

# RECUPERACIÓN DE FENOL DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES POR TRATAMIENTO CON NaCl

IVETH SERNA

*Ingeniera Química, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín.*

JESÚS TORRES

*Ingeniero Químico, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín..*

BIBIAN HOYOS

*bahoyos@perseus.unalmed.edu.co*

*Profesor, Escuela de Procesos y Energía, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín.*

Recibido para revisar 20 de Marzo de 2003, aceptado 2 de Junio de 2003, versión final 18 de Junio de 2003.

**RESUMEN:** En el presente trabajo se explora una técnica para la recuperación de fenol de aguas residuales que hasta el momento se ha realizado en forma empírica en algunas industrias locales. Se realizó un diseño experimental donde se tomó la concentración de NaCl como variable de entrada del proceso y el porcentaje de recuperación de fenol como variable de salida. El análisis estadístico de los datos muestra que la concentración de NaCl es una variable de suma importancia en el proceso. Se determinó que el mejor punto de operación está a 25° C, con un *pH* inicial entre 2 y 3, una concentración inicial de fenol de 6% y concentración inicial de NaCl de 21,5%, logrando una recuperación del fenol del 79 % con una concentración de fenol en la fase orgánica del 83 %. Además de la parte experimental, en el trabajo se exponen algunas teorías desarrolladas acerca de la separación de una solución de no electrolito y agua por adición de sal.

**PALABRAS CLAVES:** Recuperación de fenol, Tratamiento salino.

**ABSTRACT:** A technique for phenol recovery from residual waste water which has been made in an empiric way in some local industries is explored in this work. It was carried out an experimental design that takes into account the concentration of NaCl as the entrance variable and the phenol recovery percentage as the exit variable. The statistical analysis of data determined that the best operation point is 25 °C, with a initial *pH* between 2 and 3, an initial concentration of 6% and 21,5% for phenol and NaCl respectively, achieving a phenol recovery of 79 % with a phenol concentration in the organic phase of 83%. Besides the experimental part some theories are exposed dealing with the separation of a on electrolyte and water by salt addition.

**KEYWORDS:** Phenol Recovery, Salting Out.

## 1. INTRODUCCIÓN

Hasta el momento en la Universidad Nacional, Sede Medellín, se han investigado algunas alternativas para el tratamiento de aguas fenólicas, entre las que se encuentran métodos de recuperación y métodos destructivos. Dentro de

los destructivos se ha explorado con métodos electroquímicos (Monterroza y Vanega, 2000), éstos son apropiados para concentraciones iniciales de fenol que pueden llegar hasta 4000 ppm; también se ha hecho investigación en métodos biológicos (Gómez y González, 1998; Ortiz y Parra, 2000) cuya concentración inicial de fenol permisible varía de acuerdo con el microorganismo, aunque este valor puede estar

entre 1 ppm y 40000 ppm. Otro método destructivo estudiado es la oxidación química (Gómez y González, 1998; Guarín y Román, 1997) el cual, dependiendo del agente oxidante, se puede utilizar para un amplio intervalo de concentraciones iniciales de fenol. Los métodos anteriormente nombrados presentan la gran desventaja de degradar irreversiblemente el fenol siendo imposible pensar en su reutilización.

Entre los métodos no destructivos estudiados se encuentran la extracción líquido-líquido (Pineda y Lozada, 1993), adsorción por carbón activado (Ramírez y Villa, 1993) y adsorción con resinas de intercambio iónico y membranas. Los métodos de adsorción manejan concentraciones iniciales de fenol menores del 4% en peso, dependiendo del adsorbente utilizado, sin embargo, la regeneración del adsorbente requiere procedimientos costosos y en algunos casos se degrada el fenol adsorbido. De otro lado la extracción líquido-líquido resulta eficiente cuando se tienen concentraciones iniciales de fenol mayores del 2 % en peso, no obstante, los solventes y equipos utilizados pueden resultar poco viables desde el punto de vista económico.

Este trabajo tiene el propósito de resolver una inquietud hecha por la empresa INTERQUIM S.A. acerca de la posibilidad de recuperar el fenol presente en las aguas de extracción del proceso de fabricación de resinas (con una concentración de 60000 ppm de fenol), mediante la adición de NaCl. El objetivo es obtener fenol que se pueda reprocesar en la fabricación de resinas y conseguir aguas con una menor concentración de fenol y así ser llevadas a tratamiento biológico. Cabe anotar que en el medio no se ha encontrado material escrito sobre la implementación de este método a escala industrial.

El tratamiento propuesto se basa en la insolubilidad que presenta el fenol en soluciones salinas; este proceso se lleva a cabo por adición de NaCl en la mezcla agua-fenol para lograr la separación de fases y la subsiguiente remoción de la fase orgánica.

El objetivo de este estudio consiste en evaluar el efecto de la cantidad de NaCl adicionada en el grado de recuperación de fenol de una mezcla agua-fenol.

## 2. TEORÍAS SOBRE EL EFECTO DE LA SAL

A pesar de la evidencia empírica en la industria, no se han encontrado métodos específicos que a través de la insolubilidad pretendan separar el fenol de aguas residuales. Sin embargo, se han encontrado algunos artículos que estudian el sistema fenol-agua-NaCl (Belhachemi y Gotouk, 1999; Long y McDevit, 1952) desde el punto de vista físico-químico.

Aunque el fenol puede solubilizar en algunas proporciones sustancias polares, su naturaleza le impide ser un solvente efectivo en presencia de electrolitos, pues no logra separar del todo las moléculas de electrolitos en sus respectivos iones, este fenómeno también es debido a la baja constante dieléctrica que posee el fenol.

El fenómeno de separación es explicado por algunos autores a través de los cambios que experimentan los coeficientes de actividad de no-electrolitos en soluciones acuosas al adicionar sales. Este fenómeno es de interés tanto desde el punto de vista teórico como del práctico, ya que permite explicar la separación de no-electrolitos de soluciones acuosas. Algunos de los autores de las teorías que explican este fenómeno utilizan las frases "Salting out" y "Salting in" para describir respectivamente un incremento y un decrecimiento en el coeficiente de actividad del no-electrolito con el incremento de la concentración de electrolito (Long y McDevit, 1952).

Para este estudio, el mayor interés está en el "Salting out", que es el que se presenta con el NaCl y el fenol, aumentando el coeficiente de actividad del fenol con una consecuente disminución de la solubilidad del mismo en la solución acuosa.

El coeficiente de actividad de un no-electrolito en solución acuosa está definido por:

$$\mu_i = RT \ln \gamma_i x_i + \mu_i^* \quad (1)$$

en la cual:

$$\mu_i^* = \lim(\mu_i - RT \ln x_i) \quad (2)$$

$$x \rightarrow 0$$

Si el no-electrolito se transfiriera de una solución en agua pura a una en la cual se ha adicionado sal, el cambio en la energía libre no-ideal por mol ( $\Delta G$ ) será:

$$\Delta G = RT \ln \frac{\gamma_i}{\gamma_i^o} \quad (3)$$

Ambos coeficientes de actividad ( $\gamma_i$  y  $\gamma_i^o$ ) se acercan uno al otro en soluciones diluidas, sin embargo, las derivadas de sus logaritmos con respecto a la concentración molar de sal son diferentes incluso para diluciones infinitas. Para efectos prácticos en el manejo de datos resulta más conveniente trabajar con el coeficiente molar de actividad  $f_i$  que con el coeficiente  $\gamma_i$ .

En general,  $f_i$  (o  $\gamma_i$ ) es una función de la concentración de los solutos, NaCl y fenol para este caso. A una temperatura dada,  $\log f_F$  puede ser representado por una serie de potencias en la concentración molar de NaCl,  $C_S$ , y en la concentración molar de fenol,  $C_F$ :

$$\log f_F = \sum_{n,m} k_n C_S^n C_F^m \quad (4)$$

Si se asume que para bajas concentraciones de NaCl y bajas concentraciones de fenol los únicos términos significativos son los lineales, entonces:

$$\log f_F = k_S C_S + k_F C_F \quad (5)$$

Esta expresión ha sido validada experimentalmente para soluciones moderadamente diluidas en las cuales no hay interacción química entre los solutos (Long y McDevit, 1952).

Muchas de las teorías del efecto de la sal se refieren al cálculo de  $k_S$  (parámetro de interacción para NaCl-fenol) y no de  $k_F$  el cual resulta de la interacción del fenol consigo mismo.

Se han formulado varias teorías cualitativas y cuantitativas sobre el efecto de la sal, todas subrayan los mismos aspectos pero presentan diferentes acercamientos al problema. A continuación se presentan las ideas fundamentales de las principales teorías postuladas.

## 2.1 Teorías de hidratación

Esta teoría propone que el "Salting out" se da por la remoción de moléculas de agua de su papel de solvente debido a que pasan a hidratar iones. Esta teoría sostiene que existe una atracción preferencial entre iones y moléculas de agua. Sin embargo, esta teoría lleva a la conclusión de que el efecto de la sal es independiente del no-electrolito, lo cual es falso y además, no permite explicar el "Salting in". En Kruyt y Robinson, (1926) citado por Long y McDevit, (1952) propusieron que el efecto de la sal sobre diferentes no electrolitos aumentaba por el hecho de que los dipolos del agua son orientados en una coraza de hidratación alrededor del ión. Estos autores anotan que si existe una orientación preferencial de las moléculas de agua hacia un no-electrolito polar, los iones de un signo podrían promover la tendencia hacia su solubilidad, mientras que los de signo opuesto, los cuales orientan las moléculas de agua desfavorablemente, podrían llevar a una menor solubilidad del no-electrolito como sucede en el "Salting out".

## 2.2 Teoría electrostática

Esta teoría fue propuesta por Debye y McAulay, (1925) citado por Long y McDevit, (1952) y justifica el efecto de la sal por la influencia del no-electrolito sobre la constante dieléctrica del solvente. La cantidad de trabajo necesaria para descargar los iones en agua pura como solvente de constante dieléctrica  $D_o$  y para recargarlos en una solución de constante dieléctrica  $D$  que contiene el no-electrolito es calculada en esta teoría. El trabajo calculado lleva al cálculo del coeficiente de actividad, esta teoría predice resultados en órdenes de magnitud correctos, pero no descarta el efecto de otros tipos de fuerzas que pueden ser importantes.

## 2.3 Fuerzas de van der Waals

Esta teoría afirma que otras fuerzas de corto alcance, principalmente fuerzas de dispersión

juegan un papel importante y que pueden ser en parte responsables del efecto producido por la sal.

Esta teoría toma también en cuenta el tamaño de los iones y sus cargas y formula una ecuación para calcular los coeficientes de actividad en función de las fuerzas de interacción entre cargas y moléculas y las interacciones de Van der Waals.

En resumen, la teoría dice que el desplazamiento de las moléculas de agua de su papel de solvente, se debe a una fuerza que los iones ejercen sobre estas y que es proporcional al volumen iónico y la disociación de los mismos.

## 2.4 Concepto de presión interna

El concepto de “Presión Interna” fue empleado por algunos investigadores en la primera mitad del siglo XX para explicar el efecto de la sal a través de otras propiedades de las soluciones salinas, como el aumento o disminución del volumen de solvente cuando se adiciona la sal.

En esta teoría se calcula el parámetro de interacción  $k_s$  como una función de la “Presión Efectiva” ejercida por sales en solución, basados en la idea física de que la energía libre no ideal de transferencia no es más que el producto de la presión efectiva ( $P_s$ ), por el volumen molar parcial del no-electrolito.

De esta forma, el grado de “Salting out” o “Salting in” en un soluto no polar es determinado por la medida en la cual el medio solvente es comprimido o expandido cuando los iones están presente

## 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las pruebas se llevaron a cabo a temperatura ambiente y con un  $pH$  inicial entre 2 y 3 (dependiendo este valor de  $pH$  de las aguas de salida del proceso de fabricación de resinas fenólicas)

## 3.1 Diseño experimental

Con el fin de realizar un análisis estadístico representativo se planeó un diseño unifactorial con el porcentaje de NaCl como factor, (variable de entrada) y el porcentaje de recuperación de fenol como variable de salida. Se escogieron cinco niveles distribuidos equidistantemente en el intervalo de 5% a 27% de NaCl.

Se realizaron cinco réplicas por experimento para un total de 25 experimentos. La Tabla 1 muestra los niveles para el factor.

Tabla 1. Niveles para la concentración de NaCl.

Experimento	Concentración de NaCl (% $p/p$ )	
	No de replicas	Nivel
1	5	5
2	5	10,5
3	5	16
4	5	21,5
5	5	27

Para cada uno de los experimentos se tomaron 400 g de agua residual contaminada con fenol, los cuales fueron depositados en un beaker y mezclados con la cantidad de NaCl indicada para cada uno de los experimentos hasta obtener una solución o mezcla homogénea. Esta mezcla fue posteriormente depositada en un embudo de separación donde se dejó reposar por 24 horas para garantizar que se alcanzara el equilibrio y una separación completa de las fases. Después de este tiempo se separaron las fases acuosa y orgánica para su posterior análisis por fotometría (ASTM-D1783, 1994).

Se estableció como variable de salida el porcentaje de recuperación de fenol (% recuperación) definido de la siguiente manera:

$$\% \text{ Recuperación} = \frac{M_F \cdot X_{FF}}{M_M \cdot X_{FM}} \times 100 \quad (6)$$

Los valores de estas masas y los resultados de fracción masa calculados para cada una de las fases y para las muestras en todos los experimentos se exponen en la Tabla 2.

Tabla 2. Fracción masa de fenol presente en la muestra inicial y en las respectivas fases separadas

Sistema	% de NaCl	M <sub>M</sub> (g)	M <sub>NaCl</sub> (g)	X <sub>FM</sub>	X <sub>FA</sub>	X <sub>FF</sub>
1	5	400	20	0,054	0,045	0,678
				0,0533	0,0437	0,625
				0,0605	0,047	0,781
				0,0572	0,0438	0,6017
				0,0572	0,0488	0,7145
2	10,5	400	46	0,0624	0,0319	0,786
				0,0572	0,0294	0,7744
				0,0585	0,0296	0,8097
				0,0572	0,0292	0,7959
				0,0575	0,0304	0,7689
3	16	400	75,5	0,0575	0,0168	0,7956
				0,0502	0,0178	0,7398
				0,0575	0,0162	0,6272
				0,0605	0,019	0,8183
				0,0575	0,018	0,8221
4	21,5	400	109	0,0624	0,0142	0,8522
				0,0585	0,0095	0,7881
				0,0585	0,0096	0,8173
				0,0585	0,0104	0,8117
				0,0605	0,0083	0,8635
5	27	400	148	0,054	0,005	0,726
				0,0533	0,0069	0,8245
				0,0471	0,0068	0,8164
				0,0401	0,005	0,7474
				0,0605	0,007	0,8252

En la mayoría de los tratamientos se observó que la fase acuosa reposaba por debajo de la fase orgánica, a excepción del sistema con 5% de NaCl en el cual ocurría el efecto contrario, depositándose la fase acuosa por encima de la orgánica.

Los resultados de porcentaje de recuperación de fenol para cada uno de los sistemas y cada una de las réplicas se muestra en la Tabla 3.

### 3.2 Pruebas posteriores

Los resultados obtenidos parecían indicar que para porcentajes mayores del 21% de NaCl la eficiencia del tratamiento comenzaba a permanecer constante. Por este motivo se decidió realizar 2 pruebas más, una con 40% de NaCl y otra con 50%. Los resultados para estas pruebas se muestran en la Tabla 4.

Estos resultados mostraron un porcentaje de recuperación ligeramente superior al obtenido con el tratamiento a 27% de NaCl. Se puede observar que el intervalo para la concentración de NaCl escogido en este estudio resulta ser adecuado, ya que porcentajes de sal mayores al 27% no muestran recuperación adicional significativa de fenol.

En la Figura 1 se muestra el ajuste utilizando las medias por tratamiento e incluyendo los datos de las pruebas posteriores y además, se puede observar que el porcentaje de recuperación aumenta con la cantidad de sal hasta un 27%, a partir de esta región se comienza a observar la saturación del sistema

Tabla 3. Porcentaje de recuperación de fenol.

Sistema	% de NaCl	% de recuperación
1	5	13,39
		14,96
		19,61
		21,14
		11,18
2	10,5	44,82
		44,38
		45,24
		44,72
		42,74
3	16	66,68
		59,28
		68,27
		64,16
		64,19
4	21,5	72,24
		80,30
		80,05
		78,37
		83,34
5	27	87,92
		82,96
		80,89
		83,48
		84,87

Tabla 4. Resultados para sistemas a concentraciones superiores del 27% de NaCl.

% NaCl	X <sub>FM</sub>	X <sub>FA</sub>	X <sub>FF</sub>	% recuperación
40	0,0605	0,0063	0,69	83,41
50	0,0605	0,0065	0,72	80

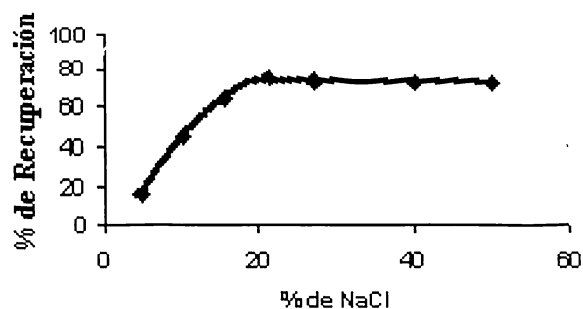


Figura 1. Porcentaje promedio de recuperación de fenol a 25°C.

A pesar de que el punto máximo de recuperación se alcanza en 27% de NaCl, por cuestiones prácticas resulta mejor operar el sistema en 21,5% de NaCl. Esta decisión está justificada por varias razones: la primera de ellas es que el aumento en el porcentaje de recuperación del sistema al 27% respecto al sistema al 21,5% es de solamente un 5,16% mientras que el aumento entre sistemas consecutivos anteriores está entre 14% y 28% por lo cual no se justifica adicionar más sal para obtener poco aumento en el porcentaje de recuperación. Además, en el sistema con 27% de NaCl se alcanza la saturación lo cual hace que el sistema sea más difícil de operar desde el punto de vista industrial y constituye un desperdicio de sal.

### 3.3 Análisis IR

A través de todo el trabajo se determinó la cantidad de fenol presente por el método fotométrico, el cual cuantifica el mínimo porcentaje de compuestos fenólicos existentes en la muestra, aunque este tipo de medida satisface los intereses de INTERQUIM S.A., se realizó un análisis infrarrojo, con el propósito de validar la presencia de fenol en la fase orgánica separada, para esto se tomó una muestra de la fase orgánica obtenida del tratamiento con 21,5% de NaCl.

El análisis IR se basa en la excitación que sufre las moléculas de un compuesto bajo la influencia de la luz infrarroja, esta excitación se refleja en un conjunto de registros que son característicos de ciertos compuestos y grupos funcionales.

La Figura 2 muestra las dos bandas características del fenol en la región de 3400 a 3200  $\text{cm}^{-1}$  y entre 1300 - 1200  $\text{cm}^{-1}$ ; las tensiones debidas al anillo aromático se evidencian claramente en las regiones de 1650 a 1450  $\text{cm}^{-1}$  y en el último trayecto entre 800-600  $\text{cm}^{-1}$ , sin embargo no se ve claramente la absorción entre 2000 y 1667  $\text{cm}^{-1}$ , esto puede ser explicado por el contenido de humedad de la muestra el cual no permite un registro claro en algunas zonas de absorción.

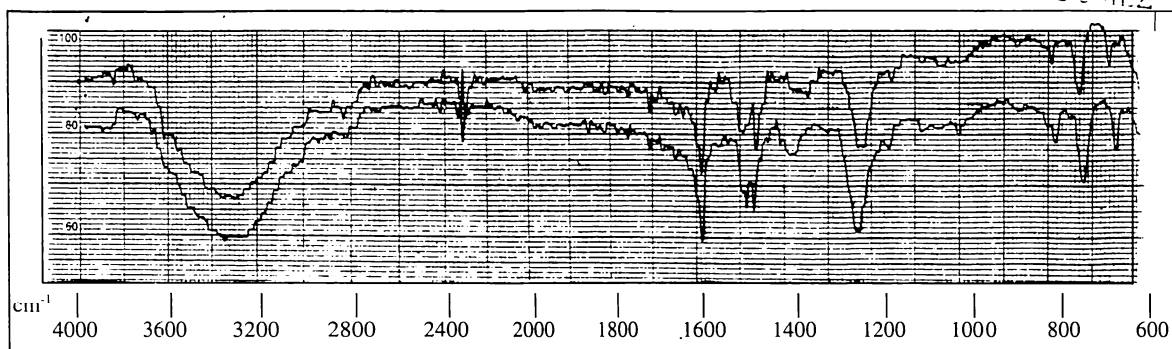


Figura 2. Espectro IR para la fase orgánica separada obtenida por tratamiento con 21,5% de NaCl

#### 4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

A partir de los resultados obtenidos se realizó un análisis estadístico para determinar la verdadera influencia de la variable escogida en el sistema, bajo un análisis de varianza y del residuo.

En experimentos de un factor los diferentes niveles se denominan tratamientos. Cada nivel del factor representa una variable aleatoria, las cuales se asumen normales con igual varianza  $\sigma^2$  y con medias  $\mu_i$ , con  $i = 1, 2, \dots, a$ . Las hipótesis a ser probadas están dadas por:

$$H: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$$

A: Al menos dos medias son diferentes.

La hipótesis  $H$  intenta demostrar que el factor estudiado, en este caso la concentración de NaCl, no tiene influencia sobre la separación, es decir, sobre el porcentaje de recuperación del fenol.

Esta prueba sólo permite saber si existen por lo menos dos medias  $\mu_i$  diferentes, indicando

diferencias en los tratamientos, pero no permite saber cuales son las medias diferentes. Para resolver esto se pueden hacer comparaciones entre las medias  $\mu_i$  de los tratamientos, esto se hace a través de un test de rango múltiple. Existen diferentes tipos de test, para este trabajo se utilizó un test LSD o de diferencia mínima significativa. En las Tablas 5 y 6 se muestran los resultados para el análisis de varianza y el test LSD.

En la Tabla 5, del análisis de varianza, se puede observar que el valor  $P$  para la prueba  $F$  es menor de 0,05, lo cual indica que se acepta la hipótesis A (al menos dos medias son diferentes) con un nivel de confianza del 95%. Además del valor  $P$ , se puede comparar el valor  $F_o$  obtenido con los datos experimentales y el  $F_{\alpha; a-1; N-a}$ , donde:  $\alpha = 0,05$ ;  $a-1 = 4$  y  $N-a = 20$ ; hallado en una tabla estadística para la prueba  $F$ ; se encontró el valor  $F_{\alpha; a-1; N-a} = 5,8$ ; y  $F_o = 359,49$ ; como el valor  $F_o$  es mayor que  $F_{\alpha; a-1; N-a}$ , entonces confirma la aceptación de la hipótesis A. (Montgomery, 1976; Moreno, 1993).

Tabla 5. Resultados para la tabla ANOVA.

Sistema	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	$F_o$	Valor P
Entre tratamientos	15.493,6	4	3873,39	359,49	0,00
Error	215,49	20	10,77		
Total	15.709,10	24			

Tabla 6. Resultados del test LSD al 95% de confianza

Contraste	Diferencia <sup>(*)</sup>	+/- Límites
10,5 - 16	- 20,136	4,33052
10,5 - 21,5	- 34,48	4,33052
10,5 - 27	- 39,644	4,33052
10,5 - 5	28,324	4,33052
16 - 21,5	- 14,344	4,33052
16 - 27	- 19,508	4,33052
16 - 5	48,46	4,33052
21,5 - 27	- 5,164	4,33052
21,5 - 5	62,804	4,33052
27 - 5	67,968	4,33052

En la tabla 6 se comparan todas las parejas de medias  $\mu_i$  indicando que existe una diferencia significativa entre todos los pares con un nivel de confianza del 95%. Ambas tablas fueron calculadas con el programa de computadora Statgraphics Plus 5.0.

La validez de las conclusiones de un análisis de varianza depende del cumplimiento de ciertas suposiciones. Dichas suposiciones indican que los datos deben estar adecuadamente descritos por el modelo:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (7)$$

Además, los errores deben ser independientes y estar distribuidos normalmente con media cero.

Estas suposiciones pueden comprobarse por varios métodos. En este caso, se realizó analizando los residuos mediante una gráfica de residuos contra el valor ajustado. Si el modelo es correcto y las suposiciones se satisfacen, los residuos no deben tener ningún patrón, ni estar relacionados con alguna otra variable, incluyendo la respuesta  $y_{ij}$ . Una comprobación sencilla consiste en graficar los residuos contra los valores ajustados  $\bar{y}_{ij}$  (promedio del tratamiento i-esimo).

La Figura 3 muestra el valor de los residuos contra el valor ajustado. Se puede observar que los residuos tienen media aproximadamente igual a cero, además no se observan patrones obvios de los residuos, por tanto, se concluye que las suposiciones se cumplen y por lo tanto el análisis de varianza es correcto.

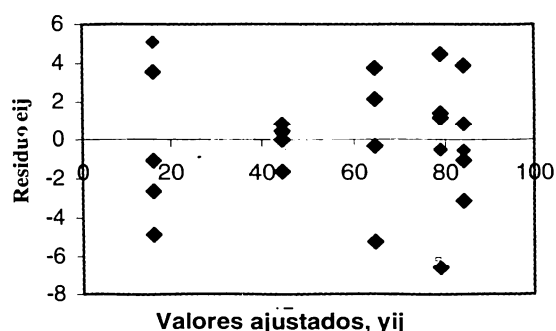


Figura 3. Residuos de los tratamientos contra valores ajustados

## 5. CONCLUSIONES

Se logró la separación del fenol de las aguas residuales por tratamiento con NaCl, donde se obtuvo una separación clara de fases permitiendo una fácil sustracción de las mismas. Se encontró que a medida que aumenta la concentración de sal en el medio la recuperación de fenol aumenta alcanzando el máximo en el tratamiento con 27% de NaCl.

El análisis estadístico de los datos demostró que la cantidad de NaCl en el sistema tiene una fuerte influencia sobre el aumento en el grado de recuperación del fenol.

Se determinó que el mejor punto de operación es a 21,5% de NaCl, ya que a mayores cantidades de sal, el aumento en la



recuperación no es significativo (menos del 6% entre los dos últimos niveles) pues al compararlo con las diferencias entre los porcentajes de recuperación de niveles anteriores consecutivos, se observa que estas diferencias son muy superiores (desde 14 % hasta 28%). Además operacionalmente, a mayores concentraciones de sal, esta se precipita, complicando la separación de las fases, pues en la parte inferior queda el fenol y el NaCl precipitado y la fase acuosa en la parte superior; dificultando la obtención del fenol separado.

A medida que aumenta la concentración de NaCl la fase orgánica recuperada tiende a tener una mayor concentración de fenol, como se puede observar en la Tabla 2, esto apoya la teoría acerca del cambio en el papel de solvente del agua, pues pasa de formar puentes de hidrógeno con el fenol, a solvatar los iones del NaCl ya que en este último la energía asociada a la disposición de las moléculas de agua es menor. Esto apoya la decisión de operar el sistema a 21,5% de NaCl, pues en este punto se obtiene una fase orgánica con alto contenido de fenol (alrededor del 82% de fenol), comparada con el fenol industrial que tiene una concentración del 90%.

Se recomienda el estudio, desde la medición de solubilidad y coeficientes de actividad, de otras sales para el proceso de separación, pues esta investigación puede llevar a mejores condiciones de operación. Dentro de las sales a estudiar se encuentran el cloruro de litio y potasio, lo cual será objeto de estudio posterior.

Finalmente, se realizó una prueba a escala industrial con adición de 21,5% de NaCl. La fase orgánica obtenida en esta prueba fue reutilizada satisfactoriamente en la fabricación de resina fenólica, demostrando así que este método de recuperación tiene un gran potencial de aplicación para industrias con efluentes de aguas residuales fenólicas.

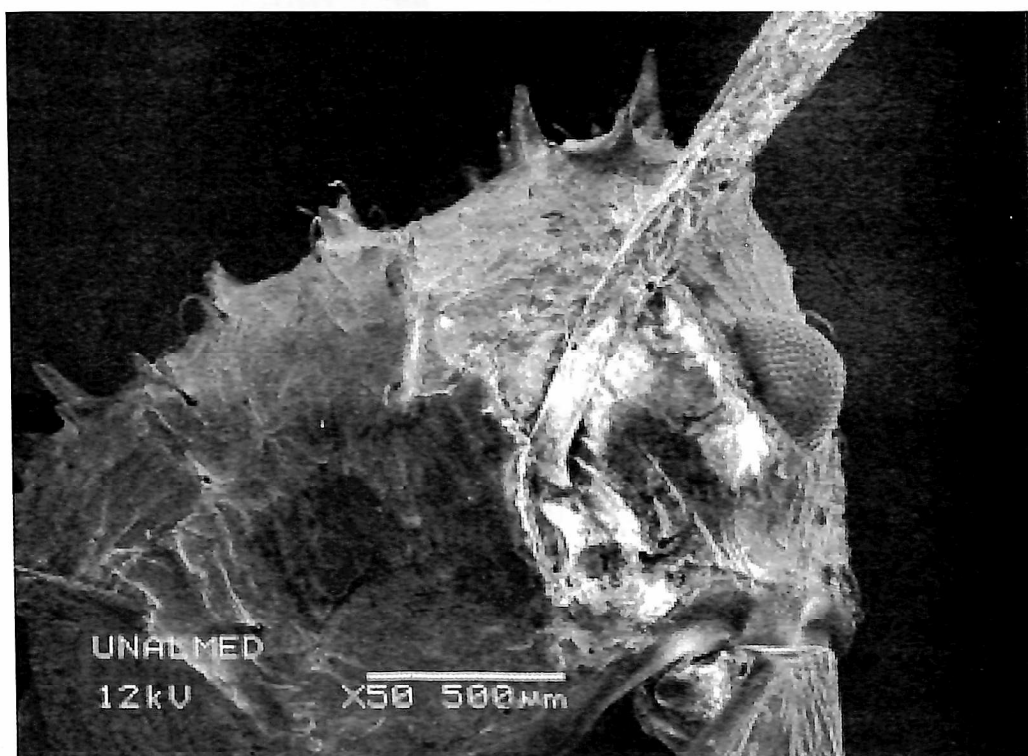
## NOMENCLATURA

$A$ :	Número de niveles del factor
$C_i^o$ :	Concentración molar de $i$ en solución libre de sal
$C_i$ :	Concentración molar de $i$ en solución salina
$f_i^o$ :	Coefficiente de actividad molar de $i$ en solución libre de sal
$IR$ :	Infrarrojo
$k_s$ :	Parámetro de "Salting out"
$k_i$ :	Parámetro de interacción del no-electrolito consigo mismo
$M_A$ :	Masa de la fase acuosa
$M_F$ :	Masa de la fase orgánica
$M_{FA}$ :	Masa de fenol en la fase acuosa
$M_{FF}$ :	Masa de fenol en la fase orgánica
$M_{FM}$ :	Masa de fenol en la muestra
$M_M$ :	Masa de la muestra
$M_{NaCl}$ :	Masa de NaCl.
$N$ :	Número de tratamientos
$ppm$ :	partes por millón.
$pH$ :	Potencial de hidrógeno.
$R$ :	Constante de los gases
$T$ :	Temperatura absoluta
$X_{FA}$ :	Fracción masa de fenol en la fase acuosa
$X_{FF}$ :	Fracción masa de fenol en la fase orgánica
$X_{FM}$ :	Fracción masa de fenol en la muestra
$\gamma_i$ :	Coefficiente de actividad de $i$ en solución salina
$\gamma_i^o$ :	Coefficiente de actividad de $i$ en una solución libre de sal
$x_i$ :	Fracción mol del no electrolito $i$
$\mu_i$ :	Potencial Químico de la especie no electrolítica

## REFERENCIAS

- ASTM-D1783. *Standard test methods for phenolic compounds in water*. Vol 11.02. 1994.

- Belhachemi B. y Gotouk A. Efectos de la sal sobre el equilibrio líquido-líquido para el sistema agua-fenol-sal(KCl, NaCl, LiCl,  $\text{CaCl}_2$  y  $\text{MgCl}_2$ ). *Journal de Chimie Physique et de Physico-Chimie Biologique*. 7, (96), 1999.
- Gómez, M. y González, L. Remoción de fenoles de las aguas de producción en los campos Trinidad y Barquereña. Trabajo dirigido de grado, Universidad Nacional sede Medellín, 1998.
- Guarín, L. y Román, L. Estudio cinético de la degradación del fenol por oxidación química con peróxido de hidrógeno catalizada con luz ultravioleta. Trabajo dirigido de grado, Universidad Nacional sede Medellín, 1997.
- Long F. y McDevit W. Activity coefficients of nonelectrolyte solutions in aqueous salt solutions. *Chemical reviews*, vol 51, pág 119-169, 1952
- Monterroza, A. y Vanegas, Y. Desfenolización de aguas residuales por vía electroquímica. Trabajo dirigido de grado, Universidad Nacional sede Medellín, 2000.
- Montgomery, D. *Análisis de experimentos*. John Wiley and Sons, 1976.
- Moreno W. *Aplicaciones al diseño y análisis de experimentos*. Ediciones UIS. Bucaramanga, 1993.
- Ortiz, G. y Parra, A. Degradación de fenoles mediante fermentación anaerobia en dos etapas. Trabajo dirigido de grado, Universidad Nacional sede Medellín, 2000.
- Pineda, S. y Lozada, D. Recuperación de fenol de agua residual industrial de la empresa INTERQUIM S.A. mediante extracción líquido-líquido. Trabajo dirigido de grado, Universidad Nacional sede Medellín, 1993.
- Ramírez, J. y Villa, D. Eliminación de fenoles de aguas residuales por adsorción en carbón activado. Trabajo dirigido de grado, Universidad Nacional sede Medellín, 1993.



Detalle de Cabeza de una hormiga arriera