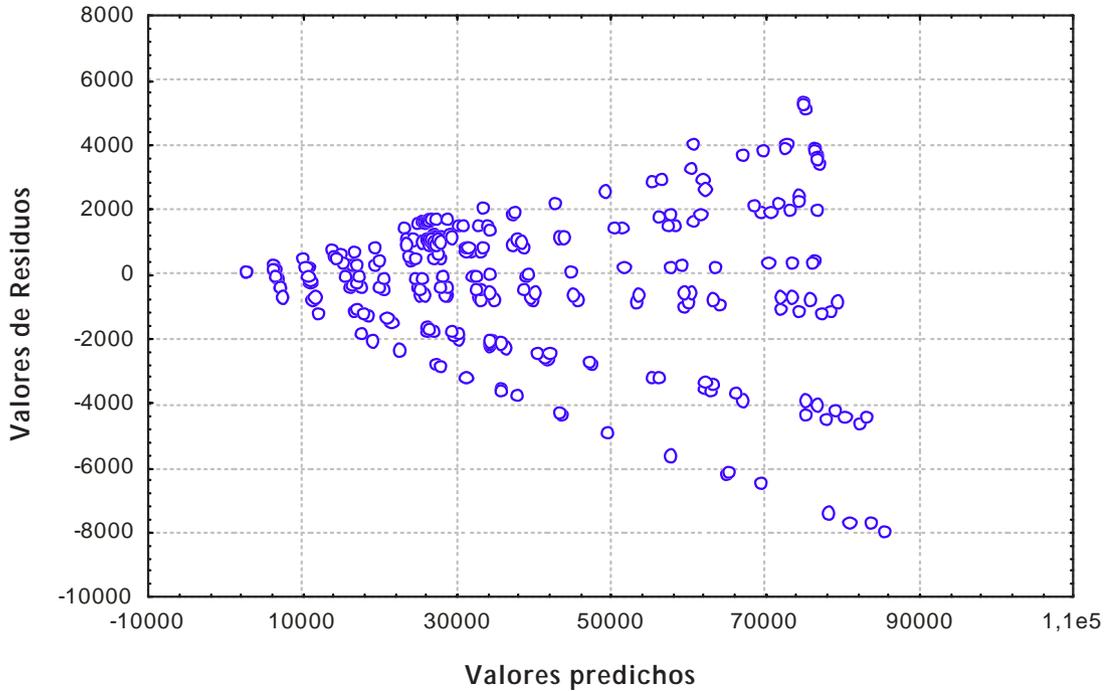
**Figura 3.** Diagrama de Dühring para las soluciones modelos de jugo de caña de azúcar.

**Tabla 4.** Parámetros de la ecuación de Antoine para las soluciones modelos de jugo de caña de azúcar.

Solución modelo	A	B	C	r <sup>2</sup>
1	23,74115	-4159,37	-33,0773	0,99999
2	23,75149	-4169,61	-32,8957	0,99999
3	23,45175	-4001,97	-39,1579	0,99999
4	23,42175	-4003,60	-39,3474	0,99999
5	23,81426	-4209,40	-31,5321	0,99999
6	23,65524	-4123,29	-34,6395	0,99999
7	23,31697	-3938,34	-41,7699	0,99999
8	23,52781	-4094,27	-35,9867	0,99999
9	23,81676	-4216,24	-31,1546	0,99999
10	23,56103	-4076,74	-36,5813	0,99999
11	23,72667	-4218,13	-31,2678	0,99999
12	23,61158	-4171,48	-33,0991	0,99999
1 - 12	23,24271	-3907,00	-42,1130	0,98994



**Figura 4.** Representación de la ecuación de Antoine para las soluciones modelos de jugo de caña de azúcar.



**Figura 5.** Distribución de los residuos para la ecuación de Antoine de las soluciones modelos de jugo de caña de azúcar.

## CONCLUSIONES

- Para un rango de presión entre  $2.5 \times 10^3$  y  $8.0 \times 10^4$  Pa (abs.), en las diferentes soluciones de modelo de caña de azúcar con concentraciones entre 30 y 60 °Brix, la relación entre la temperatura de ebullición de la solución y la temperatura del agua pura, es lineal, lo cual se representa a través del diagrama de Dühring.
- El aumento de la temperatura de ebullición de la solución modelo de jugo de caña

para una concentración de 30 °Brix es casi independiente de la presión, en el rango de  $2.5 \times 10^3$  y  $8.0 \times 10^4$  Pa (abs.), y solo varía con las relaciones de los componentes de la solución modelo. Las desviaciones considerables de esta conducta comenzaron a ocurrir a concentraciones más alta de 30 °Brix.

- La ecuación de Antoine representa adecuadamente los datos experimentales de la temperatura de ebullición para las diferentes soluciones modelos de jugo de caña de azúcar.

## BIBLIOGRAFIA

Cabral, R. 2000. Influência da Temperatura e Fração de Água nos Parâmetros Reológicos do Extrato de Café. Tesis M.Sc., IBILCE/UNESP. São José do Rio Preto

Foust, A.; Wenzel, L.; Clump, C.; Maus, L. y Andersen, L. 1960, Principles of Unit Operations. John Wiley & Sons, New York, p245

- Geankoplis, C. 1998. Procesos de transporte y operaciones unitarias. CECSA, Mexico D.F., p556
- Mc Cabe, W.; Smith, J. y Harriott, P. 1999. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Mc Graw-Hill/ Interamericana de España, Madrid, p491- 495
- Perry, R. y Chilton, C. 1986. Manual de Engenharia Química. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, p96
- Perry, R. y Green, D. 2001. Manual del Ingeniero Químico. McGraw-Hill/ Interamericana de España, Madrid, p354-355
- Telis-Romero, J.; Cabral, R.; Gabas, A. y Telis, V. 2001. Rheological properties and fluid dynamics of coffee extract. Journal of Food Process Engineering 24(4):217
- Telis-Romero, J.; Cabral, R. y Kronka, G. 2002. Elevation of boiling point of coffee extract. Brazilian Journal of Chemical Engineering 19(1):119-126
- Varshney, N. y Barhate, V. 1978. Effects of concentrations and vacuum on boiling points of fruit juices. Journal of Food Technology 13:225-233.
- Westphalen, D. 1988. Cálculo da elevação do ponto de ebulição de soluções a partir de dados de pressão parcial. <http://www.Hottopos.com.br/regeq6/denis.htm> [Accedido: 30-5-2006]
- Westphalen, D. y Wolf, M. 2000. Uso da equação de Capriste e Lozano para predição da elevação de pontos de ebulição. XII Congresso Brasileiro de Ingeniería Química, Universidad Estatal de Campinas, Campinas, p1-8