

**OBTENCIÓN DE UNA RESINA DE INTERCAMBIO CATIONICO A PARTIR DE  
POLIESTIRENO DE MEDIO IMPACTO POST-CONSUMO**

**CAROLINA QUINTERO OROZCO  
MARTHA PATRICIA RUIZ OJEDA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2006**

**OBTENCIÓN DE UNA RESINA DE INTERCAMBIO CATIONICO A PARTIR DE  
POLIESTIRENO DE MEDIO IMPACTO POST-CONSUMO**

**CAROLINA QUINTERO OROZCO  
MARTHA PATRICIA RUIZ OJEDA**

**Trabajo de grado presentado como  
requisito parcial para optar al título de  
QUÍMICO**

**Director  
JOSÉ CARLOS GUTIÉRREZ  
QUÍMICO., M. SC**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2006**

*A DIOS por iluminar cada instante de mi vida  
A mis padres LUIS y ELVA por su amor y apoyo constante y en especial a mi mamita por ser más que una madre mi mejor amiga  
A mi hermanita MONICA por creer en mi y ser esa voz de aliento que nunca me dejó desfallecer.  
A mi hermanita ADRIANA por ser la persona que más admiro en el mundo, GRACIAS porque siempre supe que estarías ahí para mi y GRACIAS porque no solo eres mi inspiración y modelo a seguir, sino además un ángel en mi vida  
A mi cuñado STEVEN por su cariño sincero y por ser la persona más especial del mundo GRACIAS "REY" a ti mi gratitud eterna  
A mis sobrinitos LAURA Y FABIAN STEVEN por su alegría y cariño  
A HÉCTOR por su paciencia y comprensión  
A mis amigas MARIA TERESA SARMIENTO por sus oraciones, compañía y amistad incondicional y  
A DIANA ANGARITA por su alegría y amistad incondicional, me siento afortunada de contar con su amistad y ustedes hacen realidad la frase de que quien encuentra un amigo, encuentra un tesoro.*

*CAROLINA*

*A DIOS y a mis padres hUMBERTO y MARTHA CECILIA por darme la oportunidad de vivir y amar  
A mis hermanos JULIO CESAR y GRECIA JOHANA por el amor que me han brindado siempre  
A LUIS ENRIQUE señora e hijos, por su apoyo moral y económico  
A los compañeros y amigos que incondicionalmente me han apoyado  
A los profesores que han sido guía durante este recorrido*

*PATRICIA*

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

A DIOS

A la universidad Industrial de Santander

Al profesor José Carlos Gutiérrez, que con su experiencia y conocimiento, hizo posible este proyecto.

A los profesores Guillermo González y Uriel Mora, por su colaboración incondicional.

A los laboratoristas Adolfo, Ramiro, Alejandro de la escuela de química y Guillermo Acero de la escuela de ingeniería química, por su ayuda en todo momento.

A nuestros padres y hermanos por su cariño, apoyo y comprensión.

A todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización de este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1 POLIESTIRENO	17
1.1.1. Generalidades	17
1.1.2. Síntesis	18
1.1.3. Estructura	19
1.1.4. Caracterización	20
1.2 RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO	21
1.2.1. Generalidades	21
1.2.2. Estructura	24
1.2.3. Síntesis	25
1.2.4. Caracterización	25
1.3 FUNCIONALIZACIÓN DE POLÍMEROS	26
1.4 ESQUEMA DE REACCIÓN	30
2. PARTE EXPERIMENTAL	36
2.1 PREPARACIÓN DEL POLICARBOXIESTIRENO	38
2.1.1 Poliacetilestireno	38
2.1.2 Policarboxiestireno	40
2.2 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE IONES METÁLICOS DE LA RESINA POLICARBOXIESTIRENO	42
2.2.1 Tratamiento en Discontinuo o Batch	42
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
3.1 PREPARACIÓN DEL POLICARBOXIESTIRENO	46

3.1.1 Poliacetilestireno	48
3.1.2 Policarboxiestireno	52
3.2 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE IONES METÁLICOS DE LA RESINA PSC (Policarboxiestireno)	55
3.2.1 Tratamiento en Discontinuo o Batch	55
4. CONCLUSIONES	59
5. RECOMENDACIONES	60
BIBLIOGRAFÍA	61
ANEXOS	67

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Estructura del poliestireno	19
<b>Figura 2.</b> Resina de intercambio cationico en contacto con iones en solución	22
<b>Figura 3.</b> Intercambio iónico en columna	23
<b>Figura 4.</b> Metodología en diagrama de flujo	37
<b>Figura 5.</b> Montaje experimental para la acilación del poliestireno	39
<b>Figura 6.</b> Montaje experimental para la oxidación del poliestireno Acetilado	41
<b>Figura 7.</b> Espectro IR del poliestireno obtenido a partir de vasos Reciclados	45
<b>Figura 8.</b> Representación gráfica obtenida por DSC del poliestireno proveniente de vasos reciclados	46
<b>Figura 9.</b> Espectro IR del poliestireno acetilado (poliacetilestireno)	49
<b>Figura 10.</b> Representación gráfica obtenida por DSC del poliestireno acetilado (poliacetilestireno)	50
<b>Figura 11.</b> Espectro IR del poliestireno carboxilado (policarboxiestireno)	52
<b>Figura 12.</b> Representación gráfica obtenida por DSC del poliestireno carboxilado (policarboxiestireno)	54

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Frecuencias en el espectro infrarrojo para el poliestireno	20
<b>Tabla 2.</b> Lista de reactivos empleados	38
<b>Tabla 3.</b> Solubilidad del poliestireno de medio impacto a 25 °C	44
<b>Tabla 4.</b> Rendimiento de reacción (acilación)	48
<b>Tabla 5.</b> Rendimiento de reacción (carboxilación)	48
<b>Tabla 6.</b> Solubilidad del poliestireno acetilado (poliacetilestireno) a 25 °C	51
<b>Tabla 7.</b> Solubilidad del poliestireno carboxilado (policarboxiestireno) a 25 °C	53
<b>Tabla 8.</b> Resultados obtenidos al realizar el análisis de iones por espectrofotometría de absorción atómica, aplicando la técnica de intercambio iónico en discontinuo.	55
<b>Tabla 9.</b> Resultados obtenidos al realizar el análisis de iones una vez regenerada la resina, por espectrofotometría de absorción atómica aplicando la técnica de intercambio iónico en discontinuo.	57

## LISTA DE ESQUEMAS

<b>Esquema 1.</b> Tipos de poliestireno	17
<b>Esquema 2.</b> Reacción para la polimerización del estireno	19
<b>Esquema 3.</b> Esquema de reacción de acilación de Friedel-Crafts. a) formación del intermediario electrofílico y b) reacción SEAr entre el benceno y el cation acilo	31
<b>Esquema 4.</b> Esquema de reacción de oxidación de haloformo	33
<b>Esquema 5.</b> Esquema de reacción propuesto para la <i>p</i> -carboxilación del poliestireno	34
<b>Esquema 6.</b> Orden de retención de la resina de intercambio cationico policarboxiestireno, con relación al tamaño de los iones	56

## LISTA DE ANEXOS

<b>ANEXO A.</b> curvas de calibración obtenidas por absorción atómica para la cuantificación de los iones $\text{Ca}^{+2}$ , $\text{Mg}^{+2}$ , $\text{Cu}^{+2}$ , $\text{Zn}^{+2}$ , $\text{Ni}^{+2}$ , $\text{Cr}^{+6}$	68
<b>ANEXO B.</b> (Resina regenerada) curvas de calibración obtenidas por absorción atómica para la cuantificación de los iones $\text{Ca}^{+2}$ , $\text{Mg}^{+2}$ , $\text{Cu}^{+2}$ , $\text{Zn}^{+2}$ , $\text{Ni}^{+2}$ , $\text{Cr}^{+6}$	71

## ABREVIATURAS

IR	Espectroscopia infrarroja
DSC	Calorimetría diferencial de barrido
T <sub>g</sub>	Temperatura de transición vítrea
TGA	Termogravimetría
SEM	Microscopía de barrido electrónico
AFM	Microscopía de fuerza atómica
SIMS	Espectrometría de masas de ión secundario
XPS	Espectroscopía de rayos x fotoelectrónica
SEAr	Sustitución electrofílica aromática
PS	Poliestireno
ppm	Partes por millón
P <sub>R</sub>	Porcentaje de retención
C <sub>i</sub>	Concentración inicial
C <sub>f</sub>	Concentración final
PSA	Poliestireno acetilado
PSC	Poliestireno carboxilado

## RESUMEN

**TITULO:** OBTENCIÓN DE UNA RESINA DE INTERCAMBIO CATIONICO A PARTIR DE POLIESTIRENO DE MEDIO IMPACTO POST-CONSUMO\*

**AUTORES:** QUINTERO OROZCO CAROLINA  
RUIZ OJEDA MARTHA PATRICIA\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Resina de intercambio catiónico; Poliestireno de medio impacto; Grupo funcional, Reciclaje

### DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO

El objetivo de este trabajo fue obtener una resina de intercambio catiónico, a partir de poliestireno de medio impacto proveniente de vasos reciclados; para este propósito se llevo a cabo la funcionalización del polímero, mediante una acilación del poliestireno reciclado seguida de una oxidación, para obtener, una resina de intercambio catiónico ácido débil, que tiene como grupo funcional un ácido carboxílico.

La cantidad de iones intercambiados por parte de la resina policarboxiestireno, se determinó por absorción atómica. La resina presentó buenos porcentajes de retención de los iones estudiados; calcio, magnesio, cobre, zinc, níquel y cromo. Por tanto, la funcionalización del poliestireno resulta ser una excelente alternativa de reciclaje, ya que permite el aprovechamiento de estos residuos plásticos, con la consecuente obtención de un producto reprocesado de gran utilidad, como lo son las resinas de intercambio catiónico.

Los altos porcentajes de retención obtenidos, convierten a la resina policarboxiestireno, en un instrumento útil en el tratamiento de aguas, como lo es la eliminación de su dureza, en tratamientos de efluentes industriales tales como: farmacéuticas, procesadoras de alimentos, medicas, en donde estos iones estan presentes. En industrias como las metalúrgicas esta resina podría ser utilizada para remover metales pesados como el cromo, que contaminan el agua debido a su toxicidad

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Director: José Carlos Gutiérrez

## SUMMARY

**TITLE:** OBTAINING OF A RESIN OF CATIONIC INTERCHANGE From POLYSTYRENE OF AVERAGE IMPACT POST-CONSUMPTION\* \*

**AUTHORS:** QUINTERO OROZCO CAROLINA\*\*  
RUIZ OJEDA MARTHA PATRICIA

**KEY WORDS:** Resin of cationic interchange, Polystyrene of average impact; Functional group, Recycling

### DESCRIPTION OF THE CONTENT

The objective of this work was to obtain a resin of cationic interchange from polystyrene of average impact originating of recycled glasses; for this intention we carried out the functionality of polymer by means of an acylation of recycled polystyrene followed by one oxidation in order to obtain a resin of weak acid cationic interchange, which has as functional group a carboxylic acid.

The amount of ions interchanged on the part of the resin polycarboxystyrene, was determined by atomic absorption. The resin displayed good percentage of retention of studied ions; calcium, magnesium, copper, zinc, nickel and chromium. Therefore, the functionality of the polystyrene turns out to be an excellent alternative of recycling since it allows the utilization of these plastic remainders. The product resulting from this is very useful, as they are the resins of cationic interchange.

The high percentage of retention turned the polycarboxystyrene resin into an useful instrument in water treatment as it is the elimination of its hardness in treatments of industrial effluents such as: pharmaceuticals, and food processors in which these ions are present. In industries such as metallurgy this resin could be used to remove heavy metals like chromium that contaminates water due to their toxicities.

---

\* Project of Graduate

\*\* Faculty of Science, Chemistry of School. Direct: José Carlos Gutiérrez.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente en Colombia, se ha visto un crecimiento notable en el consumo de productos plásticos, que aunque ofrece muchas ventajas, se convierte en un problema en el momento en que son desechados. Debido a la generación de este tipo de residuos, han llegado a niveles alarmantes, por ello el reciclaje se ha convertido en una actividad prioritaria, para evitar la acumulación de dichos materiales, ya que anualmente se consumen 530000 toneladas de plásticos, de las cuales 48000 pertenecen al poliestireno, esto se debe a la gran demanda y aplicación de este polímero en la industria.

En nuestro país las tecnologías más utilizadas para el aprovechamiento de los residuos plásticos son el reciclaje mecánico y el reciclaje químico. Sin embargo, el continuo desarrollo de la industria de los polímeros ha dado uso al proceso químico conocido como funcionalización de polímeros, que consiste en la incorporación de grupos reactivos a una cadena polimérica y en el cual estos grupos funcionales otorgan a los polímeros diferente reactividad frente a distintos agentes e introducen nuevas propiedades o potencian propiedades ya existentes.

Motivados por este avance, en la actualidad ha crecido el interés por generar nuevos materiales, a partir de los residuos poliméricos inertes que se están acumulando constantemente en el ambiente, permitiendo su uso en diversas áreas, además de su clásica aplicación en tratamiento de aguas. Entre estos materiales se encuentran las resinas de intercambio iónico; estas resinas han sido de gran aplicación industrial no sólo en tratamiento de aguas, sino también en tratamientos de residuos nucleares, en la industria alimentaria y en la industria farmacéutica, entre otras.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente y teniendo en cuenta que en Colombia, no se han llevado a cabo estudios sobre funcionalización del poliestireno de medio impacto reciclado; en este proyecto se propone una alternativa de reprocesamiento, puesto que este polímero no tiene ningún valor agregado y se está enterrando en los rellenos sanitarios del país. Por tal razón, el poliestireno de medio impacto de los vasos desechados es funcionalizado, para elaborar una resina de intercambio catiónico capaz de retener y recuperar iones presentes en soluciones líquidas. Esta resina de intercambio catiónico (policarboxiestireno) se preparó, por funcionalización del poliestireno, mediante reacción de acilación de Friedel-Crafts seguida de la reacción de oxidación de haloformo.

Los altos porcentajes de retención, obtenidos, al colocar la resina de intercambio catiónico (policarboxiestireno), en contacto con soluciones acuosas de iones disueltos, ( $Mg^{+2}$ ,  $Cr^{+6}$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Ni^{+2}$ ,  $Cu^{+2}$ , y  $Zn^{+2}$ ), la convierten en un instrumento útil en el tratamiento de aguas y efluentes industriales.

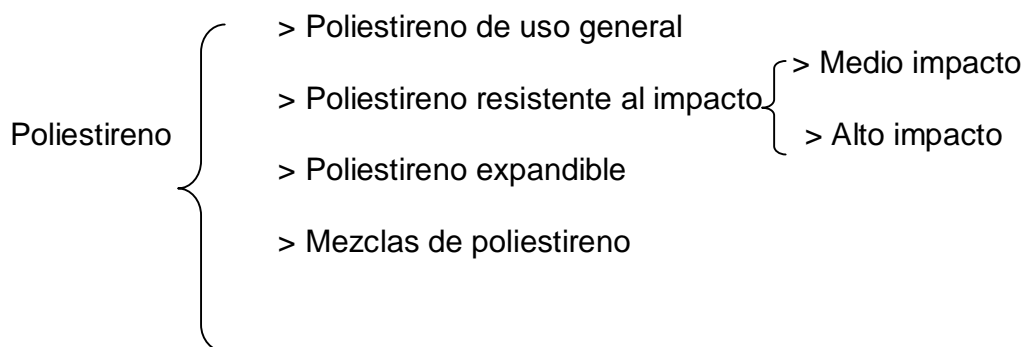
Este libro se encuentra dividido en tres capítulos. En el primero se hace una breve descripción teórica de aspectos básicos relacionados con la ciencia de los polímeros y de las resinas de intercambio iónico. En este mismo capítulo se presenta también una reseña de estudios anteriores sobre funcionalización de polímeros. En los capítulos siguientes se encuentra la metodología empleada, los diferentes equipos utilizados en el estudio, los resultados obtenidos y su discusión.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 POLIESTIRENO

**1.1.1. Generalidades.** El poliestireno es un polímero termoplástico, soluble en hidrocarburos aromáticos, en acetato de etilo, en diclorometano, y en metiletilcetona, entre otros; muestra insolubilidad en hidrocarburos alifáticos, alcoholes y agua,<sup>1,2,3</sup> es un material transparente, incoloro, duro, rígido, económico y resistente. Para ciertas aplicaciones, se le añaden algunos aditivos con el objeto de impartirle al poliestireno flexibilidad, tenacidad y resistencia al impacto. Dependiendo del proceso de fabricación y de los aditivos utilizados, se pueden encontrar diversos tipos de poliestireno,<sup>4</sup> como se muestra en el esquema 1.

### Esquema 1. Tipos de poliestireno



<sup>1</sup> XU and HU. New synthetic route for weak base anion exchangers based on crosslinked polystyrene. En: J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem., 36, 2151 (1998).

<sup>2</sup> BÁEZ, D. y HERRERA, G. Reciclaje de poliestireno espumado para la obtención de resinas de intercambio iónico. Tesis. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia (2002).

<sup>3</sup> CHARLESBY, A. Atomic radiation and polymers. Editorial Pergamon press. Gran Bretaña. 1960; p. 284.

<sup>4</sup> RUBIN, I. Materiales plásticos, propiedades y aplicaciones. Editorial Limusa. México. 1998; p. 131-169.

El poliestireno tiene excepcionales aplicaciones gracias a sus propiedades de resistencia mecánica, eléctrica y química.<sup>5,6</sup> Se emplea no solo en la protección, transporte y comercialización de alimentos,<sup>7,8,9</sup> sino también en la fabricación de maquetas,<sup>10</sup> aislantes térmicos,<sup>11</sup> molde para la confección de diversas estructuras en el campo de la construcción,<sup>12,13</sup> en la fabricación de aparatos domésticos como juguetes, cascos protectores, neveras,<sup>14,15</sup> entre otros.

**1.1.2. Síntesis.** El poliestireno es un polímero que se obtiene por un proceso denominado polimerización, que consiste en la unión de muchas moléculas pequeñas llamadas monómeros.<sup>16</sup> El monómero utilizado como base en la obtención del poliestireno es el estireno (vinilbenceno).<sup>3</sup> A escala industrial, el poliestireno se prepara calentando etilbenceno en presencia de un catalizador para dar lugar al estireno. La polimerización del estireno requiere la presencia de una pequeña cantidad de peróxidos, que operan rompiéndose para generar un radical libre por acción del calor. Este radical libre se une a una molécula de estireno, dando lugar a la abertura del doble enlace del estireno, formándose así otro radical libre más grande, que a su vez se une a otra molécula de estireno y

---

<sup>5</sup> ESPESO, J. y PEREZ, E. El poliestireno expandido, aplicaciones en la construcción. En: Revista de Plásticos Modernos. España: Diciembre 2002, vol. 84, No. 558.

<sup>6</sup> Hemeroteca de Plásticos Universales [online]. Las propiedades del poliestireno. Diciembre (2002), No. 81. Disponible en internet: <<http://www.plasticosuniversales.com>>.

<sup>7</sup> ANAPE Asociación Nacional de Poliestireno Expandido [online]. Madrid: junio 2001, no. 4 e-eps@anape.es

<sup>8</sup> Hemeroteca de Plásticos Universales [online]. El Poliestireno expandido, al servicio de la cadena de frío. Mayo (2002), No. 76. Disponible en internet: <<http://www.plasticosuniversales.com>>.

<sup>9</sup> Hemeroteca de Plásticos Universales [online]. El Poliestireno, en el envasado de manzanas, la mejor opción. Octubre (2003), No. 89. Disponible en internet: <<http://www.plasticosuniversales.com>>.

<sup>10</sup> Hemeroteca de Plásticos Universales [online]. Maquetas y displays en poliestireno. Marzo (2003), No. 83. Disponible en internet: <<http://www.plasticosuniversales.com>>.

<sup>11</sup> HORCAJADA, D. El poliestireno expandido, en el envase y embalaje: el material, sus aplicaciones y radiografía del sector en España y Europa. En: Revista de Plásticos Modernos. España: Febrero (2004), vol. 89, No. 584.

<sup>12</sup> DUNKER, Alberto. Los aislantes térmicos y el poliestireno. En: Bit-La Revista Técnica de la Construcción. Chile: Mayo 2003.

<sup>13</sup> López, C. El poliestireno expandido, en la construcción. En: Revista de Plásticos Modernos. España: Febrero 2004, vol. 87, No. 572.

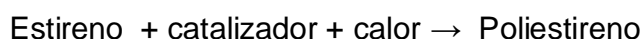
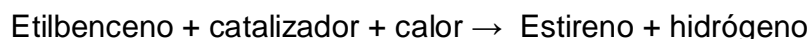
<sup>14</sup> SEYMOUR, R. Introducción a la química de los polímeros. Editorial Reverté. Barcelona. 1995; p. 325.

<sup>15</sup> Hemeroteca de Plásticos Universales [online]. El Poliestireno en la industria del juguete. Noviembre (2003), No. 90. Disponible en internet: <<http://www.plasticosuniversales.com>>.

<sup>16</sup> POLIESTIRENO. Enciclopedia virtual wikipedia. Disponible en internet: <[http://www.es.wikipedia.org/wiki/Grado\\_de\\_polimerizaci%C3%B3n](http://www.es.wikipedia.org/wiki/Grado_de_polimerizaci%C3%B3n)>.

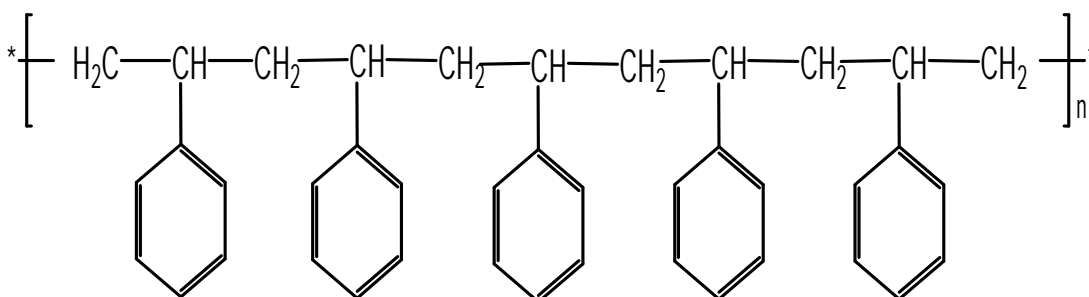
así sucesivamente, dando la formación del polímero.<sup>17</sup> La reacción puede representarse como se muestra en el esquema 2.

### Esquema 2. Reacción para la polimerización del estireno



**1.1.3. Estructura.** El poliestireno posee una estructura no cristalina formada a partir de cientos o miles de unidades de estireno, unidas mediante los enlaces  $-\text{CH}=\text{CH}_2-$ .<sup>4</sup> Estructuralmente, es una cadena larga hidrocarbonada con un grupo fenilo enlazado cada dos átomos de carbono presentando pesos moleculares elevados.<sup>18</sup> La figura 1. muestra la estructura del poliestireno.

**Figura 1. Estructura del poliestireno**



Debido a que las fuerzas intermoleculares de estos polímeros son débiles, al calentar las cadenas de poliestireno, éstas pueden moverse unas con relación a otras, sin embargo, una vez se enfría el poliestireno, dichas fuerzas

<sup>17</sup> CAÑAMERO, A. El poliestireno. En: El Rincón de la Ciencia [online]. Febrero (2002), No. 15. Disponible en Internet: <<http://www.centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/Curiosid/Rc-38/RC-38.htm>>.

<sup>18</sup> POLYSTYRENE. Departamento de Ciencia de Polimeros. Universidad del Sur de Mississippi. Disponible en Internet: <<http://www.pslc.ws/spanish/styrene.htm>>.

intermoleculares vuelven a reestablecerse pero, entre átomos diferentes puesto que, la ordenación de las cadenas ha cambiado.<sup>19,20</sup>

**1.1.4. Caracterización.** Las técnicas espectroscópicas habitualmente usadas en la caracterización del poliestireno, con algunas limitaciones en la resolución son Resonancia Magnética Nuclear de <sup>1</sup>H y <sup>13</sup>C, espectroscopia infrarroja FT-IR y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).<sup>21</sup>

Las señales características reportadas al realizar estudios espectroscópicos de infrarrojo del poliestireno aparecen en la tabla 1.<sup>22,23</sup>

**Tabla 1. Frecuencias en el espectro infrarrojo para el poliestireno**

Frecuencia (cm <sup>-1</sup> )	Asignación
3025	Estiramiento C-H aromático
2919	Estiramiento C-H del CH <sub>2</sub> asimétrico
2849	Estiramiento C-H del CH <sub>2</sub> simétrico
1601	Estiramiento C-C aromático
1492	Estiramiento C-C aromático
1451	Estiramiento C-H aromático
1027	Flexión C-H del anillo en el plano
906	Flexión C-H fuera del plano
747	Flexión C-H fuera del plano
694	Flexión C-H fuera del plano

<sup>19</sup> MEYSENBURG, C. Tecnología de plásticos para ingenieros. Ediciones Urmo. España. 1967; p.20-22.

<sup>20</sup> GOLDING, B. Polymers and resins their chemistry and chemical engineering. Editorial Van Nostrand Company. New Jersey. 1959; p.14.

<sup>21</sup> MARTINELLI, M., FROMOWICZ, P., CALDERON, M. and STRUMIA, M. Materiales poliméricos funcionalizados. En: Revista Iberoamericana de Polímeros [online]. Córdoba, Argentina. Diciembre 2003, vol 4. Disponible en Internet: <<http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/DICO3/Strumial.pdf>>.

<sup>22</sup> LÓPEZ, A. Influencia del proceso de reciclado sobre las propiedades de los materiales compuestos obtenidos por inyección de poliestireno reforzado con fibras lignocelulósicas [online]. Universidad de Girona Madrid-España (2004). Disponible en Internet: <[http://www.tdx.cesca.es/TESIS\\_UdG/AVAILABLE/TDX-0924104-125154//tals3de7.pdf](http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UdG/AVAILABLE/TDX-0924104-125154//tals3de7.pdf)>.

<sup>23</sup> CONLEY, R. Espectroscopia Infrarroja. Editorial Alambra. Madrid. 1979.

Mediante la técnica de Calorimetría Diferencial de Barrido, DSC (*Differential Scanning Calorimetry*); la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), del Poliestireno, reportada en la literatura es de 100<sup>0</sup>C aproximadamente.<sup>24,25</sup>

## 1.2 RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO

**1.2.1 Generalidades.** Las resinas de intercambio iónico son insolubles en agua y son de naturaleza polimérica.<sup>26</sup> Una resina de intercambio iónico es una matriz tridimensional formada por redes hidrocarbурadas que le proporcionan grados de insolubilidad a la misma.<sup>27</sup> A estas resinas se encuentran unidos grupos funcionales iónicos solubles, los cuales son el origen de sus propiedades de intercambio,<sup>28,29</sup> estos grupos ionizados (aniones o cationes), están presentes en forma repetitiva a lo largo de las cadenas, tienen su carga neutralizada por iones de signo contrario (contraiones) que pueden ser intercambiados por otros iones de igual signo, al ponerse en contacto con una solución de electrolitos. De acuerdo al grupo funcional presente en la estructura polimérica, las resinas pueden ser:

- catiónicas (intercambian cationes) o
- aniónicas (intercambian aniones).<sup>26</sup>

Las resinas intercambiadoras de cationes, se caracterizan por la presencia de grupos funcionales como el sulfónico  $-\text{SO}_3^- \text{H}^+$  o el carboxílico  $-\text{COO}^- \text{H}^+$ , los cuales emiten iones Hidrógeno, que son intercambiados por cationes como  $\text{Ca}^{+2}$ ,

<sup>24</sup> LENZ, R. Organic Chemistry of Synthetic High Polymers. Editorial Interscience Publishers. Estados Unidos. 1967; p. 45.

<sup>25</sup> ODIAN, G. Principles of Polymerization. Editorial Mc Graw Hill. Estados Unidos. 1970; p. 30.

<sup>26</sup> ZERQUERA, H. Resinas de intercambio iónico para prolongar la liberación de los fármacos. Revista Cubana de Farmacia [online]. Vol. 34 (2000); p.196-206. Disponible en Internet: <[http://www.scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttex&pid=S003475152000000300007&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttex&pid=S003475152000000300007&lng=es&nrm=iso)>.

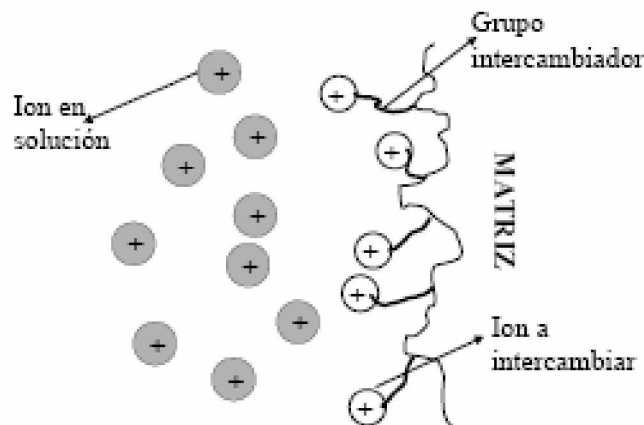
<sup>27</sup> HELFFERICH, F. Ion exchange. Editorial Mc Graw Hill. Estados Unidos. 1962; p. 14.

<sup>28</sup> GAONA, J. El Mercurio como Contaminante Global [online]. Disponible en Internet: <[http://www.tdx.cesca.es/TESIS\\_UAB/AVAILABLE/TDX-1025104-165935/xgm1de1.pdf](http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UAB/AVAILABLE/TDX-1025104-165935/xgm1de1.pdf)>.

<sup>29</sup> KHYM, J. Analytical ion-exchange procedures in chemistry and biology. Editorial Prentice Hall. New Jersey. 1974; p.2.

Mg<sup>+2</sup> , Na<sup>+1</sup> , entre otros. En la figura 2 se puede apreciar una representación simplificada, de la superficie de una resina de intercambio cationico, cuando esta se encuentra en contacto con una solución acuosa de iones disueltos.

**Figura 2. Resina de Intercambio Cationico en contacto con iones en solución**



Las resinas intercambiadoras de aniones poseen grupos amino terciarios o grupo amino primarios, los cuales intercambian iones hidroxilo por otros aniones.<sup>27,30</sup>

Hoy, el proceso de intercambio iónico tiene una amplia variedad de aplicaciones importantes en industrias tales como: farmacéuticas, procesadoras de alimentos, médicas, hidrometalúrgicas, de síntesis química, de tratamiento de aguas, de producción de fibras sintéticas y cromatográficas,<sup>26</sup> además de la recuperación de materiales valiosos de las aguas residuales, remoción de productos corrosivos y desmineralización de aguas.<sup>31</sup> También se ha empleado para remover de las aguas, por su toxicidad, metales pesados como cadmio, plomo y cromo. Por otro

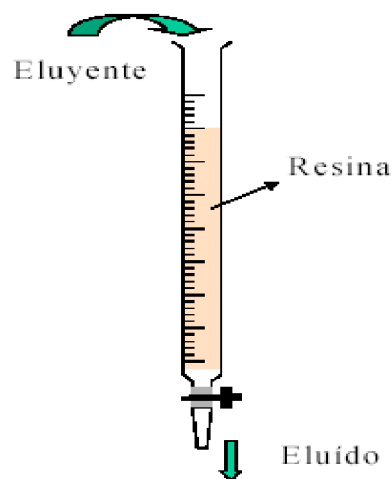
<sup>30</sup> DOW CHEMICAL COMPANY. Dowex. Ion Exchange. Editorial Dow. Michigan. 1964.

<sup>31</sup> A COMMERCIAL WATERTECH COMPANY. Intercambio Iónico. Editorial Excel Water Technologies. 2002

lado, debido al olor, color y excesiva dureza de las aguas, también son removidos cationes como hierro, calcio y magnesio.<sup>32</sup>

De manera general, el tratamiento de una disolución con una resina de intercambio iónico se puede llevar a cabo mediante dos métodos distintos: el método batch y el método de columna. En el método batch, se mezcla la resina de intercambio iónico y la disolución en un recipiente hasta que el intercambio de iones alcanza el equilibrio. Después de alcanzado el equilibrio, la resina de intercambio es separada de la fase de solución por filtración o centrifugación, y ambas fases son analizadas.<sup>29</sup> Mientras que por el método en columna la resina se coloca en el interior de una columna vertical (como se muestra en la figura 3) a través de la cual se hace fluir la disolución a tratar. La concentración de los iones metálicos presentes en la solución eluyente de la columna se determinan por diversos métodos tales como titulación complejométrica y espectrofotometría de absorción.<sup>30</sup>

**Figura 3. Intercambio Iónico en Columna**



---

<sup>32</sup> GUTIERREZ, E. Post-treatment of municipal wastewater for feeding to boilers using ionic exchange. En: Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia. Vol. 28 (2005).

**1.2.2. Estructura.** Según la estructura de las resinas de intercambio iónico, si en sus cadenas moleculares quedan lugares químicamente activos, éstos se combinan en todas las direcciones, dando lugar a un entrecruzamiento en el espacio, que a medida que va siendo mayor va limitando la movilidad de las mismas.<sup>33</sup> Dicho grado de entrecruzamiento determina la capacidad “swelling” (capacidad de hincharse) de las resinas, además de conferirles estabilidad y mayor resistencia mecánica,<sup>29</sup> por tal razón las resinas de intercambio iónico pueden clasificarse en una de dos formas físicas como:

- geles, o
- materiales macroporosos

Las resinas *tipo gel*, son polímeros homogéneos entrecruzados, conocidos con el nombre de resinas microporosas; ya que presentan tamaños de poro relativamente pequeños. Poseen alrededor de un 2% de entrecruzamiento, lo cual se considera de leve a bajo grado de entrecruzamiento. Esto, les permite tener altos porcentajes de hinchamiento, cuando son colocados en disolventes adecuados.<sup>21</sup>

Las resinas *macroporosas* también llamadas macro-reticulares,<sup>34</sup> son preparadas por polimerización en suspensión, resultando en la formación de un producto altamente entrecruzado, rígido y con muy buena estabilidad mecánica.<sup>21</sup> Debido a la gran área de superficie de los macroporos su estructura es de apariencia

---

<sup>33</sup> MARTINEZ, S. Polímeros. Universidad Industrial de Santander. Editorial Publicaciones UIS. Bucaramanga. 2001; p.32-33.

<sup>34</sup> GONZALEZ y PEREZ. Intercambio Iónico [online]. Transferencia de Masa-Ing. Química-Universidad Nacional, Colombia. Disponible en internet: <<http://www.francisco346.tripod.com/>>.

esponjosa la cual permite el acceso de reactivos a la porción activa de la misma. La reactividad de estos materiales macroporosos no depende del hinchamiento.<sup>35</sup>

**1.2.3. Síntesis.** En forma general, la preparación de resinas de intercambio iónico se puede resumir en:

a) Modificación química de polímeros preformados. En esta vía se puede partir de un polímero soluble inerte y proceder a su funcionalización o partir de materiales entrecruzados con el fin de pegar un ligando bioespecífico o un fármaco, para su uso en afinidad cromatográfica o como carrier de liberación controlada, respectivamente. Esta alternativa de modificación es la más utilizada puesto que permite que se lleven a cabo otras transformaciones químicas sobre materiales cuyas propiedades y características ya son conocidas, la cual repercute en la obtención de resinas con grupos funcionales más específicos y aplicaciones más concretas.

b) Polimerización o copolimerización de monómeros que contengan los grupos funcionales deseados. Algunos de los monómeros clásicos más usados contienen grupos funcionales carboxilos, hidroxilos u otros grupos en adición al doble enlace. Este últimos permite su posterior copolimerización.<sup>21</sup>

Los rendimientos de reacción de este tipo de reacciones pueden verse afectados por el grado de entrecruzamiento; cuanto mayor sea el grado de entrecruzamiento, menor será el rendimiento de modificación química.<sup>26</sup>

**1.2.4. Caracterización.** Debido a la insolubilidad que presentan las resinas de intercambio iónico, los estudios de caracterización para éstas son limitados. Sin embargo, la solubilidad de estos polímeros es de gran importancia para su

---

<sup>35</sup> AVILLA J. Lo esencial acerca del intercambio iónico [online]. Disponible en Internet: <<http://www.agualatinoamerica.com>>.

caracterización puesto que, estos no muestran solubilidad normal; ya que pueden hincharse bajo la influencia de ciertos solventes. El factor de hinchamiento por sí sólo no es prueba de entrecruzamiento, se hace necesario que el polímero muestre resistencia a los solventes típicos en los cuales antes era soluble, esto si es considerado como entrecruzamiento.<sup>36</sup> Las técnicas más comúnmente usadas reportadas en la literatura son: análisis elemental, estudios termogravimétricos (TGA) y análisis térmico diferencial (DSC). Otras técnicas más específicas para el estudio de sus superficies podrían ser microscopía de barrido electrónico (SEM) y de fuerza atómica (AFM), ángulo de contacto, espectrometría de masas de ion secundario (SIMS) y espectroscopía de rayos X fotoelectrónica (XPS).<sup>21</sup>

### 1.3 FUNCIONALIZACION DE POLÍMEROS

En los últimos años la preocupación ciudadana por el cuidado y respeto del medio ambiente ha venido aumentando, es por esto, que distintos sectores industriales están adoptando diversas medidas para reducir el impacto de sus residuos en el entorno.<sup>37</sup> Entre estas medidas el reciclado se ha convertido en una realidad constante, puesto que actúa como una alternativa para poseer un mejor ambiente, permitiendo la recuperación de ciertos materiales que pueden ser procesados o reutilizados.<sup>38</sup>

Debido a la existencia de diversas opciones de reciclaje como: reciclaje mecánico, reciclaje químico e incluso la funcionalización de polímeros que permiten proveer un nuevo uso a los residuos poliméricos; el poliestireno se ha convertido en un material promisorio para la producción de nuevos materiales con múltiples

---

<sup>36</sup> SORENSON, W. and CAMPBELL, T. Preparative methods of polymer chemistry. Editorial Interscience Publishers. New York. 1961; p.52-54.

<sup>37</sup> ANAPE Asociación Nacional de Poliestireno Expandido [online]. Madrid: septiembre 2000, no. 1 e- eps@anape.es.

<sup>38</sup> LAGUNA, O. y ARGANZA, R. Estudio para el aprovechamiento de los residuos de materiales plásticos. En: Revista de Plásticos Modernos. No. 270 (1978).

aplicaciones, puesto que de él se encuentra un volumen importante dentro del total de polímeros descartables.<sup>39</sup>

Entre las distintas aplicaciones se encuentra su uso en la fabricación de planchas para la construcción,<sup>40</sup> como auxiliar en la elaboración de compost<sup>41</sup>, de ladrillos ligeros y porosos,<sup>7</sup> como sustitutos de la madera<sup>42</sup>, para la elaboración de hormigones<sup>43</sup> y para aprovechamientos energéticos,<sup>5</sup> además de las ventajas ofrecidas cuando los materiales son funcionalizados puesto que pueden ser utilizados como adhesivos, materiales biocompatibles, catalizadores<sup>21</sup> e incluso como intercambiadores iónicos.<sup>44</sup>

En pocas palabras, la funcionalización de polímeros a sido usada a lo largo de los años para incorporar nuevas propiedades a los polímeros y generar nuevas aplicaciones. Entre los primeros aportes a estos estudios, se encuentra el realizado por Blanchette y Cotman en el año 1957, quienes reportan la síntesis de polímeros funcionalizados modificando químicamente poliestireno, poliacrilonitrilo y copolímeros mediante reacciones de nitración, clorometilación y acilación.<sup>45</sup>

Gracias a que los anillos aromáticos del poliestireno pueden ser funcionalizados relativamente más fácil en comparación con otros polímeros y debido a su buena

---

<sup>39</sup> ANAPE Asociación Nacional de Poliestireno Expandido [online]. Madrid: octubre 2001, no. 5 e- eps@anape.es.

<sup>40</sup> Hemeroteca de Plásticos Universales [online]. Curiosidades cuando no hay madera. Junio 2003, no. 86. Disponible en internet: <<http://www.plasticosuniversales.com>>.

<sup>41</sup> Hemeroteca de Plásticos Universales [online]. Opciones para el tratamiento de residuos de EPS. Marzo 2002, no. 74. Disponible en internet: <<http://www.plasticosuniversales.com>>.

<sup>42</sup> BARRALES, J.M. Análisis y caracterización de materiales polímeros: Ensayos Preliminares. Revista de Plásticos Modernos No 478, Abril de 1996.

<sup>43</sup> HORCAJADA, D. Envasado y embalado con poliestireno expandido. En: Revista de Plásticos Modernos. España: Marzo 2003, vol. 85, No. 561.

<sup>44</sup> Aplicaciones de las Resinas de Intercambio Iónico en la Industria [online]. Disponible en internet: <[http://www.gedar.com/html/familias/De\\_talles/repuestos/GEDAR%20\\_%20Resinas%20.pdf](http://www.gedar.com/html/familias/De_talles/repuestos/GEDAR%20_%20Resinas%20.pdf)>

<sup>45</sup> BLANCHETTE y COTMAN. Synthesis of polyfunctional polymers. [Contribution from the Research Department, Plastics Division, Monsanto Chemical Co.]. Diciembre 12, 1957.

resistencia química y mecánica, éste se ha convertido en uno de los polímeros más utilizados en la preparación de productos funcionalizados.<sup>46</sup>

En el año 1984, se reporta que el poliestireno puede ser sulfonado en presencia de anhídrido ftálico y ácido sulfúrico para la producción de resinas de intercambio.<sup>47</sup> Otros estudios muestran que también es posible funcionalizar el poliestireno por clorometilación con la incorporación de 1,4-bis (clorometoxi) butano a los anillos aromáticos,<sup>48</sup> o mediante la reacción de Friedel-Crafts en presencia de ácido clorosulfónico y metilaldehído obteniéndose también resinas de intercambio.<sup>49</sup>

En los últimos años, Sun y colaboradores, reportan la modificación química del poliestireno comercial formando en un primer paso de síntesis el poly(4-vinilacetofenona) mediante la reacción de acilación de Friedel-Crafts y luego de posteriores pasos, que involucran su tratamiento con peróxidos y cloro gaseoso, obtienen ligados en la posición *para* de los anillos aromáticos el 6-metil-1,3,5-triazina-2,4-diona.<sup>50</sup> Hui Xu y Xi-Zhang Hu, en el año de 1998, desarrollan una ruta para introducir grupos amino al poliestireno, mediante previa incorporación de grupos acetilo a los anillos aromáticos, por tratamiento del polímero con cloruro de acilo o anhídrido acético en presencia del catalizador de Friedel-Crafts, cloruro de aluminio, seguida de la reacción de Mannich, obteniendo una resina de intercambio aniónico de base débil.<sup>1</sup>

---

<sup>46</sup> FRECHET, J., DE SMET, M. and FARRALL, J. Application of phase-transfer catalysis to the chemical modification of cross-linked polystyrene resins. En: J. Am. Chem. Soc., 44, 1774 (1979).

<sup>47</sup> BISWAS and CHATTERJEE. Chemical modification of polystyrene. V. sulfonic acid resins from anhydride substituted polystyrene. En: J. Appl. Polym. Sci., 29, 829 (1984).

<sup>48</sup> CARPOV, A., LUCA, C. and BARBOIU, V. On the reaction of linear and crosslinked polystyrene with 1,4 - bis(chloromethoxy)butane. En: J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed., 22, 269 (1984).

<sup>49</sup> BELFER and GLOZMAN. Anion exchange resins prepared from polystyrene crosslinked via a Friedel -Crafts reaction. En: J. Appl. Polym. Sci., 24, 2147 (1979).

<sup>50</sup> SUN, G., CHEN, T. and WORLEY, S. A novel biocidal styrenetriazinedione polymer. En: J. Polym. Sci., 37,3753 (1996).

Debido a que la reacción de acilación de Friedel-Crafts ha mostrado ser muy atractiva en el momento de introducir variedad de sustituyentes a los polímeros, ésta se ha convertido en una ruta versátil para incorporar grupos amino, clorometilo, clorobenzoilos y carboxilos.<sup>1,45</sup> Entre los trabajos realizados para *p*-carboxilar el poliestireno, se ha reportado su obtención mediante la oxidación de acetilpoliestireno con hipoclorito de sodio,<sup>45</sup> mediante la metalación del poliestireno con una mezcla de *n*-butillitio (*n*-BuLi) y *t*-butóxido de potasio (*t*-BuOK) en ciclohexano, seguido de la reacción entre el poliestireno metalado con dióxido de carbono sólido, obteniéndose luego de posteriores pasos el polímero carboxilado.<sup>51</sup> También es reportada su preparación, por tratamiento del poliestireno con dióxido de carbono gaseoso,<sup>52</sup> sin embargo, la desventaja de emplear estos métodos es que, aparte de involucrar procedimientos complejos envuelven condiciones drásticas de reacción; no obstante, el producto carboxilado posee amplia aplicación en el campo de los intercambiadores iónicos.<sup>35</sup>

El aporte más importante al desarrollo de intercambiadores iónicos fue en el año 1935 por los químicos Basil Adams y Eric Holmes del departamento de investigación científica del Reino Unido, quienes desarrollaron polímeros orgánicos de intercambio catiónico y aniónico.<sup>34</sup> Desde entonces se ha continuado la investigación y el desarrollo de nuevas estructuras con un amplio campo de aplicación industrial como purificación, catálisis, recuperación de metales preciosos y en tratamientos de aguas.<sup>53</sup>

---

<sup>51</sup> NEMES, S., BORBÉLY, J., BORDA, J. and KELEN, T. Highly functionalized polystyrene by direct metalation-carboxylation. *Polymer Bulletin* [online]. Vol.27 (1991). Disponible en Internet: <[http://www.springerlink.com/\(hvub2i41jhdqmbjlz04lx45\)/app/home/contribution.asp?referrer=parent&backto=issue,2,18;journal,158,335;linkingpublicationresults,1:102513,1](http://www.springerlink.com/(hvub2i41jhdqmbjlz04lx45)/app/home/contribution.asp?referrer=parent&backto=issue,2,18;journal,158,335;linkingpublicationresults,1:102513,1)>.

<sup>52</sup> SEN, M. Síntesis of middle-chain carboxyl and primary amine-functionalized polystyrenes using anionic polymerization techniques. En: *J. Polym. Sci. Polym. Chem.* (2005)

<sup>53</sup> Tecnociencia Aplicaciones de los Intercambiadores Iónicos en la industria [online]. Diciembre 2001. Disponible en Internet: <[http://www.tecnociencia.es/espe\\_ciales/intercambio\\_ionico/aplicaciones.htm](http://www.tecnociencia.es/espe_ciales/intercambio_ionico/aplicaciones.htm)>.

## 1.4 ESQUEMA DE REACCIÓN

La mayoría de los estudios reportados evidencian la aplicación particular del poliestireno funcionalizado como resina de intercambio iónico<sup>47,49</sup> y tienen en cuenta que las propiedades de aplicación de dichos materiales son una consecuencia de su estructura molecular,<sup>28,54</sup> es decir del grupo sustituyente que haya sido incorporado a los anillos aromáticos, además del grado de funcionalización que éste posea. Por tal motivo, se ha optado por combinar procesos y reacciones químicas que generen materiales con aplicación definida entre los cuales la reacción de Friedel-Crafts se ha vinculado de manera importante.<sup>55,56,57</sup>

Sin embargo sin ser totalmente clara la forma por la cual ocurren las transformaciones químicas de los polímeros a resinas de intercambio iónico, debido a la multiplicidad de rutas que pueden llevarse a cabo, es claro, que el esquema de reacción propuesto para un compuesto no polimérico que involucre la reacción de acilación de Friedel-Crafts con subsecuente oxidación conlleve a la formación de un producto carboxilado,<sup>58,59,60</sup> como se muestra en el esquema 3 y 4.

---

<sup>54</sup> STRUMIA, M., ALVAREZ, C., GRASSINO, S. y HALABI, A. Materiales poliméricos funcionalizados: síntesis, caracterización y estudios de sus propiedades de aplicación [online]. Disponible en internet: <<http://www.fcq.unc.edu.ar/site/departamentos/d%20qo%2010.htm>>.

<sup>55</sup> BARTOLI, G., BOSCO, M., MARCANTONI, E., MASSACCESI, M., RINALDI, S. and SAMBRI, L. LiClO<sub>4</sub> – acyl anhydrides complexes as powerful acylating reagents of aromatic compounds in solvent free conditions. En: J. Tetrahedron Lett. 2002, 43, 6331.

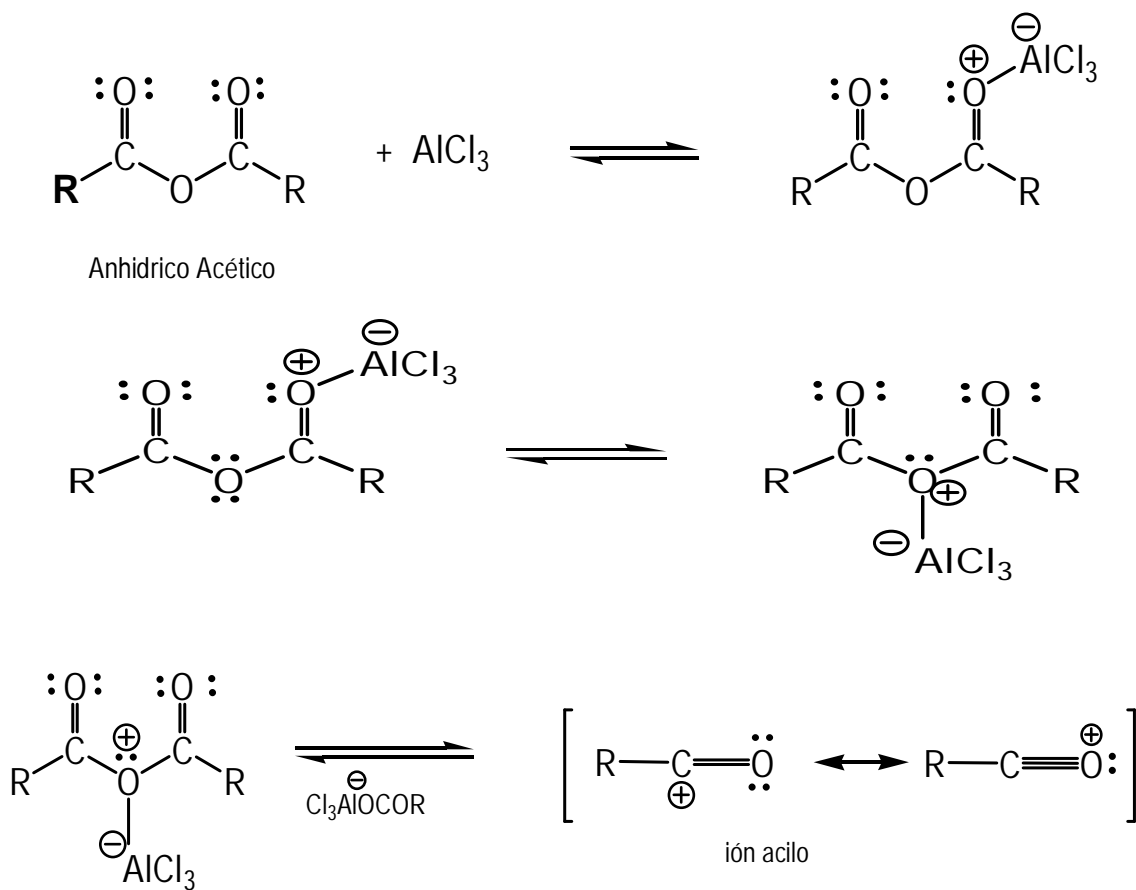
<sup>56</sup> CARDOSO, L., ALVES, W., GONZAGA, A., AGUIAR, L. and ANDRADE, H. Friedel-Crafts acylation of anisole with acetic anhydride over silica-supported heteropolyphosphotungstic acid (HPW / SiO<sub>2</sub>). En: J. Mol. Catal. A: Chem. 209 (2004) 189-197.

<sup>57</sup> YADAV, G. y BHAGAT, R. Experimental and theoretical análisis of Friedel-Crafts acylation of thioanisole to 4-(methylthio)acetophenone using solid acids. En: J. Mol. Catal. A: Chem. 235 (2005) 98-107.

<sup>58</sup> MORRISON, R. Química Orgánica. Editorial Addison Wesley. USA. 1996.

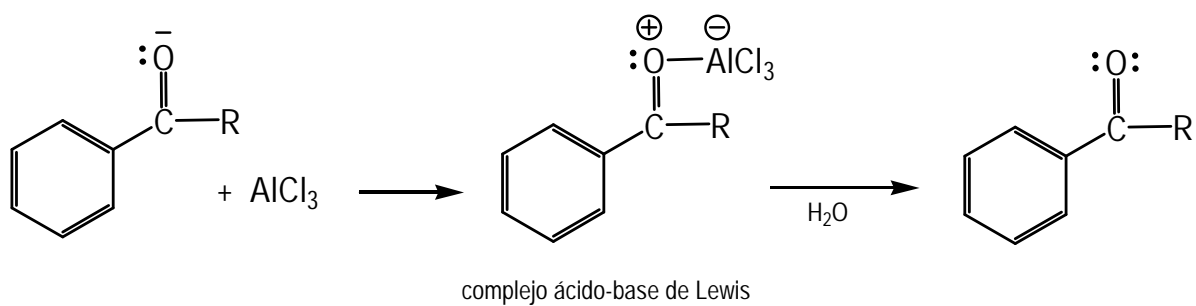
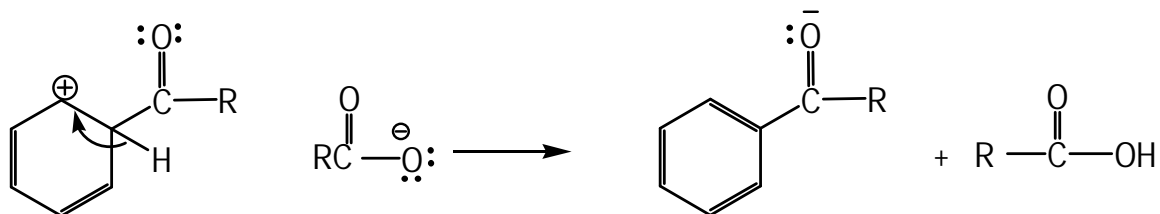
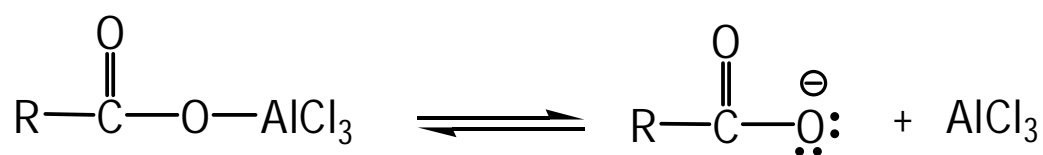
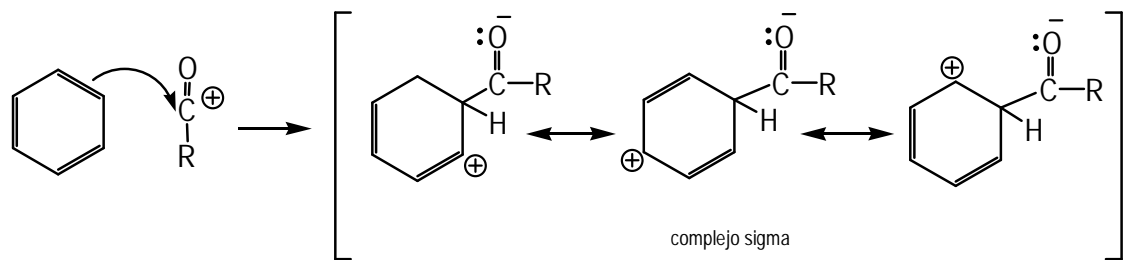
<sup>59</sup> BRUNET, E. La Química Orgánica Transparente. Lección 13. Sustitución electrofílica aromática [online]. Universidad Autónoma de Madrid. Disponible en Internet: <[http://www.uam.es/departamentos/ciencias/qorg/docencia\\_red/qo/l13/acilfc.html](http://www.uam.es/departamentos/ciencias/qorg/docencia_red/qo/l13/acilfc.html)>

**Esquema 3. Esquema de reacción de acilación de Friedel-Crafts. a) formación del intermediario electrofílico y b) reacción SEAr entre el benceno y el catión acilo**



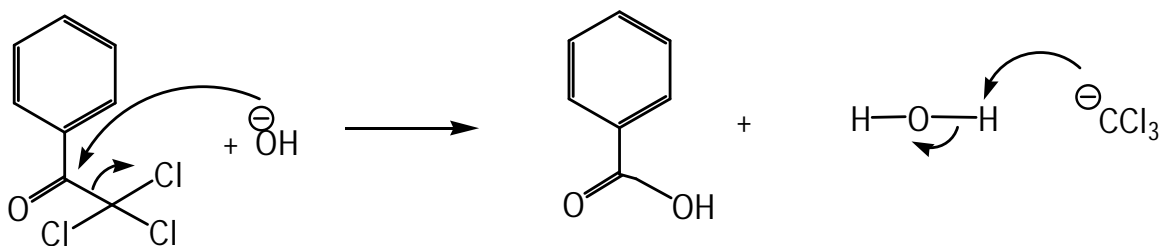
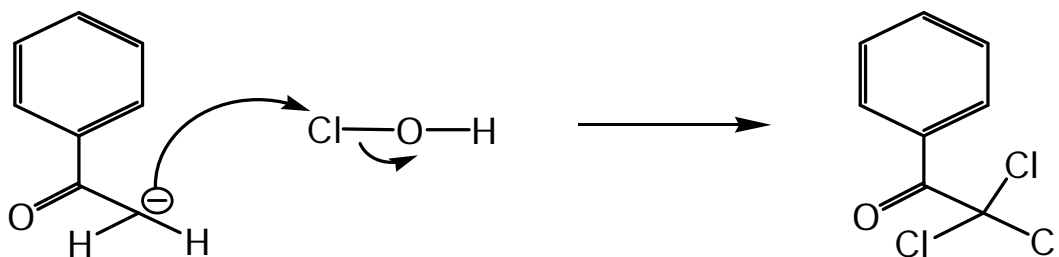
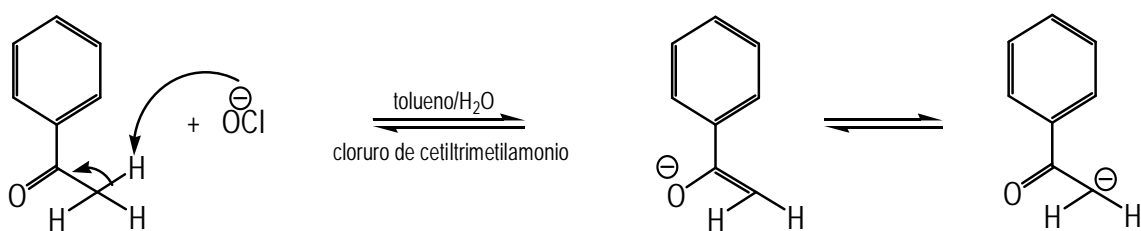
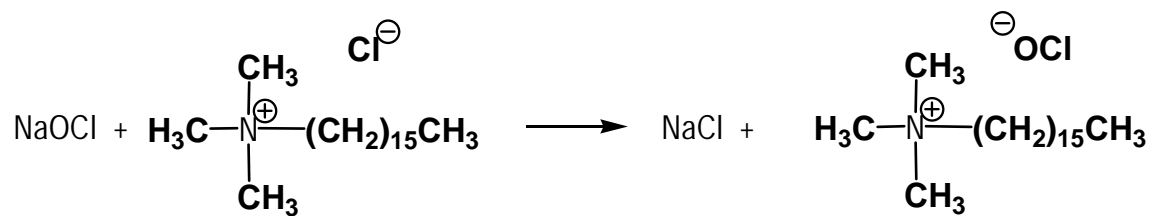
**a) formación del intermediario electrofílico**

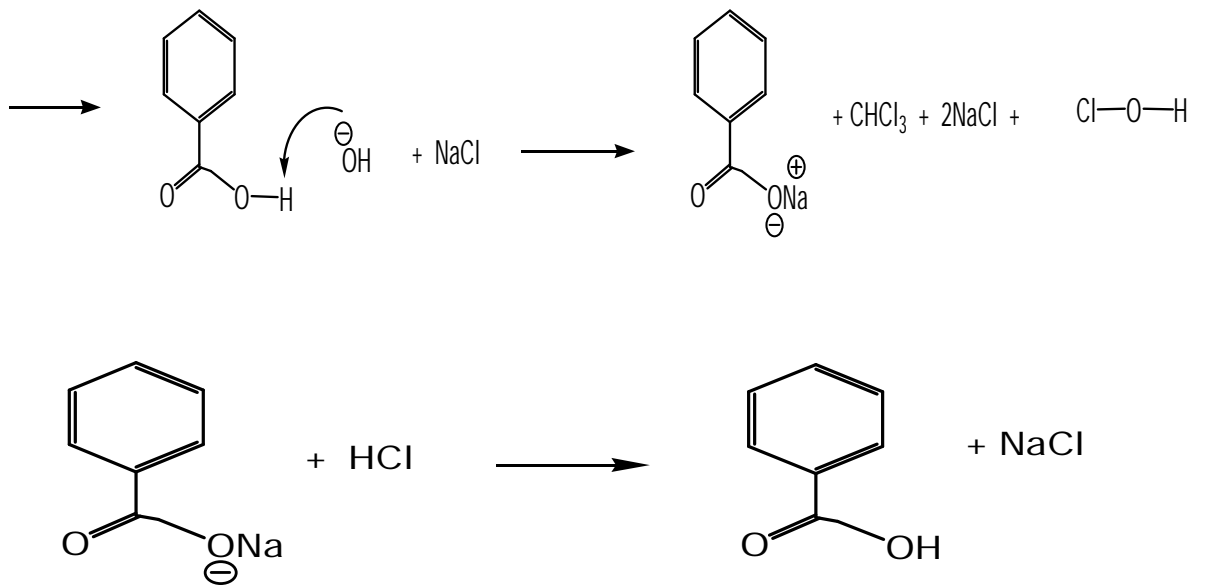
<sup>60</sup> RIVERA, E. Obtención de ácido benzoico. Laboratorio de Química II. Proyecto final, experimento VII. Modificado Febrero (2004); p. 49-55. Disponible en Internet: <<http://www.organica1.pquim.unam.mx/organica/qo2lab/manual/>>



**b) reacción SEAr entre el benceno y el catión acilo**

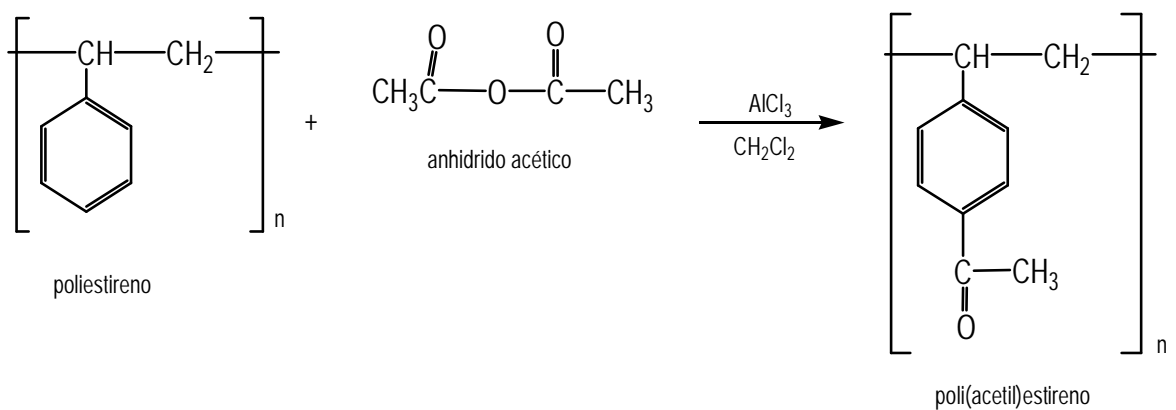
**Esquema 4. Esquema de reacción de oxidación de haloformo**

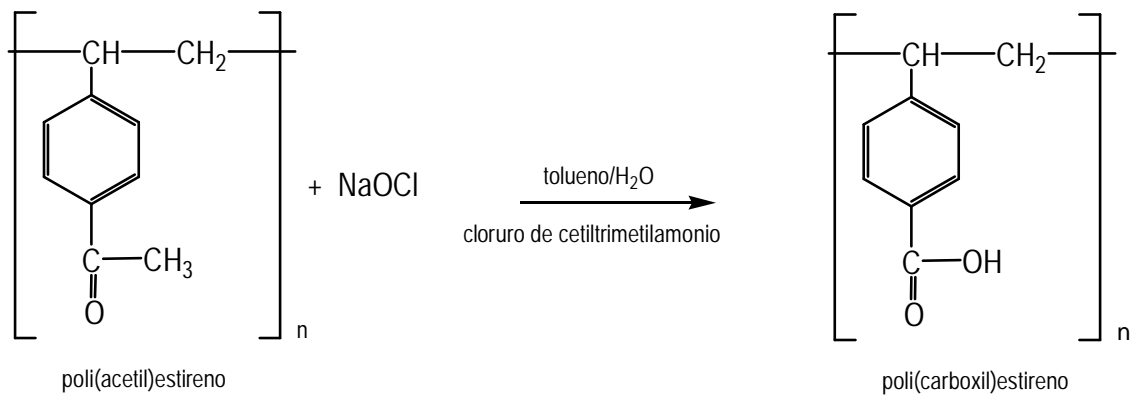




Por lo anterior, los pasos involucrados en la *p*-carboxilación del poliestireno podrían describirse como se muestra en el esquema 5.

**Esquema 5 . Esquema de reacción propuesto para la *p*-carboxilación del poliestireno**



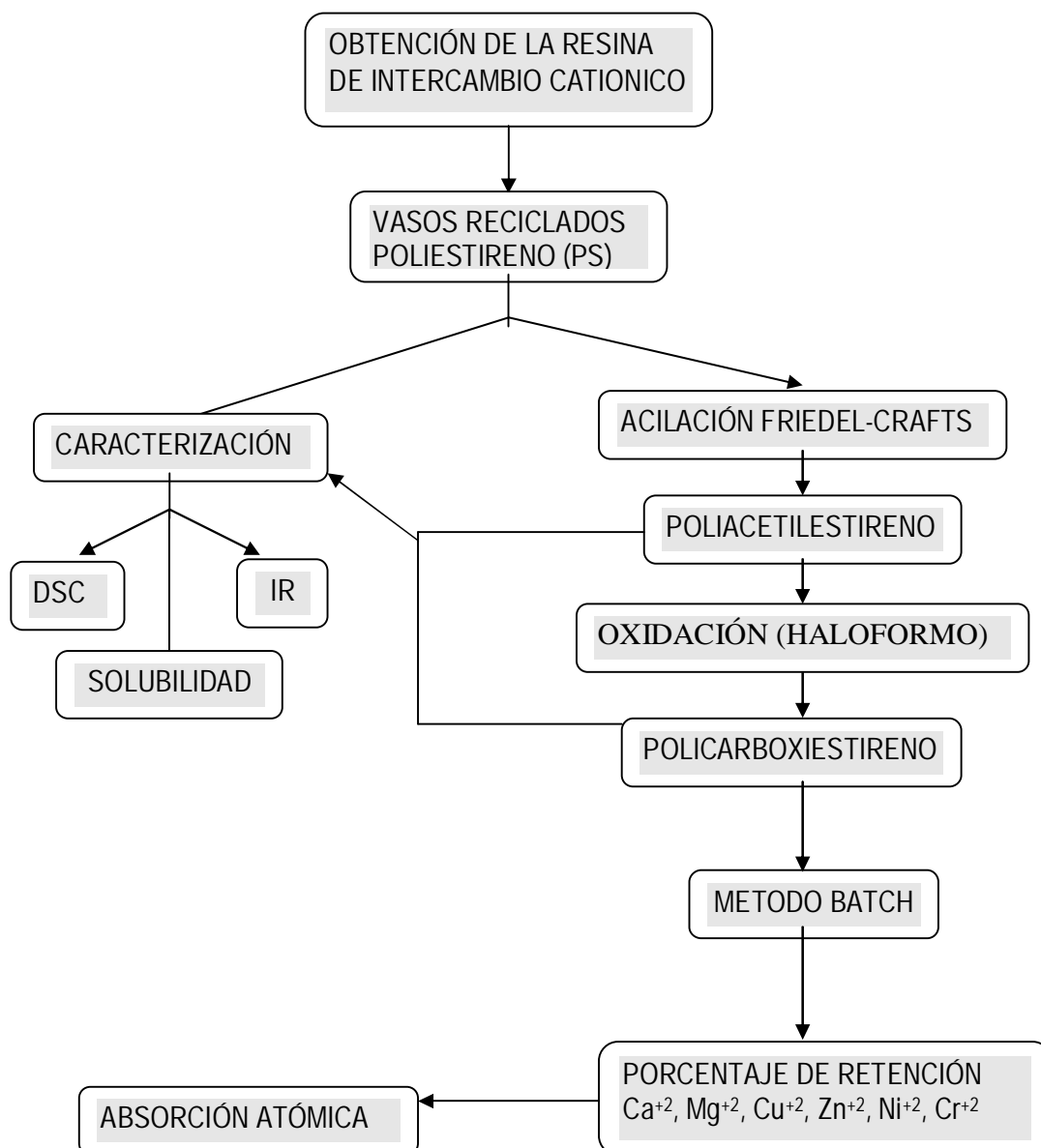


## 2. PARTE EXPERIMENTAL

Dentro del desarrollo experimental, se realizó una parte preliminar que consistió en la caracterización del poliestireno de medio impacto proveniente de los vasos plásticos reciclados, mediante pruebas de solubilidad, análisis por DSC y análisis espectroscópico IR.

Una vez caracterizado el poliestireno, se procedió a obtener el polímero funcionalizado, mediante dos etapas fundamentales: en la primera etapa se acilo el poliestireno reciclado de medio impacto mediante reacción de Friedel-Crafts y en la segunda etapa se oxido el polímero acilado mediante reacción de haloformo. Los productos obtenidos se caracterizaron mediante: espectroscopía infrarroja, calorimetría diferencial de barrido y pruebas de solubilidad. Finalmente se utilizó el método de intercambio iónico en discontinuo(batch), para determinar el porcentaje de retención de iones metálicos, por parte de la resina obtenida (Policarboxiestireno). En el diagrama de flujo de la figura 4 se presenta un resumen de la metodología empleada para la realización de este proyecto.

Figura 4. Metodología en diagrama de flujo



Las técnicas espectroscópicas utilizadas fueron las siguientes: espectroscopia infrarroja, se empleó un espectrofotómetro marca **BRUKER** modelo **SENSOR 27** empleando la técnica de la pastilla de KBr; por Calorimetría Diferencial de Barrido

(DSC), se utilizó un calorímetro modelo **Q10**; la cuantificación de los iones metálicos calcio, magnesio, cobre, zinc, cromo y níquel se realizó por espectrofotometría de absorción atómica en un espectrofotómetro **PERKIN ELMER** modelo **372**.

En la tabla 2 se especifica la lista de reactivos utilizados

**Tabla 2. Lista de reactivos empleados**

Reactivo	Fórmula
Tolueno	$C_7H_8$
Hexano	$C_6H_{14}$
Xileno	$C_8H_{10}$
Acetona	$C_3H_6O$
Formol	$H_2C=O$
Benceno	$C_6H_6$
Cloroformo	$CHCl_3$
Eter etílico	$C_4H_{10}O$
Ciclohexanol	$C_6H_{12}O$
Acetato de etilo	$C_4H_8O_2$
Diclorometano	$CH_2Cl_2$
Anhídrido acético	$(CH_3CO)_2O$
Cloruro de aluminio	$AlCl_3$
Ácido clorhídrico	$HCl$ (37%)
Bicarbonato de sodio	$NaHCO_3$
Hipoclorito de sodio	$NaOCl$
Bisulfito de sodio	$NaHSO_3$
Tetrahidrofurano	$C_4H_8O$
Metanol	$CH_3OH$

## 2.1 PREPARACIÓN DEL POLI(CARBOXI) ESTIRENO

**2.1.1. Poli(acetil)estireno.** Para la preparación del poli(acetil)estireno, se tomó un balón de tres bocas de 250 mL y se mezcló 8g (0,0769 moles) de Cloruro de Aluminio ( $AlCl_3$ ) y 17 mL de Diclorometano ( $CH_2Cl_2$ ). Esta mezcla se mantuvo con agitación magnética de 300 rev/min, durante media hora a Temperatura Ambiente.

Seguidamente se adicionó gota a gota 2 mL de Anhídrido Acético ( $\text{CH}_3\text{CO}$ )<sub>2</sub>O y 10 mL de Diclorometano ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ), manteniendo la agitación constante. Después de dos horas se añadieron lentamente 4,2g (0,04 moles) de Poliestireno, (PS) disuelto en 30 ml de Diclorometano ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ). Esta mezcla se dejó reaccionar durante noventa minutos. Finalmente el producto obtenido presentó una coloración naranja y consistencia esponjosa. En la figura 5 se muestra el montaje experimental para la acilación del Poliestireno (PS).

**Figura 5. Montaje experimental para la acilación del poliestireno**



Para realizar la extracción del poli(acetil)estireno, se mezcló, en un vaso de precipitado de 400 ml, el producto obtenido con hielo finamente picado y 25 ml de Acido Clorhídrico concentrado ( $\text{HCl}$  [ ]); la mezcla se agitó hasta disolución completa con agitación mecánica.

Una vez disuelto el producto, la fase orgánica se separó por decantación y se lavó con una solución saturada de Bicarbonato de Sodio. El Diclorometano ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) presente, fue separado por destilación simple.<sup>1,61</sup>

El sólido blanco obtenido se secó mediante vacío a  $60\text{ }^\circ\text{C}$  durante 24 horas y se caracterizó por espectroscopia infrarroja (IR), calorimetría diferencial de barrido (DSC) y mediante pruebas de solubilidad en diversos solventes (ver tabla 2).

**2.1.2. Poli(carboxi)estireno.** En un balón de 1000 mL se mezcló 9g de poliestireno acetilado preparado en el primer paso, 200 mL de tolueno ( $\text{C}_7\text{H}_8$ ), 0,4g de cloruro de cetiltrimetilamonio y 20 mL de una solución acuosa al 5% de hipoclorito de sodio ( $\text{NaOCl}$ ). Se colocó a reflujo durante 24 horas a  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . La mezcla de reacción se mantuvo con agitación vigorosa durante todo el tiempo de reacción. Pasadas 24 horas se adicionó a través del condensador 20 mL de solución de hipoclorito de sodio ( $\text{NaOCl}$ ) y se dejó reaccionar por 24 horas más (figura 6). Al finalizar este tiempo, la mezcla se dejó enfriar a temperatura ambiente; una vez fría se le añadieron 30 g de bisulfito de sodio ( $\text{NaHSO}_3$ ) disueltos en 200 mL de agua. La mezcla fue agitada por 15 minutos a temperatura ambiente; seguidamente esta mezcla se acidificó con 200 mL de ácido clorhídrico 1M ( $\text{HCl}$ ).

La resultante capa orgánica fue lavada sucesivamente por tres tiempos con porciones de 200 mL de ácido clorhídrico 1M ( $\text{HCl}$ ) y tres tiempos con 200 mL de agua. La mezcla fue entonces evaporada hasta cercana sequedad, seguidamente se adicionó 100 mL de tetrahidrofurano (THF), y 1000 mL de metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) acidificado con 20 mL de ácido clorhídrico concentrado ( $\text{HCl}$  [ ]). El sólido blanco

---

<sup>61</sup> LAMPMAN, M. and PAVIA, D. Introduction to organic laboratory techniques. Editorial Saunders College Publishing. 1998; p. 241-245.

obtenido se filtro por succión y se colocó a secar bajo vacío a 60 °C , durante 24 horas.<sup>62,63</sup>

El poliestireno carboxilado se caracterizó por espectroscopía infrarroja (IR), DSC y mediante pruebas de solubilidad.

**Figura 6. Montaje experimental para la oxidación del poliestireno acetilado**



---

<sup>62</sup> ZHANG, G., LIU, L., WANG, H. and JIANG, M. "Preparation and Association Behavior of Diblock Copolymer Ionomers Based on Poly(styrene-b-ethylene-co-propylene)". En: Eur. Polym. J. Vol. 36 (2000); p. 61-68.

<sup>63</sup> LIU, L. and JIANG, M. "Synthesis of Novel Triblock Copolymers Containing Hydrogen-Bond Interaction Groups via Chemical Modification of Hydrogenated Poly(styrene-block-butadiene-block-styrene)". En: Macromolecules. Vol. 28 (1995); p. 8702-8704.

## 2.2 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE IONES METÁLICOS DE LA RESINA PSC (POLICARBOXIESTIRENO)

Iones como  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Cr}^{+6}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Ni}^{+2}$  y  $\text{Cu}^{+2}$  fueron escogidos para ser tratados con la resina de intercambio catiónico (policarboxiestireno) mediante el método batch, el cual es un proceso en discontinuo, en donde la resina, se mezcla en un recipiente con la solución que contiene los iones a intercambiar, posteriormente se filtra la resina y el líquido obtenido es cuantificado. La escogencia de los iones  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Cr}^{+6}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Ni}^{+2}$  y  $\text{Cu}^{+2}$  se hizo no solo por su fácil consecución, sino también porque hacen parte de la mayoría de lixiviados y aguas residuales de origen doméstico e industrial. Estos iones fueron obtenidos a partir de sustancias como  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , respectivamente. Cada una de estas sustancias se pesó, para obtener una solución de 100 mL de volumen y concentración de 100 ppm para cada patrón. La preparación de las soluciones utilizadas para cada uno de los iones fueron llevadas a un volumen de 100 mL para obtener una concentración de 0,5 ppm. El análisis de dichas soluciones se realizó por espectrofotometría de absorción atómica.

**2.2.1. Tratamiento en Discontinuo o Batch.** Se tomó un vaso de precipitado de 100 mL y se adicionó una mezcla de 8 g de resina de intercambio catiónico (policarboxiestireno) y 10 mL de solución patrón, la mezcla fue agitada constantemente con agitación mecánica, con un tiempo de retención de 2 horas. Pasado este tiempo se procedió a recuperar la muestra de resina de intercambio catiónico por filtración y se realizó el mismo procedimiento para cada uno de los iones. La cuantificación de los iones presentes en las soluciones eluyentes se realizó mediante curvas de calibración (ver anexo A). Las bandas de absorción representativas se obtuvieron a longitudes de onda ( $\lambda$ ) de 422.7 nm, 285.2 nm,

213.9 nm, 324.8 nm, 357.9 nm y 232 nm características de Ca, Mg, Zn, Cu, Cr y Ni respectivamente.<sup>29,30,64,65,66</sup>

- **Regeneración de la Resina Policarboxiestireno**

Una vez recuperada por filtración la resina, se procedió a su regeneración; transfiriéndola a un vaso de precipitado de 100 mL y mezclándola con una solución de 10 mL de ácido clorhídrico al 10% (HCl), con contacto resina-solución de 2 horas. Terminada la etapa de regeneración, se le aplicó nuevamente a la resina el mismo procedimiento de operación en discontinuo, es decir se tomó nuevamente un vaso de precipitado de 100 mL y se le adicionó una mezcla de 8 g de resina (regenerada) y 10 mL de solución patrón, con un tiempo de retención de 2 horas. Terminado este tiempo la resina fue recuperada por filtración y se realizó el mismo procedimiento para cada uno de los iones. Finalmente se procedió a medir la absorción de las soluciones eluyentes, registrando su absorbancia (ver anexo B).<sup>29,30,67</sup>

El cálculo del porcentaje de retención de iones se realizó mediante<sup>2</sup>

$$\% P_R = \left( 1 - \frac{C_f}{C_i} \right) \times 100$$

---

<sup>64</sup> Determinación de la Concentración Iónica Total del Agua Potable, Usando la Cromatografía de Intercambio Iónico [online]. Disponible en Internet: <[http://www.2.uca.es/grup\\_invest/corrosion/integrado/p4.pdf](http://www.2.uca.es/grup_invest/corrosion/integrado/p4.pdf)>.

<sup>65</sup> Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 14<sup>th</sup> edición. Editorial American Public Health Association. Estados Unidos. 1975.

<sup>66</sup> PERKIN ELMER CORPORATION. Analytical Methods for Atomic Absorption. Spectrophotometry. Estados Unidos. 1976.

<sup>67</sup> Obtención de Acido Tripolifosfórico [online]. Disponible en Internet: <[http://www.dec.fq.edu.uy/ecampos/catedra\\_inorganica/inorganica/practica9.pdf](http://www.dec.fq.edu.uy/ecampos/catedra_inorganica/inorganica/practica9.pdf)>

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de solubilidad obtenidos para el poliestireno de medio impacto reciclado; al mezclar 0,1 g del polímero con 3 mL de solvente, se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3. Solubilidad del poliestireno de medio impacto a 25°C**

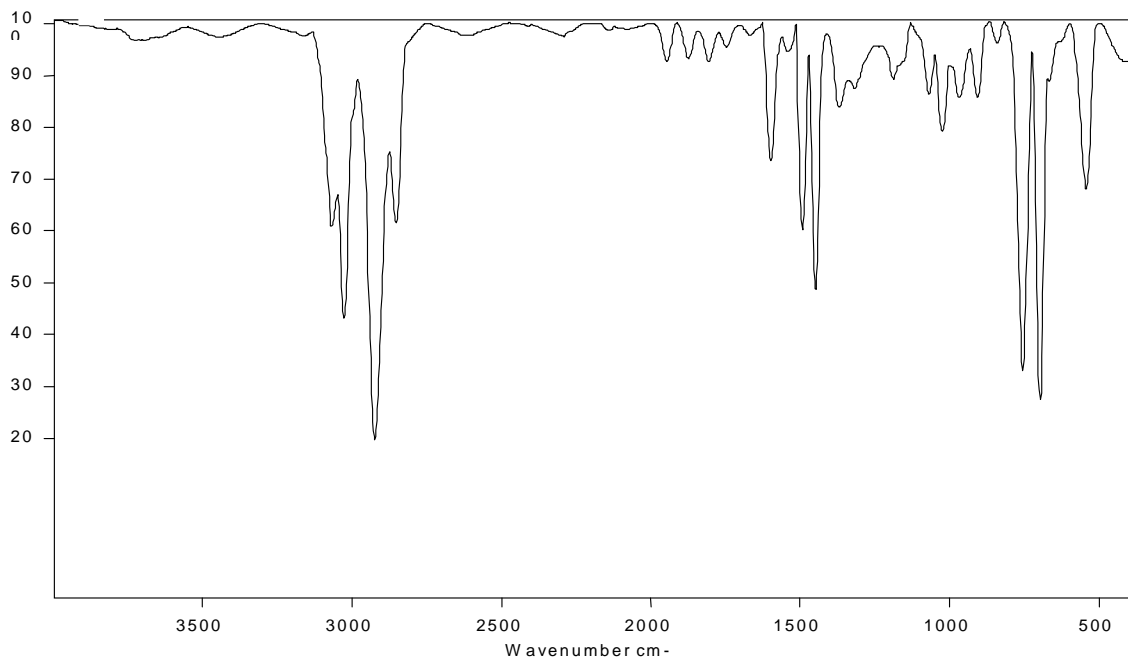
SOLVENTE	SOLUBILIDAD
Cloroformo	Soluble
Tolueno	Soluble
Hexano	Insoluble
Eter etílico	Insoluble
Benceno	Soluble
Xileno	Soluble
Acetona	Soluble
Formol	Insoluble
Diclorometano	Soluble
Ciclohexano	Soluble
Acetato de Etilo	Soluble
Tetrahidrofurano	Soluble

Se puede observar que la solubilidad del poliestireno es predominante en hidrocarburos aromáticos, debido a la rápida disolución del mismo en solventes como tolueno, xileno y benceno. También se evidencia que el poliestireno es fácilmente soluble en solventes clorados, puesto que éste fue soluble en cloroformo y diclorometano. Por otro lado, el poliestireno no presentó solubilidad en solventes como hexano, formol y eter etílico.

Al realizar el análisis del poliestireno por espectroscopía infrarroja (IR), se puede observar la presencia de una banda de absorción en  $3025\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al estiramiento C-H del anillo aromático, las bandas observadas en  $2919$  y  $2849\text{ cm}^{-1}$  se deben a la vibración asimétrica del enlace C-H de los grupos  $\text{CH}_2$  de la cadena

central del poliestireno. En  $1601$  y  $1492\text{ cm}^{-1}$  aparece la banda de absorción del enlace C-C del anillo. La figura 7 muestra el espectro IR correspondiente a el poliestireno proveniente de los vasos reciclados.

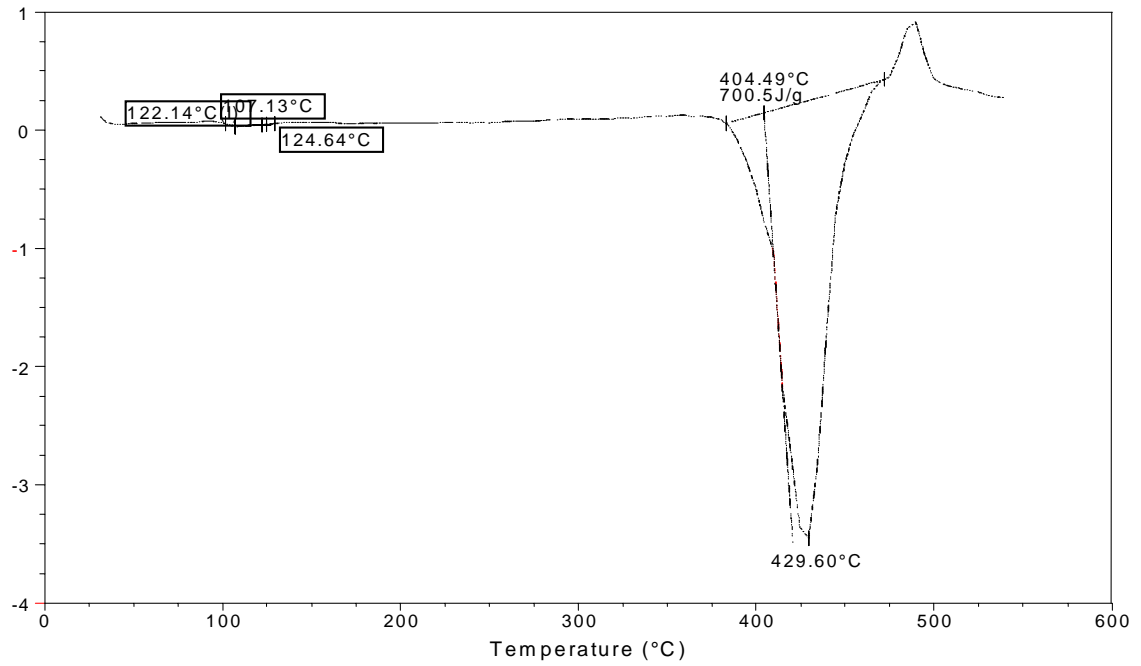
**Figura 7. Espectro IR del poliestireno obtenido a partir de vasos reciclados**



Asimismo, las bandas observadas en  $1451$  y  $1027\text{ cm}^{-1}$  corresponden respectivamente a las vibraciones de estiramiento y flexión de los enlaces C-H del anillo aromático. Finalmente, se observa la presencia de bandas a  $906$ ,  $747$  y  $694\text{ cm}^{-1}$  características de flexión de los enlaces C-H del anillo aromático fuera del plano.

En la figura 8. se representa el gráfico obtenido por DSC del poliestireno sometido a calentamiento en un intervalo de  $30$  a  $200^{\circ}\text{C}$  a una velocidad de  $10^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$  en una atmósfera inerte de nitrógeno.

**Figura 8. Representación gráfica obtenida por DSC del poliestireno proveniente de vasos reciclados**



En este ensayo de caracterización se observa que la temperatura de transición vítrea del poliestireno oscila alrededor de  $107^{\circ}\text{C}$ , siendo representada en el gráfico mediante un cambio de pendiente, en donde la temperatura del polímero permanece constante durante este intervalo.

### **3.1. PREPARACIÓN DEL POLI(CARBOXI)ESTIRENO**

Para la preparación de la resina de intercambio catiónico, primero se realizó la reacción de acilación de Friedel–Crafts al poliestireno de medio impacto proveniente de los vasos reciclados y luego se llevó a cabo la reacción de oxidación del producto acilado mediante la reacción de haloformo.

La elección del solvente adecuado, es decir, la elección de un solvente que disolviera al poliestireno pero que no interfiriera ni tampoco inhibiera la reacción de acilación de Friedel-Crafts, se llevo a cabo realizandole pruebas al polímero en diversos solventes (ver tabla 3).

Al realizar la acilación del poliestireno utilizando tetrahidrofurano como solvente, se encontró que no hubo funcionalización del polímero, esto pudo deberse a que como el tetrahidrofurano es un sistema heterociclo  $\pi$  excedente y debido a que en reacciones de acilación se utiliza como catalizador un acido de lewis, es decir un aceptor de pares de electrones; este preferirá coordinar con el tetrahidrofurano, que es rico electrónicamente, que con el anhídrido acetico (agente acilante). En solventes como el acetato de etilo, ocurrió lo mismo, no hubo acilación del polímero, lo cual pudo deberse a que el ácido de lewis ( $AlCl_3$ ), preferirá coordinarse con los oxígenos carbonílicos del acetato, debido a la densidad electrónica de estos.

Tolueno, xileno y benceno no se utilizaron como solventes, en la acilación del poliestireno, debido a que sus centros reactivos aromáticos son susceptibles a la acetilación. Se escogió el diclorometano como solvente, ya que este no reacciona ni inhibe la reacción de acilación además de que disuelve fácilmente al poliestireno.

En la tabla 4 y 5 aparecen registradas las cantidades de reactantes y el rendimiento de reacción (acilación -carboxilación)

**Tabla 4. Rendimiento de reacción (acilación), en gramos.**

prueba	Poliestireno	AlCl <sub>3</sub>	O(CH <sub>3</sub> CO) <sub>2</sub>	Poli(acetil)estireno	% rendimiento
I	1,08	2,89	1,5	1,41	93
II	1,42	3,59	2,37	1,86	93
III	3,99	8	2,16	5,32	95
IV	2,52	4,02	1,08	3,42	96
V	4,03	8	2,16	5,47	97
VI	2,53	4,73	1,08	3,45	97
VII	12,67	23,7	54	16,98	95

**Tabla 5. Rendimiento de reacción (carboxilación), en gramos.**

Prueba	Poli(acetil)estireno	NaOCl	Cloruro de cetiltrimetil amonio	Poli(carboxi)estireno	% rendimiento
I	4,5	1,5	0,2	4,36	95
II	4,5	1,5	0,2	4,32	95
III	9	3,0	0,4	8,78	96

Con el peso molecular del poliestireno (PM=168175g/mol)<sup>68</sup>, se halló las unidades referentes para conocer los porcentajes de rendimiento, en base a estos, nos permite conocer que tan eficiente son las reacciones de acilación y oxidación, y se puede observar que esta en un promedio entre 93-97 %, que es bueno de acuerdo a las condiciones utilizadas.

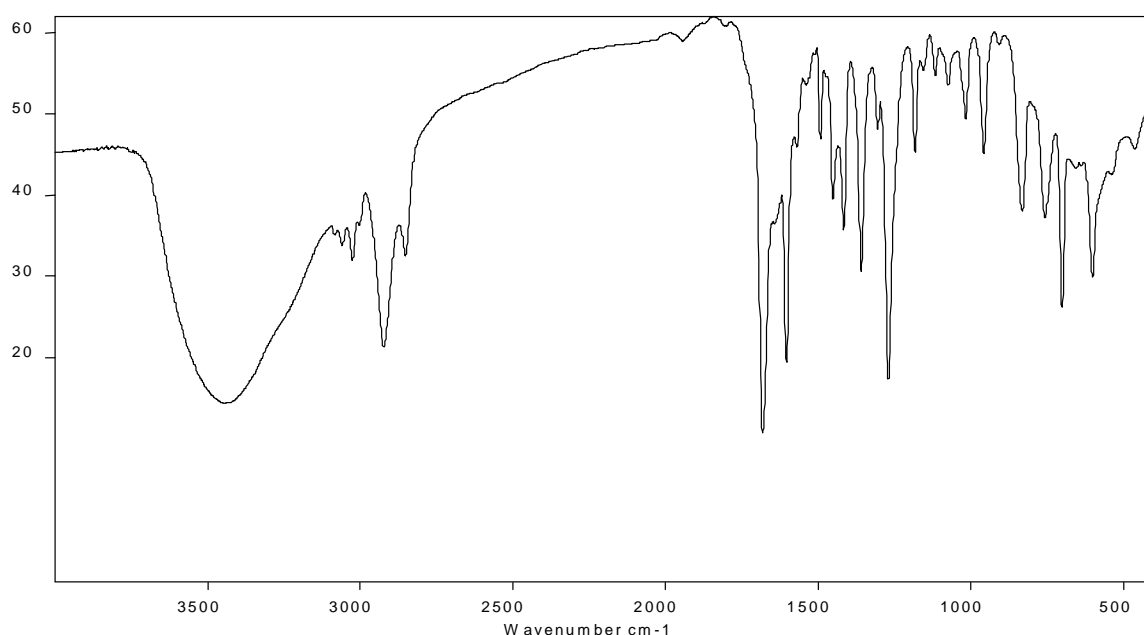
**3.1.1. Poli(acetil)estireno.** Siguiendo el método descrito para la preparación del poli(acetil)estireno se obtuvo un sólido de color blanco que fue caracterizado por espectroscopia infrarroja (IR), por calorimetría diferencial de barrido (DSC) y mediante pruebas de solubilidad.

Analizando el espectro IR del poliestireno y el poli(acetil)estireno se evidencia una variación en las vibraciones, puesto que, en éste último se presenta una banda

<sup>68</sup> VARÓN, O. Producción de Poliestireno de Alto Impacto. Tesis. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia (1973).

intensa en  $1680\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a la tensión del grupo carbonilo Ar-CO-R, además de la banda observada en  $830\text{ cm}^{-1}$  de flexión del enlace C-H fuera del plano correspondiente a un anillo aromático con sustitución en las posiciones 1,4. La figura 9. muestra el espectro IR del poli(acetil) estireno.

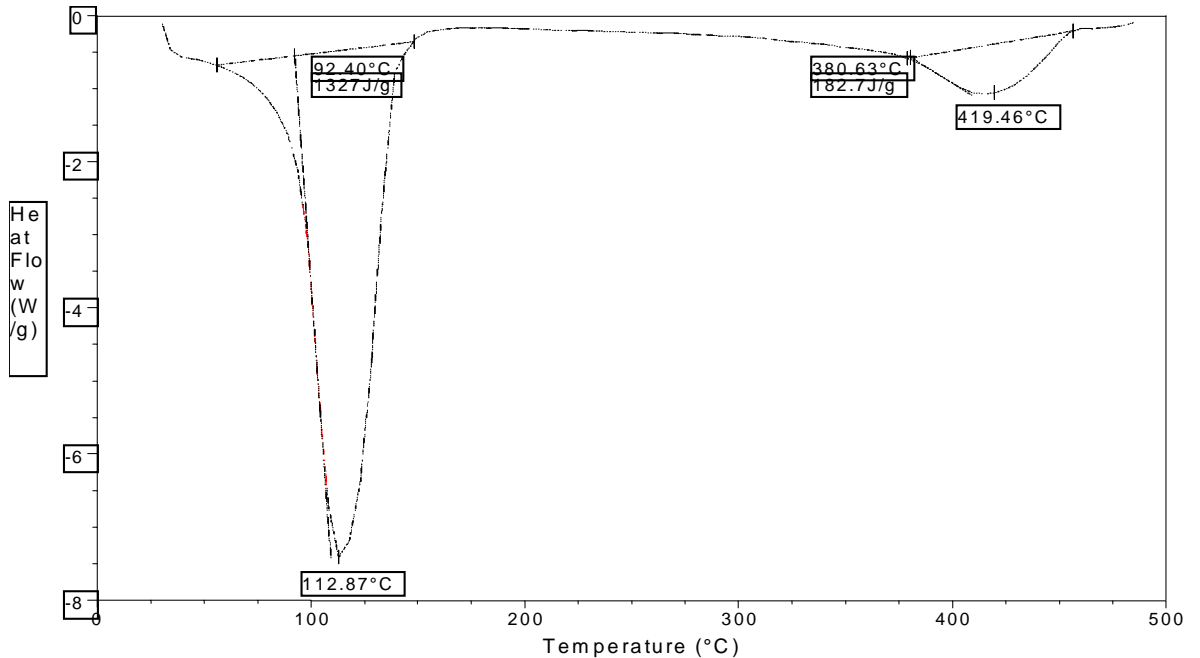
**Figura 9. Espectro IR del poliestireno acetilado (poliacetilestireno)**



La presencia en el espectro de las señales características de las vibraciones y tensiones del grupo carbonilo y de la sustitución del anillo aromático en la posición *para*, confirmaron la funcionalización del poliestireno, puesto que las bandas coincidieron con las reportadas por Xu y Hu<sup>1</sup>

En la figura 10. se representa el gráfico obtenido por DSC del poli(acetil)estireno sometido a calentamiento en un intervalo de 30 a  $250^{\circ}\text{C}$  a una velocidad de  $10^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$  en una atmósfera inerte de nitrógeno.

**Figura 10. Representación gráfica obtenida por DSC del poliestireno acetilado (poliacetilestireno)**



Este resultado muestra un descenso en la temperatura de transición vítrea del polímero acilado (poliacetilestireno) en relación a la temperatura del poliestireno sin modificar, puesto que la temperatura de transición vítrea obtenida para el poliestireno fue de 107<sup>0</sup>C, mientras que la temperatura del poli(acetil)estireno se mantuvo constante alrededor de los 92<sup>0</sup>C.

Esta diferencia en temperaturas indica que efectivamente se presentó un cambio en las propiedades del polímero debido a la incorporación de grupos acetilo a los anillos aromáticos; generándose así un incremento del tamaño molecular, que se manifiesta en un cambio de valor de la temperatura Tg del poliestireno acetilado, con respecto al valor de la temperatura de transición vítrea para el poliestireno sin funcionalizar.

El impedimento estérico producido por la incorporación de grupos colgantes a los anillos aromáticos del poliestireno, genera volúmenes libres, en donde las cadenas del polímero pueden moverse con más facilidad, lo cual repercute en la disminución de la temperatura de transición vítrea del polímero, debido a que cuanto más fácilmente puedan moverse las cadenas del polímero, menor calor habrá que suministrar.

En la tabla 6. se muestran los resultados obtenidos al realizar las pruebas de solubilidad del poli(acetil)estireno.

**Tabla 6. Solubilidad del poliestireno acetilado (poliacetilestireno) a 25<sup>0</sup>C**

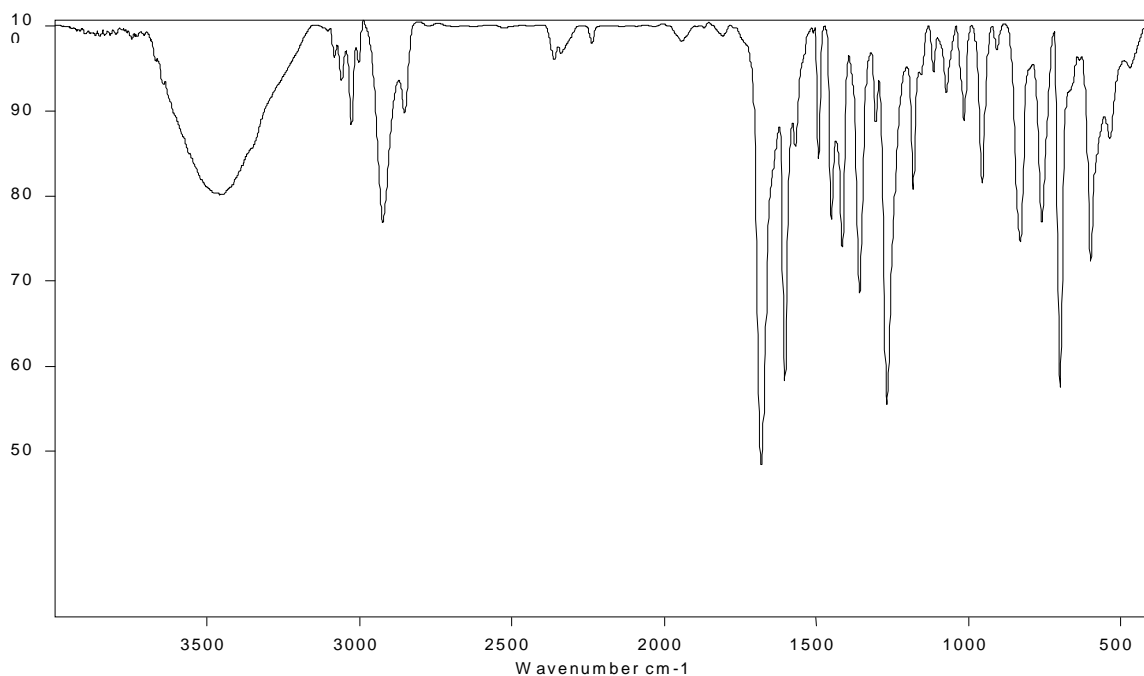
<b>SOLVENTE</b>	<b>SOLUBILIDAD</b>
Cloroformo	Parcialmente Soluble
Tolueno	Presenta hinchamiento
Hexano	Insoluble
Eter etílico	Insoluble
Benceno	Presenta hinchamiento
Xileno	Presenta hinchamiento
Acetona	Presenta hinchamiento
Formol	Insoluble
Diclorometano	Parcialmente Soluble
Ciclohexanol	Insoluble
Acetato de Etilo	Insoluble
Tetrahidrofurano	Presenta hinchamiento

Se puede observar que dichos solventes no disuelven totalmente al poli(acetil)estireno, puesto que, el polímero acilado presenta un comportamiento en su mayoría insoluble manifiesto no sólo mediante solubilidad parcial, sino también por el hinchamiento de sus cadenas. Al comparar estos resultados con los obtenidos para el poliestireno reciclado, se puede deducir que el polímero

funcionalizado posee cierto grado de entrecruzamiento, evidenciado no solo por el hinchamiento del polímero acilado sino también por la resistencia de éste, al ataque de varios solventes, en los cuales antes era soluble.

**3.1.2. Poli(carboxi)estireno.** Una vez caracterizado el poli(acetil)estireno se realizó la reacción de oxidación del mismo y se obtuvo un sólido de color blanco. Al realizar el análisis por espectroscopía infrarroja del poli(carboxi)estireno se observa la presencia de una banda intensa en  $1680\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a la tensión del grupo carbonilo. Una banda en  $830\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a la disustitución 1,4 en el anillo bencénico. En  $1415\text{ cm}^{-1}$  y  $3448\text{ cm}^{-1}$  aparecen respectivamente una banda de flexión y de tensión correspondientes a enlaces O-H de grupos carboxilos y en  $1305\text{ cm}^{-1}$  se encuentra la banda de vibración de tensión C-O correspondiente a enlaces C-O en ácidos carboxílicos. En la figura 11 se muestra el espectro IR del poli(carboxi)estireno.

**Figura 11. Espectro IR del poli(carboxi)estireno**



Estos resultados confirman la presencia de los grupos CO y O-H correspondientes a los ácidos carboxílicos, enlazados en la posición 1,4 de los anillos aromáticos. Los resultados obtenidos al realizar las pruebas de solubilidad al policarboxiestireno se registran en la tabla 7.

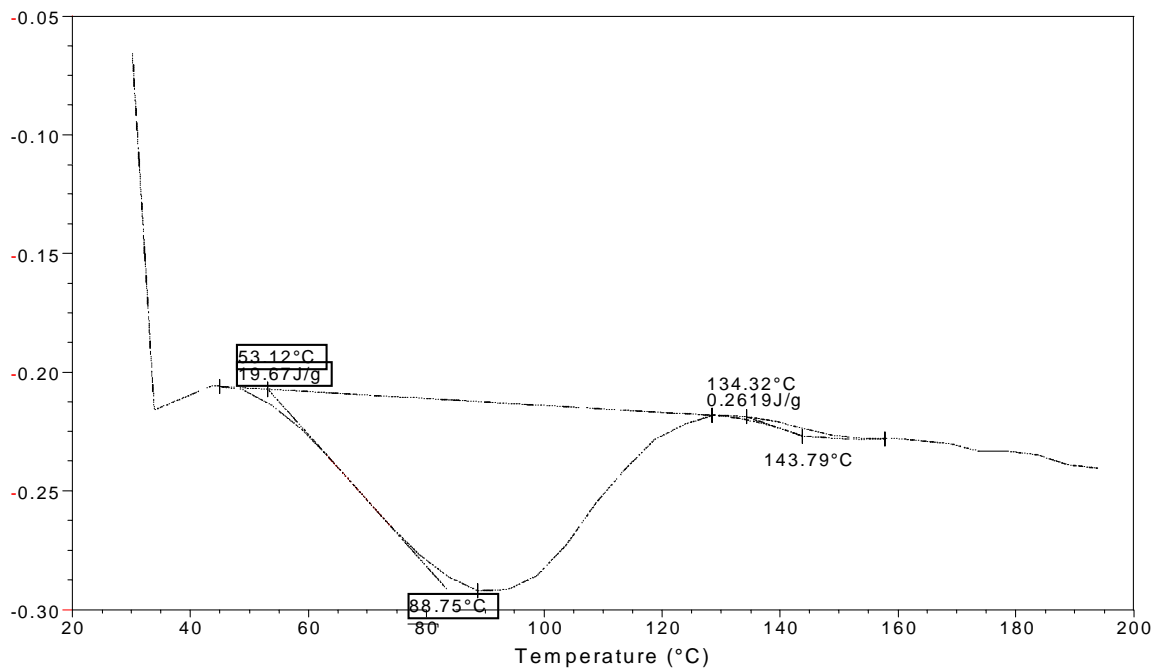
**Tabla 7. Solubilidad del poliestireno carboxilado (policarboxiestireno) a 25°C**

<b>SOLVENTE</b>	<b>SOLUBILIDAD</b>
Cloroformo	Parcialmente Soluble
Tolueno	Presenta menor hinchamiento que PSA
Hexano	Insoluble
Eter etílico	Insoluble
Benceno	Presenta menor hinchamiento que PSA
Xileno	Presenta menor hinchamiento que PSA
Acetona	Presenta menor hinchamiento que PSA
Formol	Insoluble
Diclorometano	Parcialmente Soluble
Ciclohexanol	Insoluble
Acetato de Etilo	Insoluble
Tetrahidrofurano	Presenta menor hinchamiento que PSA

Al igual que con el poli(acetil)estireno se puede observar que dichos solventes no disuelven totalmente al policarboxiestireno, puesto que, éste último presenta un comportamiento en su mayoría insoluble. Al comparar los resultados obtenidos al realizar las pruebas de solubilidad tanto al poliestireno carboxilado como al acetilado, se observa que el poliestireno carboxilado presenta menor hinchamiento en relación al poliestireno acetilado. Estas diferencias se deben a que la polaridad del grupo carboxilo es mayor que la polaridad del acetilo, por ende las fuerzas intermoleculares que se presentan debido a la presencia de grupos carboxilos son más fuertes y son del tipo dipolo-dipolo y eventualmente del tipo puentes de hidrógeno.

La figura 12 muestra el termograma del poli(carboxi)estireno, sometido a calentamiento en un intervalo de 30 a 200 °C a una velocidad de 10°C/minuto en una atmósfera inerte de nitrógeno.

**Figura 12. Representación gráfica obtenida por DSC del poliestireno carboxilado (policarboxiestireno)**



Se observa una variación en la temperatura de transición vítrea del polímero carboxilado en relación a la temperatura del poliestireno acilado, puesto que la temperatura de transición vítrea obtenida para el poliestireno acilado fue de 92°C aproximadamente, mientras que la temperatura del policarboxiestireno se mantuvo constante alrededor de los 88 °C.

La presencia de grupos voluminosos y flexibles a lo largo de las cadenas del polímero, como son los grupos carboxilo, favorecen la separación de las cadenas, aumentando así el volumen libre, debido al libre movimiento de los grupos, lo cual

conlleva a una disminución en la temperatura de transición vítrea  $T_g$  del polímero.

### 3.2 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE IONES METÁLICOS DE LA RESINA PSC (Policarboxiestireno)

Para la determinación del porcentaje de retención de iones metálicos del policarboxiestireno, se realizó el tratamiento de dicha resina con disoluciones iónicas de concentración conocida mediante la técnica de intercambio iónico en discontinuo o batch.

**3.2.1 Tratamiento en Discontinuo o Batch.** Siguiendo el método de intercambio iónico en discontinuo, para la determinación del porcentaje de retención de iones metálicos, fueron recogidos 10 mL de cada una de las soluciones eluyentes, para ser cuantificadas por espectrofotometría de absorción atómica.

En la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos por espectrofotometría de absorción atómica para la cuantificación de los iones metálicos  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Ni}^{+2}$  y  $\text{Cr}^{+6}$ . En el anexo A aparecen registradas las curvas de calibración.

**Tabla 8. Resultados obtenidos al realizar el análisis de iones por espectrofotometría de absorción atómica aplicando la técnica de intercambio iónico en discontinuo o batch**

Ion	$C_i$ (ppm)	$C_f$ (ppm)	$P_R$ (%)
$\text{Ca}^{+2}$	0,5	0,0019	99,6
$\text{Mg}^{+2}$	0,5	0,0005	99,9
$\text{Cu}^{+2}$	0,5	0,0041	99,18
$\text{Zn}^{+2}$	0,5	0,0053	98,94
$\text{Ni}^{+2}$	0,5	0,0038	99,24
$\text{Cr}^{+6}$	0,5	0,00063	99,87

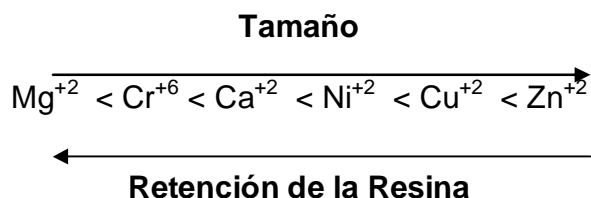
$C_i$  = Concentración inicial de la solución que se hizo pasar a través de la columna

$C_f$  = Concentración final de la solución eluida a través de la columna

$P_R$  = Porcentaje de retención de iones

Se puede observar que la resina policarboxiestireno presenta altos porcentajes de retención de los iones estudiados. Sin embargo se puede evidenciar cierta tendencia de selectividad debido a un descenso en el porcentaje de retención de los cationes con respecto a su tamaño. Esto se debe a que el grado de interacción electrostática entre la resina y los iones empleados para este estudio, no sólo depende de la carga relativa de los iones sino también de su tamaño iónico; puesto que se observa un comportamiento descendiente en el porcentaje de retención con relación al aumento en el tamaño como se muestra en el esquema 6.

**Esquema 6. Orden de Retención de la resina de intercambio catiónico policarboxiestireno con relación al tamaño de los iones.**



De acuerdo con estos resultados, la resina policarboxiestireno presenta mayor porcentaje de retención hacia los iones más pequeños. Esta afinidad hacia iones pequeños puede deberse a la presencia de un grupo polar como lo es el carboxílico; la presencia de estos grupos a lo largo de las cadenas poliméricas, aumenta las fuerzas intermoleculares, haciendo que las cadenas se unan y se facilite el entrecruzamiento, por esta razón la resina tiene afinidad hacia iones pequeños, además como la resina está entrecruzada, esto lo que hace es que la matriz hidrocarbonada sea menos elástica, los poros de la red de la resina sean

estrechos, los procesos de intercambio sean lentos y por ende la resina incrementó la tendencia de prohibir la entrada de grandes iones a su estructura.

- **Regeneración de la Resina Policarboxiestireno.** Para evaluar la utilidad de la resina, una vez regenerada, se utilizó nuevamente la técnica en discontinuo o batch. Las soluciones eluyentes obtenidas fueron analizadas mediante absorción atómica (ver tabla 9). En el anexo B aparecen registradas las curvas de calibración.

**Tabla 9. Resultados obtenidos al realizar el análisis de iones una vez regenerada la resina, por espectrofotometría de absorción atómica aplicando la técnica de intercambio iónico en discontinuo o batch.**

<b>Ion</b>	<b>C<sub>i</sub> (ppm)</b>	<b>C<sub>f</sub> (ppm)</b>	<b>P<sub>R</sub> (%)</b>
Ca <sup>+2</sup>	0,5	0,0106	97,9
Mg <sup>+2</sup>	0,5	0,0068	98,64
Cu <sup>+2</sup>	0,5	0,017	96,6
Zn <sup>+2</sup>	0,5	0,022	95,6
Ni <sup>+2</sup>	0,5	0,015	97,0
Cr <sup>+6</sup>	0,5	0,0089	98,22

Se puede observar, que el porcentaje de retención de iones, disminuye para todas las especies, debido a que no hubo regeneración completa de la resina. Sin embargo, estos valores continúan siendo altos, reafirmando así el poder intercambiador de la resina.

Estos resultados indican que la resina policarboxiestireno, además de presentar altos porcentajes de retención puede ser regenerada y una vez regenerada seguir presentando altos porcentajes de retención de los iones estudiados.

De acuerdo con estos resultados, la resina sería de gran utilidad en ablandamiento de aguas debido a su capacidad de intercambiar iones como el calcio y el magnesio, en tratamientos de efluentes industriales, para industrias tales como galvanoplastia y purificación de metales por su capacidad de intercambiar iones como el níquel y el zinc.

Es importante destacar que la producción de esta resina, es altamente limpia, ya que todos los residuos de estos procesos, pueden ser tratados o reutilizados. Por ejemplo, pueden ser recuperados, el ácido acético, hidróxido de aluminio y cloruro de acetilo, cloruro de sodio, cloroformo, entre otros.

#### 4. CONCLUSIONES

- La funcionalización realizada al poliestireno de medio impacto reciclado mediante acilación y posterior carboxilación, se llevó a cabo satisfactoriamente, con lo cual se logró el propósito principal de este estudio, obtener una resina de intercambio catiónico a partir de material reciclado.
- La resina de intercambio catiónico policarboxiestireno presentó altos porcentajes de retención, de los iones estudiados. Estos resultados, convierten a la resina policarboxiestireno en un instrumento útil en el tratamiento de aguas, como la eliminación de su dureza o en tratamiento de efluentes industriales, en donde estos iones están presentes.
- La funcionalización del poliestireno resulta ser una alternativa de reciclaje, puesto que permite el reprocesamiento de estos residuos, con la consecuente obtención de un producto de gran aplicabilidad, como lo son las resinas de intercambio catiónico que pueden ser utilizadas en tratamiento de aguas.
- Este estudio tiene el carácter de estudio exploratorio, que servirá de base para posteriores investigaciones con miras al mejoramiento del proceso a nivel industrial.

## 5. RECOMENDACIONES

- Analizar el comportamiento de la resina en presencia de otros cationes como por ejemplo el mercurio, plomo y cadmio entre otros, los cuales son altamente tóxicos y se encuentran presentes en las aguas, debido a contaminación minera.
- Realizar el seguimiento de intercambio, variando el tiempo de contacto resina – ión.
- Realizar el procedimiento de funcionalización por un método viable, buscando alternativas que permitan enfocar el proceso a nivel industrial.

## BIBLIOGRAFÍA

A COMMERCIAL WATERTECH COMPANY. Intercambio Iónico. Editorial Excel Water Technologies. 2002.

ANAPE Asociación Nacional de Poliestireno Expandido [online]. Madrid: junio 2001, no. 4 e- [eps@anape.es](mailto:eps@anape.es)

ANAPE Asociación Nacional de Poliestireno Expandido [online]. Madrid: septiembre 2000, no. 1 e- [eps@anape.es](mailto:eps@anape.es).

ANAPE Asociación Nacional de Poliestireno Expandido [online]. Madrid: octubre 2001, no. 5 e- [eps@anape.es](mailto:eps@anape.es).

Aplicaciones de las Resinas de Intercambio Iónico en la Industria [online]. Disponible en internet: <[http://www.gedar.com/html/familias/Detalles/repuestos/GEDAR%20\\_%20Resinas%20.pdf](http://www.gedar.com/html/familias/Detalles/repuestos/GEDAR%20_%20Resinas%20.pdf)>.

AVILLA J. Lo esencial acerca del intercambio iónico [online]. Disponible en internet: <<http://www.agualatinoamerica.com>>.

BÁEZ, D. y HERRERA, G. Reciclaje de poliestireno espumado para la obtención de resinas de intercambio iónico. Tesis. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia (2002).

BARRALES, J.M. Análisis y caracterización de materiales polímeros: Ensayos Preliminares. En: Revista de Plásticos Modernos No 478, Abril de 1996.

BARTOLI, G., Bosco, M., Marcantoni, E., MASSACCESI, M., Rinaldi, S. and SAMBRI, L.  $\text{LiClO}_4$  – acyl anhydrides complexes as powerful acylating reagents of aromatic compounds in solvent free conditions. En: J. Tetrahedron Lett. 2002, 43, 6331.

BELFER and GLOZMAN. Anion exchange resins prepared from polystyrene crosslinked via a Friedel –Crafts reaction. En: J. Appl. Polym. Sci., 24, 2147 (1979).

BISWAS and CHATTERJEE. Chemical modification of polystyrene. V. sulfonic acid resins from anhydride substituted polystyrene. En: J. Appl. Polym. Sci., 29, 829 (1984).

BLANCHETTE and COTMAN. Synthesis of polyfunctional polymers. [Contribution from the Research Department, Plastics Division, Monsanto Chemical Co.]. Diciembre 12, 1957.

BRUNET, E. La Química Orgánica Transparente. Lección 13. Sustitución electrofílica aromática [online]. Universidad Autónoma de Madrid. Disponible en Internet: <[http://www.uam.es/departamentos/ciencias/qorg/docencia\\_red/qo/l13/acilfc.html](http://www.uam.es/departamentos/ciencias/qorg/docencia_red/qo/l13/acilfc.html)>.

CAÑAMERO, A. El poliestireno. En: El Rincón de la Ciencia [online]. Febrero (2002), No. 15. Disponible en Internet: <<http://www.centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/Curiosid/Rc-38/RC-38.htm>>.

CARDOSO, L., Alves, W., GONZAGA, A., Aguiar, L. and ANDRADE, H. Friedel-Crafts acylation of anisole with acetic anhydride over silica-supported heteropolyphosphotungstic acid (HPW / SiO<sub>2</sub>). En: J. Mol. Catal. A: Chem. 209 (2004) 189-197.

CARPOV, A., Luca, C. and BARBOIU, V. On the reaction of linear and crosslinked polystyrene with 1,4 -bis(chloromethoxy)butane. En: J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed., 22, 269 (1984).

CHARLESBY, A. Atomic radiation and polymers. Editorial Pergamon press. Gran Bretaña. 1960; p. 284.

CONLEY, R. Espectroscopia Infrarroja. Editorial Alambra. Madrid. 1979.

Determinación de la Concentración Iónica Total del Agua Potable, Usando la Cromatografía de Intercambio Iónico [online]. Disponible en Internet: <[http://www.2.uca.es/grup\\_invest/corrosion/integrado/p4.pdf](http://www.2.uca.es/grup_invest/corrosion/integrado/p4.pdf)>.

DOW CHEMICAL COMPANY. Dowex. Ion Exchange. Editorial Dow. Michigan. 1964.

DUNKER, Alberto. Los aislantes térmicos y el poliestireno. En: Bit-La Revista Técnica de la Construcción. Chile: Mayo 2003.

ESPESO, J. y PEREZ, E. El poliestireno expandido, aplicaciones en la construcción. En: Revista de Plásticos Modernos. España: Diciembre 2002, vol. 84, No. 558.

FRECHET, J., DE SMET, M. and FARRALL, J. Application of phase-transfer catalysis to the chemical modification of cross-linked polystyrene resins. En: J. Am. Chem. Soc.,44, 1774 (1979).

GAONA, J. El Mercurio como Contaminante Global [online]. Disponible en Internet: <[http://www.tdx.cesca.es/TESIS\\_UAB/AVAILABLE/TDX-1025104-165935/xgm1de1.pdf](http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UAB/AVAILABLE/TDX-1025104-165935/xgm1de1.pdf)>.

GOLDING, B. Polymers and resins their chemistry and chemical engineering. Editorial Van Nostrand Company. New Jersey. 1959; p.14.

GONZALEZ y PEREZ. Intercambio Iónico [online]. Transferencia de Masa-Ing. Química-Universidad Nacional, Colombia. Disponible en internet: <<http://www.francisco346.tripod.com/>>.

GUTIERREZ, E. Post-treatment of municipal wastewater for feeding to boilers using ionic exchange. En: Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia. Vol. 28 (2005).

HELFFERICH, F. Ion exchange. Editorial Mc Graw Hill. Estados Unidos. 1962; p. 14.

Hemeroteca de Plásticos Universales [online]. Curiosidades cuando no hay madera. Junio 2003, no. 86. Disponible en internet: <<http://www.plasticosuniversales.com>>.

Hemeroteca de Plásticos Universales [online]. El Poliestireno en la industria del juguete. Noviembre (2003), No. 90. Disponible en internet: <<http://www.plasticosuniversales.com>>.

Hemeroteca de Plásticos Universales [online]. El Poliestireno expandido, al servicio de la cadena de frío. Mayo (2002), No. 76. Disponible en internet: <<http://www.plasticosuniversales.com>>.

Hemeroteca de Plásticos Universales [online]. El Poliestireno, en el envasado de manzanas, la mejor opción. Octubre (2003), No. 89. Disponible en internet: <<http://www.plasticosuniversales.com>>.

Hemeroteca de Plásticos Universales [online]. Las propiedades del poliestireno. Diciembre (2002), No. 81. Disponible en internet: <<http://www.plasticosuniversales.com>>.

Hemeroteca de Plásticos Universales [online]. Maquetas y displays en poliestireno. Marzo (2003), No. 83. Disponible en internet: <<http://www.plasticosuniversales.com>>.

Hemeroteca de Plásticos Universales [online]. Opciones para el tratamiento de residuos de EPS. Marzo 2002, no. 74. Disponible en internet: <<http://www.plasticosuniversales.com>>.

HORCAJADA, D. El poliestireno expandido, en el envase y embalaje: el material, sus aplicaciones y radiografía del sector en España y Europa. En: Revista de Plásticos Modernos. España: Febrero (2004), vol. 89, No. 584.

HORCAJADA, D. Envasado y embalado con poliestireno expandido. En: Revista de Plásticos Modernos. España: Marzo 2003, vol. 85, No. 561.

KHYM, J. Analytical ion-exchange procedures in chemistry and biology. Editorial Prentice Hall. New Jersey. 1974; p.2.

LAGUNA, O. y ARGANZA, R. Estudio para el aprovechamiento de los residuos de materiales plásticos. En: Revista de Plásticos Modernos. No. 270 (1978).

LAMPMAN, M. and PAVIA, D. Introduction to organic laboratory techniques. Editorial Saunders College Publishing. 1998; p. 241-245.

LENZ, R. Organic Chemistry of Synthetic High Polymers. Editorial Interscience Publishers. Estados Unidos. 1967; p. 45.

LIU, L. and JIANG, M. "Synthesis of Novel Triblock Copolymers Containing Hydrogen-Bond Interaction Groups via Chemical Modification of Hydrogenated Poly(styrene-block-butadiene-block-styrene)". En: Macromolecules. Vol. 28 (1995); p. 8702-8704.

LÓPEZ, A. Influencia del proceso de reciclado sobre las propiedades de los materiales compuestos obtenidos por inyección de poliestireno reforzado con fibras lignocelulósicas [online]. Universidad de Girona Madrid-España (2004). Disponible en Internet: <[http://www.tdx.cesca.es/TESIS\\_UdG/AVAILABLE/TDX-0924104-125154//tals3de7.pdf](http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UdG/AVAILABLE/TDX-0924104-125154//tals3de7.pdf)>.

LÓPEZ, C. El poliestireno expandido, en la construcción. En: Revista de Plásticos Modernos. España: Febrero 2004, vol. 87, No. 572.

MARTINELLI, M., FROIMOWICZ, P., CALDERON, M. and STRUMIA, M. Materiales poliméricos funcionalizados. En: Revista Iberoamericana de Polímeros [online]. Córdoba, Argentina. Diciembre 2003, vol 4. Disponible en Internet: <<http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/DICO3/Strumial.pdf>>.

MARTINEZ, S. Polímeros. Universidad Industrial de Santander. Editorial Publicaciones UIS. Bucaramanga. 2001; p.32-33.

MEYSENBURG, C. Tecnología de plásticos para ingenieros. Ediciones Urmo. España. 1967; p.20-22.

MORRISON, R. Química Orgánica. Editorial Addison Wesley. USA. 1996.

NEMES, S., Borbély, J., BORDA, J. and KELEN, T. Highly functionalized polystyrene by direct metalation-carboxylation. Polymer Bulletin [online]. Vol.27 (1991). Disponible en Internet:<[http://www.springerlink.com/\(hvub2i41jhdqmbjz04lx45\)/app/home/contribution.asp?referrer=parent&backto=issue,2,18;journal,158,335;linkingpublicationresults,1:102513,1](http://www.springerlink.com/(hvub2i41jhdqmbjz04lx45)/app/home/contribution.asp?referrer=parent&backto=issue,2,18;journal,158,335;linkingpublicationresults,1:102513,1)>.

ODIAN, G. Principles of Polymerization. Editorial Mc Graw Hill. Estados Unidos. 1970; p. 30.

PERKIN ELMER CORPORATION. Analytical Methods for Atomic Absorption. Spectrophotometry. Estados Unidos. 1976.

POLIESTIRENO. Enciclopedia virtual wikipedia. Disponible en internet: <[http://www.es.Wikipedia.org/wiki/Grado\\_de\\_polimerizaci%C3%B3n](http://www.es.Wikipedia.org/wiki/Grado_de_polimerizaci%C3%B3n)>.

POLYSTYRENE. Departamento de Ciencia de Polimeros. Universidad del Sur de Mississippi. Disponible en Internet: <<http://www.pslc.ws/spanish/styrene.htm>>.

RIVERA, E. Obtención de ácido benzoico. Laboratorio de Química II. Proyecto final, experimento VII. Modificado Febrero (2004); p. 49-55. Disponible en Internet: <<http://www.organica1.pquim.unam.mx/organica/qo2lab/manual/>>

RUBIN, I. Materiales plásticos, propiedades y aplicaciones. Editorial Limusa. México. 1998; p. 131-169.

SEN, M. Síntesis of middle-chain carboxyl and primary amine-functionalized polystyrenes using anionic polymerization techniques. En: J. Polym. Sci. Polym. Chem. (2005)

SEYMOUR, R. Introducción a la química de los polímeros. Editorial Reverté. Barcelona. 1995; p. 325.

SORENSEN, W. and CAMPBELL, T. Preparative methods of polymer chemistry. Editorial Interscience Publishers. New York. 1961; p.52-54.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 14<sup>th</sup> edición. Editorial American Public Health Association. Estados Unidos. 1975.

STRUMIA, M., ALVAREZ, C., GRASSINO, S. y HALABI, A. Materiales poliméricos funcionalizados: síntesis, caracterización y estudios de sus propiedades de aplicación [online]. Disponible en internet: <<http://www.fcq.unc.edu.ar/site/departamentos/d%20qo%2010.htm>>.

SUN, G., CHEN, T. and WORLEY, S. A novel biocidal styrenetriazinedione polymer. En: J. Polym. Sci., 37,3753 (1996).

Tecnociencia Aplicaciones de los Intercambiadores Iónicos en la industria [online]. Diciembre 2001. Disponible en Internet: <[http://www.tecnociencia.es/especiales/intercambio\\_ionico/aplicaciones.htm](http://www.tecnociencia.es/especiales/intercambio_ionico/aplicaciones.htm)>.

VARÓN, O. Producción de Poliestireno de Alto Impacto. Tesis. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia (1973).

XU and HU. New synthetic route for weak base anion exchangers based on crosslinked polystyrene. En: J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem., 36, 2151 (1998).

YADAV, G. y BHAGAT, R. Experimental and theoretical análisis of Friedel-Crafts acylation of thioanisole to 4-(methylthio)acetophenone using solid acids. En: J. Mol. Catal. A: Chem. 235 (2005) 98-107.

ZHANG, G., LIU, L., WANG, H. and JIANG, M. "Preparation and Association Behavior of Diblock Copolymer Ionomers Based on Poly(styrene-b-ethylene-co-propylene)". En: Eur. Polym. J. Vol. 36 (2000); p. 61-68.

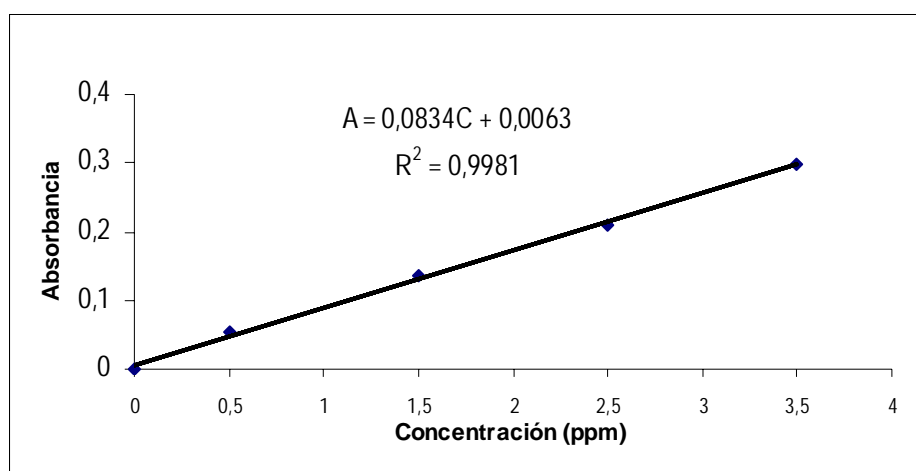
ZERQUERA, H. Resinas de intercambio iónico para prolongar la liberación de los fármacos. Revista Cubana de Farmacia [online]. Vol. 34 (2000); p.196-206. Disponible en Internet: <[http://www.scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttex&pid=S00347515200000300007&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttex&pid=S00347515200000300007&lng=es&nrm=iso)>.

# **ANEXOS**

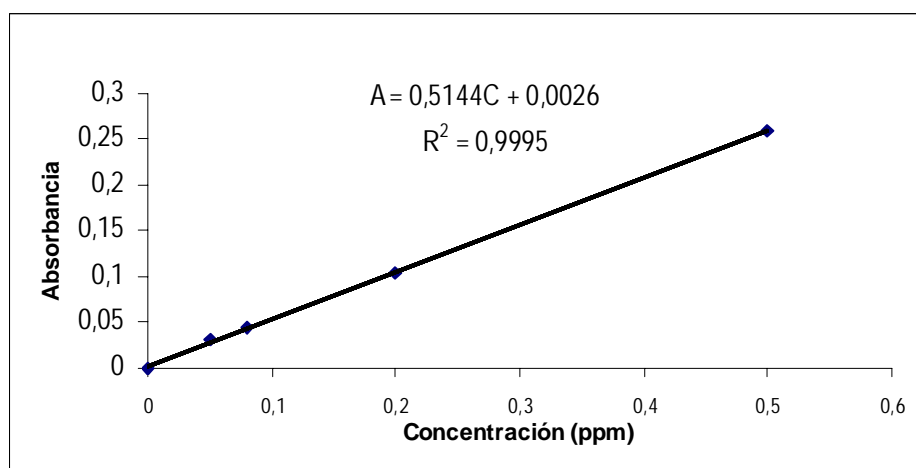
## ANEXO A

### OPERACIÓN EN DISCONTINUO O BATCH

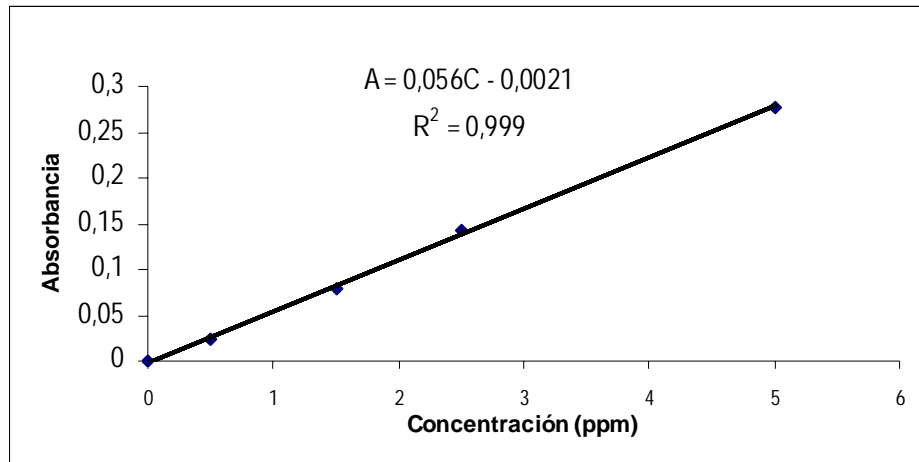
Curva de calibración obtenida mediante absorción atómica para la cuantificación de iones Calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ )



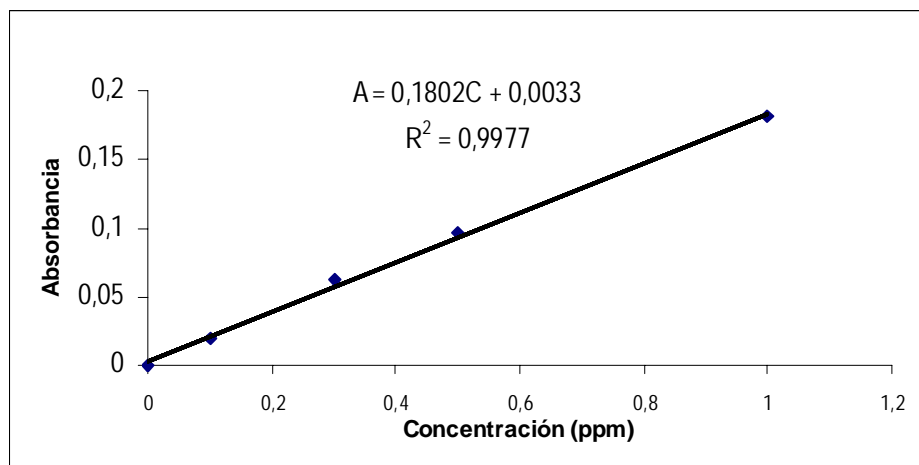
Curva de calibración obtenida mediante absorción atómica para la cuantificación de iones Magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ )



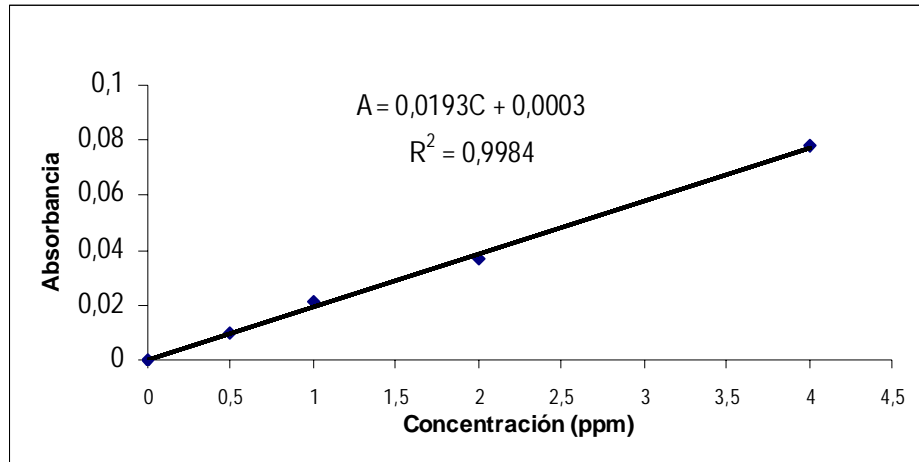
Curva de calibración obtenida mediante absorción atómica para la cuantificación de iones Cobre ( $\text{Cu}^{+2}$ )



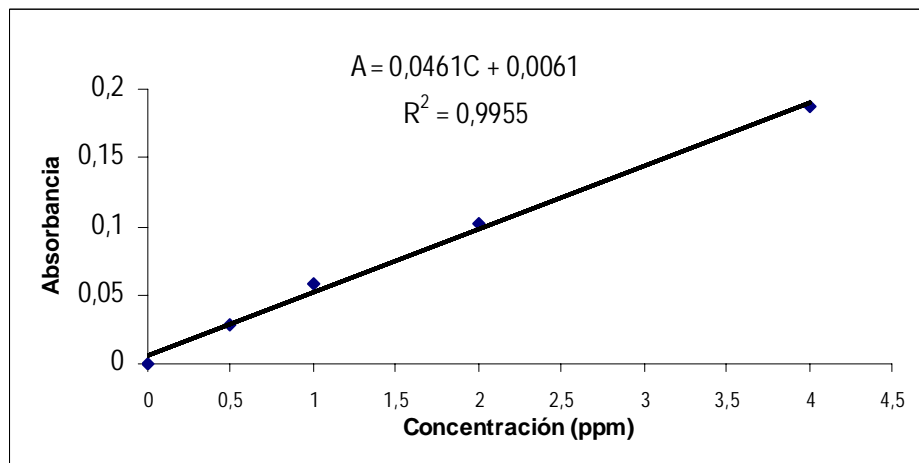
Curva de calibración obtenida mediante absorción atómica para la cuantificación de iones Zinc ( $Zn^{+2}$ )



Curva de calibración obtenida mediante absorción atómica para la cuantificación de iones Niquel ( $Ni^{+2}$ )



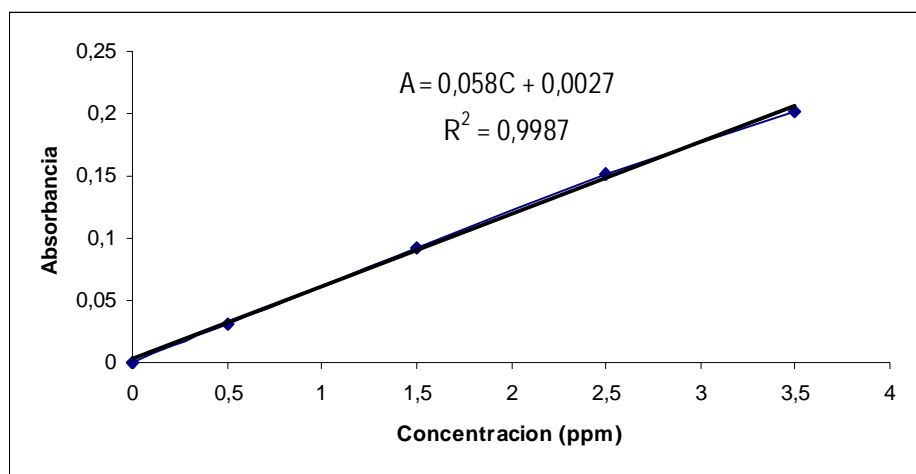
Curva de calibración obtenida mediante absorción atómica para la cuantificación de iones Cromo ( $\text{Cr}^{+6}$ )



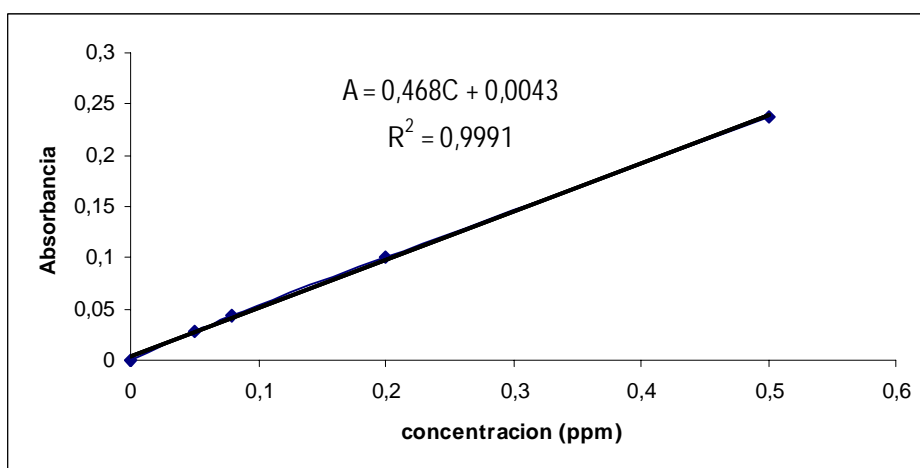
## ANEXO B

### OPERACIÓN EN DISCONTINUO UNA VEZ REGENERADA LA RESINA (POLICARBOXIESTIRENO)

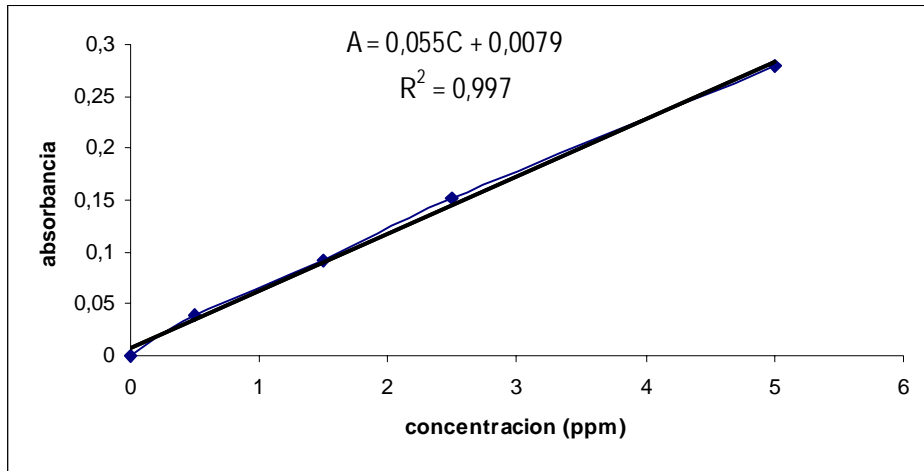
Curva de calibración obtenida mediante absorción atómica para la cuantificación de iones Calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ )



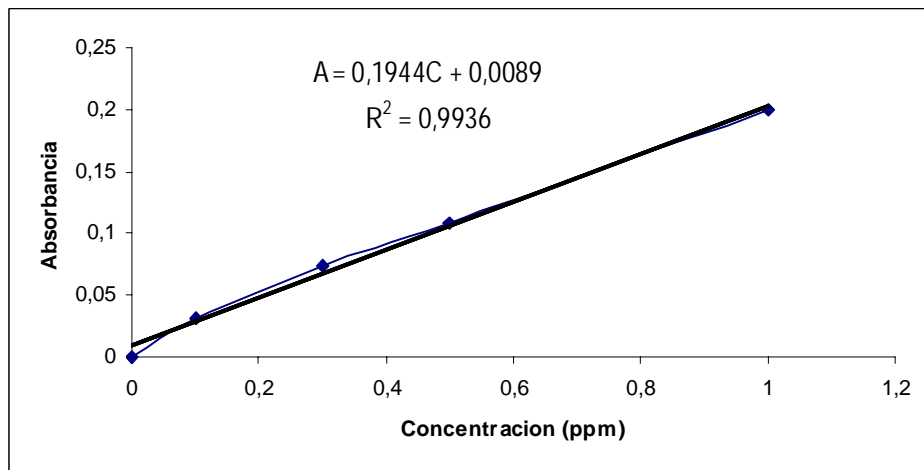
Curva de calibración obtenida mediante absorción atómica para la cuantificación de iones Magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ )



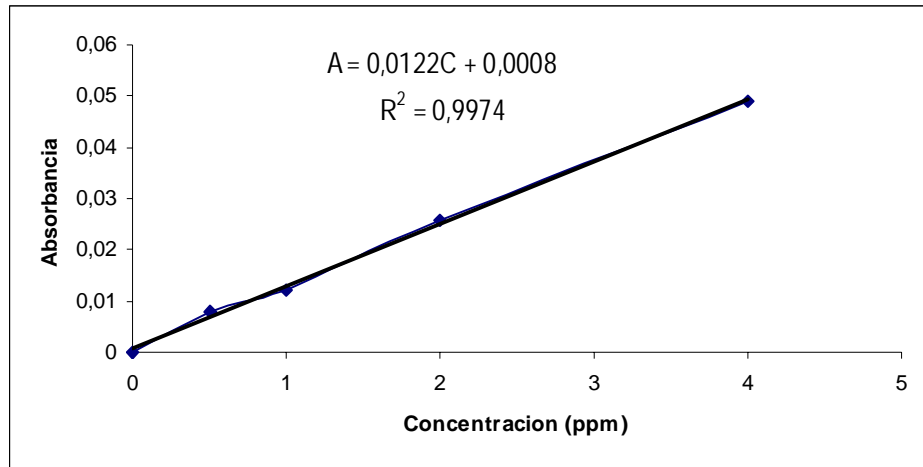
Curva de calibración obtenida mediante absorción atómica para la cuantificación de iones Cobre ( $\text{Cu}^{+2}$ )



Curva de calibración obtenida mediante absorción atómica para la cuantificación de iones Zinc ( $Zn^{+2}$ )



Curva de calibración obtenida mediante absorción atómica para la cuantificación de iones Niquel ( $Ni^{+2}$ )



Curva de calibración obtenida mediante absorción atómica para la cuantificación de iones Cromo ( $\text{Cr}^{+6}$ )

