

Reducción de pentaclorofenol en el agua cruda del río Cauca mediante adsorción con carbón activado en procesos de potabilización

Pentachlorophenol reduction in raw Cauca river water through activated carbon adsorption in water purification

Patricia Torres¹, Camilo Cruz², Magally González³, Héctor Mario Gutiérrez⁴, Luz Edith Barba⁵, Juan Carlos Escobar⁶ y Luis Germán Delgado⁷

RESUMEN

La reducción del riesgo químico del agua cruda del río Cauca causado por la presencia de pentaclorofenol y materia orgánica (color real, absorbancia UV₂₅₄) se evaluó a escala de laboratorio mediante tres secuencias de tratamiento: adsorción con carbón activado en polvo (CAP); adsorción-coagulación y adsorción-desinfección-coagulación. Los resultados mostraron que el CAP es un compuesto adecuado para la remoción del pentaclorofenol y que su uso conjunto con el coagulante (sulfato de aluminio) mejora significativamente la remoción tanto del compuesto fenólico como de la materia orgánica, promoviendo la coagulación mejorada; sin embargo, la secuencia de tratamiento más eficiente fue la de adsorción-desinfección-coagulación, alcanzándose niveles de pentaclorofenol inferiores al límite de detección (1,56 µg/l), valor menor que el límite de 9 µg/l establecido por la OMS debido al efecto del cloro sobre el CAP.

Palabras clave: adsorción, carbón activado, coagulación mejorada, materia orgánica natural, pentaclorofenol, riesgo químico.

ABSTRACT

Reducing chemical risk in raw water from the River Cauca (caused by the presence of pentachlorophenol and organic matter (real color, UV₂₅₄ absorbance)) was evaluated at bench scale by using three treatment sequences: adsorption with powdered activated coal (PAC); adsorption – coagulation; and, adsorption – disinfection – coagulation. The results showed that although PAC is appropriate for pentachlorophenol removal, and its use together with the coagulant (aluminium sulphate) significantly improved phenolic compound and organic matter removal (promoting enhanced coagulation), the most efficient treatment sequence was adsorption – disinfection – coagulation, achieving minor pentachlorophenol levels than detection (1.56 µg/l) and WHO limits (9 µg/l) due to the effect of chloride on PAC.

Keywords: powdered activated coal, adsorption, chemical risk, enhanced coagulation, natural organic matter, pentachlorophenol.

Recibido: mayo 6 de 2008

Aceptado: octubre 27 de 2008

Introducción

El agua es un líquido esencial para la vida y el desarrollo humano, razón por la cual su calidad debe ser lo más adecuada posible considerando primordialmente la protección de la salud pública; la calidad de las fuentes superficiales se ha venido deteriorando por los usos a los que son sometidas, haciendo que aparezcan compuestos que además de representar un riesgo a la salud también afectan propiedades organolépticas como color, olor y sabor causando rechazo por parte del consumidor, quien la considera como agua no “segura”. Dentro de los contaminantes químicos se encuentran los compuestos fenólicos, que son un grupo de especial interés que constituyen la unidad estructural básica de una va-

riedad de compuestos orgánicos sintéticos como algunos plaguicidas (Brasquet y Le Cloirec, 1997; Dabrowski *et al.*, 2005).

El pentaclorofenol es un compuesto de gran interés desde el punto de vista del riesgo sanitario que ocasiona efectos adversos en la salud, afectando órganos como hígado, riñones, sangre, pulmones y los sistemas nervioso, inmunitario y digestivo (ATSDR, 2001); además, es clasificado como un agente posiblemente carcinogénico en humanos (IPCS, 1991). El fenol y el pentaclorofenol presentan niveles umbrales para sabor y olor de 100 µg/L; para agua potable se recomiendan valores máximos de 1 y 9 µg/L, respectivamente (OMS, 2004).

Con el fin de suministrar agua de calidad aceptable surgieron procesos para el tratamiento del agua en varias modalidades, siendo

¹ Ingeniera sanitaria, Universidad del Valle, Colombia. M.Sc. y Ph.D., Universidad Sao Paulo, Brasil. Profesora asociada, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Colombia. patolo@univalle.edu.co

² Ingeniero sanitario, Universidad del Valle, Colombia. M.Sc., Universidad Sao Paulo, Brasil. Profesor asociado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Colombia. camecruz@univalle.edu.co

³ Ingeniera sanitaria, Universidad del Valle, Colombia. Joven investigadora, Colciencias. magui125@hotmail.com

⁴ Químico. M.Sc., Universidad del Valle, Colombia. Profesor auxiliar, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Colombia. hegutier@univalle.edu.co

⁵ Químico. M.Sc., Universidad del Valle, Colombia. Profesora titular, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Colombia. luebarba@univalle.edu.co

⁶ Ingeniero sanitario, Universidad del Valle, Colombia. M.Sc. y Ph.D., Universidad Sao Paulo, Brasil. Vinculado a EMCALI EICE ESP, Cali, Colombia. jcscobar@emcali.com.co

⁷ Ingeniero sanitario, Universidad del Valle, Colombia. Vinculado a EMCALI EICE EPS, Cali, Colombia. lgdelgado@emcali.com.co

el tratamiento convencional o en ciclo completo conformado por las etapas de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección, el más ampliamente empleado. Para reducir el riesgo químico y mitigar la generación de olor y sabor desagradables en el agua, se emplean tratamientos como el proceso de adsorción, que consiste en la acumulación de una sustancia entre dos fases líquido/sólido; la sustancia a remover se denomina adsorbato y aquella sobre la cual tiene lugar la adsorción es el adsorbente. Algunos de los adsorbentes empleados en el tratamiento del agua son: resinas de intercambio iónico, resinas adsorbentes, óxidos metálicos, hidróxidos, carbonatos y carbón activado, siendo este último el más ampliamente utilizado por su fácil manejo y eficiencia (Miyake *et al.*, 2003).

Numerosas investigaciones y aplicaciones prácticas en el tratamiento del agua han demostrado la efectividad del carbón activado para adsorber sustancias productoras de olor y sabor como metabolitos de la producción algal y fenoles (Adbul y Campbell, 1996; Cook *et al.*, 2001), con riesgo para la salud humana por tener efectos tóxicos y mutagénicos como metales pesados (cadmio, cromo, plata, mercurio) y plaguicidas (ametrin, aldicarb, dinoseb, diuron, triazina, simazina, cyanazina) (Adams y Watson, 1996; Ayranci y Hoda, 2005; Bailey *et al.*, 1999; Bassar, 2006; Nemr *et al.*, 2008). Se ha investigado la remoción de derivados del petróleo, sustancias activas al azul de metileno, detergentes y sustancias halogenadas (Ponche, 2005).

La acción conjunta del proceso de adsorción y los procesos del tratamiento convencional, especialmente la coagulación, además de garantizar la remoción de partículas en suspensión y turbiedad mejoran la remoción de materia orgánica natural (MON) y de compuestos fenólicos; la combinación de los procesos de adsorción y coagulación se denomina *coagulación mejorada*, con la cual se obtienen eficiencias de reducción de compuestos fenólicos hasta del 100%, color entre el 81% – 89% y absorbancia UV_{254} del 99% (Tomaszewska *et al.*, 2004; Yan *et al.*, 2007).

Con base en estas investigaciones, y considerando que el título B del Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico – RAS (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000) establece el uso del carbón activado sumado al tratamiento en ciclo completo para una fuente con características físico-químicas y microbiológicas como las del río Cauca. La empresa de servicios públicos responsable del suministro de agua potable de la ciudad de Cali (Emcali EICE ESP) ha venido aplicando este producto desde hace varios años para garantizar la reducción de riesgo químico en el agua de consumo de la población caleña.

En este estudio se evaluó el efecto de la aplicación de carbón activado en polvo - CAP sobre la reducción de compuestos fenólicos asociados a la producción de olor y sabor, para el agua cruda del río Cauca, el cual abastece aproximadamente al 80% de la población de la ciudad de Cali y es potabilizada en las plantas Río Cauca y Puerto Mallarino. Se evaluaron tres modalidades de aplicación del CAP: solamente adsorción; adsorción seguida de coagulación (proceso seguido en la planta Río Cauca) y adsorción seguida de precloración y coagulación (proceso seguido en la planta Puerto Mallarino).

Desarrollo experimental

Los ensayos fueron realizados a escala de laboratorio y por duplicado, usando agua cruda del Río Cauca, la cual fue caracterizada en términos de las variables temperatura (°C), pH (unidades), turbiedad (UNT), color verdadero (UPC) y absorbancia UV_{254} .

Adsorbente. Se empleó carbón activado en polvo - CAP grado comercial con 99,5 del peso pasando por el tamiz 100 US estándar, un contenido de cenizas del 5%, número de yodo > 800 y porcentaje de humedad de 8% máximo, el cual es actualmente utilizado en las plantas de potabilización de la ciudad de Cali en una dosis de 1,5 mg/l.

Adsorbato. El patrón de pentaclorofenol empleado era grado analítico con una solubilidad en fase acuosa de 0,001 g/100 ml a 20 °C; este fue adicionado al agua cruda con el objetivo de alcanzar una concentración cercana a los 15 µg/L. La determinación de esta sustancia se efectuó mediante extracción en fase sólida y se cuantificó usando la técnica de cromatografía de gases según el método 5530C (APHA *et al.*, 2005), con límites de detección de 1,56 µg/L y de cuantificación de 3,9 µg/L.

Coagulante. Teniendo en cuenta que el coagulante usado en las plantas de potabilización de la ciudad de Cali es el sulfato de aluminio líquido grado comercial tipo B, este fue el coagulante empleado en los ensayos; la solución concentrada estaba entre el 48 al 50% y almacenada a temperatura ambiente. Previo a la realización de cada ensayo, se prepararon soluciones con una concentración de 2%, que es la concentración de aplicación del coagulante en escala real.

Desinfectante. Para la simulación de la precloración que se lleva a cabo antes de la coagulación en la planta Puerto Mallarino, se empleó como fuente de cloro una solución preparada a partir de hipoclorito de sodio.

Condiciones experimentales

Los ensayos se realizaron en equipos de jarras Phipps and Birds con un volumen de muestra de dos litros en cada jarra. Se evaluaron tres condiciones: aplicación solamente de carbón activado en polvo – CAP (adsorción); simulación de la secuencia adsorción–coagulación (CAP+Al₂SO₄) y simulación de la secuencia adsorción–precloración–coagulación (CAP+Cl₂+Al₂SO₄). Las dos últimas secuencias simulaban el tratamiento que se adelanta en las plantas de potabilización Río Cauca y Puerto Mallarino, de la ciudad de Cali.

La duración de los ensayos (tiempo de contacto) fue 150 minutos, de acuerdo con el tiempo de equilibrio definido previamente (Cruz *et al.*, 2007), cuya metodología se determinó según Najm (1996), Shen y Chaung (1998) y Duan *et al.* (2003). La Tabla 1 muestra las condiciones empleadas para la simulación de los procesos. Las dosis de coagulante y desinfectante utilizadas, corresponden a las aplicadas en las plantas de potabilización al momento de la toma de la muestra de agua cruda.

Una vez adicionado el CAP, se tomaron muestras cada media hora hasta finalizar el tiempo de contacto establecido, y en el ensayo donde se simuló la secuencia de aplicación de los productos aplicados en las plantas se tomaron muestras adicionales previa adición de cada uno de los mismos. Todas las muestras fueron filtradas y se les midió color real, absorbancia UV_{254} y pentaclorofenol.

Resultados

Los resultados de la caracterización inicial del agua cruda se presentan en la Tabla 2.

Las muestras usadas en los ensayos son similares para todas las variables, permitiendo considerar que representan una calidad de agua cruda con valores típicos del río Cauca en condiciones de verano, y la adición de pentaclorofenol no alteró las características fi-

sico-químicas del agua, solamente incrementó su concentración. El color aparente y real presentan alta correlación con la presencia de MON particulada y disuelta y con indicadores de contaminación microbiológica; teniendo en cuenta su relación con la adsorbancia UV₂₅₄ (Ratnaweera et al., 1999; Boualam et al., 2002; Archer y Singer, 2006), se considera importante usar estas variables para el control de procesos de potabilización dada su simplicidad y bajo costo de análisis. La Tabla 3 muestra los resultados de los ensayos de adsorción: adsorción (S1), adsorción-coagulación (S2) y adsorción-precloración-coagulación (S3).

Tabla 1. Condiciones empleadas para la simulación de los procesos

Etapa de Tratamiento	Dosis (mg/l)	Velocidad de rotación (RPM)	Tiempo de contacto (min)	
			Parcial	Acumulado
Secuencia 1: Adsorción (CAP)				
Adsorción	1.5	40	150	150
Secuencia 2: Adsorción-Coagulación (CAP+Al₂SO₄)				
Adsorción	1.5	40	36	36
Coagulación	24	300	1	37
Posterior a aplicación de químicos	-	20	113	150
Secuencia 3: Adsorción-Precloración-Coagulación (CAP+Cl₂+Al₂SO₄)				
Adsorción	1.5	40	8	8
Precloración	6.9	100	3	11
Coagulación	24	300	1	12
Posterior a aplicación de químicos	-	20	138	150

Tabla 2. Caracterización inicial del agua cruda

Variable	Agua Cruda		Agua con Pentaclorofenol	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Temperatura (°C)	24.2	24.0	24.7	24.1
pH (Unidades)	7.32	7.41	7.19	7.25
Turbiedad (UNT)	28	25	28.2	24.4
Color real (UPC)	12.7	13	12	12.5
Absorbancia UV ₂₅₄	0.128	0.130	0.126	0.131
Pentaclorofenol (µg/l)	<1.56	<1.56	15.3	15.2

Tabla 3. Remoción promedio de materia orgánica (color real y absorbancia) y pentaclorofenol

Tiempo (min)	Color real (UPC)			Absorbancia UV ₂₅₄			Pentaclorofenol (µg/l)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
0	12,2	11,9	12,5	0,129	0,124	0,131	15,3	15,3	15,2
30	12,1	11,7	0,9	0,116	0,120	0,050	12,8	15,3	1,9
60	12,1	2	0,7	0,114	0,050	0,044	10,2	7,4	1,7
90	11,9	1,8	0,6	0,111	0,041	0,054	5,8	7,6	<1,56
120	11,8	1,7	0,7	0,109	0,038	0,050	5,3	6,4	<1,56
150	11,6	1,9	0,6	0,103	0,035	0,050	4,8	5,2	<1,56

S1: Secuencia 1. Solamente adsorción con CAP;
 S2: Secuencia 2: CAP+Al₂SO₄;
 S3: Secuencia 3. CAP+Cl₂+Al₂SO₄

En la Tabla se observa que el color real y la absorbancia presentaron en general un comportamiento similar en el tiempo y en las diversas secuencias evaluadas, lo que ratifica la correlación entre estas dos variables y potencializa su uso para determinar de manera indirecta la presencia de materia orgánica natural.

En S1 se observa que este es ineficiente para la remoción de la MON; en dicha condición se encontró un comportamiento relativamente estable en el tiempo de contacto del agua con el adsor-

bente, obteniéndose una eficiencia de reducción cercana al 5% para color real y al 20% para adsorbancia. Con relación al pentaclorofenol, a partir de los 90 minutos hubo una reducción del orden del 62%, la cual aumentó hasta 69% al finalizar el tiempo de contacto.

S2 causó un eficiente efecto de reducción tanto del color real como de la adsorbancia en un tiempo posterior a 30 minutos debido a la coagulación mejorada con CAP, en el cual se obtiene una mayor remoción de la MON (Tomaszewska et al., 2004). La reducción alcanzada a los 30 minutos fue superior al 83% y 60% para color real y adsorbancia, respectivamente, que aumentó a 72% para la adsorbancia a los 150 minutos. No se observó una diferencia significativa de pentaclorofenol entre las secuencias 1 y 2 de tratamiento.

En S3 la reducción significativa en los niveles de color real y adsorbancia se inició antes que en S2, lo que probablemente se deba a la adición del cloro que oxida la materia orgánica al entrar en contacto con el desinfectante. Adicionalmente, esta configuración de tratamiento se mostró mucho más eficiente que las otras dos (S1 y S2), principalmente en términos de la reducción de pentaclorofenol, ya que se alcanzaron valores menores de 1,56 µg/l (límite de detección), siendo inferior al valor guía de 9 µg/l de la OMS (OMS, 2004). La Figura 1 muestra el comportamiento de las eficiencias de reducción de color, absorbancia y pentaclorofenol después de un tiempo de contacto de 150 minutos en las tres secuencias de adsorción evaluadas.

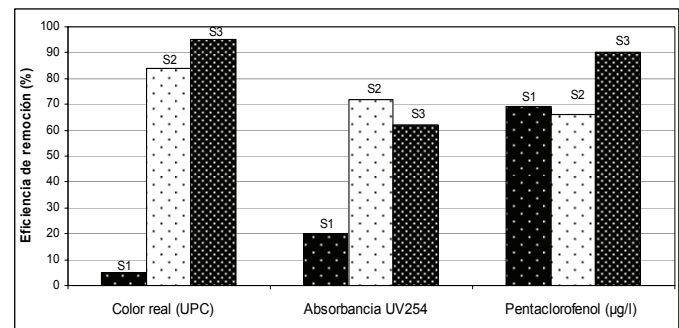


Figura 1. Eficiencia de reducción de color, absorbancia y pentaclorofenol en las tres secuencias evaluadas

Se observa que el mejor desempeño lo representa S3, alcanzándose además de la mayor eficiencia de reducción de pentaclorofenol, las mejores eficiencias de reducción tanto del color real como de la adsorbancia. Este resultado puede ser atribuido a que por la presencia de cloro con CAP en el tratamiento se generan sitios de adsorción y un inusual momento bipolar pequeño; estos enlaces tienen características ácidas según Lewis, lo que genera un cambio de polaridad con el CAP, dando lugar a sitios activos que permiten la adsorción del pentaclorofenol (Pérez et al., 2003).

Conclusiones y recomendaciones

El carbón activado en polvo y el tiempo de contacto actualmente aplicados en el tratamiento del agua cruda del río Cauca garantizan una eficiente reducción del pentaclorofenol, disminuyendo el riesgo químico asociado a su presencia en el agua tratada.

La coagulación mejorada garantizó mayores eficiencias de reducción del pentaclorofenol y de la materia orgánica presente en el agua cruda del río Cauca.

Aunque el tratamiento del agua cruda del río Cauca con adsorbente, desinfectante y coagulante mostró las mejores eficiencias de re-

ducción, se recomienda evaluar la secuencia adsorción, coagulación, desinfección para minimizar el riesgo químico por la potencial formación de subproductos de la desinfección.

Se recomienda incorporar el color real y la absorbancia UV₂₅₄ como parámetros de rutina de operación en procesos de potabilización por su representatividad de la materia orgánica natural presente y por la sensibilidad hallada en los ensayos.

Se recomienda evaluar otras dosis, tipos de carbón activado y tiempos de contacto para optimizar la remoción de los compuestos fenólicos.

Agradecimientos

El estudio fue desarrollado por el Grupo de investigación estudio y control de la contaminación ambiental de Univalle, en el marco de la investigación "Evaluación de riesgos sanitarios, adsorción con carbón activado y optimización de procesos de las plantas de potabilización de Emcali abastecidas por el río Cauca", financiado por Emcali y la Universidad del Valle.

Bibliografía

- Adams, C. D., Watson, T.L., Treatability of S-Triazine Herbicide metabolites using powdered activated carbon., *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 122, No. 4, 1996, pp. 327-330.
- Abdul, H., Campbell, R., Pentachlorophenol adsorption and desorption., *Characteristics of granular activated Carbon-ii. Kinetics*. Pergamon. *Water Research*, Vol. 30, No. 12, 1996, pp. 2907-2913.
- APHA, AWWA, WEF., *Standard Methods for the examination of Water and Wastewater.*, edición 21, 2005.
- Archer, A., Singer, P., Effect of SUVA and enhanced coagulation on removal of TOX precursors., *American Water Works Association Journal*, Vol. 98, No. 8, 1996, pp. 97-108.
- ATSDR., *Resumen de Salud Pública, Pentaclorofenol.*, <http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es-phs51.html>, 2001. Consultada 28-03-08.
- Ayranci, E., Hoda, N., Adsorption kinetics and isotherms of pesticides onto activated carbon-cloth., *Chemosphere*, Vol. 60, No. 11, 2005, pp. 1600-1607.
- Bailey, S., Olin, T., Bricka, R., Adrian, D., A review or potentially low-cost sorbents for heavy metals., *Water Research*. Vol. 33, No. 11, 1999, pp. 2469 – 2479.
- Basar, C.A., Applicability of the various adsorption models of three dyes adsorption onto activated carbon prepared waste apricot., *Journal of Hazardous Materials*, Vol. B135, 2006, pp. 232-241.
- Boualam, M., Mathieu, L., Fass, S., Cavard, J., Gatel, D., Relationship between coliform culturability and organic matter in low nutritive waters., *Water Research*. Vol. 36, No. 10, 2002, pp. 2618-2626.
- Brasquet, C., Le Cloirec, P., Adsorption onto activated carbon fibers: application to water and air treatments., *Carbon*. Vol. 35, No. 9, 1997, pp. 1307 - 1313.
- Cook, D., Newcombe, G., Sztajn bok, P., The application of powdered activated carbon for MIB and geosmin removal: predicting PAC dosis in four raw waters., *Water Research*. Vol. 35, No. 5, 2001, pp. 1325 - 1333.
- Cruz, C., Torres, P., Barba, L. E., Gutiérrez, H. M., Estudios para evaluación de riesgos sanitarios, adsorción con carbón activado y optimización de procesos de las plantas de potabilización de EMCALI EICE abastecidas por el Río Cauca., *Proyecto de investigación*, 2007.
- Dabrowski, A., Podkoscielny, P., Hubicki, Z., Barczak, M., Adsorption of phenolic compounds by activated carbon - a critical review., *Chemosphere*, Vol. 58, No. 8, 2005, pp. 1049-1070.
- Duan, J., Wilson, F., Graham, N., Tay, J. H., Adsorption of humic acid by powdered activated carbon in saline water conditions., *Desalination*, Vol. 151, No. 1, 2, 2005, pp. 53-66.
- IPCS., *Programa Internacional de seguridad de las sustancias químicas.*, Fichas internacionales de seguridad química, 1991.
- Ministerio de Desarrollo Económico., *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS Sistemas de Potabilización.*, Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, Bogotá, Colombia, 2000.
- Miyake, Y., Sokoda, A., Yamunashi, H., Kaneda, H., Suzuki, M., Activated Carbon Adsorption of Trichloroethylene (TCE) vapor stripped from TCE – Contaminated water., *Water Research*, Vol. 37, No. 8, 2003, pp. 1852-1858.
- Najm, I., Mathematical modeling of PAC adsorption processes., *American Water Works Association Journal*, Vol. 88, No. 10, 1996, pp. 79-89.
- Nemr, A., Khaled, A., Abdelwahab, O., El-Sikaily, A., Treatment of wastewater containing toxic chromium using new activated carbon developed from date palm seed., *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 152, No. 1, 2008, pp. 263-275.
- OMS., *Organización Mundial de la Salud. Guidelines for Drinking-water Quality.*, Tercera Edición, 2004.
- Pérez, A., Maldonado, F., Moreno, C., On the nature of surface acid sites of chlorinated activated carbons., *Carbon*, Vol. 24, 2003, pp. 473 – 478.
- Ponche, E., Diseño de un tren de potabilización para una planta generadora de agua embotellada., Tesis presentada a la Universidad de las Américas, Puebla para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Disponible en: <http://catarina.udlap.mx>. 2005.
- Ratnaweera, H., Hiller, N., Bunse, U., Comparison of the coagulation behavior of different Norwegian aquatic NOM sources., *Environment International*, Vol. 25, No. 2-3, 1999, pp. 347-355.
- Shen, Y. H., Chaung, T. H., Removal of dissolved organic carbon by coagulation and adsorption from polluted source water in Southern Taiwan., *Environment International*, Vol. 24, No. 4, 1998, pp. 497-503.
- Tomaszewska, M., Mozia, S., Morawski, A., Removal of organic matter by coagulation enhanced with adsorption on PAC., *Desalination*, Vol. 161, 2004, pp. 79-87.
- Yan, M., Wang, D., Shi, B., Wei, Q., Qu, J., Tang, H., Transformations of particles, metal elements and natural organic matter in different water treatment processes., *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 19, No. 3, 2007, pp. 271-277.