

## Comparación entre la co-precipitación química y el uso de hidrogeles en la remoción de iones cobalto (II) disueltos en soluciones acuosas

Jorge Alberto Cortes Ortega\*, Abraham Gabriel Alvarado Mendoza y Rubén Octavio Muñoz García

Departamento de química, Universidad de Guadalajara (C.U.C.E.I.)  
Boulevard Marcelino García Barragán 1455  
C.P. 44340, Guadalajara, Jalisco, México

(\*) [jorcortes@hotmail.com](mailto:jorcortes@hotmail.com)

Recibido: 29/06/2020

Revisado: 30/09/2020

Aceptado: 17/11/2020

### Resumen

En este trabajo se presenta la remoción de iones cobalto presentes en solución acuosa, empleando hidrogeles de acrilamida/ácido itacónico como medio de transporte y dosificadores de iones hidroxilo (OH<sup>-</sup>). Este proceso se llevó a cabo en dos etapas, en la primera los hidrogeles totalmente secos (xerogel) se colocaron en soluciones 0,1 M de NaOH y posteriormente fueron colocados en las soluciones acuosas que contenían al metal, iniciando la liberación de los grupos OH<sup>-</sup> los cuales reaccionan con los iones Co<sup>+2</sup> para formar Co(OH)<sub>2</sub> sobre la superficie del hidrogel debido a la insolubilidad del hidróxido formado, con esto se evita la penetración de iones Co<sup>+2</sup> hacia el hidrogel y la dispersión del sólido en la solución, al terminar la reacción de precipitación el sólido obtenido puede ser fácilmente removido, mediante la decantación de la solución residual y el lavado del hidrogel con agua destilada

**Palabras claves:** cobalto; acrilamida; ácido itacónico; hidrogeles; remediación de aguas industriales

### Abstract

**Comparison between chemical coprecipitation and the use of hydrogels in the removal of dissolved cobalt (II) ions in aqueous solutions.** In this work, the removal of cobalt ions dissolved in aqueous solution is presented, using acrylamide / itaconic acid hydrogels as transport medium and hydroxyl ions (OH<sup>-</sup>) dispensers. This process was carried out in two stages, in the first the totally dry hydrogels (xerogel) were placed in 0.1 M NaOH solutions and later they were placed in the aqueous solutions containing the metal, initiating the release of the OH<sup>-</sup> groups, which react with the Co<sup>+2</sup> ions to form Co(OH)<sub>2</sub> on the surface of the hydrogel due to the insolubility of the hydroxide formed, this prevents the penetration of Co<sup>+2</sup> ions towards the hydrogel and the dispersion of the solid in the solution, At the end of the precipitation reaction, the solid obtained can be easily removed by decanting the residual solution and washing the hydrogel with distilled water.

**Keywords:** Cobalt; Acrylamide; Itaconic Acid; Hydrogels; Industrial Water Remediation

### Introducción

El aumento en el uso de metales pesados como el cobalto en muchos procesos tecnológicos e industriales ha incrementado en gran medida su concentración en aguas residuales provocando un serio problema ambiental y para la salud de humanos, plantas y animales<sup>1-4</sup>. Debido a esto se han desarrollado distintos materiales, procesos y métodos de recuperación de metales pesados disueltos en forma de iones. Se encuentran métodos novedosos como: oxidación-reducción<sup>5</sup>, nano y ultrafiltración<sup>6,7</sup>, tratamientos electroquímicos<sup>8</sup>, separación por medio de membranas<sup>9</sup> y electrodiálisis<sup>10</sup>, hasta métodos más flexibles, económicos y que no requieren tecnologías avanzadas como la extracción con diferentes tipos de ácido<sup>11,12</sup> y el método de adsorción. En este último caso se emplea una sustancia capaz de adsorber sobre su superficie o dentro de sus partículas a los iones metálicos que se desean remover. Por

ejemplo, el uso de carbón activado<sup>13</sup> e hidrogeles<sup>14-16</sup>. Los hidrogeles son un material flexible, económico y de alto rendimiento en la recuperación y remoción de metales pesados presentes en soluciones acuosas en forma de iones, por lo cual han recibido un gran interés en los últimos veinte años. Para la remoción de iones cobalto (II) en solución acuosa se han empleado distintas técnicas. Mansour *et al.*<sup>17</sup> emplearon la técnica de electrocoagulación de corriente alterna para remover el 95% de Co<sup>+2</sup> en solución acuosa pH de 7,5 con una densidad de corriente de 0,04 A/m<sup>2</sup> en un tiempo de 35 min y una concentración de iones de 25 mg/L. Ketsela *et al.*<sup>18</sup> emplearon carbón activado sintetizado a partir del altramuz blanco, para remover iones Co<sup>+2</sup> presentes en soluciones acuosas, la máxima eficiencia de adsorción obtenida fue de 90,36% en un medio de pH 5, con tiempo de contacto 30 min y temperatura de 55 °C con 2 g de adsorbente y una concentración inicial de

iones de 50 mg/L. En trabajos previos nuestro grupo de investigación encontró que el uso de hidrogeles de acrilamida/ácido crotonico hinchados en soluciones acuosas de NaOH 0,1 M ayudó a incrementar la cantidad removida de iones  $\text{Ni}^{+2}$  presentes en soluciones acuosas. Esto se logró formando hidróxido de níquel<sup>19</sup> sobre la superficie del hidrogel el cual actúa como un medio de transporte de iones  $\text{OH}^-$ , removiendo hasta el 90% del metal presente.

En este trabajo se presenta la síntesis de hidrogeles compuestos de poli (acrilamida-co-ácido itacónico) con una relación másica de 80/20 y la comparación entre dos técnicas de remoción de iones  $\text{Co}^{+2}$  desde soluciones acuosas. En la primera se llevó a cabo la precipitación química de los iones añadiendo un volumen determinado de una solución de NaOH 0,1 M. En la segunda técnica se emplearon los hidrogeles sintetizados en la recuperación de iones  $\text{Co}^{+2}$ . Los polímeros totalmente secos (xerogel) se sumergieron en soluciones acuosas de NaOH con un valor de pH igual a 13 durante 48 h, posteriormente los hidrogeles (xerogeles hinchados con la solución acuosa de NaOH) fueron colocados dentro de soluciones acuosas de  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , los iones  $\text{OH}^-$  presentes en el hidrogel reaccionaron con los iones  $\text{Co}^{+2}$  formando hidróxido de cobalto sobre la superficie del gel, logrando una remoción del 94%.

## Parte experimental

### Métodos y materiales

Los monómeros acrilamida (AM) y ácido itacónico (AI) ambos con una pureza de 99% fueron obtenidos de Sigma y Aldrich respectivamente. La sal de cobalto empleada en el desarrollo de este trabajo fue el cloruro de cobalto hexahidratado ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) obtenido de Sigma con pureza de 99%. El iniciador empleado en las reacciones de polimerización fue el persulfato de potasio (KPS,  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ) con una pureza del 99% de Aldrich. Como agente entrecruzante se empleó N',N'-metilbisacrilamida (NMBA) con pureza de 99% obtenido de TCI. Se empleó el acelerador N,N,N',N'-tetrametil-etilendiamina (TMEDA) de Tokyo Kasei para llevar a cabo la reacción a temperatura de 30 °C. Finalmente, como medio de reacción se empleó agua bi-distilada de Productos Selectopura. Todos los reactivos fueron empleados como se recibieron.

### Síntesis de los hidrogeles.

Se prepararon distintas soluciones acuosas con una composición de 90% de agua y 10% de monómeros, con una relación en masa de acrilamida/ácido itacónico igual a 80/20. Además, se adicionaron el 1% de NMBA, 2% de

KPS y 3% de TMEDA en masa con respecto al total de monómeros. Posteriormente, las soluciones se colocaron en recipientes cilíndricos de vidrio los cuales fueron sellados y colocados en un baño de reacción a 30 °C por 24 h, al cabo de este tiempo las muestras fueron retiradas del recipiente, se cortaron en discos de 2 cm de espesor y se colocaron en agua bi-distilada por 7 días para retirar las trazas de reactivos, al finalizar este tiempo el agua de lavado se reemplazó cada 6 h

durante 3 días más. Finalmente, los hidrogeles fueron introducidos a una estufa de vacío a 50 °C hasta alcanzar peso constante.

### Remoción de los iones cobalto

Con el objetivo de maximizar la remoción de iones cobalto se llevaron a cabo distintos métodos, en los cuales se estudió la variación de la relación másica de solución de NaOH a xerogel empleado, la concentración de iones  $\text{OH}^-$  presentes en el hidrogel, la concentración de iones  $\text{Co}^{+2}$  disueltos en la solución del metal y el número de veces que el hidrogel fue empleado en el proceso sobre la remoción de iones  $\text{Co}^{+2}$ .

**Método 1:** los xerogeles fueron inmersos en soluciones acuosas 0,1 M de NaOH con un tiempo de residencia de 48 h a temperatura constante de 30 °C en relaciones másicas de 50/1, 65/1, 100/1, 125/1 y 150/1 de solución a xerogel empleado con el objetivo de determinar la proporción adecuada para que los iones  $\text{OH}^-$  penetren al polímero y posteriormente sean liberados desde la matriz en la solución del metal para llevar a cabo la reacción de precipitación

La capacidad de absorber agua de los hidrogeles se calculó mediante la ecuación 1:

$$W = \frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \quad (1)$$

Con ello se midió la masa de agua absorbida por cada gramo de polímero seco (xerogel). Esta misma ecuación fue empleada para calcular posteriormente la cantidad de solución de iones cobalto absorbida por el hidrogel.

**Método 2:** los xerogeles fueron inmersos en soluciones acuosas 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 y 0,5 M de NaOH, con un tiempo de residencia de 48 h a temperatura constante de 30 °C. Una vez concluido el periodo de tiempo se retiraron de la solución de NaOH y se colocaron en las soluciones de  $\text{CoCl}_2$ . El objetivo fue medir el efecto de la concentración de los iones  $\text{OH}^-$  presentes en el hidrogel sobre la capacidad de este para remover los iones  $\text{Co}^{+2}$ .

**Método 3:** los hidrogeles previamente hinchados en las soluciones acuosas 0,1 M se colocaron en soluciones de ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) de distinta concentración. La remoción de metales se llevó a cabo sin agitación con un tiempo de residencia de los hidrogeles en estas soluciones de 48 h a una temperatura constante de 30 °C.

**Método 4:** los hidrogeles empleados en la remoción de los iones  $\text{Co}^{+2}$  fueron lavados con agua bi-distilada y posteriormente se colocaron una estufa de vacío a 50 °C hasta alcanzar peso constante, para ser reutilizados en el proceso. Se evaluó la capacidad del hidrogel para remover iones  $\text{Co}^{+2}$  en función del número de veces (ciclos) que se ha utilizado.

Una vez que se concluyó el tiempo de residencia del hidrogel en la solución de  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  la solución residual fue decantada de tal manera que los primeros 15 ml se recolectaron para

la medición del cobalto residual, mediante espectroscopia UV vis, empleando un espectrofotómetro de marca UNICO modelo 250, y una curva de calibración construida previamente con base en lo reportado para el uso de esta técnica<sup>20</sup>. El material sólido se colocó en una estufa de vacío a 50 °C para su secado. Todos los experimentos se realizaron por triplicado, reportándose los valores con desviaciones estándar menores al 5%.

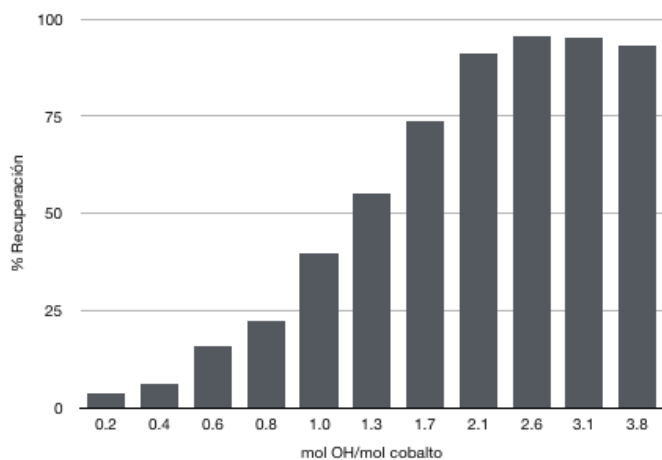
Para determinar la efectividad del uso de hidrogeles en la remoción de los iones  $\text{Co}^{+2}$ , se realizó una prueba de co-precipitación química en solución, para ello se prepararon soluciones acuosas de 1800 ppm de  $(\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$  a las cuales se les adicionó un volumen determinado de solución 0,1 M de NaOH, cuyo objetivo fue encontrar la relación molar entre los iones  $\text{Co}^{+2}$  y los iones  $\text{OH}^-$  a la cual se logra precipitar la mayor cantidad de  $\text{Co}(\text{OH})_2$  sin la presencia del hidrogel, este estudio fue la referencia para evaluar la efectividad de los hidrogeles, es decir, si se logra mejorar la remoción de iones  $\text{Co}^{+2}$  con la presencia de los hidrogeles.

## Resultados

En la prueba de co-precipitación química se encontró que en un valor de relación molar de iones  $\text{OH}^-/\text{Co}^{+2}$  igual a 2,55 se removió el 90% del total de cobalto disuelto (figura 1). Al incrementar este valor la remoción de iones metálicos no fue significativa y la cantidad de solución de NaOH 0,1 M que debía adicionarse se incrementó de manera apreciable como se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1.** % de recuperación de iones cobalto como función de la proporción de moles de NaOH adicionados por cada mol de cobalto, cuando se mezclan soluciones de 1000 ppm de cobalto con soluciones 0,1 Molar de NaOH.

NaOH (mL)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
$\text{CoCl}_2$ (mL)	38	36	34	32	30	28	26	24	22	20	18
% recuperación	3,62	5,92	15,76	22,32	39,55	55,05	73,94	91,21	95,70	95,28	93,14
moles $\text{OH}^-/\text{mol Co}$	0,16	0,35	0,55	0,78	1,04	1,33	1,68	2,07	2,55	3,11	3,79



**Fig. 1:** % de recuperación de iones cobalto como una función de la proporción de moles de sosa adicionados por cada mol de cobalto, cuando se mezclan soluciones de 1800 ppm. de cobalto con soluciones 0,1 M de NaOH.

Los resultados obtenidos mediante el método A se presentan en la tabla 2, se encontró que para la relación 100/1 gramo de solución 0,1 M de NaOH/gramo de xerogel (g sln NaOH 0,1 M/xerogel), la cantidad de solución captada por el hidrogel fue de 61,4 gramos de solución 0,1 M de NaOH/gramo de xerogel ( $W_{\text{NaOH}}$ ) en 48 h, una vez que este hidrogel fue colocado en la solución acuosa de cloruro de cobalto se obtuvo un hinchamiento de 34,3 gramos de solución de cobalto 1000 ppm/gramo de xerogel ( $W_{\text{Co}}$ ) recuperando el 95% del cobalto inicial presente en la solución (%  $\text{Co}_{\text{rec}}$ ) o una relación másica de 0,099 gramos de  $\text{Co}^{+2}$ / gramos de xerogel empleado ( $g_{\text{Co}}/g_{\text{xerogel}}$ ) con una relación molar de  $\text{OH}^-/\text{Co}$  igual a 1,91 ( $\text{mol}_{\text{OH}^-}/\text{mol}_{\text{Co}}$ ), valores similares de porcentaje de iones  $\text{Co}^{+2}$  removidos se encontraron para las relaciones 125/1 y 150/1. En la tabla 2, se muestra que la cantidad de metal removido por cada gramo de xerogel se incrementó al aumentar la cantidad de solución de NaOH donde sumergió el xerogel previamente, se obtuvo un valor de remoción máximo de 0,155 gramos de cobalto por cada gramo de xerogel, lo que representa el 94% del metal presente originalmente. El resto de las muestras alcanzó un porcentaje de remoción similar, excepto la muestra 50/1 que sólo fue capaz de remover el 39% de del ion metálico disuelto inicialmente, lo cual es debido a que el hinchamiento para esta muestra fue de 48,2 gramos de solución de NaOH 0,1 M/gramo de xerogel, lo que representa casi la totalidad de la solución colocada inicialmente, por lo que no había suficiente solución para que el proceso de hinchamiento continuara, por lo que la cantidad de iones  $\text{OH}^-$  presentes dentro del hidrogel está restringido al existente en la solución de NaOH, por esta razón esta muestra presentó una baja remoción del metal.

Como los hidrogeles son materiales heterogéneos, entonces la velocidad a la que absorben la solución en la cual se colocan pueden variar, lo cual se puede observar en la tabla 2, los valores de los hinchamientos presentan una desviación estándar aproximada del 10%, entre las muestras estudiadas, por lo que el análisis de remoción de iones  $\text{Co}^{+2}$  se realizó como una función de los iones  $\text{OH}^-$  presentes en el hidrogel en lugar del análisis por cada gramo de xerogel, tomando en cuenta el hinchamiento para cada muestra se encontró que la relación molar de  $\text{OH}^-/\text{Co}^{+2}$  es la que permite remover la mayor cantidad de iones disueltos. Cuando la relación molar de  $\text{OH}^-/\text{Co}^{+2}$  incrementa como en las muestras de 50/1 y 65/1 la cantidad de iones removidos es menor. Con esto se puede afirmar que el uso de hidrogeles para la remoción de iones cobalto es efectivo, ya que cuando sólo se lleva a cabo la co-precipitación química debe emplearse una relación molar de  $\text{OH}^-/\text{Co}^{+2}$  igual a 2,1.

En la aplicación del método 2 se observó que un incremento en la concentración de las soluciones de NaOH [NaOH], en las cuales los xerogeles fueron hidratados provocó una disminución en la capacidad de absorción de iones  $\text{Co}^{+2}$  de los hidrogeles, esto se debe a que se disminuye el área superficial del hidrogel, que es el otro factor determinante para la remo-

**Tabla 2.** Recuperación de iones cobalto como una función de la proporción de sosa/xerogel, donde se sumerge el xerogel en soluciones 0,1 M de NaOH y en soluciones de 1000 ppm de cobalto.

$g_{\text{NaOH } 0,1 \text{ M}}/g_{\text{xerogel}}$ (masa)	$g_{\text{sln Co}^{+2}}/g_{\text{xerogel}}$ (masa)	$W_{\text{NaOH}}$ ( $g_{\text{sln NaOH}}/g_{\text{xerogel}}$ )	$W_{\text{Co}}$ ( $g_{\text{sln Co}}/g_{\text{xerogel}}$ )	$\% \text{Co}_{\text{rec}}$	$g_{\text{Co}}/g_{\text{xerogel}}$	$\text{mol}_{\text{OH}^-}/\text{mol}_{\text{Co}}$
50	200	48,2	7,5	40,2	0,069	4,19
65	200	56,1	23,0	88,7	0,075	2,25
100	200	61,4	34,3	95,0	0,099	1,91
125	200	59,6	52,1	97,7	0,113	1,91
150	200	61,7	44,3	94,0	0,155	1,92

ción de iones cobalto, lo cual se puede observar en la tabla 3. Debido a la concentración de las soluciones de NaOH empleadas, la cantidad de moles de iones  $\text{OH}^-$  por mol de ion  $\text{Co}^{+2}$  inicial en la solución se incrementa ( $\text{mol}_{\text{NaOH}}/\text{mol}_{\text{Co}} \text{ inicial}$ ), provocando una disminución en la cantidad de iones removidos, en soluciones acuosa con concentración 0,1 y 0,5 M de NaOH sólo logro removerse ~60% (%rem) de la concentración inicial de iones  $\text{Co}^{+2}$ . En la tabla 3 se muestran también la masa de NaOH absorbida por gramo de xerogel ( $m_{\text{NaOH}}/m_{\text{xerogel}}$ ).

Los resultados del método 3 se muestran a continuación. Los hidrogeles hinchados en las soluciones de NaOH fueron sumergidos en soluciones de 1000 ppm de  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , incrementando la relación gramos de solución de Co/gramo de xerogel ( $g_{\text{sln Co}}/g_{\text{xerogel}}$ ); se encontró que la cantidad de cobalto removido por los hidrogeles alcanzó un valor de  $g_{\text{sln Co}}/g_{\text{xerogel}} = 0,27$  cuando la relación  $g_{\text{sln Co}}/g_{\text{xerogel}}$  fue de 300/1, lo que representa el 90% de iones  $\text{Co}^{+2}$  removidos (% $\text{Co}_{\text{rec}}$ ). Estos resultados se muestran en la tabla 4.

La relación  $g_{\text{Co}}/g_{\text{xerogel}}$  incrementa a 0,35 para una relación másica de 750  $g_{\text{sln Co}}/g_{\text{xerogel}}$ , con una relación  $\text{mol}_{\text{OH}^-}/\text{mol}_{\text{Co}}$  de 1,76, este valor es menor a la relación  $\text{mol}_{\text{OH}^-}/\text{mol}_{\text{Co}} = 2,1$  obtenida en las muestras de co-precipitación química. Sin embargo, los hidrogeles colocados en estas muestras presentan cambios bruscos en su capacidad de absorber la solución de  $\text{Co}^{+2}$ , debido a la presencia de iones cobalto en exceso con respecto de los iones  $\text{OH}^-$ , por lo que cuando la reacción de precipitación ha terminado y los iones  $\text{OH}^-$  están agotados, los iones  $\text{Co}^{+2}$  presentes en la solución provocan la formación de pliegues en el hidrogel cuando estos colapsan, en estos pliegues se depositan iones cobalto sin reaccionar ( $g_{\text{sal}}/g_{\text{xerogel}}$ ) provocando un aumento en la remoción de los iones cobalto mayor a la remoción obtenida en la co-precipitación química.

Debido a que los experimentos fueron realizados sin agitación, se modificó el volumen de agua utilizado en la remoción de los iones metálicos, manteniendo la relación de g cobalto/g xerogel en el valor de 0,1, se encontró que el volumen de agua utilizado no es factor que modifique la capacidad del hidrogel

**Tabla 3.** Recuperación de iones cobalto como una función de la concentración de NaOH de la solución donde se sumerge el xerogel y colocados posteriormente en soluciones de 1000 ppm. de cobalto. Con una proporción de solución de metal/xerogel de 150/1.

[NaOH] (mol/L)	$W_{\text{NaOH}}$ ( $g_{\text{sln}}/g_{\text{xerogel}}$ )	$W_{\text{Co}}$ ( $g_{\text{slnCo}}/g_{\text{xerogel}}$ )	$\text{mol}_{\text{NaOH}}/\text{mol}_{\text{Co}} \text{ inicial}$	$\% \text{Co}_{\text{rec}}$	$m_{\text{NaOH}}/m_{\text{xerogel}}$ ( $g_{\text{sln}}/g_{\text{xerogel}}$ )	$g_{\text{sln NaOH}}/g_{\text{xerogel}}$ ( $g_{\text{sln}}/g_{\text{xerogel}}$ )
0,10	72,73	103,93	284	86,86	150	151
0,20	61,76	115,47	4,91	94,60	150	150
0,30	53,80	112,50	6,39	89,06	150	193
0,40	44,75	91,29	7,28	58,09	150	151
0,50	60,95	112,40	11,98	65,16	150	151

**Tabla 4.** Extracción de iones cobalto como una función de la proporción de solución de cobalto/xerogel, desde soluciones de 1000 ppm de Cobalto, los xerogel fueron colocados en una proporción de sosa/xerogel de 150/1.

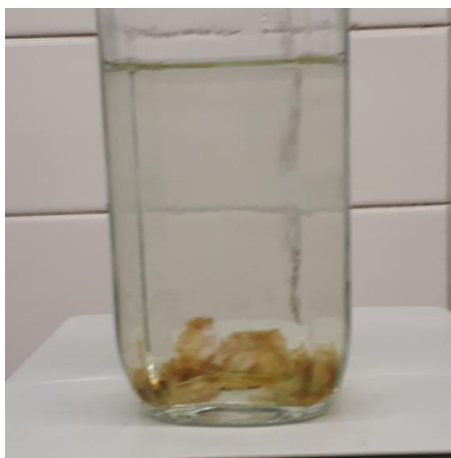
$g_{\text{sln Co}}/g_{\text{xerogel}}$	$W_{\text{NaOH}}$ ( $g_{\text{sln}}/g_{\text{xerogel}}$ )	$W_{\text{Co}}$ ( $g_{\text{slnCo}}/g_{\text{xerogel}}$ )	$\% \text{Co}_{\text{rec}}$	$g_{\text{Co}}/g_{\text{xerogel}}$	$g_{\text{sal}}/g_{\text{xerogel}}$	$\text{mol}_{\text{OH}^-}/\text{mol}_{\text{Co}}$
100	98,83	141,09	76,30	0,08	0,41	7,18
200	91,96	129,51	81,22	0,16	0,81	3,34
300	92,68	44,47	90,37	0,27	1,21	1,99
496	85,42	5,24	60,52	0,30	2,01	1,65
750	105,67	5,18	46,89	0,35	3,04	1,76
1000	80,25	3,16	27,08	0,27	4,05	1,72



en la remoción del metal. La cantidad de iones cobalto removido fue de 85% (Tabla 5), esto demuestra que el hidrogel puede remover iones cobalto hasta en una proporción de 4333/1 g de solución/g de xerogel lo cual lo puede realizar sin el proceso de agitación. Para determinar el límite de detección y eliminación de los iones cobalto se colocó una muestra de xerogel en una solución de 22 ppm de cobalto con una proporción de gramos de solución de  $\text{Co}^{+2}$ /g de xerogel igual a 15000/1: En la figura 2 se puede observar el sólido formado en la superficie del hidrogel a esta proporción, con lo cual podemos establecer un proceso en el que los hidrogeles presentes pueden ayudar a remover iones  $\text{Co}^{+2}$  al nivel de trazas químicas.

**Tabla 5.** Remoción de iones cobalto como una función de la proporción de solución/xerogel, pero manteniendo la proporción de sal/xerogel en cada solución del metal estudiada, esta proporción fue de 0,40g de sal por cada gramo de xerogel.

$g_{\text{sln}}/g_{\text{xer}}$	$[\text{Co}]_{\text{inicial}}$	$W_{\text{NaOH}}$	$W_{\text{Co}}$	$g_{\text{Co}}/g_{\text{xerogel}}$	$[\text{Co}]_{\text{final}}$	
		$(g_{\text{sln}}/g_{\text{xerogel}})$	$(g_{\text{sln}}/g_{\text{xerogel}})$	$\% \text{Co}_{\text{rec}}$		
100	976	58,43	64,88	91,08	0,089	96,47
200	482	68,75	131,63	82,89	0,080	121,48
300	341	67,60	137,09	75,46	0,077	108,97
400	253	69,56	182,09	76,22	0,077	83,97
500	195	52,37	147,45	71,74	0,070	58,96
1000	107	57,05	213,24	70,00	0,072	21,4461
4000	24	67,13	350,70	67,94	0,066	8,9421
4336	22	70,10	327,62	99,00	0,097	<8,9421



**Fig. 2:** Cobalto depositado en la superficie del hidrogel después del proceso de remoción.

En el método 4 estudiamos la cantidad de veces que se puede utilizar el hidrogel para el proceso de remoción de cobalto (Ciclos), después de cada experimento de remoción de iones cobalto realizado, el hidrogel fue removido de la solución del metal y se sumergió en una solución fresca de NaOH 0,1 M, en la cantidad suficiente para que la proporción de gramos de solución 0,1 M de NaOH/ gramos de xerogel fue de 125/1 en masa. La muestra de hidrogel fue utilizada en 8 ocasiones y la capacidad de remoción de cobalto disminuyó en 24% con

**Tabla 6.** Extracciones de iones cobalto en función del número de ocasiones en que se utilizó el hidrogel a 30 °C, con una proporción de NaOH/xerogel de 125/1, relación de solución de cobalto/xerogel de 250/1 con una concentración de 1000 ppm.

Ciclo	$\% \text{Co}_{\text{rec}}$	$g_{\text{Co}}/g_{\text{xerogel}}$	$W_{\text{NaOH}}$	$W_{\text{Co}}$	$[\text{Co}]_{\text{final}}$	$\text{mol}_{\text{OH}^-}/\text{mol}_{\text{Co}}$
			$(g_{\text{sln}}/g_{\text{xerogel}})$	$(g_{\text{sln}}/g_{\text{xerogel}})$	(ppm)	
1	89,9	0,21	64,8	20,6	86	1,78
2	79,9	0,19	55,8	5,2	168	1,69
3	36,4	0,17	51,4	9,1	352	3,29
4	68,0	0,16	41,0	13,4	291	1,47
5	70,2	0,16	37,3	14,3	264	1,33
6	67,4	0,16	35,1	15,1	305	1,25
7	77,8	0,18	40,1	18,2	195	1,27
8	77,8	0,18	43,0	18,9	236	1,37

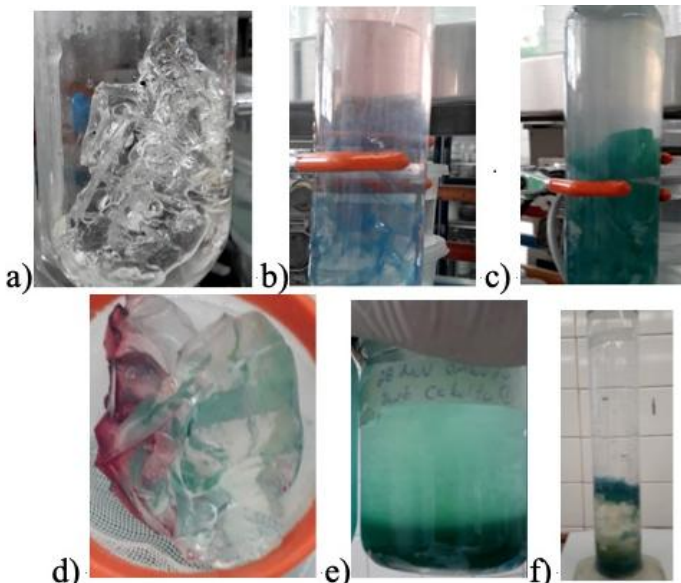
respecto al primer ciclo. Cuando se analizó la cantidad de moles de iones  $\text{OH}^-$  necesarios para remover iones  $\text{Co}^{+2}$ , se encontró una disminución con respecto al parámetro establecido como punto de comparación con la co-precipitación química ( $\text{mol}_{\text{OH}^-}/\text{mol}_{\text{Co}^{+2}} = 0,21$ , tabla 6). En todos los casos la cantidad de  $\text{Co}^{+2}$  fue  $\sim 0,19 g_{\text{Co}}/g_{\text{xerogel}}$ . Finalmente, se modificó el pH de la solución de iones cobalto mediante la adición de HCl o NaOH para determinar el efecto sobre la remoción de iones cobalto; se encontró que no existe un cambio significativo en el intervalo de pH = 3 hasta pH = 12, donde se remueven en promedio  $0,19 g_{\text{Co}}/g_{\text{xerogel}}$  cuando se emplearon soluciones de  $\text{CoCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  de 1500 ppm. Solo a pH = 1 no existe formación de hidróxido de cobalto sólido y se removió el 3% de los iones metálicos presentes por la absorción del metal en el hidrogel, esto debido a que los iones  $\text{OH}^-$  contenidos en el hidrogel primero son neutralizados con los iones  $\text{H}^+$  de la solución y los iones restantes reaccionan con los  $\text{Co}^{+2}$  residuales formando el hidróxido correspondiente, el cual no es suficiente para que se forme una cantidad de sólido que se pueda observar, debido a que este sólido disperso no absorbe en la región UV donde si lo hacen los iones. Para la solución con un valor de pH = 2, se formó una pequeña cantidad de sólido, similar a la solución con pH = 1; cabe mencionar que la cantidad de cobalto removido por la absorción del hidrogel tiene valores semejantes a los encontrados en estudios previos de hidrogeles empleados en la remoción de iones metálicos<sup>10</sup>. En la tabla 7 se presentan los datos encontrados en este experimento.

En la figura 3 se resume el proceso de extracción de los iones cobalto: el xerogel es hidratado en la solución 0,1 M de NaOH durante 48 h (a); posteriormente, el hidrogel hinchado se sumergió en la solución acuosa de iones cobalto en la figura y se puede observar cómo se inicia el proceso de precipitación de los iones cobalto al formarse el hidróxido de cobalto (b); la remoción de los iones cobalto continua y con ello la purificación del agua (c); el hidrogel es retirado de la solución acuosa de iones  $\text{Co}^{+2}$  con el hidróxido formado en su superficie y entre los pliegues del hidrogel iones metálicos, fueron lavados con agua bidestilado y posteriormente colocados de nuevo en

una solución fresca 0,1 M de NaOH (d); la solución residual de cobalto se decanta para llevar a cabo la recuperación del hidróxido de cobalto formado (e); finalmente, se puede observar la clarificación de la solución y el precipitado verde/azulado del sólido obtenido (f).

**Tabla 7.** Extracción de iones cobalto como una función del pH de la solución de iones cobalto, con una concentración de 1500 ppm. de cobalto, una proporción de 125 gramos de solución de NaOH por cada gramo de xerogel y una relación de 200 gramos de solución por cada gramo de xerogel

pH	$W_{NaOH}$	$W_{Co}$	$[Co]_{final}$	$g_{Co}/g_{xerogel}$	
	( $g_{sln}/g_{xerogel}$ )	( $g_{sln}/g_{xerogel}$ )	(ppm)	% $Co_{rec}$	
1	61	9	1134	5,70	0,02
2	53	11	1197	4,39	0,01
3	58	8	622	48,99	0,15
4	54	14	522	56,52	0,16
5	54	11	472	61,57	0,18
6	61	16	384	63,62	0,19
8	60	9	447	63,87	0,20
9	58	14	397	59,79	0,18
10	57	18	434	66,59	0,21
11	64	21	484	64,34	0,21
12	53	35	409	71,44	0,22



**Fig. 3:** Resumen el proceso de extracción de los iones cobalto mediante el uso de hidrogeles de acrilamida/ácido itacónico.

## Conclusiones

En el presente trabajo se llevó a cabo la comparación entre la técnica de co-precipitación química y el uso de hidrogeles en la capacidad para remover iones  $Co^{+2}$  disueltos en soluciones acuosas. Los hidrogeles empleados compuestos de poli (acrilamida-co-ácido itacónico) 80/20 mostraron una mayor capacidad en la remoción de estos iones metálicos al actuar como medio de transporte y suministro de iones  $OH^-$ , los cuales reaccionan con el  $Co^{+2}$  disuelto formando el  $Co(OH)_2$  sobre la

superficie del hidrogel. La concentración de iones metálicos iniciales en solución no mostró un efecto significativo en la capacidad de remoción del hidrogel, pero sí lo hizo la concentración de iones  $OH^-$ , pues a mayor concentración de ésta menor capacidad de remoción de  $Co^{+2}$ . Además, el pH de la solución de iones metálicos no mostró efectos significativos en la capacidad de remoción del hidrogel entre valores de pH entre 3 y 12. Finalmente, se logró la remoción de los iones metálicos en soluciones con una concentración inicial de 22 ppm, con una proporción de 4333/1 respecto del xerogel, con lo que se presenta un nuevo método para remover y recuperar iones cobalto en soluciones diluidas; los experimentos fueron llevados a cabo sin necesidad de agitación mecánica y modificando las dimensiones geométricas de los recipientes donde se realizaron los experimentos, lo cual no mostró efectos significativos en la capacidad de remoción de iones  $Co^{+2}$  del hidrogel.

## Referencias

1. J Lu, DY Dreisinger, T Glüc. Cobalt electrowinning – A systematic investigation for high quality electrolytic cobalt production. **Hydrometallurgy**, **178(6)**, 19-29 (2018).
2. F Mazur, L Liu, H Li, J Huang, R Chandrawati. Core-satellite gold nanoparticle biosensors for monitoring cobalt ions in biological samples. **Sensors and Actuators B: Chemical**, **268(9)**, 182-187 (2018).
3. Y Tian, L Xu, J Bao, J Qian, H Su, H Li *et al.* Hollow cobalt oxide nanoparticles embedded in nitrogen-doped carbon nanosheets as an efficient bifunctional catalyst for Zn-air battery. **J. Energy Chemistry**, **33(6)**, 59-66(2018).
4. J Yun, D Park, SY Jung, J Wang. Fabrication of nanosized cobalt powder from Cobalt(II) hydroxide of spent lithium ion battery. **Applied Surface Science**, **415(9)**, 80-84(2017).
5. M Amara, H Kerdjoudj, A Bouguelia, M Trari. A combination between membrane selectivity and photoelectrochemistry to the separation of copper, zinc and nickel in aqueous solutions. **J. Membrane Science**, **312**, 125-131 (2008).
6. ZVP Murthy, LB Chaudhari. Application of nanofiltration for the rejection of nickel ions from aqueous solutions and estimation of membrane transport parameters. **J. Hazardous Materials**, **160**, 70-77 (2008).
7. X Chen, G Huang, J Wang. Electrochemical reduction/oxidation in the treatment of heavy metal wastewater. **J. Metallurgical Engineering**, **2**, 161-164 (2013).
8. F Akbal, S Camc. Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation. **Desalination**, **269**, 214-222 (2011).
9. B Pospiech, W Walkowiak. Separation of copper (II), cobalt (II) and nickel (II) from choride solutions by polymer inclusion membranes. **Sep. Purif. Technol.**, **57**, 461-465 (2007).
10. K Dermentzis. Removal of nickel from electroplating rinse waters using electrostatic shielding electro dialysis/electrodeionization. **J. Hazardous Materials**, **173**, 647-652 (2009).

11. G Ortega, P Medina, M Falcon, J Ariza, A Remedios. Comportamiento de la extracción y selectividad de níquel y cobalto de colas amoniacales con ácido piroleñoso de bagazo de caña. **Tecnología Química**, **30(2)**, 58-66(2010).
12. Y Ramírez, E Fernández, A Palacios. Recuperación de cobalto por extracción con ácidos orgánicos a partir del licor de desecho de la empresa Ernesto Ché Guevara. **Revista Cubana de Química**, **17(1)**, 32-29(2005).
13. M Penedo, E Manals, F Vendrell, D Salas. Aplicación de carbón activado de cascarón de coco en adsorción de especies metálicas contenidas en el licor de desecho (WL) de la lixiviación ácida de mineral laterítico. **Tecnología Química**, **36(1)**, 117-129(2015).
14. A Ramirez, H Atudillo, L Prin, B Rojas de Gáscue. Evaluación de hidrogeles de acrilamida-co-ácido itacónico en la disminución de iones de Fe con potenciales usos en plantas para tratamientos de aguas potabilizadoras. **Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales**, **5**, 32-25(2012).
15. N Tapia, M Oliveira, A Yarango, N Rojas. Estudio de la biosorción del Cu(II) por gránulos del biopolímero de alginato de calcio. **Revista Peruana de Química e Ingeniería Química**, **6(1)** 37-42 (2003).
16. C Alvarez, J Cortes. Use of pH-thermosensitive hydrogels for nickel ion removal and recovery. **Polímeros**, **27(1)**, 35-40 (2017).
17. S.E. Mansour, I.H. Hasieb, H.A. Khalaf. Removal of cobalt from drinking water by alternating current electrocoagulation technique. **J. Applied Sciences (Faisalabad)**, **12(8)**, 787-792 (2012).
18. G Ketsela, Z Animen, A Talema. Adsorption of Lead (II), Cobalt (II) and Iron (II) From Aqueous Solution by Activated Carbon Prepared From White Lupine (GIBITO) HSUK. **J. Thermodynamics and Catalysis**, **11**, 203- (2020).
19. J Correa, M Valadez, G Carbajal, J Cortes. Síntesis de hidróxidos de níquel utilizando hidrogeles de acrilamida-ácido crotonico. XXXI Congreso Nacional de la Sociedad Polimérica de México A.C, Puebla, México, pags. 78-80 (2018).  
Disponible: [http://www.sociedadpolimerica.org.mx/sites/default/files/Extensos\\_XXXI\\_SPM\\_2018\\_compressed.pdf](http://www.sociedadpolimerica.org.mx/sites/default/files/Extensos_XXXI_SPM_2018_compressed.pdf)
- 20 SO Camelino, M Minchiotti, R Bariles, RL Padilla, J Colazo. Optimización de un procedimiento para la determinación de oro mediante espectrofotometría UV/Vis. **Revista Matéria**, **23(2)**, artículo e-12005 (2018).  
Disponible: <https://www.scielo.br/pdf/rmat/v23n2/1517-7076-rmat-23-02-e12005.pdf>