

## Efecto de la temperatura sobre la viscosidad de soluciones acuosas diluidas de Cloruro de 1-Butil-3-metil Imidazolio [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>]

Manuel S. Páez<sup>(1)\*</sup>, Armando Alvis<sup>(2)</sup> y Guillermo Arrázola<sup>(2)</sup>.

(1) Universidad de Córdoba, Departamento de Química, Facultad de Ciencias Básicas, Carrera 6 No. 76-103. Km 3. vía Cereté. Córdoba-Colombia. (e-mail: mspaezm@unal.edu.co)

(2) Universidad de Córdoba, Departamento de Ingeniería de Alimentos, Facultad de Ciencias Agrícolas, Carrera 6 No. 76-103. Km 3. Vía Cereté. Córdoba-Colombia.

\* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia.

*Recibido Oct. 14, 2013; Aceptado Dic. 3, 2013; Versión final recibida Dic. 14, 2013*

---

### Resumen

Se determinó la viscosidad dinámica de las soluciones acuosas diluidas del líquido iónico cloruro de 1-butil-3-metilimidazolio ([Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>]) en el intervalo de temperaturas de 283.15 a 318.15 K a presión atmosférica 0.1 MPa, usando un Microviscosímetro Automático Anton Paar (AMVn). Se evaluaron los coeficientes A, B y D de viscosidad, y se encontró que las fuerzas de largo alcance de naturaleza electrostática entre las especies iónicas [Bmim<sup>+</sup>] y [Cl<sup>-</sup>] dominan el comportamiento viscosimétrico del sistema [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>] + agua, a todas las temperaturas. También se analizaron los parámetros de activación del flujo viscoso  $\Delta G^\ddagger$ ,  $\Delta H^\ddagger$ ,  $\Delta S^\ddagger$  y se encontró que el proceso de flujo viscoso resultó endotérmico y evidenció un predominio de las interacciones ión-ión.

*Palabras clave: viscosidad, [Bmim][Cl], coeficientes de viscosidad, parámetros de activación, fuerzas de largo alcance*

## Effect of temperature on the viscosity of dilute aqueous solutions of 1-Butyl-3-methyl imidazolium chloride [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>]

### Abstract

The dynamic viscosity of dilute aqueous solutions of the ionic liquid 1-butyl-3-methyl imidazolium chloride ([Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>]) in the temperature range of 283.15 to 318.15 K at atmospheric pressure 0.10 MPa was determined. For this an automatic Microviscosimeter Anton Paar (AMVn) was employed. The coefficients of viscosity A, B and D were evaluated, and it was found that long range forces of electrostatic nature between the ionic species [Bmim<sup>+</sup>] and [Cl<sup>-</sup>] dominate the viscosimetric behavior of the system [Bmim<sup>+</sup>] + [Cl<sup>-</sup>] + water, at all temperatures. The activation parameters of viscous flow  $\Delta G^\ddagger$ ,  $\Delta H^\ddagger$  and  $\Delta S^\ddagger$  were also analyzed and it was found that viscous flow process was endothermic and showed a predominance of the ion-ion interactions.

*Keywords: viscosity, [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>], viscosity coefficients, activation parameters, long range forces*

## INTRODUCCIÓN

Aunque la literatura científica utilizada para designar el término líquido iónico se reserva exclusivamente a compuestos que están formados por iones y que son líquidos a temperaturas moderadas (puede considerarse que su límite superior es del orden de los 100°C) (Romero, 2008), algunos de ellos como es el caso del cloruro de 1-Butil-3-metilimidazolio [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>] son sólidos a temperatura ambiente. Es conocido que las mezclas líquidas de diferentes compuestos dan origen a soluciones que generalmente no se comportan idealmente. Es por ello, que el entendimiento de la microestructura y las interacciones de los líquidos iónicos a nivel molecular, en estado puro o como especies disueltas, es un área muy interesante, por cuanto permite interpretar la no idealidad y diseñar mezclas apropiadas de líquidos iónicos. Para facilitar la selección óptima de una mezcla apropiada de un líquido iónico para una aplicación particular, es útil tener en cuenta sus propiedades termodinámicas y de transporte (Gonfa et al., 2011). Además, las propiedades viscosimétricas de las soluciones acuosas de diversos solutos, incluyendo a los líquidos iónicos (LI) son de gran importancia, especialmente en la región diluida, debido a la complejidad de las interacciones entre los grupos polares y apolares con el agua y, si bien, se sabe que dicho comportamiento tiene origen en las características estructurales del agua, aún no ha sido claramente explicado (Portacio et al., 2012).

Cualquier intento para describir las propiedades viscosimétricas de las soluciones electrolíticas, como es el caso de las soluciones acuosas del líquido iónico (LI) [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>], es útil, ya que estos líquidos tienen gran aplicación en diversas ramas de la industria química, debido a que pueden actuar como catalizadores, y/o, disolventes, lo que hace que tengan gran interés como fluidos para aplicaciones de ingeniería, por lo que son llamados solventes de diseño debido a que están formados por cationes y aniones que conducen al diseño de tareas específicas (Cortés et al., 2010; Guajardo et al., 2010; Shamsipur et al., 2010). Por tal motivo, en este trabajo se reportan datos de densidad ( $\rho$ ) y viscosidades dinámicas ( $\eta$ ) de la mezcla binaria diluida del líquido iónico Cloruro de 1-Butil-3-metilimidazolio [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>] + agua en el intervalo de temperatura (283,15-318,15) K y concentración de (0,0100 a 1,632) mol.L<sup>-1</sup>.

Por otra parte, la influencia de la temperatura sobre las propiedades viscosimétricas de diversas mezclas acuosas frecuentemente se usa para obtener información sobre el efecto de distintos solutos sobre la estructura del agua (Portacio et al., 2012). Experimentalmente se ha encontrado que el signo de  $dB/dT$  refleja el efecto de los solutos sobre la estructura del agua e indica el comportamiento hidrofóbico del soluto. (Páez et al., 2009). El signo negativo es atribuido al efecto formador de estructura, mientras que el signo positivo es atribuido al efecto disruptor de estructura del agua (Romero y Beltrán, 2012). De ahí que nuestro interés consistió en realizar un estudio del efecto que la temperatura ejerce sobre la viscosidad de las soluciones acuosas de [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>], con el propósito de obtener información relevante de las interacciones que ocurren en la solución. Para lograr este objetivo, los datos de viscosidad relativa fueron correlacionados a través de la ecuación de Jones–Dole (Kaminsky, 1957), mientras que los datos de viscosidad absoluta fueron analizados con base en la teoría de Eyring (Aznarez, 2008)

## MATERIALES Y MÉTODOS

El líquido iónico Cloruro de 1-Butil-3-metilimidazolio fue obtenido de la casa comercial Across Organic con una pureza  $\geq 99\%$  al cual se le determinó el contenido de agua (0,05%) por el método Karl Fisher, el agua que se usó para preparar las soluciones se bidistiló y desgasificó obteniendo una conductividad menor que 2  $\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ . La preparación de las soluciones del sistema acuoso [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>] se realizó aplicando el método gravimétrico usando una balanza OHAUS con una resolución de  $\pm 1 \times 10^{-4}$  g, en botellas herméticamente selladas para minimizar pérdidas por evaporación, la incertidumbre promedio en la concentración del LI fue de  $\pm 3 \times 10^{-4}$  mol.kg<sup>-1</sup>.

Las densidades experimentales en la región diluida de las soluciones acuosas del [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>] se midieron utilizando un densímetro digital de tubo vibratorio Anton Paar DMA 5000, en el rango de temperatura (283,15-318,15) K y a la presión atmosférica 0,10 MPa. La celda del DMA se calibró con aire seco y agua ultra pura a la presión atmosférica (Spieweck y Bettin, 1992). Las muestras fueron termostatadas y controladas a  $\pm 0,001$  K. La incertidumbre en el valor de la densidad determinada fue de  $\pm 0,2 \times 10^{-5}$  g.cm<sup>-3</sup>. Las viscosidades de las diferentes mezclas binarias en la región diluida se determinaron con un Microviscosímetro Automático Anton Paar (AMVn) a presión atmosférica 0,10 MPa en el intervalo de temperaturas (283,15–318,15) K. La temperatura en las mediciones se controló mediante un sensor Pt100 con una resolución de  $\pm 0,01$  K. El principio de medición del AMVn es el de caída de bola, el cual consiste en la determinación del tiempo que tarda en caer una bola de densidad conocida en el interior de un capilar lleno con el líquido cuya viscosidad se quiere determinar. Mediante este tiempo de caída y las constantes de calibración del capilar, que dependen de las características del capilar y la bola (la cual está hecha de cobalto - carburo de tungsteno), se obtiene el valor de la viscosidad. La viscosidad se obtuvo con una incertidumbre de  $\pm 0,001$  mPa.s.

## RESULTADOS Y DISCUSION

Los valores experimentales de las densidades,  $\rho$ /(g.cm<sup>-3</sup>), medidos a diferentes temperaturas y molaridades, C/(mol · L<sup>-1</sup>), para este sistema se muestran en la Tabla 1. La validación de estos resultados se realizó comparando nuestros datos con los de literatura (Qiwei et al., 2010) a 308,15K, encontrándose un alto grado de coincidencia.

Tabla 1: Densidad experimental con  $\rho$  ( $\pm 2 \times 10^{-5}$ g.cm<sup>-3</sup>) de las soluciones [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>] + H<sub>2</sub>O

T/(K)	283.15	288.15	293.15	298.15	303.15	308.15	313.15	318.15
C/(mol.L <sup>-1</sup> )	$\rho$ (g · cm <sup>-3</sup> )							
0.0000	0.99977	0.99919	0.99829	0.99703	0.99561	0.99405	0.99221	0.99022
0.0099	0.99991	0.99931	0.99840	0.99723	0.99580	0.99407	0.99239	0.99030
0.0197	1.00005	0.99942	0.99851	0.99733	0.99590	0.99410	0.99248	0.99039
0.0303	1.00020	0.99955	0.99863	0.99744	0.99601	0.99420	0.99258	0.99048
0.0496	1.00047	0.99979	0.99885	0.99765	0.99621	0.99439	0.99277	0.99066
0.0785	1.00089	1.00015	0.99919	0.99798	0.99652	0.99470	0.99309	0.99095
0.0990	1.00119	1.00042	0.99944	0.99822	0.99675	0.99492	0.99332	0.99116
0.1942	1.00260	1.00178	1.00070	0.99949	0.99797	0.99609	0.99444	0.99225
0.2864	1.00403	1.00314	1.00204	1.00076	0.99920	0.99733	0.99557	0.99339
0.3817	1.00555	1.00463	1.00350	1.00218	1.00059	0.99867	0.99678	0.99462
0.4676	1.00695	1.00602	1.00488	1.00350	1.00187	0.99988	0.99789	0.99575
0.5491	1.00830	1.00738	1.00623	1.00482	1.00312	1.00106	0.99897	0.99683
0.7101	1.01104	1.01018	1.00890	1.00750	1.00566	1.00338	1.00121	0.99902
0.8632	1.01369	1.01295	1.01155	1.01015	1.00813	1.00565	1.00341	1.00119
1.6317	1.02659	1.02736	1.02548	1.02366	1.02094	1.01784	1.01541	1.01293

La viscosidad dinámica,  $\eta$ /(mPa.s) del sistema [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>] + agua, a las temperaturas de trabajo, se obtuvo usando la ecuación (1):

$$\eta = Kt(\rho_b - \rho) \quad (1)$$

A partir de los datos de la Tabla 1, la densidad de la bola  $\rho_b=7,70000$  g.cm<sup>-3</sup>, el tiempo de flujo  $t$ , y la constante de calibración  $k$ , la cual a su vez depende de la sustancia de calibración, el ángulo de inclinación y la temperatura; en nuestro caso se usó un ángulo de 50° y los valores de  $k$  utilizados son compilados en las siguientes expresiones:  $k=-22.102 + 0,22005 \cdot T - 0,00071811 \cdot T^2 + 7,778E-07 \cdot T^3$  con  $\sigma=\pm 0,000346$  para el etilenglicol y  $k=-0,1449 + 0,001481 \cdot T - 0,000004742 \cdot T^2 + 5,031E-09 \cdot T^3$  con  $\sigma=\pm 6,620E-06$  para el agua. Estas constantes fueron ajustadas usando los datos de viscosidad reportados por Riddick y Bunger, 1970

Los resultados se muestran en la Tabla 2, donde se observa que la viscosidad dinámica de las soluciones de [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>] + agua, aumentan con el aumento de la concentración del soluto, lo que podría deberse a que los iones tratan de mantener una estructura de red espacial en la solución, intensificando las fuerzas eléctricas entre ellos. También se observa que la viscosidad de las soluciones de [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>] + agua disminuye con el incremento de la temperatura, lo cual es una consecuencia de la perturbación de la red espacial en la solución por el movimiento térmico de las moléculas.

Tabla 2: Viscosidad dinámica de las soluciones acuosas diluidas de [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>] a diferentes temperaturas.

T/(K)	283.15	288.15	293.15	298.15	303.15	308.15	313.15	318.15
C/(mol.L <sup>-1</sup> )	$\eta$ /(mPa.s)							
0.0000	1.304	1.137	1.002	0.890	0.797	0.719	0.653	0.597
0.0099	1.333	1.160	1.021	0.906	0.809	0.730	0.665	0.605
0.0197	1.339	1.166	1.028	0.909	0.815	0.735	0.668	0.612
0.0303	1.351	1.175	1.037	0.919	0.820	0.741	0.672	0.615
0.0496	1.356	1.188	1.046	0.925	0.828	0.747	0.679	0.618
0.0785	1.378	1.201	1.065	0.941	0.837	0.758	0.686	0.625
0.0990	1.390	1.209	1.075	0.949	0.844	0.763	0.692	0.630
0.1942	1.463	1.272	1.128	0.988	0.882	0.791	0.718	0.651
0.2864	1.525	1.330	1.173	1.027	0.919	0.823	0.748	0.677
0.3817	1.586	1.391	1.220	1.071	0.952	0.849	0.774	0.697
0.4676	1.660	1.443	1.261	1.107	0.986	0.878	0.798	0.719
0.5491	1.729	1.484	1.295	1.137	1.011	0.905	0.818	0.738
0.7101	1.886	1.638	1.398	1.218	1.079	0.960	0.865	0.776
0.8632	2.046	1.781	1.505	1.307	1.155	1.025	0.920	0.823
1.6317	3.044	2.673	2.155	1.860	1.626	1.421	1.262	1.117

A partir de los datos de la Tabla 2, se determinó la viscosidad relativa como la razón de la viscosidad dinámica de la solución respecto a la del solvente puro, estas viscosidades a su vez se ajustaron a partir de la ecuación Jones–Dole para soluciones electrolíticas (Kaminsky, 1957), la cual viene dada por:

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_0} = 1 + A\sqrt{C} + BC + DC^2 \quad (2)$$

donde C es la molaridad ( $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ),  $\eta_r$  es la viscosidad relativa, A (también llamado coeficiente de Falkenhagen) es una constante que mide las interacciones de largo alcance ion-ion (fuerzas de Coulomb), B es una constante que tiene en cuenta la interacción ion-solvente (Svorstol et al., 1988). Se ha encontrado experimentalmente que si el signo de B es positivo se asocia a la formación de agregados hidrofóbicos en solución acuosa y que el soluto está fuertemente hidratado; mientras que un signo negativo para B se asocia a solutos que desestabilizan la estructura de los agregados hidrofóbicos en solución acuosa y además indica que los solutos están débilmente hidratados (Abdulagatov et al., 2006); sin embargo, el signo del coeficiente B podría no ser indicativo especialmente para grandes solutos hidrofóbicos; por ello se sugiere usar mejor la primera derivada de B con respecto a la temperatura, la razón es porque el signo de  $\text{dB} / \text{dT}$  es un criterio más indicativo de formación o disrupción de estructura. En este sentido, el signo negativo de  $\text{dB} / \text{dT}$  indica formación de estructura (cosmotrópico), mientras que el signo positivo sugiere disrupción de estructura (caotrópico). Por otra parte, la constante D incluye todas las interacciones estructurales soluto-solvente y soluto- soluto que no toman en cuenta los términos  $AC^{1/2}$  y BC a mayor concentración (Zhao, 2006)

El ajuste de la viscosidad relativa fue realizado utilizando el método de los mínimos cuadrados, donde la desviación estándar ( $\sigma$ ) viene dada por la ecuación.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left( \frac{(\eta_r^{exp} - \eta_r^{calc})^2}{n-p} \right)}{n-p}} \quad (3)$$

En esta ecuación  $\eta_r^{exp}$ ,  $\eta_r^{calc}$  son las viscosidades relativas determinadas a partir de los datos de viscosidad dinámica reportados en este artículo y calculados por la ecuación (2), donde  $n=14$  es el número de puntos experimentales,  $p=3$  es el número de parámetros ajustables. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3. Los resultados para los coeficientes A, B y D con sus respectivas desviaciones estándar y la variación de B respecto a la temperatura, se muestran en la Tabla 3. La correlación del coeficiente B con temperatura se logró mediante la ecuación (4), con  $r^2=0,9668$ .

$$B = 1 \times 10^{-5} T^2 + 0,0053 T - 1,4949 \quad (4)$$

Tabla 3: Desviación estándar  $\sigma$  para el ajuste de la viscosidad relativa usando la ecuación (2) y coeficientes de viscosidad A, B y D de las soluciones acuosas de  $[\text{Bmim}^+][\text{Cl}^-]$  como una función de la temperatura.

T/(K)	A ( $\text{L}^{1/2}\cdot\text{mol}^{1/2}$ )	B ( $\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	D ( $\text{L}^2\cdot\text{mol}^{-2}$ )	$\text{dB}/\text{dT}$ ( $\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	$\sigma$
283.15	2.9900	-1.0408	0.2303	-0.00036	0.018
288.15	2.9800	-1.0449	0.2250	-0.00046	0.020
293.15	2.9743	-1.0514	0.1689	-0.00056	0.023
298.15	2.9616	-1.0769	0.1602	-0.00066	0.020
303.15	2.9577	-1.0846	0.1463	-0.00076	0.019
308.15	2.9496	-1.1008	0.1374	-0.00086	0.019
313.15	2.9494	-1.1011	0.1160	-0.00096	0.020
318.15	2.9367	-1.1266	0.1126	-0.00106	0.019

En la Tabla 3 se observa que el coeficiente A presenta el más alto valor, ello indica que las fuerzas de largo alcance de naturaleza electrostática entre las especies iónicas:  $[\text{Bmim}^+]$ ,  $[\text{Cl}^-]$  dominan el comportamiento viscosimétrico del sistema  $[\text{Bmim}^+][\text{Cl}^-]$  + agua, a todas las temperaturas (Das et al., 2012). Mientras que los pequeños valores negativos para  $\text{dB} / \text{dT}$ , ponen en evidencia la presencia de iones hidratados débilmente, lo que permite considerar que los iones del  $[\text{Bmim}^+][\text{Cl}^-]$  se comportan como solutos débilmente formadores de la estructura del agua. Por otra parte, el valor no nulo del coeficiente D, revela la presencia de autointeracciones entre estos iones  $[\text{Bmim}^+]-[\text{Bmim}^+]$  y  $[\text{Cl}^-]-[\text{Cl}^-]$  (Abdulagatov et al., 2005). Finalmente, los parámetros de activación del flujo viscoso, fueron evaluados usando la teoría de las velocidades absoluta de Eyring (Páez et al., 2012), ya que de acuerdo con esta teoría la viscosidad dinámica ( $\eta$ ) de un fluido Newtoniano viene dada por la ecuación (5).

$$\eta = \frac{h N}{V_m} \exp\left(\frac{\Delta G^\ddagger}{RT}\right) = \frac{h N}{V_m} \exp\left(\frac{\Delta H^\ddagger}{RT} - \frac{\Delta S^\ddagger}{R}\right) \quad (5)$$

donde  $h$  es la constante de Planck,  $N$  es número de Avogadro,  $V_m$  es el volumen molar del líquido,  $T$  es la temperatura absoluta, y  $\Delta G^\ddagger$ ,  $\Delta H^\ddagger$ ,  $\Delta S^\ddagger$  son la energía libre de Gibbs, la entalpía y la entropía de activación del flujo viscoso respectivamente.

De acuerdo con la ecuación (5),  $\Delta H^\ddagger$  y  $\Delta S^\ddagger$  se obtienen de la pendiente  $\Delta H^\ddagger/R$  y el intercepto  $-\Delta S^\ddagger/R$  de la gráfica de  $\ln \eta V_m/hN$  vs  $1/T$ ; mientras  $\Delta G^\ddagger$ , se obtiene a partir de la ecuación fundamental de la termodinámica:

$$\Delta G^\ddagger = \Delta H^\ddagger - T\Delta S^\ddagger \quad (6)$$

Cabe destacar que la gráfica del  $\ln(\eta V_m/hN)$  vs  $1/T$  para cada punto de composición del sistema binario [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>]+ agua, mostró un comportamiento lineal en el intervalo de temperaturas estudiado, con un alto valor para el coeficiente de determinación. Los parámetros de activación de flujo viscoso calculados para el Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>]+ agua, se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Parámetros de activación del flujo viscoso  $\Delta G^\ddagger$ ,  $\Delta H^\ddagger$  y  $\Delta S^\ddagger$  para mezclas [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>]+ agua.

C/(mol.L <sup>-1</sup> )	[Bmim <sup>+</sup> ][Cl <sup>-</sup> ] + agua		T/(K)							
	$\Delta H^\ddagger \pm 0.25$ (kJ.mol <sup>-1</sup> )	$\Delta S^\ddagger \pm 0.80$ (kJ.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	283.15	288.15	293.15	298.15	303.15	308.15	313.15	318.15
			$\Delta G^\ddagger \pm 0.24$ /(kJ.mol <sup>-1</sup> )							
0.0000	16.50	24.84	9.61	9.49	9.36	9.24	9.12	8.99	8.87	8.74
0.0099	16.64	24.55	9.63	9.50	9.38	9.26	9.14	9.01	8.89	8.77
0.0197	16.58	24.67	9.65	9.53	9.40	9.28	9.16	9.03	8.91	8.79
0.0303	16.64	24.50	9.68	9.55	9.43	9.31	9.19	9.06	8.94	8.82
0.0496	16.61	24.69	9.72	9.60	9.48	9.35	9.23	9.11	8.98	8.86
0.0785	16.71	24.66	9.75	9.63	9.50	9.38	9.26	9.13	9.01	8.89
0.0990	16.73	25.48	9.91	9.78	9.65	9.52	9.40	9.27	9.14	9.01
0.1942	17.12	25.23	10.04	9.91	9.78	9.66	9.53	9.41	9.28	9.15
0.2864	17.18	25.71	10.17	10.04	9.91	9.79	9.66	9.53	9.40	9.27
0.3817	17.45	26.03	10.30	10.17	10.04	9.91	9.78	9.65	9.52	9.39
0.4676	17.67	26.11	10.40	10.27	10.14	10.01	9.87	9.74	9.61	9.48
0.5491	17.79	27.97	10.58	10.60	10.30	10.16	10.02	9.88	9.74	9.60
0.7101	18.50	31.95	11.96	11.20	11.64	11.48	11.32	11.16	11.00	10.84
0.8632	21.01	32.02	11.01	10.85	10.69	10.53	10.37	10.21	10.05	9.89
1.6317	22.30	36.11	12.08	11.90	11.72	11.54	11.35	11.17	10.99	10.81

En la Tabla 4, se observa que los valores de  $\Delta H^\ddagger$  para el agua y las mezclas con [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>] son positivos y se incrementan con la concentración del líquido iónico (LI), ello podría indicar que el proceso del flujo viscoso es endotérmico y como también un incremento de las interacciones ión-ión. El cambio de la energía de Gibbs de activación  $\Delta G^\ddagger$ , controla la velocidad de flujo en el líquido, la cual se rige por la capacidad de los iones que constituyen al LI para moverse en las cavidades y por la facilidad con que las cavidades están dispuestas en el agua. Ahora, como  $\Delta G^\ddagger$  se incrementa con la concentración del LI, ello evidencia una mayor dificultad en el movimiento de los iones a través del disolvente, resultado de la complejidad de las interacciones características del sistema en estudio: interacciones ión-ión, autointeracciones entre los iones [Bmim<sup>+</sup>]-[Bmim<sup>+</sup>] y [Cl<sup>-</sup>]-[Cl<sup>-</sup>] e iones débilmente hidratados y agua débilmente estructurada, las cuales se incrementan con la concentración. Los valores positivos de la variación de entropía de activación  $\Delta S^\ddagger$  muestran que las especies que forman el estado activado son más desordenadas que el estado inicial.

## CONCLUSIONES

Las fuerzas de largo alcance de naturaleza electrostática entre las especies iónicas: [Bmim<sup>+</sup>], [Cl<sup>-</sup>] dominan el comportamiento viscosimétrico del sistema binario [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>] + agua, en el intervalo de concentración molar (0,0000-1,6317) mol.L<sup>-1</sup> a todas las temperaturas de trabajo. El proceso de flujo viscoso resultó endotérmico y evidenció un incremento significativo de las interacciones ión-ión. Los iones del [Bmim<sup>+</sup>][Cl<sup>-</sup>] se comportan como solutos débilmente formadores de la estructura del agua.

## NOTACIÓN

### Símbolos:

A	Coefficientes A de viscosidad	$\Delta G^\ddagger$	Energía libre de Gibbs de activación
B	Coefficientes B de viscosidad	$\Delta H^\ddagger$	Entalpía de activación
C	Molaridad	$\Delta S^\ddagger$	Entropía de activación
D	Coefficientes D de viscosidad		

$h$	Constante de Planck
$K$	Constantes del viscosímetro
$N$	Número de Avogadro
$t$	Tiempo de flujo
$T$	Temperatura absoluta
$V_m$	Volumen molar

## Letras griegas:

$\eta$	Viscosidad dinámica de la mezcla
$\eta_0$	Viscosidad del agua
$\eta_r$	Viscosidad relativa
$\rho$	Densidad

**AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen a la universidad de Córdoba por el apoyo prestado para la realización de este trabajo.

**REFERENCIAS**

- Abdulagatov, I.M., A.B. Zeinalova y N.D. Azizov, *Experimental viscosity B-coefficients of aqueous LiCl solutions*, J. Mol. Liq, 126, 75-88 (2006).
- Aznarez, S, *Viscosimetric behaviour of n-alkanols with triethylene glycol monomethyl ether at different temperatures*: J. Mol. Liq, 139,131-137 (2008).
- Cortés, E., A. Dondero., H. Aros y C. Carlesi, *Síntesis del Líquido Iónico Bmin<sup>+</sup>HSO<sup>-</sup> mediante una sola Etapa, para Aplicaciones en Hidrometalurgia*: Inf. Tecnol, 21(3), 67-76 (2010).
- Das, S., A. Pattanaik y M. Das, *Densities and viscosity measurement of K<sub>3</sub>[Cr(C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)<sub>3</sub>]3H<sub>2</sub>O in water, methanol-water, isopropanol-water and DMSO-water at 303.15K*, Afr. J. Sci. Res, 8(1), (2012).
- Gonfa, G., M.A. Bustam., Z. Man., M. I. Abdul Mutalib. *Unique Structure and Solute –Solvent Interaction in Imidazolium Based Ionic Liquids*: Rev. Asian. T. Eng, 1 (5), 24-34 (2011).
- Guajardo, N., J. Santana y C. Carlesi, *Uso de un líquido iónico como catalizador para la oxidación de alcoholes hidrofóbicos de alto peso molecular*: Inf. Tecnol, 21(3), 57-65 (2010).
- Kaminsky, M., *The concentration and temperature dependence of the viscosity of aqueous solutions of strong electrolytes. III. KCl, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgCl<sub>2</sub>, BeSO<sub>4</sub>, and MgSO<sub>4</sub> solutions*: Z. Physik. Chem. Neue Floge, 12, 206-231 (1957).
- Páez, M., Cantero P., y Peña J, *Viscosidades de la mezcla n,n-Dimetilformamida +1-Butanol a Diferentes Temperaturas*: Inf. Tecnol. 23(3), 149-156 (2012).
- Páez, M., J. Lafont., y Portacio, A, *Efecto de la Temperatura sobre la Viscosidad de Soluciones Acuosas Diluidas de 1,2-Pentanodiol*: Inf. Tecnol, 20, 55-60 (2009).
- Portacio, A., G. Borja., M. Páez, *Efecto de la temperatura sobre la viscosidad de soluciones acuosas diluidas de 1,4-pentanodiol*: Rev.Col.Fís, 44 (3), 243-247 (2012).
- Qiwei, Y. y otros autores 5 autores, *Volumetric Properties of Binary Mixtures of 1-Butyl-3-methylimidazolium Chloride + Water or Hydrophilic Solvents at Different Temperatures*, J. Chem. Eng: 55, 1750-1754 (2010).
- Riddick, J.A, y W.B, Bunger, *Organic Solvents*. 3ª edición, Vol. 2, 67-68, John Wiley & Sons, Inc, New York, USA (1970).
- Romero, A. S, *Líquidos iónicos a temperatura ambiente: un nuevo medio para las reacciones químicas*: Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat (Esp), 102, 79-90, (2008).
- Romero, C. y A. Beltrán, *Efecto de la temperatura y la concentración en la viscosidad de soluciones acuosas de ácido 3-aminopropanoico, ácido 4-aminobutanoico, ácido 5-aminopentanoico, ácido 6-aminohexanoico*: Rev. Colomb. Quím, 41(1), 123-131(2012).
- Shamsipur, M., y otros cuatro autores, *Physical and electrochemical properties of ionic liquids 1-ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate, 1-butyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonate and 1-butyl-1-methylpyrrolidinium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide*: J. Mol. Liq, 157, 43-50 (2010).
- Spieweck, F. y H. Bettin, *Solid and liquid density determination*, Technisches Messen: 59, 285-1292 (1992).
- Svorstol, I., T. Sigvartsen y T. Songstad, *Solvent Properties of Dichloromethane Viscosity Studies of Electrolytes in Dichloromethane*, Acta. Chem. Scand, 42, 133-144(1988).
- Zhao. H., *Viscosity B-coefficients and standard partial molar volumes of amino acids, and their roles in interpreting the protein (enzyme) stabilization*: Biophys.Chem, 122, 157-183 (2006).