

# Hydrogels obtained from acrylamide, maleic acid, acrylic acid and octylmonoitaconate: synthesis, absorbent capacity and pH variations in copper sulfate solutions

**Blanca Rojas de Gascue<sup>1</sup>, Marvelis Ramírez<sup>2</sup>, Rocelis Aguilera<sup>1</sup>,  
Augusto García<sup>1</sup>, José Luis Prin<sup>1</sup>, José Lias<sup>2</sup>, Carlos Torres<sup>2</sup> e Issa Katime<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Biomedicina y Ciencias Aplicadas IIBCA-UDO,  
Universidad de Oriente. Apdo. Postal 245, Cerro del Medio, Cumaná, Venezuela.

<sup>2</sup>Grupo de Polímeros, Departamento de Química, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

<sup>3</sup>Grupo de Nuevos Materiales y Espectroscopía Supramolecular, Universidad del País Vasco.  
Bilbao, España. blanca\_gascue@yahoo.com, ramirez@ula.ve

## Abstract

Acrylamide (AAm)/maleic acid (AM), acrylic acid (AAc)/maleic acid (AM) and acrylic acid (AAc)/2-methylenebutanedioic acid octylester (MI-8) hydrogels were synthesized in presence of ammonium persulfate as initiator and N,N'-methylenebisacrylamide as crosslinking agent. The grade of hydrogels swelling was determined by two tests at different temperatures: 25 and 37°C. The hydrogels swelling also was studied in divalent cations salts solutions, like copper by way of plasma spectroscopy emission. The swelling of synthesized hydrogels test shows isothermal that extends asymptotically to the equilibrium. It was demonstrated that the maleic acid content had a direct influence in the swelling properties (an increment of 30% in AM rise the content of water in the hydrogel in 12%). Respect to the copper cations adsorption, we found that the concentration decrease in the initial solution after to be in contact with the hydrogels. Moreover, pH variation was measured allowing understand the reaction mechanism between the hydrogels and metallic ions.

**Key words:** Polymers hydrogels, swelling capacity, absorption, plasma spectroscopy emission.

## Hidrogeles obtenidos a partir de acrilamida, ácido maleico, ácido acrílico y monoitaconato de octilo: síntesis, capacidad absorbente y variaciones de pH en soluciones de sulfato de cobre

## Resumen

Se sintetizaron hidrogeles de acrilamida (AAm)/ácido maleico (AM), ácido acrílico (AAc)/ácido maleico (AM) y ácido acrílico (AAc)/octiléster del ácido 2-metilenbutanodioico (MI-8) en presencia de persulfato de amonio como iniciador y N,N'-metilenbisacrilamida como agente entrecruzante. El grado de hinchamiento de los hidrogeles fue caracterizado en ensayos de absorción a dos temperaturas: 25 y 37°C. Se estudió también su hinchamiento en soluciones de sales de cationes divalentes, como el cobre mediante la técnica de espectroscopia de emisión de plasma. Durante el estudio de hinchamiento, se encontró que los hidrogeles sintetizados presentaron isotermas que se extienden asintóticamente hacia el equilibrio. Se comprobó que un aumento en el contenido de ácido maleico influye directamente en las propiedades de hinchamiento (un incremento del 30% en AM aumenta el contenido de agua del hidrogel en el equilibrio en

un 12%). Respecto a la captación de cationes cobre, se encontró que la concentración disminuyó en la solución inicial, después de haber estado en contacto con los hidrogeles. Además, se midieron variaciones de pH en las soluciones que permitieron clarificar el mecanismo de reacción entre los hidrogeles y los iones metálicos.

**Palabras clave:** Polímeros hidrogeles, capacidad de hinchamiento, absorción, espectroscopia de emisión de plasma.

## Introducción

El reciente interés en el desarrollo de nuevos hidrogeles sintéticos con propiedades de biocompatibilidad, permeabilidad e hidrofilia, es una de las investigaciones de mayor relevancia en la actualidad [1-4]. Los hidrogeles son polímeros entrecruzados que tienen la capacidad de absorber agua o soluciones acuosas y, debido a esta propiedad y a su estructura, tienen una gran diversidad de aplicaciones, tales como: membranas para aplicaciones biomédicas, materiales para procesos de separación, materiales superabsorbentes y geles sensibles a la temperatura y al pH. Las propiedades físicas de estos materiales dependen, principalmente, del balance de grupos iónicos presentes en el hidrogel, generando interacciones atractivas o repulsivas entre sus cadenas; aunque también la fuerza iónica del medio donde se encuentren, y la elasticidad de la red polimérica, son factores importantes para su comportamiento [1].

En la síntesis de los hidrogeles, se ha reportado la importante función del agente entrecruzante [2-3], el cual da lugar a la estructura reticulada del hidrogel al poseer más de dos grupos reactivos en su estructura, siendo habituales compuestos tetrafuncionales, y hasta hexafuncionales [3]. En años recientes se han realizado investigaciones sobre la caracterización y el grado de hinchamiento de hidrogeles preparados por copolimerización vía adición; encontrándose que los hidrogeles exhiben una combinación de propiedades únicas en función de su composición química [4, 5]. Recientemente Katime y Rodríguez [6], han reportado el hinchamiento de hidrogeles, obtenidos a partir de ácido acrílico y ácido itacónico, en soluciones de sales de sulfatos, demostrando la potencial capacidad de los mismos para absorber iones metálicos.

El objetivo del presente trabajo, ha sido estudiar diversos sistemas hidrogeles poliméricos obtenidos al variar la composición y el tipo de co-

monómero, así como la concentración de agente entrecruzante, además se evaluaron sus propiedades termodinámicas (hinchamiento). Conjuntamente se evaluó la capacidad de absorción de iones metálicos en soluciones de sulfato de cobre.

## Parte Experimental

### Materiales

La acrilamida y el agente entrecruzante (N,N'-metilenbisacrilamida) fueron suplidos por Riedel de Haën, mientras que el poli(ácido acrílico) y el ácido maleico son de Aldrich Chemical. El ácido acrílico fue obtenido de la Cía. Fluka y el iniciador persulfato de amonio fue suministrado por Baker. Para el estudio de absorción se utilizó el sulfato de cobre pentahidratado (Merck).

En la Tabla 1 se presentan las estructuras químicas de los componentes de la polimerización: monómeros, iniciador y agente entrecruzante.

### Síntesis de los hidrogeles

Se sintetizó una serie de hidrogeles con los comonómeros combinados de la siguiente forma: acrilamida (AAm)/ácido maleico (AM), ácido acrílico (AAc)/ácido maleico (AM) y ácido acrílico (AAc)/monoitaconato de octilo (MI-8).

Como agente entrecruzante se utilizó N,N'-metilenbisacrilamida en diferentes proporciones (1-3% con respecto a la cantidad total de monómeros) y como iniciador persulfato de amonio, el cual se mantuvo a una concentración constante de 0,5% para todas las composiciones. El disolvente utilizado fue agua destilada. En la Tabla 2 se describen las proporciones copolimerizadas de los monómeros.

Las cantidades correspondientes de acrilamida, ácido maleico, ácido acrílico, monoitaconato de octilo y agente entrecruzante se disolvie-

Tabla 1  
Componentes para la polimerización de los hidrogeles

Componente	Fórmula	Abreviatura
Acrilamida	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CONH}_2$	AAm
Ácido maleico	$\text{COOHCH}=\text{CHCOOH}$	AM
Ácido acrílico	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{COOH}$	AAc
Octiléster del ácido 2-metilenbutanodioico (monoitaconato de octilo)	$\begin{array}{c} \text{COOH} \\   \\ \text{CH}_2=\text{C} \\   \\ \text{CH}_2-\text{COO}(\text{CH}_2)_7-\text{CH}_3 \end{array}$	MI-8
Persulfato de amonio	$(\text{NH}_4)_2 \text{S}_2 \text{O}_8$	PSA
N,N'-metilenbisacrilamida	$\begin{array}{c} \text{O} \qquad \qquad \text{O} \\    \qquad \qquad    \\ \text{HC}-\text{C}-\text{NH}-\text{CH}_2-\text{NH}-\text{C}-\text{CH} \\    \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad    \\ \text{CH}_2 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{CH}_2 \end{array}$	MBAAm

Tabla 2  
Proporciones de los reactivos  
copolimerizados

Monómeros	Agente entrecruzante (%)
AAm/AM	
100/0	3
190/10	3
80/20	3
70/30	3
60/40	3
AAc/AM	
90/10	1
80/20	1
70/30	1
60/40	1
AAc/MI-8	
90/10	1
80/20	1
70/30	1
60/40	1

AAm/AM: acrilamida/ácido maleico.  
AAc/AM: ácido acrílico/ácido maleico.  
AAc/MI-8: ácido acrílico /monoitaconato de octilo.

ron en agua destilada, dentro de un tubo de ensayo. Luego, se agregó el iniciador, agitándole hasta su total disolución; posteriormente se colocó el tubo de ensayo en un baño de aceite a 60°C, donde permaneció por 7 horas hasta la formación de los geles. Una vez terminada la polimerización, el gel se extrajo del tubo de ensayo, se lavó con agua destilada y se cortó en forma de pastillas, las cuales se secaron a temperatura ambiente hasta que alcanzaron masa constante.

### Caracterización del grado de hinchamiento

La determinación del grado de hinchamiento, se realizó a temperatura constante (25 y 37°C) de la siguiente forma: Se pesaron 0,10 g del xerogel, luego, se introdujo la pastilla en un vaso de precipitados que contenía 50 mL de agua destilada; a intervalos constantes de tiempo se extrajo la pastilla, se secó cuidadosamente su superficie con papel de filtro, se pesó y se volvió a colocar en el agua. Este proceso se repitió, sucesivamente, hasta que el hidrogel alcanzó el equilibrio; es decir, hasta que no se detectaron variaciones en la masa con el tiempo. De esta manera, se pudo calcular el contenido de agua absorbida por el hidrogel en función del tiempo. Para determinar el error que genera en las medidas del grado de hinchamiento la aplicación del método gravimétrico,

se midió el grado de hinchamiento en tres pastillas de los hidrogeles AAm/AM, 100/0 sintetizados al 2% de entrecruzante.

### Absorción de iones cobre

Con el fin de medir la cantidad de iones cobre, que podía absorber cada hidrogel, se colocó, en cada caso, 0,10 g de la pastilla de xerogel en 50 mL de una solución de sulfato de cobre preparada a 63,52 ppm, durante 20 horas, con agitación constante [6]. Transcurrido el tiempo de agitación, se extrajo la pastilla de hidrogel y se midió la cantidad de iones cobre antes y después de colocar el hidrogel en la solución. La cantidad de iones cobre absorbidos fue determinada por espectroscopia de emisión a una longitud de onda de 213,598 nm, bajo una atmósfera de argón. Estas medidas se realizaron en un espectrofotómetro de emisión atómica de plasma Perkin-Elmer, modelo 400. El procedimiento se repitió para hidrogeles obtenidos con diferentes composiciones de monómeros. Se midió también el pH en la solución antes y después de estar en contacto con el hidrogel en un pH-metro (Perkin-Elmer), el cual ya se había calibrado con una solución buffer entre 4 y 10.

## Resultados y Discusión

### Síntesis de los copolímeros

La síntesis de los hidrogeles se realizó mediante un proceso de copolimerización vía adición. La copolimerización de la acrilamida con el ácido maleico, ha sido estudiada en varios trabajos reportados previamente [7-8]. La polimerización se inicia con la formación de especies activas en el monómero, que se producen por radicales libres de oxígeno, causados por la acción de los iones persulfato [9].

En la etapa de iniciación el radical, obtenido a partir de la disociación del iniciador, reacciona con las moléculas de los monómeros de acrilamida y/o ácido maleico para formar las cadenas activas, mientras que en la etapa de propagación ocurre la polimerización vía adición; donde los monómeros acrilamida y ácido maleico se adicionan a la cadena que se propaga. Por otra parte, el agente entrecruzante (N,N'-metilbisacrilamida) es el responsable de generar enlaces covalentes entre él y las macromoléculas que se forman durante la etapa de propagación. Una de las numerosas posibilidades en que se pueden combinar los tres monómeros se ilustra en el esquema de la Figura 1. En ella se

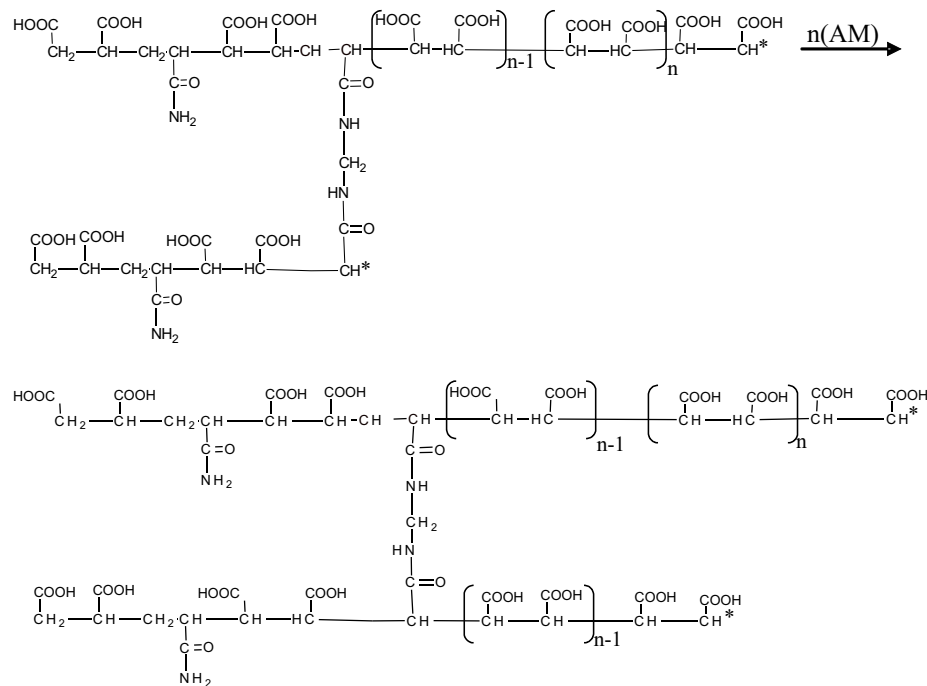


Figura 1. Esquema de una de las posibles etapas de propagación durante la polimerización del hidrogel a partir de acrilamida, ácido maleico y N,N'-metilbisacrilamida.

muestra como se puede formar la red tridimensional durante la etapa de propagación a partir de la macromolécula que está creciendo.

### Grado de hinchamiento

El grado de hinchamiento permite determinar el contenido de agua en el equilibrio, ya que controla un gran número de las propiedades de los hidrogeles, tales como permeabilidad, biocompatibilidad y las propiedades mecánicas; el mismo se ve afectado por la composición química del hidrogel y su densidad de entrecruzamiento [10-14].

La cantidad de agua retenida (% $m_t$ ), en el equilibrio, fue calculado por la siguiente ecuación [3]:

$$m_t(\%) = \frac{m_t - m_o}{m_o} \times 100, \quad (1)$$

donde  $m_o$  y  $m_t$  denotan la masa del hidrogel seco (xerogel) y del hidrogel húmedo, respectivamente, en función del tiempo.

El tiempo necesario para que los hidrogeles alcancen el equilibrio de hinchamiento depende de la composición del copolímero y del grado de entrecruzamiento. Es interesante destacar que el error en las medidas de grado de hinchamiento resultó ser de 0,5% para la data de las masas tomadas en tres pastillas del hidrogel de poli(acrilamida). En la Figura 2, pueden observarse las isotermas de hinchamiento obtenidas a 25°C, a partir de los hidrogeles de AAm/AM, sintetizados con 1% de agente entrecruzante hasta las 140 horas del hidrogel en el agua. Un acercamiento a las curvas en las primeras 5 horas (Figura 2b) muestran dos etapas: en la primera (los primeros 30 minutos) la absorción de agua es acelerada, ya que los hidrogeles tienen un mayor volumen libre; a continuación, una segunda etapa, en la que la absorción se hace más lenta, debido a que el volumen libre disminuye hasta alcanzar el equilibrio termodinámico de hinchamiento (Figura 3). Inicialmente, todas las curvas son similares, pero el tiempo que tardan los diferentes hidrogeles en llegar al equilibrio va a ser función de la composición de los monómeros.

En la Figura 2 se puede observar que el hidrogel con mayor contenido de acrilamida (100/0) exhibió un menor hinchamiento, que

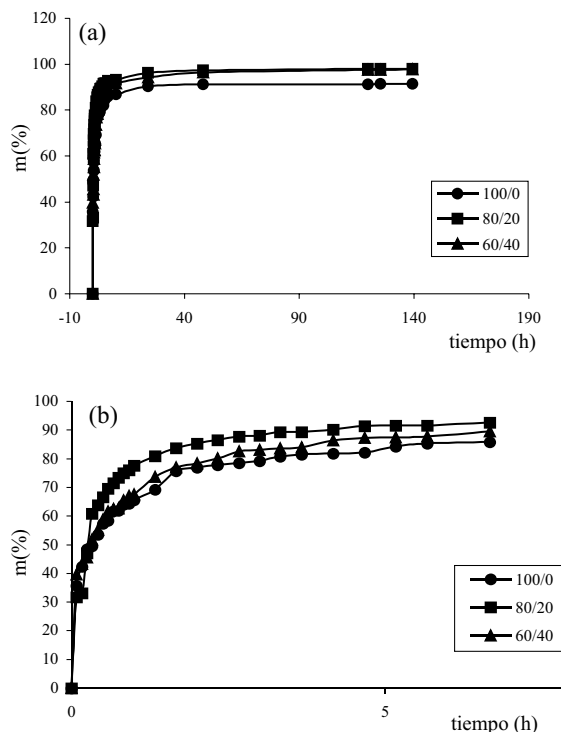


Figura 2. Isotermas de hinchamiento de hidrogeles de AAm/AM a 25°C a una concentración de entrecruzante de 1%:  
(a) A las 136 horas de hinchamiento,  
(b) En las primeras 5 horas.

aquellos hidrogeles sintetizados con ácido maleico, lo cual puede deberse a que la molécula de AAm posee una menor cantidad de grupos hidrófilos respecto a la del AM. Sin embargo, a medida que se fue incrementando la alimentación de ácido maleico en la copolimerización, este incorpora una mayor cantidad de grupos hidrófilos a las cadenas del polímero, favoreciendo una mayor interacción del hidrogel con el agua.

En la Figura 3, se muestran las isotermas de hinchamiento de hidrogeles copolimerizados a partir de AAm/Am, manteniendo fija su alimentación, 70/30, pero variando la concentración del agente entrecruzante. En ella se aprecia que al incrementar el porcentaje de agente entrecruzante, los hidrogeles exhiben una marcada reducción del hinchamiento en agua.

En la Figura 3 se refleja el hinchamiento de los hidrogeles a tiempos menores que en la Figura 2, pudiéndose apreciar con mayor claridad

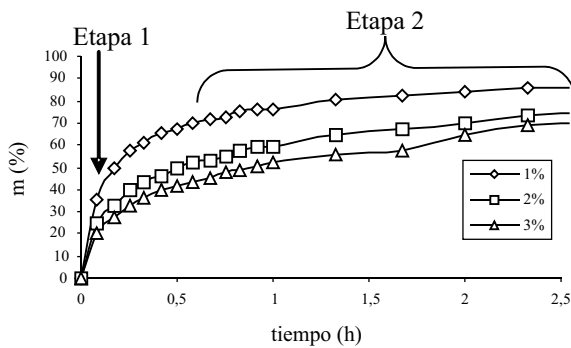


Figura 3. Isotermas de hinchamiento de AAm/AM (70/30) a 25°C a diferentes concentraciones de agente entrecruzante.

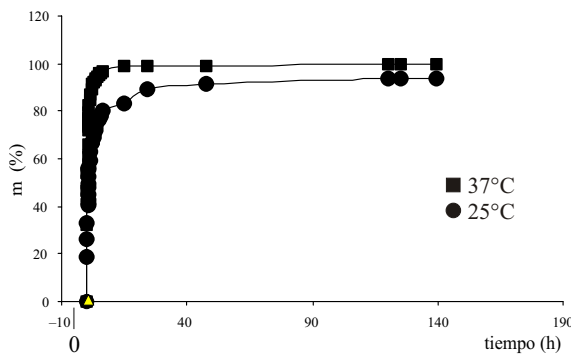


Figura 4. Isotermas de hinchamiento medidas a diferentes temperaturas en hidrogeles de AAm/AM, 60/40.

que las curvas muestran las dos etapas mencionadas anteriormente: la primera es mucho más rápida que la segunda. Este es el comportamiento típico de estos materiales.

En la Tabla 3 se ilustra la cantidad de agua absorbida cuando se varió el tiempo de contacto con el agua, para los hidrogeles sintetizados con

los otros comonómeros a la misma proporción de agente entrecruzante (1%) y de comonómeros (90/10). Estas medidas reflejan que al incorporar el ácido maleico, a las cadenas del hidrogel, se favoreció la absorción de agua; pues, se generó una mayor interacción de los grupos -COOH con ella, mientras que al sintetizar con MI-8, por tener este monómero un mayor número de grupos metilenos -CH<sub>2</sub> en su cadena lateral, el hidrogel se hinchó con mayor dificultad debido a la baja interacción de la cadena lateral con las moléculas de agua.

Por otra parte, el efecto de la temperatura en las propiedades de hinchamiento de los hidrogeles es importante, debido al amplio marco de actividades en la que se pueden usar estos materiales: en suelos áridos a alta temperatura, como fármaco en el cuerpo humano y otros [15, 16].

En la Figura 4, se muestran las isotermas de hinchamiento medidas a 37 y a 25°C en hidrogeles de AAm/AM, 60/40, sintetizados a una concentración constante de agente entrecruzante (2%). En dicha figura, se puede visualizar que la absorción de agua, fue mayor cuando se incrementó la temperatura. Esto indica que la red del hidrogel se expande con el aumento de la temperatura, causando un incremento en la capacidad de absorción del agua [2, 17].

En la isoterma obtenida a 25°C se puede apreciar un punto de inflexión a las 15 horas de estar en contacto el hidrogel con el agua. Esta medida se repitió tres veces, comprobándose que estaba dentro del error del método ( $\pm 0,5\%$ ); no obstante hay que destacar que la construcción de estas curvas es dificultosa debido a que los hidrogeles con alto contenido de AM llegaban a absorber tanta agua que al final de la experiencia había que manipularlos con mucho cuidado para que

Tabla 3  
Contenido de agua de diferentes hidrogeles a 1% de entrecruzante

Tiempo (h)	AAc/AM	AAc/MI-8
0,08	28,80	25,87
1,00	60,21	50,37
3,00	74,26	63,33
24,00	91,37	84,46
139,35	93,66	86,55



no se fracturaran (Figura 5b). Cuando esto ocurría, había que comenzar nuevamente a recolectar la data para la elaboración de la isoterma con una nueva pastilla seca (xerogel). Dificultades similares han sido reportadas por otros autores en el área de hidrogeles [18].

Las medidas en el grado de hinchamiento obtenidas permiten afirmar que los hidrogeles de AAm/AM, 60/40, son termohinchables, ya que temperaturas más altas facilitan los movimiento macromoleculares en el hidrogel, lo que arroja un incremento en su capacidad de hidratación.

### Absorción de iones cobre en hidrogeles

Una aplicación importante de los hidrogeles es el de la eliminación de trazas metálicas presentes en soluciones acuosas, para ello se pueden emplear hidrogeles con un alto contenido de grupos hidrófilos que permitan la interacción en-

tre estos grupos y los iones metálicos que se encuentren en el medio acuoso [1, 2, 6-8, 19].

En la Figura 5c se muestra un hidrogel de AAm/AM después de estar en contacto durante 20 horas con una solución de sulfato de cobre, donde se observa que el hidrogel al final de las 20 h exhibió una coloración verde intensa, evidenciando que la captación de iones cobre por parte del hidrogel se había realizado.

En la Tabla 4, se presentan los distintos valores de la concentración final de cobre, medidas en las soluciones que estuvieron en contacto con los hidrogeles. Los resultados revelan que, en todos los casos, la concentración inicial de los iones cobre en la solución inicial (63,52 ppm) disminuyó apreciablemente. No obstante, los hidrogeles con un mayor porcentaje de agente entrecruzante (2%) parecen haber absorbido una menor proporción de los iones metálicos, debido posiblemente a que las cadenas del hidrogel son más rí-

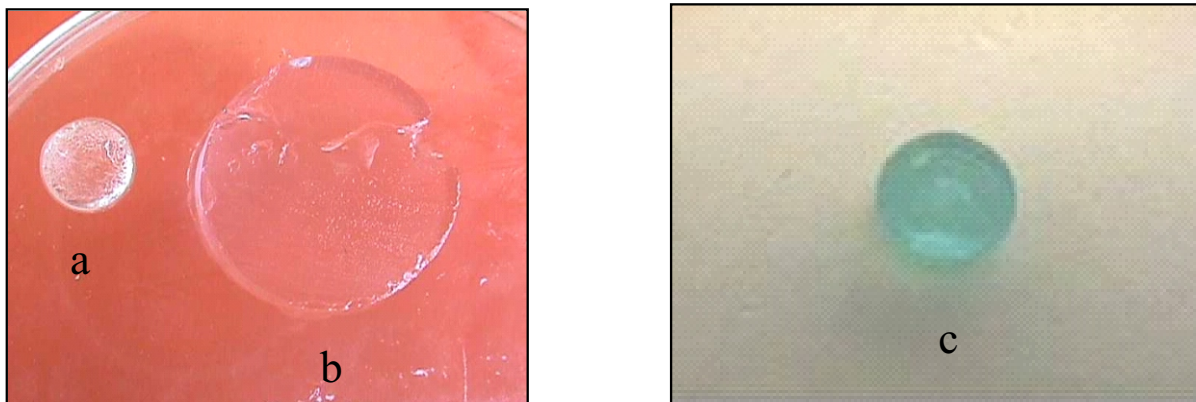


Figura 5. Fotografías de la pastilla de hidrogel: (a) en estado seco, (b) hinchada y fracturada, (c) después de haber permanecido en la solución de cobre.

Tabla 4

Variación de la concentración de cobre en soluciones a las cuales se les introdujo una pastilla de los hidrogeles de poli(acrilamida-co-ácido maleico)

Tipo de hidrogel	Concentración inicial de cobre (mg/L) ±0,1	Concentración final de cobre (mg/L) ±0,1
AAm/AM (90/10) 1% de entrecruzante	63,52	32,15
AAm/AM (60/40) 1% de entrecruzante	63,52	29,64
AAm/AM (90/10) 2% de agente entrecruzante	63,52	50,69
AAm/AM (60/40) 2% de entrecruzante	63,52	51,18

gidas y poseen un menor volumen libre, lo que dificulta la interacción de los grupos hidrófilos con los cationes cobres presentes en la solución.

En la Tabla 5, se presentan la concentración final e inicial de los iones cobre para los hidrogeles sintetizados con AM, AAc y MI-8, a una concentración fija de agente entrecruzante (1%). Para todos los copolímeros se presentaron diferencias significativas respecto a la concentración inicial de cobre. No obstante, no se detectaron variaciones apreciables en la concentración final cuando se sustituyó en los hidrogeles el monómero AM por el MI-8, de lo que se deduce que ambos tipos de monómeros favorecen el mismo mecanismo de reacción para la captación de los iones metálicos.

En la Figura 6, se representa la diferencia de concentraciones de Cu medidas en el espectrómetro de emisión de plasma para los hidrogeles de AAm/AM (60/40), sintetizados con diferentes concentraciones del agente entrecruzante (MBAAm). Es un hecho conocido que la concentración del agente entrecruzante utilizada en la síntesis de un polímero reticulado, como los hidrogeles, es directamente proporcional al movimiento que van a poder tener las cadenas (flexibilidad) y a su densidad de reticulación. En consecuencia, un menor grado de entrecruzamiento genera un aumento del volumen libre en el hidro-

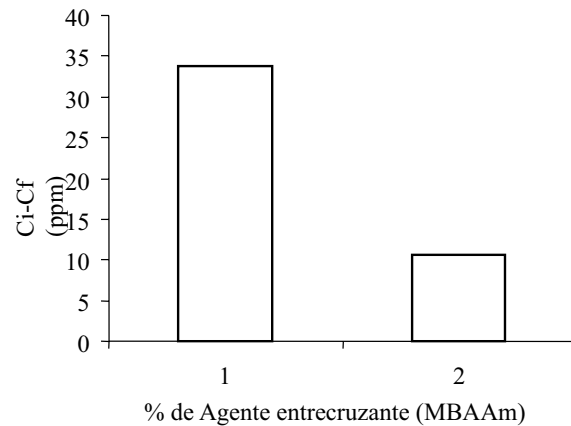


Figura 6. Variación de la concentración de cobre medidas en el equipo de plasma para dos copolímeros de AAm/AM (60/40).

gel, que podría favorecer la interacción entre los grupos carboxílicos presentes y los iones metálicos de la solución, en función de su radio iónico [20]. Las diferencias en la Figura 6 y los resultados de la Tabla 5 reflejan que una de las variables más importante que influye en la absorción de los iones cobre es la concentración de agente entrecruzante en el hidrogel.

En la Tabla 6 se presentan los valores de pH medidos, en las diferentes soluciones de sulfato de cobre en las cuales se colocaron los hidroge-

Tabla 5  
Variación de la concentración de cobre en soluciones que estuvieron en contacto con diferentes tipos de hidrogeles con 1% de entrecruzante

Tipo de hidrogel	Concentración inicial de cobre (mg/L) ±0,1	Concentración final de cobre (mg/L) ±0,1
AAc/AM (90/10)	63,52	41,53
AAc/AM (60/40)	63,52	41,29
AAc/MI-8 (90/10)	63,52	39,02
AAc/MI-8 (60/40)	63,52	40,09

Tabla 6  
Variación del pH en soluciones de sulfato de cobre que estuvieron en contacto con diferentes tipos de hidrogeles con 1% de entrecruzante

Tipo de hidrogel	pH inicial	pH final	ΔpH
AAm/AM (90/10)	6,18	4,61	1,57
AAm/AM (60/40)	6,18	4,17	2,01



les. Estas medidas corresponden al pH después de estar en contacto durante 12 horas con la solución de sulfato de cobre. Los resultados presentados demuestran que hubo una disminución en el pH, posiblemente debido a que ocurrió

una recombinación de los protones hidronio ( $H^+$ ) en el medio. Esta disminución arroja evidencias que permiten proponer un mecanismo para la absorción de iones cobre, considerando una estructura idealizada del hidrogel (Figura 7).

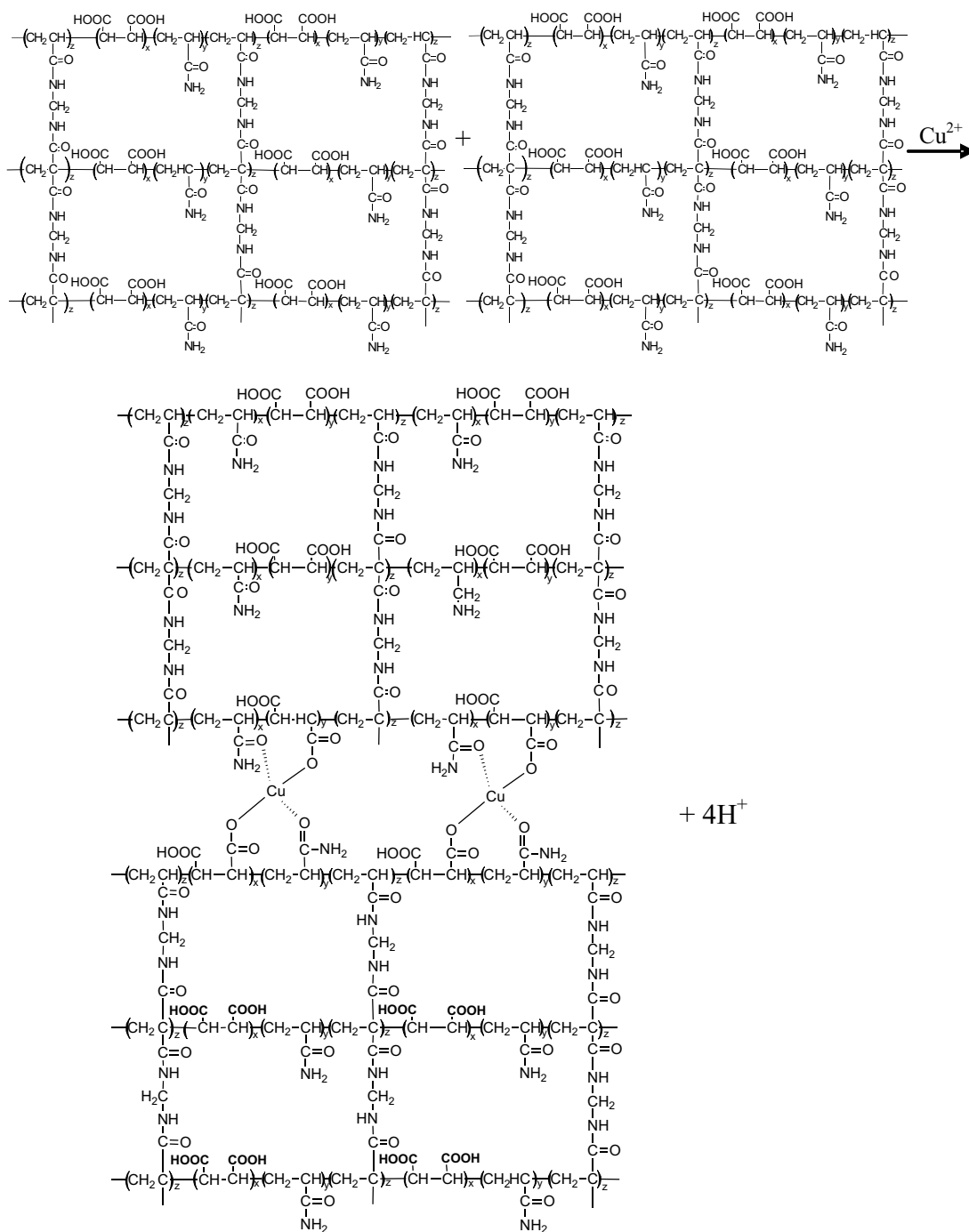


Figura 7. Mecanismo propuesto para la absorción de iones cobre considerando una estructura idealizada del hidrogel AAm/AM.

En la Tabla 6 se puede apreciar que los valores de  $\Delta\text{pH}$  obtenidos permiten afirmar que a medida que aumenta el contenido de ácido maleico en el hidrogel, este parece capturar más cationes cobre. En la Figura 7, se propone un mecanismo, con la estructura idealizada del hidrogel, donde se indica la coordinación que podría existir entre estos iones con los grupos aniónicos del ácido maleico, la cual podría ser uno de los mecanismos que origina las reducciones de pH y de concentración de iones cobre medidas en los hidrogeles.

### Conclusiones

Los polímeros hidrogeles de poli(acrilamida-co-ácido maleico), poli(ácido acrílico-co-ácido maleico) y poli(ácido acrílico-co-monoitaconato de octilo) presentaron un comportamiento similar durante el hinchamiento en agua, aumentando rápidamente su masa y volumen en los primeros momentos y manteniendo estos parámetros constantes a medida que se alcanza el equilibrio.

El grado de hinchamiento, o contenido de agua en el equilibrio, aumentó en forma creciente en los copolímeros al incrementar el contenido de ácido maleico. Un efecto contrario se encontró al aumentar la proporción del comonomero octiléster del ácido 2-metilenbutanodioico (MI-8). Además, al incrementar el porcentaje de agente entrecruzante, todos los hidrogeles exhiben una marcada reducción del hinchamiento en agua.

Una de las variables más importante que influye en la absorción de los iones cobre resultó ser la cantidad de agente entrecruzante. La absorción de iones cobre es mayor cuando se emplea un bajo porcentaje de agente entrecruzante. Además a medida que se aumentó el contenido de ácido maleico en el hidrogel, este pareció capturar más cationes cobre.

Finalmente, los hidrogeles de poli(acrilamida-co-ácido maleico) demostraron ser termohinchables ya que exhibieron un aumento en la absorción de agua al incrementarse la temperatura.

### Agradecimientos

Al Consejo de Investigación de la UDO y al IIBCA-UDO por el financiamiento de este trabajo

a través del proyecto CI-5-1902-0955/00 y, muy especialmente al Dr. Issa Katime por su asesoramiento y motivación en la presente investigación.

### Referencias Bibliográficas

1. Katime I.: "Hidrogeles inteligentes". Rev. Ibe. Pol., Vol. 5, No. 5 (2000)10-30.
2. Katime I., Katime O. y Katime D.: "Los materiales inteligentes de este milenio: Los hidrogeles macromoleculares. Síntesis, propiedades y aplicaciones". Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, Bilbao, España, 2004.
3. González N., Vadillo I., Trigo R. y Teijon J.: "Hidrogeles: Síntesis, propiedades y aplicaciones". Rev. Ibe. Pol., Vol. 1, No. 1 (1992) 79-83.
4. Ramírez M., López F., Bullon J., Sasía P., Larez C. y Perdomo G.: "Algunas aplicaciones de los polímeros. II Escuela Internacional de Polímeros". Edit. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela, 2002.
5. Ramírez M.: "Efecto del porcentaje de comonomeros y del entrecruzante sobre las propiedades mecánicas y el hinchamiento de hidrogeles de poli(ácido acrílico-co-monoésteres aromáticos del ácido itacónico)". Tesis de Maestría. Departamento de Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2002.
6. Katime I. y Rodríguez E.: "Absorption of metal ions and swelling properties of poly(acrylic acid-co-itaconic acid) hydrogels" J. Macromol. Sci. Pure Appl. Chem., Vol. A38, No. 5, (2001) 543-558.
7. Dursun S. y Karadag E.: "Adsorptions of some heavy metal ions in aqueous solutions by acrylamide/maleic acid hidrogel". Spe. Sci. Tech. Vol., 30, No. 17 (1995) 3287-3293.
8. Karadag E., Üzüm O. y Saraydin D.: "Swelling equilibria and dye adsorption studies of chemically crosslinked superabsorbent acrylamide/ maleic acid hydrogels". Eur. Polym J. Vol 38. (2002) 2133-2141.
9. Chávez M., Díaz J., Pérez U. y Delfin J.: "Temas de Enzimología". Edit. de la Facultad de Biología, Universidad de La Habana, Cuba, 1990.

10. Murali Y, Keshava P. y Mohana K.: "Síntesis and swelling behaviour of interpenetrating network polymers of poly(vinyl alcohol) and poly(acrylamide-co-potassium methacrylate)". *Des. Monom. and Polym.*, Vol. 8, No. 3 (2005) 187-202.
11. Yoshimura T. Ochi Y. y Fujioka R.: "Síntesis and properties of hydrogels based on polyaspartamides with varios pendants". *Polym. Bull.* 55 (2005) 377-383.
12. Serrano A., Campillo A., Gómez J., Monleón M., Gallego G. y Pissis P.: "Porous poly(2-hidroxyethyl acrylate) hydrogels prepared by radical polymerization with metanol as diluent". *Polymer*, 45 (2004) 8949-8955.
13. Bicak N., Filiz B y Gazi M.: "Hydrogels prepared by crosslinking copolymerization of N-allyl maleamic acid with acrylamide and acrylic acid". *Des. Monom. and Polym.* Vol.7. No. 3 (2004) 261-267.
14. Xuejun X. Netti P., Ambrosio L., Nicolais L. y Sannino A.: "Preparation and Characterization of a hidrogel from Low-molecular weight Hyaluronic acid". *J. Bioac. and Comp. Polym.* Vol. 19 (2004) 5-15.
15. Metters A. y Hubbell J.: "Network formation and degradation behavior of Hydrogels formed by Michel-Type addition reactions", *Biomacromolecules*, Vol. 6. No.1. (2005) 290-301.
16. Chen Z., Mingzhu L. y Songmei M.: "Synthesis and modification of salt-resistant superabsorbent polymers" *React. and Function. Polym.* Vol. 62. No. 1. (2005) 85-92.
17. Wen-Fu L. y Cheng-Hawn H.: "Thermoreversible hydrogel. Synthesis and swelling behavior of the N-isopropylacrylamide-co-trimethyl methacryloyloxyethyl ammonium iodide copolymeric hydrogels", *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 69 (1997) 1793-1802.
18. Kim D., y Park K.: "Swelling and mechanical properties of superporous Hydrogels of poly(acrylamide-co-acrylic acid)/polyethylenimine interpenetrating polymer networks", *Polymer*, Vol. 45, No. 1 (2004) 189-196.
19. Li W., Zhao H., Teasdale P., John R. y Zhang S.: "Synthesis and characterization of a polyacrylamide-polyacrylic acid copolymer hydrogel for environmental analysis of Cu and Cd", *React. and Function. Polym.* Vol. 52. No. 1. (2002) 31-41.
20. Rojas de Gascue B., Ramírez M., García A., Bejarano. L., Sánchez I. Mostue M.B. y Katime I. "Hinchamiento y absorción de hidrogel en soluciones de Cobre, Hierro y Níquel" resultados aún no publicados.

Recibido el 17 de Abril de 2006

En forma revisada el 08 de Enero de 2007