

# Obtención de pseudoboehmita mediante el método de sol-gel empleando dos catalizadores diferentes

## Pseudoboehmite obtention via sol-gel with two different catalyst

Juliana Serna Saiz<sup>1</sup>, Gabriel Camargo Vargas<sup>2</sup>, Juan Carlos Moreno<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ingeniería Química Universidad de los Andes.

<sup>2</sup> Ingeniero Químico, M.Sc. Dpto. de Ingeniería Mecánica Universidad Libre. gabriel.camargov@unilibrebog.edu.co

<sup>3</sup> Químico M.Sc, Ph.D. Departamento de Química, Universidad de los Andes. jumoreno@uniandes.edu.co

Fecha de recepción del artículo: 29/10/2010; Fecha de aceptación del artículo: 25/01/2011

### Resumen

El monohidróxido de aluminio, más conocido como pseudoboehmita (AlOOH) se obtuvo por el método sol-gel, mediante la reacción entre aluminio y alcohol isopropílico para producir isopropóxido de aluminio; empleando dos catalizadores diferentes, yoduro de mercurio y yodo sublimado. La investigación estuvo encaminada a analizar si el tiempo de envejecimiento y el tipo de catalizador empleado en la obtención del isopropóxido de aluminio, tienen algún efecto en las características texturales del sólido (área superficial, tamaño y volumen de poro), finalmente obtenido, y con ello realizar un estudio ambiental comparativo de las dos rutas de síntesis del alcóxido de aluminio, con el fin de conocer la cantidad de residuos producidos por cada uno de los catalizadores y así poder establecer cuál de los dos es más amigable con el ambiente. Para este propósito se utilizó el paquete de simulación *Green Chemistry Expert System*.

### Palabras clave

Alcóxido, Proceso Yoldas, Pseudoboehmita, Química Verde, Sol-Gel.

### Abstract

Aluminum monohydroxide, or pseudoboehmite, was obtained by reaction between aluminum

and isopropyl alcohol using sol gel method. Two different catalysts were tested: mercuric Iodide and sublimated iodine. The research looked for the influence of aging time and kind of catalysts changed textural properties in the solid (superficial area, pore size and volume). An environmental evaluation of the two processes were carried out using Green Chemistry Expert system. The results no show main effect in the kind of catalyst in the solid properties and the sublimated iodine was more friendly with the environment.

### Keywords

Alcoxide, Yoldas Process, Pseudoboehmite, green chemistry, sol gel process.

### Introducción

Las industrias químicas en la actualidad están innovando día a día sus procesos, con el fin de ser más competentes en el mercado, de cumplir con las leyes ambientales o simplemente para modernizarse como empresa, es por esto que se necesitan nuevos y mejores materiales, con determinadas características, capaces de cumplir con los requerimientos de dichos procesos; los cerámicos de aluminio son algunos de estos materiales.

En la actualidad las alúminas se producen por tres métodos: el primero de ellos es el conocido proceso Bayer, en el cual, el hidróxido de aluminio (con impurezas), es mezclado con hidróxido de sodio con el fin de hacer precipitar las impurezas y obtener el hidróxido de aluminio puro [1,2, 3, 4].

En el proceso Bayer las condiciones de operación, en cuanto a temperatura y presión, son altas, haciendo que este proceso sea más difícil de controlar y por ende más costoso. Además la alúmina final que se obtiene por este método no es totalmente pura, ya que posee residuos de  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , entre otros; lo cual puede afectar propiedades finales del cerámico como la densidad [7].

Un segundo método para obtener la pseudoboehmita, consiste en una desulfatación al sulfato de aluminio comercial, utilizando como solvente amoníaco, método desarrollado por R. Trejo (1997) [5, 6].

Existen algunos inconvenientes en las síntesis por estos dos métodos, ya que requieren de controles extremos, debido a que los productos obtenidos en las reacciones y en la activación difieren considerablemente en la estructura cristalina obtenida, lo cual influye en el área superficial de la pseudoboehmita [6].

El tercer método es la técnica del sol-gel, que consiste en producir un sol (suspensión coloidal) y del secado del mismo obtener un gel para su posterior tratamiento térmico [8]. El sol-gel utiliza diferentes rutas para obtener el cerámico deseado, y actualmente se han realizados investigaciones para la producción de numerosos óxidos como lo son los de vanadio, titanio, hierro, silicio entre otros, con este método [9, 10, 11, 12, 13].

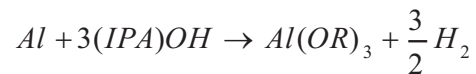
El método sol-gel, al presentar condiciones moderadas de reacción, posee varias ventajas sobre los otros métodos, además de que permite obtener

óxidos de diversas estructuras y propiedades, como membranas, películas densas, aerogeles entre otros [8]. Las etapas involucradas en el proceso sol-gel son reacción de obtención del alcóxido, hidrólisis, peptización, envejecimiento y secado.

Por lo anterior, esta investigación se enfoca en la obtención de una alúmina hidratada pseudoboehmita, con el fin de aplicar y estudiar los principios del método sol-gel en la síntesis de la misma y analizar las propiedades finales de ésta.

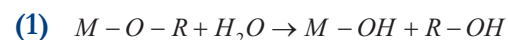
## Materiales y experimentación

La obtención del isopropóxido de aluminio se llevó cabo con reactivos en grado analítico: láminas de aluminio (Merck), alcohol isopropílico, yoduro de mercurio y yodo (J.T Baker). Este proceso está regido por la siguiente ecuación:



La temperatura a la cual se lleva a cabo la reacción oscila entre 80 y 85 °C [8]. El tiempo de reacción depende del tipo de catalizador usado, ya que si es  $\text{HgI}_2$  la reacción tarda tres horas, pero si es con  $\text{I}_2$  sublimado dura aproximadamente 1,25 horas; el final del proceso reactivo se conoce en el momento cesa la liberación de hidrógeno.

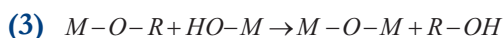
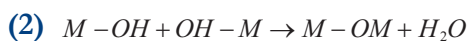
Una vez obtenido el alcóxido se procede a la hidrólisis del mismo, reacción en la cual se va a llevar a cabo una condensación de agua y de alcohol (producto de la hidrólisis). A continuación se presentan las ecuaciones que rigen este proceso<sup>1</sup>:



<sup>1</sup> Ec. 1: Reacción de hidrólisis

Ec. 2: Reacción condensación agua

Ec. 3: Reacción condensación alcohol



La etapa siguiente en el proceso es la peptización y requiere de un ácido como agente peptizante, para esta investigación se trabaja con ácido nítrico [1], porque no reacciona con el hidróxido, tiene la suficiente fuerza para producir el efecto en las cargas del coloide coagulado y es fácil de eliminar una vez finaliza la reacción [1, 8, 14, 2].

B.E. Yodas, determinó que la relación entre agente peptizante (ácido nítrico), y la pseudoboehmita debía ser de 0.07:1 moles, ácido/pseudo boehmita. La peptización consiste en tomar una solución 2M de pseudoboehmita y calentarla hasta 80°C [1, 14, 2] agregando lentamente el ácido, con agitación y reflujo constantes [1, 15].

Una vez finaliza la peptización se obtiene el sol de alúmina, del cual se evaporan el agua y del ácido, obteniendo un gel que posteriormente se envejece por el período de tiempo fijo. Con el fin disminuir el porcentaje de agua presente el gel envejecido se seca para obtener un xerogel de alúmina. La temperatura de secado es de 90 °C y las muestras permanecen en el horno por un período de 24 horas. Por último, las muestras se calcinan con el fin de disminuir aún más el porcentaje de agua presente en ellas, esto se realiza en una mufla marca Barnstead Thermolyne, por un período de 20 horas a 300°C.

Todo el procedimiento está basado en un diseño experimental, en el cual se cuenta con dos tipos de factores:

- *Factor categórico:* tipo de catalizador en la reacción del alcóxido (yoduro de mercurio y yodo sublimado). Donde los dos niveles fueron escogidos con base en la literatura [16], ya que el I<sub>2</sub> sublimado es inocuo para el medio ambiente, mientras que el yoduro de mercurio, no lo es.
- *Factor numérico:* tiempo de envejecimiento, con tres niveles, (1, 4 y 7h). Por literatura se sabe

que el tiempo de envejecimiento influye en el proceso de secado y a su vez en la estructura macroscópica de la pseudoboehmita [17].

Con el fin de conocer las implicaciones ambientales de la producción del alcóxido de aluminio se realizó un diseño ambiental comparativo de las dos rutas de síntesis empleadas en la experimentación. El análisis fue realizado con ayuda del paquete de simulación *Green Chemistry Expert System*.

El software trabaja con datos generales de cada reacción, como número de lotes por año y % de reacción, este último hace referencia al cociente entre la masa total de producto formado y la cantidad máxima esperada. Los valores de estos datos se presentan a continuación:

**Tabla 1.** Especificaciones para diseño ambiental.

	HgI <sub>2</sub>	I <sub>2</sub> sublimado
Lotes/año	520	520
%Reacción	82.89	73.89

## Discusión de resultados

### Caracterización de reactivos y productos

El alcohol isopropílico y el isopropóxido de aluminio se caracterizaron mediante un análisis infrarrojo en un equipo marca Thermo Nicolet, modelo Nexus y los espectros se analizaron con ayuda del software OMNIC, programa que viene incorporado al equipo. En las figuras 1 y 2 se pueden observar los espectros para el alcóxido y para el alcohol.

Por su parte, la pseudoboehmita que se obtuvo después de la hidrólisis, se realizó un análisis termogravimétrico en el equipo marca NETZCH, modelo STA 409 y una difracción de rayos X en el equipo RIGAKU, modelo miniflex, los resultados de esta caracterización pueden ser vistos en las Figuras 6, 7, 8 y 9 de anexo 1 respectivamente.

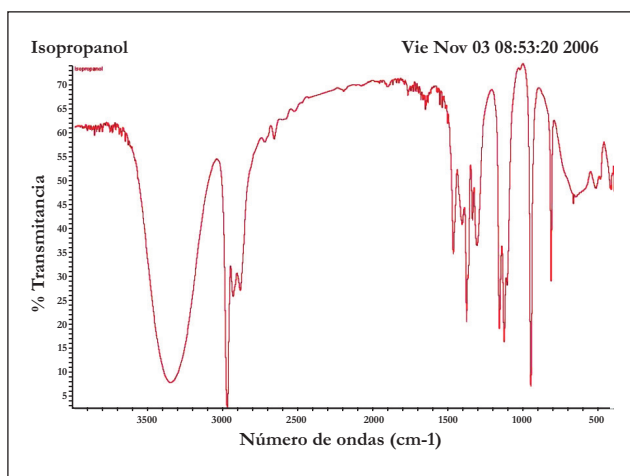


Figura 1. Infrarrojo alcohol isopropílico.

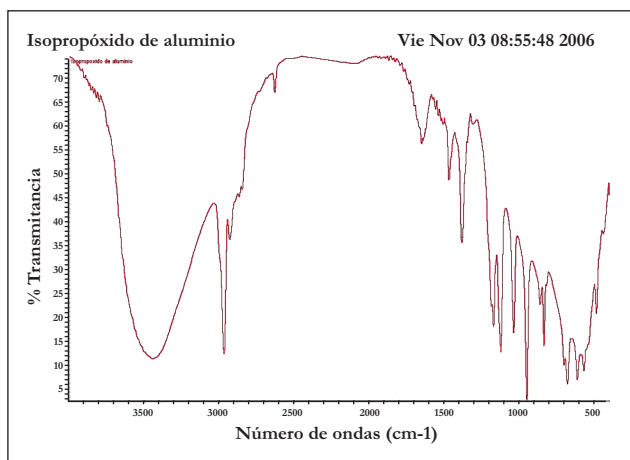


Figura 2. Infrarrojo isopropóxido de aluminio.

### Caracterización de alcohol isopropílico

El infrarrojo realizado al alcohol utilizado como reactivo (ver Figura 1), coincide con el encontrado en la literatura<sup>2</sup>. El alcohol utilizado en la reacción cumplía con los requerimientos de la misma, ya que este reactivo debe estar 99.9% de pureza.

### Caracterización del isopropóxido de aluminio

El infrarrojo del alcóxido obtenido en la experimentación concuerda con el espectro que

<sup>2</sup> Recuperado de la página de Internet [www.chemexper.com](http://www.chemexper.com).

se encuentra en la literatura (ver Figura 2); sin embargo, en 3500 hay un pico que es típico de los alcoholes, el cual se debe a que el alcóxido de la muestra todavía tenía presente isopropanol.

### Caracterización pseudoboehmita

#### *TGA para pseudoboehmita producida con I<sub>2</sub> sublimado*

Como se puede observar en la Figura 3, se presenta una pérdida de peso de la muestra del 25% aproximadamente, hecho que se puede relacionar con la pérdida de agua estructural de la muestra, ya que el rango de temperatura al que este proceso ocurrió está entre 20 -150°C, esta pérdida puede ser ocasionada porque la pseudoboehmita es una alúmina hidratada, lo que significa que posee gran cantidad de agua de estructura.

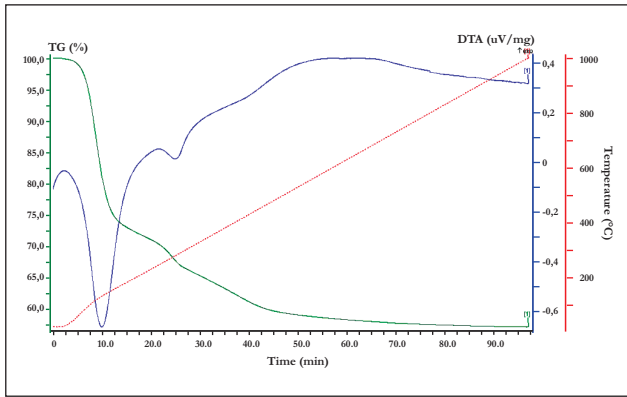
Entre 250-500°C se observan variaciones en la pendiente de la curva de porcentaje en peso, cambio que se debe al paso de la pseudoboehmita a boehmita [1]. Cuando la muestra alcanza los 500°C, se obtiene la estructura conocida como  $\gamma$ -alúmina.

Entre 500°C-800°C se presenta otra pérdida en el peso de la muestra, por literatura [1] se sabe que a 800°C el óxido de aluminio sufre otro cambio en su estructura cristalina y pasa a ser  $\delta$ -alúmina. El último rango de temperatura durante el cual hubo un cambio en el porcentaje en peso de la muestra fue entre 800-1000°C, situación que se debe al cambio de fase entre  $\delta$ -alúmina y  $\theta$ -alúmina [1].

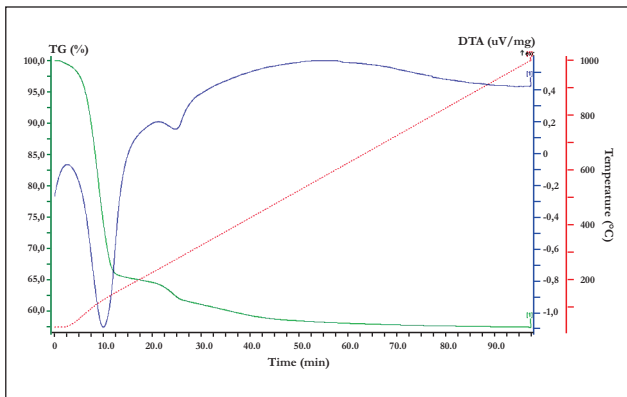
#### *TGA para pseudoboehmita producida con HgI<sub>2</sub>*

Los resultados de la pseudoboehmita producida con este catalizador pueden verse en la Figura 4, de la cual se va a referir el siguiente análisis.

La muestra analizada presenta la mayor pérdida de peso entre 20-150°C, al igual que ocurrió con la muestra de pseudoboehmita producida con I<sub>2</sub> sublimado; sin embargo, esta muestra obtenida con HgI<sub>2</sub> presenta un porcentaje de peso perdido del



**Figura 3.** TGA pseudoboehmita obtenida con  $I_2$  sublimado.



**Figura 4.** TGA pseudoboehmita obtenido con  $HgI_2$ .

50%, hecho que tiene su explicación en la pérdida de agua de estructura de la muestra.

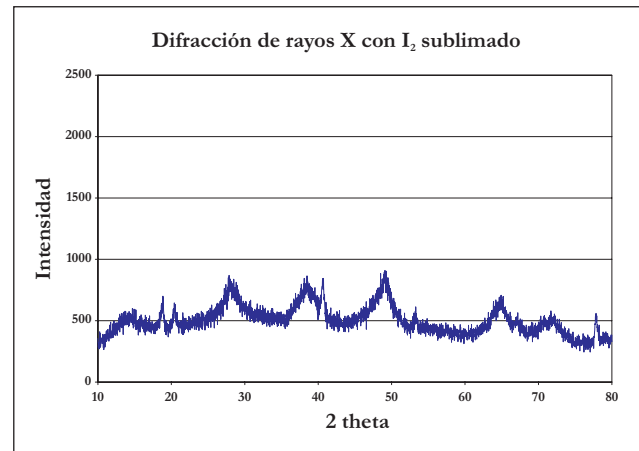
El comportamiento de la pseudoboehmita obtenida con  $HgI_2$ , se asemeja al obtenido con el otro catalizador, así por ejemplo, entre 150-250° se da una pérdida de peso que se puede relacionar con que la estructura pierda agua y con un cambio en la estructura cristalina de la alúmina hidratada.

Entre 250-500°C se da otro cambio de fase, por literatura [1] se sabe que a hasta 500°C se va tener la presencia de boehmita. Entre 500-780°C aproximadamente, se presenta otro cambio ocasionado por la transformación de  $\gamma$ -alúmina a  $\delta$ -alúmina. Así como en la primera muestra, el análisis fue llevado hasta 1000°C; es por esto que se

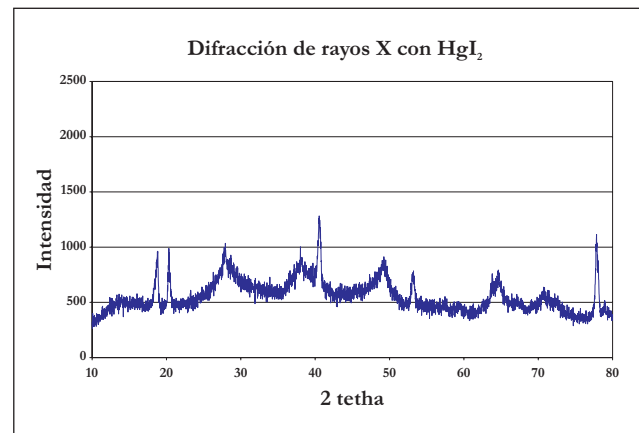
presenta un último cambio de pendiente de la curva de porcentaje en peso, ya que por literatura [1], la muestra finalmente es llevada hasta  $\theta$ -alúmina.

## Difracción de rayos X

Las Figuras 5 y 6 presentan las difracciones realizadas a las muestras después de ser hidrolizada, como se puede apreciar éstas presentan una estructura amorfa, ya que no presentan picos bien definidos, característica típica de la pseudoboehmita.



**Figura 5.** XRD pseudoboehmita obtenida con  $I_2$  sublimado.



**Figura 6.** XRD pseudoboehmita obtenida con  $HgI_2$ .

Para determinar si lo que se tenía era o no pseudoboehmita, se compararon estas difracciones de la investigación con la obtenida en la referencia

14; analizando las tres figuras, se puede observar que éstas presentan las mismas tendencias en los diferentes valores de  $2\theta$ ; sin embargo, las figuras de la investigación presentan unos picos un poco más definidos en 20 y 75 (eje x) aproximadamente, los cuales pueden ser atribuidos a la presencia de trihidroxido de aluminio  $Al(OH)_3$ , es pertinente aclarar que la presencia de este hidróxido no es muy alta y por ende la muestra puede considerarse sólo como pseudoboehmita.

## Área superficial

### Isotermas de adsorción

Para determinar si el tiempo de envejecimiento del gel y el tipo de catalizador en la producción del alcóxido influían o no en el área superficial de la pseudoboehmita que finalmente se obtuvo, fue necesario caracterizar cada muestra por medio de isotermas de adsorción, en el equipo Quantra Chrome, modelo autosorb-3B. Los resultados que se obtuvieron se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Área superficial.

Tiempo Envejecimiento	Catalizador	Área superficial (m <sup>2</sup> )
4h	I <sub>2</sub> sublimado	371.4
1h	I <sub>2</sub> sublimado	336.5
7h	I <sub>2</sub> sublimado	380.0
7h	I <sub>2</sub> sublimado	373.3
1h	HgI <sub>2</sub>	363.9
7h	HgI <sub>2</sub>	397.1
4h	HgI <sub>2</sub>	367.2
4h	I <sub>2</sub> sublimado	376.1
4h	HgI <sub>2</sub>	381.8
1h	HgI <sub>2</sub>	343.0

El tamaño y volumen de poro tiene una incidencia en el área superficial, ya que si los poros son más pequeños se va a tener mayor área. El equipo Quantra Chrome, permite también conocer estas dos variables. A continuación se presentan los resultados que para estas dos se obtuvieron.

**Tabla 3.** Volumen de poro.

Tiempo Envejecimiento	Catalizador	Volumen de poro (cc/g)
4h	I <sub>2</sub> sublimado	0.2328
1h	I <sub>2</sub> sublimado	0.2075
7h	I <sub>2</sub> sublimado	0.2318
7h	I <sub>2</sub> sublimado	0.2274
1h	HgI <sub>2</sub>	0.2265
7h	HgI <sub>2</sub>	0.2495
4h	HgI <sub>2</sub>	0.2303
4h	I <sub>2</sub> sublimado	0.2326
4h	HgI <sub>2</sub>	0.2419
1h	HgI <sub>2</sub>	0.2160

**Tabla 4.** Tamaño de poro.

Tiempo Envejecimiento	Catalizador	Tamaño de poro (Å)
4h	I <sub>2</sub> sublimado	180.8
1h	I <sub>2</sub> sublimado	193.3
7h	I <sub>2</sub> sublimado	171.2
7h	I <sub>2</sub> sublimado	171.1
1h	HgI <sub>2</sub>	174.5
7h	HgI <sub>2</sub>	173.8
4h	HgI <sub>2</sub>	167.6
4h	I <sub>2</sub> sublimado	167.3
4h	HgI <sub>2</sub>	176.0
1h	HgI <sub>2</sub>	174.7

Los resultados de área, tamaño y volumen de poro, se analizaron con el software Desing Expert, para determinar si los factores tenía o no influencia en estas tres variables. Los resultados que se obtuvieron se presentan a continuación.

## Área superficial

Para determinar si había o no influencia de los factores, es necesario realizar un análisis estadístico ANOVA, la Tabla 5 presenta los resultados obtenidos.

**Tabla 5.** ANOVA para el área superficial.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	2214,32	3	738,11	6,36	0.0271	significant
A-t envejecimiento	2166,22	1	2166,22	18,67	0.0050	
B-Catalizador	282,70	1	282,70	2,44	0.1696	
AB	23,45	1	23,45	0,20	0.6688	
Residual	696,28	6	116,05			not significant
Lack of Fit	337,81	2	168,90	1,88	0.2651	
Pure Error	358,48	4	89,62			
Cor Total	2910,60	9				

### Volumen de poro

Con respecto al volumen de poro el ANOVA realizado arrojó los siguientes resultados:

**Tabla 6.** ANOVA para volumen de poro.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	8,90E-04	3	2,90E-04	4,97	0.0458	significant
A-t envejecimiento	7,50E-04	1	7,50E-04	12,57	0.0121	
B-Catalizador	2,80E-04	1	2,80E-04	4,75	0.0722	
AB	3,70E-05	1	3,70E-05	0,63	0.4582	
Residual	3,60E-04	6	6,00E-05			not significant
Lack of Fit	2,20E-04	2	1,10E-04	3,47	0.1335	
Pure Error	1,30E-04	4	3,30E-05			
Cor Total	1,20E-03	9				

### Tamaño de poro

El resultado del ANOVA y las gráficas de tendencia para el tamaño de poro son los siguientes

**Tabla 7.** ANOVA para tamaño de poro.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	305,61	3	101,87	2,92	0.1224	not significant
A-t envejecimiento	158,79	1	158,79	4,55	0.0769	
B-Catalizador	71,87	1	71,87	2,06	0.2013	
AB	117,58	1	117,58	3,37	0.1161	
Residual	209,39	6	34,90			not significant
Lack of Fit	82,96	2	41,48	1,31	0.3646	
Pure Error	126,43	4	31,61			
Cor Total	515,00	9				

Para que un factor sea influyente en la variable de respuesta su valor de  $\text{Prob}>F$ , debe ser menor que 0.05 (establecido por el programa), como se puede observar en los ANOVA realizados tanto para el área como para el volumen de poro (ver Tablas 5 y 6), el único factor que presenta un valor menor a 0.05 es el tiempo de envejecimiento, por lo cual se puede decir que éste sí va a presentar una influencia en estas dos variables. Con respecto al tipo de catalizador, su valor de  $\text{Prob}>F$  es igual a 0,6688 el área y 0,07 en el volumen, lo que significa que no va a tener ningún efecto en ninguna de las dos variables.

Por su parte, el ANOVA realizado a la variable tamaño de poro (Tabla 7) muestra que ésta no se va a afectar por ninguno de los dos factores, ya que los valores de  $\text{Prob}>F$  son 0,0769 para el tiempo de envejecimiento y 0,2013 para el catalizador. De lo anterior, se puede decir que no va a importar ni el catalizador que se utilice, ni el tiempo que se deje envejecer el gel, porque el tamaño de poro siempre se va a presentar la misma tendencia.

## Difracción de rayos X

A las muestras se les realizó un análisis por medio de difracción de rayos X, comparando los 10 resultados se puede decir que se obtuvo el mismo material y con la misma cristalinidad (ver Figura 7).

Las difracciones obtenidas en esta investigación concuerdan con la de la referenciada, ya que para rangos de valores de  $2\theta$  como 10-15, 25-30, 35-40, 45-50, 60-70, se presentan los mismos picos, con las mismas proporciones y con la misma cristalinidad, estos picos son sólo típicos de la pseudoboehmita.

## Análisis ambiental

La reacción realizada con yodo sublimado es más amigable con el ambiente, ya que al utilizar este compuesto se produce un 50.22% de residuos totales, mientras que la reacción llevada a cabo con  $\text{HgI}_2$  implicó un porcentaje de desechos mayor 58.34% (ver Figuras 8 y 9).

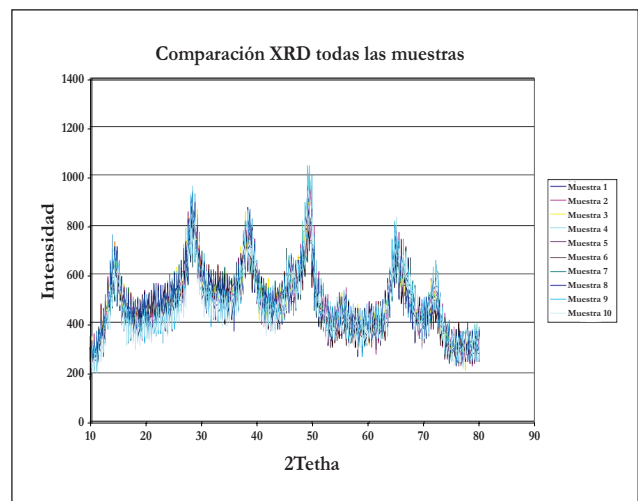


Figura 7. Comparación de todas las pseudoboehmitas obtenidas.

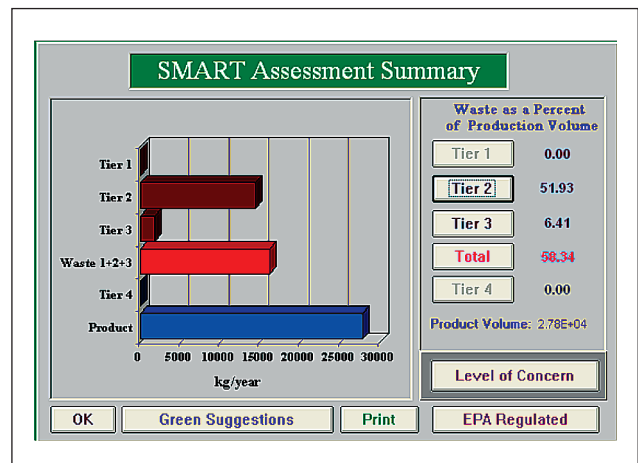


Figura 8. Resultados generales con  $\text{I}_2$  sublimado.

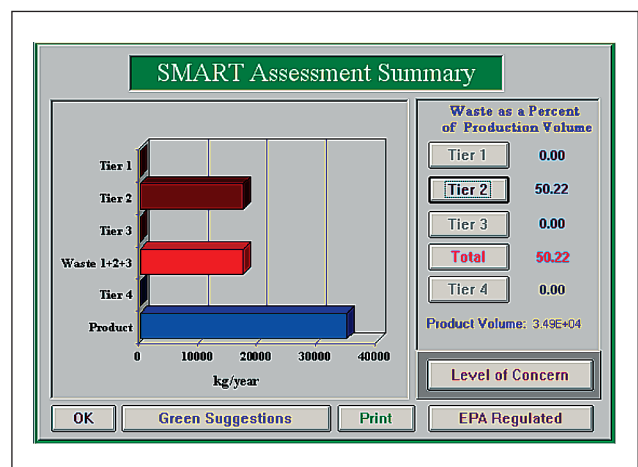


Figura 9. Resultados generales con  $\text{HgI}_2$ .



Con respecto a la diferencia en la cantidad de residuos producidos, al usar  $\text{HgI}_2$  y  $\text{I}_2$  sublimado, se puede decir que la reacción más amigable sigue siendo la que utiliza el último catalizador, ya que éste no va a generar residuos. Por el contrario, el  $\text{HgI}_2$  contribuye con un 0.94% de residuos, lo que en masa equivale a 260kg/año, teniendo una producción anual de 27,789kg del alcóxido; por su parte, la producción anual de isopropóxido de aluminio con  $\text{I}_2$  sublimado es de 34,944kg. Lo anterior puede ser corroborado con las Figuras 10 y 11, en las cuales se presenta en detalle los residuos del  $\text{HgI}_2$  y del  $\text{I}_2$  sublimado, respectivamente.

El  $\text{HgI}_2$  es catalogado como un compuesto de la clase 3 y aunque el programa no especifica su toxicidad, de acuerdo con la ficha de seguridad del mismo, se puede ver que este compuesto muy tóxico si es inhalado, si se tiene contacto con la piel y si es ingerido [15]. El yoduro de mercurio es muy tóxico para el medio ambiente, por esto es importante saber que debe evitarse su contacto con los medios acuíferos y con los suelos [15].

## Conclusiones

El isopropóxido de aluminio fue obtenido con éxito por las dos rutas de síntesis, como lo demuestra el espectro de infrarrojo arrojado por el software OMNIC.

La pseudoboehmita fue obtenida con éxito, a partir de la hidrólisis del isopropóxido de aluminio, tal como lo demuestran los análisis termogravimétricos y las difracciones de rayos X.

El área superficial de la pseudoboehmita finalmente obtenida sólo se afecta por el tiempo de envejecimiento del gel de alúmina, a mayor tiempo el área tiende a aumentar. Por el contrario, el tipo de catalizador utilizado en la reacción del alcóxido no tiene incidencia alguna en esta variable.

El volumen de poro se afecta por el tiempo de envejecimiento, pero no por el tipo de catalizador.

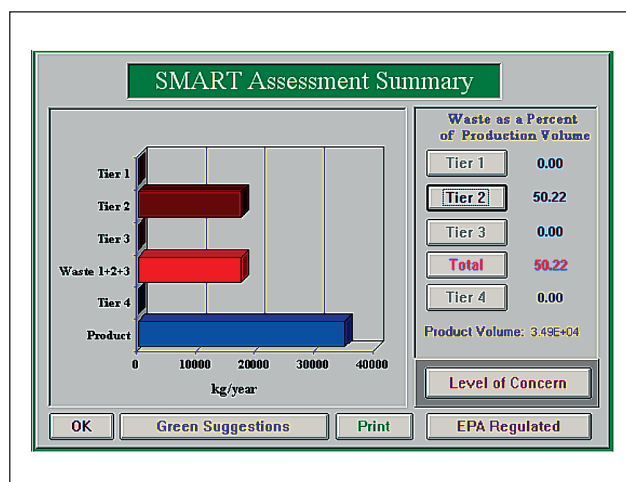


Figura 10. Resultados generales con  $\text{I}_2$  sublimado.

The screenshot shows a chemical data entry form for 'Mercuric iodide'. Fields include ID (007774-29-0), Role (Catalyst), Name (Mercuric iodide), SMILES ([Hg]), Molecular Weight (454), and Regulated under (EPCRA 302, 313, CAA112(t), HAPS). Batch Data includes Quantity (kg) (0.50), kmol (0.00), Equivalents, Recovered (kg) (0), and Percent Waste (0.94). Annual Data includes Waste (kg) (260.00). Buttons for 'OK', 'Print', and 'About EPA Regs' are present.

Figura 11. Resultados generales con  $\text{HgI}_2$ .

A medida que el tiempo incrementa el volumen de poro tiende a aumentar.

El tiempo de envejecimiento y el tipo de catalizador no influyen en el tamaño de poro final de la pseudoboehmita.

El  $\text{I}_2$  sublimado utilizado como catalizador es más amigable con el ambiente que el  $\text{HgI}_2$ , ya que para una producción de 520 lotes/año, del primero no se van a presentar residuos mientras que del segundo se presentan 260kg de desechos por año.

La cantidad de isopropóxido producida es mayor con  $I_2$  sublimado. Lo anterior pudo ser corroborado con la experimentación, ya que la reacción con este fue más rápida y con el software *Green Chemistry Expert System*, debido a que éste calcula la producción anual del isopropóxido, el programa calculó que con  $HgI_2$  se produce 27,789kg isopropóxido/año y con  $I_2$  sublimando 34,944kg/año. Lo anterior hace aún mejor la utilización del yodo.

## Referencias bibliográficas

1. Yoldas, B.E. Alumina sols preparation from alkoxides. En: *Ceramics Bulletin* (1975), Volumen 54, pp. 289-290.
2. Yoldas, B.E. Hydrolysis of aluminum alkoxides and bayerita conversion. En *Journal of applied chemistry and biotechnology* (1973), Volumen 23, pp. 803-809.
3. Marciano, S.; Mugnier, N.; Clerin, P.; Cristol, B. and Moulin, P. Nanofiltration of Bayer process solutions En *Science Direct, Journal of membrane science* (2006) Volumen 281, pp. 260-267.
4. Gerson, A.R. and Zheng, K. Bayer process plant scale: transformation of sodalite. En *Science Direct, Journal of Crystal Growth* (1997). Volumen 171, pp. 209-218.
5. Brinker, C.J. and Scherer, G.W. *Sol-gel Science - The Physics and Chemistry of sol-gel Processing*, New York, Academic Press, 1990, Capítulo 14, pp. 839-840.
6. Trejo Vázquez, R. Cuaderno de trabajo sistema de investigación Miguel Hidalgo. Diseño de un proceso para la aplicación de alúmina activada en la defluoración de agua de bebida por adsorción selectiva en proceso continuo (1997), Capítulo I, p. 11, versión Internet.
7. Louet, N.; Gonon, M. and Fantozzi, G. Influence of the amount of  $Na_2O$  and  $SiO_2$  on the sintering behavior and on the microstructural evolution of a Bayer alumina powder. En *Science Direct, Ceramics International* (2005), Volumen 31, pp. 981-987.
8. Brinker, C.J. and Scherer, G.W. *Sol-gel Science - The Physics and Chemistry of sol-gel Processing*, New York, Academic Press, 1990, Capítulo 2, p. 68.
9. Fessenden, R.J. y Fessenden, J.S. *Química Orgánica*. Universidad de Montana. Grupo Editorial Ibero América, segunda edición (1982), Capítulo 7, pp. 286-287.
10. Zahi, S.; Hashim, M. and Daud, A.R. Preparation of Ni-Zn-Cu ferrite particles by sol-gel technique. En *Science Direct, Materials letters* (2006) Volumen 60, pp. 2803-2806.
11. Murgia, V.; Farfán Torres, E. M.; Gottifredi, J.C. and Sham, E.L. Sol-gel synthesis of  $V_2O_5-SiO_2$  catalyst in the oxidative dehydrogenation of *n*-butane. En *Science Direct, Applied Catalysis A* (2006), Volumen 312, pp. 134-143.
12. Cheng, Z-X.; Dong, X-Bi.; Pan, Q-Y; Zhang, Ji-C and Dong, X.W. Preparation and characterization of  $In_2O_3$  nanorods. En *Science direct, Materials Letters*, (2006), Volume 60, pp. 3137-3140
13. Murgia, V.; Farfán Torres, E. M.; Gottifredi, J.C. and Sham, E.L. Sol-gel synthesis of  $V_2O_5-SiO_2$  catalyst in the oxidative dehydrogenation of *n*-butane. En *Science Direct, Applied Catalysis A* (2006), Volumen 312, pp. 134-143.
14. Galindo, H.M. Estudio de los procesos sol-gel para la obtención de un aglutinante apropiado para el peletizado de alúmina. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá (2000) Capítulo 3.
15. Merck. Ficha de datos de seguridad, yoduro de mercurio (2006). Versión electrónica, pp. 1-6.
16. Raymond Eller, Kirk. *Enciclopedia de la tecnología química*. Kirk/Othmer México: Limusa; Noriega Editores, c1998. Volumen 2, p. 12.
17. Brinker, C.J. and Scherer, G.W. *Sol-gel Science - The Physics and Chemistry of sol-gel Processing*, New York, Academic Press, 1990, Capítulo 2, pp. 359-387.