



## **Valorización de un residuo proveniente de la industria de galvanizado en caliente mediante la síntesis hidrometalúrgica de sales de zinc**

**Julio Andrés Casal-Ramos<sup>1</sup>, José Ramón Domínguez<sup>2</sup>, Pedro Delvasto<sup>1\*</sup>.**

1) Departamento de Ciencia de los Materiales. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela

2) Laboratorio de Espectroscopía Atómica. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.

(\*) [delvasto@usb.ve](mailto:delvasto@usb.ve)

**Recibido:** 03/06/2011

**Revisado:** 23/06/2011

**Aceptado:** 05/09/2011

### **Resumen**

Se valorizaron polvos residuales del proceso de galvanizado en caliente, a través de la síntesis hidrometalúrgica de sales orgánicas de zinc potencialmente comercializables. El proceso consistió en disolver el residuo con HCl, seguido de la adición de ácido cítrico y una posterior precipitación de sales de zinc por adición de NaOH. En otro ensayo, se agregó etanol absoluto como modificador. En ambos casos, se obtuvieron polvos finos de color blanco, que fueron caracterizados mediante, pycnometría, espectroscopia atómica, microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos-X y espectroscopía infrarroja. Se identificaron, en ambos productos de síntesis, las fases:  $Zn(C_2H_3O_2)_2 \cdot 2H_2O$ ,  $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$  y NaCl.

**Palabras Clave:** galvanizado en caliente; residuos industriales; sales orgánicas de zinc; valorización.

### **Abstract**

The possibility of adding value to a residual dust from hot-dip galvanizing process was explored, through the synthesis of potentially marketable organic zinc salts. The valorization process started by dissolving the residue in HCl, citric acid was then added and zinc salts were finally precipitated by the addition of NaOH. In another experiment, absolute ethanol was added as a modifying agent. In both cases, the products were fine white powders which were characterized by pycnometry, atomic spectroscopy, scanning electron microscopy, x-ray diffraction and infrared spectroscopy. In the synthesized products, the following phases were identified:  $Zn(C_2H_3O_2)_2 \cdot 2H_2O$ ,  $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$  and NaCl.

**Keywords:** hot-dip galvanizing; industrial wastes; organic salts of zinc; valorization.

### **Introducción**

Todo proceso industrial lleva asociado la inevitable generación de material residual, el cual, de no encontrar un uso o aplicación, termina siendo incorporado de forma no controlada al medio ambiente o depositado, de manera controlada, en lugares predestinados para tal fin<sup>1</sup>. La industria metalúrgica no escapa de esta realidad, destacándose por producir una amplia variedad de residuos ambientalmente dañinos, que contienen, entre otras cosas, metales pesados de incidencia muy negativa sobre suelos, aguas, plantas, animales, e, incluso, seres humanos<sup>2</sup>. Entre el abanico de empresas del sector metalúrgico, resalta la industria de galvanizado por inmersión en caliente, la cual genera una serie de residuos sólidos ricos en metales pesados, particularmente zinc<sup>3</sup>.

La idea inicial de cualquier planta industrial es lograr que su producción de residuos se minimice al máximo, sin embargo, dada la imposibilidad de alcanzar una

generación de desechos nula, otras vías aparecen como alternativas al usual almacenamiento o vertido al ambiente de material residual y contaminante, éstas son, la remediación y la valorización<sup>1</sup>. La primera se define como la disminución del grado contaminante de los residuos antes de ser almacenados o vertidos con un mínimo impacto ambiental. Mientras que la segunda opción consiste en encontrar una aplicación al residuo, ya sea dentro o fuera del mismo proceso que lo genera, de tal suerte que se produzca un material con mayor valor agregado. La valorización puede involucrar, o no, un procesamiento físicoquímico del residuo, aunque esto dependerá de la aplicación a la cual sea destinado<sup>1</sup>.

Con base en la realidad anterior, en el presente trabajo se exploró la posibilidad de valorizar polvos residuales ricos en zinc, provenientes del sistema de captación de gases de una industria venezolana de galvanizado en caliente, a través de la síntesis, por vía hidrometalúrgica, de sales orgánicas de zinc. Estas sales, además de poseer un mayor

valor agregado, cuentan con potenciales aplicaciones en industrias como la farmacéutica o la de alimentos, ya que estos tipos de compuestos químicos incrementan la biodisponibilidad del zinc, lo que los convierte en agentes atractivos para la elaboración de suplementos que sirvan para combatir el déficit dietético de zinc, un elemento fuertemente ligado con la prevención de enfermedades como el cáncer<sup>4,6</sup>. Por último, para caracterizar las sales de zinc sintetizadas en este trabajo, se emplearon diversas técnicas físicoquímicas con el fin de establecer, tanto la composición elemental como las fases cristalinas presentes en los productos sintetizados.

## Parte experimental

### *Origen y características del residuo*

El polvo residual empleado en este trabajo provino de una empresa galvanizadora ubicada en la región central de Venezuela. Este material se genera cuando se recubren con zinc líquido las piezas de acero, para producir una barrera anticorrosiva sobre éste<sup>3</sup>. El espesor de dicha barrera o capa de zinc protectora, se regula mediante un proceso de secado/escurreo de la pieza, el cual se lleva a cabo mediante el uso de un chorro de aire y vapor de agua a elevada presión. Esto genera una corriente de vapor con gotas de zinc que son luego capturadas por los sistemas de limpieza de gases de la planta (filtros de manga). Los sólidos recolectados, en forma de polvos, son almacenados en contenedores para su disposición posterior. El residuo presenta un color predominantemente gris, con una densidad de 6,7 g/cm<sup>3</sup> y una morfología microscópica esférica, cuyo diámetro medio de partícula de 16,5 µm.

En cuanto a la composición química elemental del residuo, se destaca un porcentaje en peso de zinc igual al 93 %, el cual se distribuye entre una fase metálica (Zn) y una fase oxidada (ZnO), con cantidades minoritarias de otros elementos (0,09 % de Fe, 0,01 % de Na y 0,01 % de Ca). Todas las características aquí presentadas fueron determinadas en un trabajo previo<sup>7</sup>.

### *Procesamiento hidrometalúrgico del residuo y síntesis de sales orgánicas de zinc*

El procesamiento hidrometalúrgico del residuo consistió en su lixiviación empleando HCl 5 M. Las condiciones de operación fueron: 5 g de polvo de galvanizado en 50 mL del ácido, reaccionando en un frasco de vidrio, bajo una agitación orbital de 200 RPM. Seguidamente, se filtró la solución a través de un filtro de celulosa ADVANTEC número 1, para luego ser guardada en un recipiente de vidrio. Luego, se procedió a la síntesis de las sales orgánicas de zinc mediante precipitación, para lo cual se implementaron dos procedimientos ligeramente diferentes, que de aquí en

adelante se denominarán PI y PII. En PI, se añadieron a la solución ácida que contiene el residuo disuelto, 10 g de C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub> (ácido cítrico comercial), lentamente y bajo suave agitación. La solución obtenida se filtró de la misma manera descrita anteriormente. Posteriormente, a esta solución se le añadió, gota a gota y de manera controlada, una solución de NaOH 5 M, empleando una bureta, hasta observar que el medio se tornaba de color blanco y con aspecto lechoso, características indicativas de la precipitación del producto de síntesis. El proceso implicó un seguimiento del pH del sistema, desde la obtención de la solución del residuo (pH igual a - 0,5), pasando por la adición del ácido cítrico, hasta llegar a la precipitación del producto de síntesis a un pH de 4,6. Para estas mediciones se empleó un pHmetro Digimed DM-23 equipado con un electrodo de Ag/AgCl. El producto de síntesis se dejó decantar por 24 horas, para luego remover el líquido sobrenadante. A continuación, se realizó (por triplicado) un lavado con agua destilada del producto de síntesis, empleando una centrifugadora DAEMON/IEC DIVISION, que operó durante 10 min por ciclo de lavado, para posteriormente verter el material resultante en una cápsula de Petri y finalmente secarlo en una estufa a 50 °C por 96 horas.

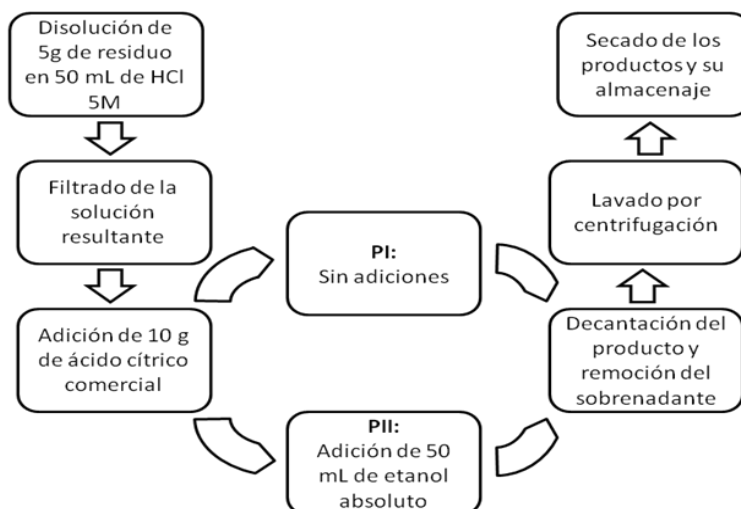
El procedimiento PII fue idéntico al empleado en PI en todas sus fases, con la excepción de que se añadieron 50 mL de etanol absoluto inmediatamente después de la adición de los 10 g de ácido cítrico comercial (lo que implicó un aumento de pH hasta aproximadamente un valor igual a la unidad), constituyendo así una etapa adicional en la que también fue medido el pH de la solución. En este caso, la precipitación del producto de síntesis también se detuvo a un pH de 4,6. En la figura 1 se describe gráficamente todo el procedimiento seguido.

### *Caracterización de las sales orgánicas de zinc sintetizadas*

**Densidad.** La medición de la densidad de los productos de síntesis se llevó a cabo mediante picnometría, utilizando etanol absoluto a 25 °C como fluido picnométrico<sup>7</sup>.

**Espectroscopía atómica (AS).** Se disolvieron 100 mg de cada producto de síntesis en 10 mL de HCl al 37 % en peso y se aforó a 500 mL con agua destilada, diluyéndose luego, a conveniencia, antes de la determinación instrumental de los analitos. Una vez preparadas las soluciones, se determinó la composición química elemental de los productos de síntesis mediante AS.

Se destaca la implementación específica de espectroscopía de absorción atómica (AAS) para la medición de zinc y de espectroscopía de emisión atómica (AES) para la cuantificación de sodio, en este caso fue necesaria la adición de CsCl<sub>2</sub> como supresor de ionización.



**Figura 1:** Esquema general del proceso de disolución de los polvos de galvanizado y su posterior procesamiento hidrometalúrgico para la generación de sales orgánicas de zinc.

Microscopía electrónica de barrido (SEM) con espectroscopía de energías dispersivas (EDS). Como preparación inicial, se recubrió cada producto de síntesis con grafito conductor mediante *sputtering* antes de su inserción en un microscopio electrónico JEOL JSM-6390, operando a un voltaje de aceleración de 25 kV. Dicho equipo permitió la observación morfológica de los productos de síntesis y el análisis microquímico elemental semicuantitativo por EDS.

Difracción de rayos-X (XRD). La detección de las fases mineralógicas (cristalinas) presentes en los productos de síntesis, se llevó a cabo con un difractómetro Phillips PW1840, empleando una longitud de onda incidente correspondiente a la radiación k-alfa del cobalto (1,7889700 Å), un barrido desde  $2\theta=10^\circ$  hasta  $2\theta=90^\circ$ , una velocidad de barrido igual a  $0,02\ 2\theta/s$ , un voltaje de 30 kV y una corriente de 22 mA. La identificación de las fases se realizó por comparación directa de los difractogramas obtenidos con las fichas estándar correspondientes, disponibles en la base de datos de la PDF-ICDD (*Powder Diffraction File - International Centre for Diffraction Data*)<sup>8</sup>.

Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Para el análisis FTIR, las muestras se mezclaron en una relación KBr:muestra de 99:1, empleando un mortero de ágata. La mezcla se prensó manualmente hasta formar pastillas traslúcidas de cada producto de síntesis, las cuales fueron colocadas en un espectrómetro BRUKER Tensor 27 para la obtención de los espectros infrarrojos y su posterior corrección de la línea base. Las condiciones de operación del equipo fueron las siguientes: 64 barridos consecutivos y una resolución espectral de  $2\text{ cm}^{-1}$ . Al finalizar, las bandas de frecuencia se caracterizaron por comparación con la literatura disponible y con espectros

estándar de la base de datos SDBS del *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)* de Japón, disponible gratuitamente online<sup>9</sup>.

## Resultados y discusión

Ambos procesos de síntesis, PI y PII, condujeron a la obtención de productos cuyo aspecto visual era similar, mostrando ambos una coloración blanca y presentando un carácter de polvo fino. La densidad obtenida por picnometría para los productos sintetizados mediante ambos métodos se muestran en la tabla 1. En dicha tabla, se evidencia una ligera superioridad del valor reportado para el espécimen generado por PII en comparación con el obtenido por PI.

**Tabla 1.** Densidades de los productos sintetizados, obtenidas mediante picnometría. En PI no se añadió etanol absoluto, mientras que en PII si se añadió.

Densidad a 25 °C (g/cm <sup>3</sup> )	
Producto de síntesis obtenido por PI	Producto de síntesis obtenido por PII
1,7 ± 0,1	1,9 ± 0,1

Las cantidades de zinc y sodio presentes en cada producto de síntesis y obtenidas mediante análisis químico AS, se presentan en la tabla 2. Se observa que el contenido de sodio en el espécimen obtenido por PII es menos de la mitad que el reportado para el espécimen obtenido por PI, como consecuencia del proceso de síntesis, ya que, en principio, para el método PII fue necesaria una menor adición de NaOH 5 M para alcanzar el pH de precipitación igual a 4,6. Como se explicará más adelante, esto obedece a la adición de etanol absoluto durante la aplicación de dicho método.

**Tabla 2.** Análisis químico por AS de zinc y sodio (% en peso) de los productos de síntesis de los procedimientos PI (sin adición de etanol) y PII (con adición de etanol).

Producto de síntesis obtenido por PI		Producto de síntesis obtenido por PII	
Zn	Na	Zn	Na
21 ± 1	12 ± 2	21,4 ± 0,6	5,2 ± 0,8

La morfología de los productos de síntesis pudo ser observada gracias a la aplicación de SEM, revelando diferencias notables entre ambos especímenes, tal y como se muestra en las figuras 2.a, 2.b, 3.a y 3.b. En estas imágenes, se puede observar que existen al menos dos fases en cada producto de síntesis, debido a la diferencia de tonalidades que se aprecia. En las imágenes que comprenden la figura 2, correspondiente al producto de síntesis obtenido mediante el proceso PI, se observa una fase oscura constituida por cristales idiomorfos, de bordes facetados muy bien definidos y con un tamaño aproximado de 5  $\mu\text{m}$ , los cuales contrastan con la fase clara, de menor tamaño y aspecto aglomerado, la cual se encuentra en menor proporción.

Con respecto a la figura 3, correspondiente al producto de síntesis obtenido mediante el proceso PII, se aprecian los dos mismos tipos de fases, con la diferencia de que, en esta ocasión, la fase clara parece estar en mayor proporción con respecto a la cantidad relativa de la misma fase en la figura 2, si se comparan las figuras 2.a y 3.a, ambas a un aumento original de 1000X. Esto permite inferir que la implementación de etanol absoluto para la precipitación del producto de síntesis en PII, tuvo una influencia en el cambio morfológico y en las proporciones relativas de las fases precipitadas, tal como establecen estudios previos similares en óxido de zinc<sup>10</sup>. Adicionalmente, al comparar nuevamente las figuras 2.a y 3.a, se aprecia en la segunda una tendencia a la formación de aglomerados con un tamaño de alrededor de 90  $\mu\text{m}$ , como consecuencia de la adición de etanol absoluto en el proceso de síntesis PII.

En la tabla 3 se reporta el microanálisis químico elemental semicuantitativo por EDS realizado en las áreas completas de las imágenes mostradas en las figuras 2.a y 3.a, para los productos sintetizados por PI y PII, respectivamente. En el mismo se observa que esta técnica detectó zinc y sodio, lo que respalda los resultados de la tabla 2. No obstante, esta técnica también advirtió la presencia de cloro como elemento adicional, el cual, como se explicará más adelante, obedece a la presencia de cloruro de sodio en los productos de síntesis.

Es de hacer notar que este análisis no pudo aplicarse para la cuantificación de otros elementos que deberían estar presentes en las muestras, tales como, hidrógeno, carbono y oxígeno.

**Tabla 3.** Porcentajes en peso de los elementos analizados por EDS en los productos sintetizados por PI (sin etanol) y PII (con etanol).

Producto de síntesis obtenido por PI			Producto de síntesis obtenido por PII		
Zn	Na	Cl	Zn	Na	Cl
44 ± 5	32 ± 2	24 ± 2	37,0 ± 0,1	35,1 ± 0,1	27,9 ± 0,1

Las fases presentes en los productos de síntesis se detectaron de manera cualitativa empleando XRD y los resultados respectivos se muestran en la figura 4. La técnica permitió la identificación en los productos de síntesis de los siguientes compuestos en fase cristalina: acetato de zinc dihidratado, citrato trisódico dihidratado y cloruro de sodio (letras A, B y C de la figura 4, respectivamente).

Es de hacer notar que, mediante comparación con las fichas de la PDF-ICDD<sup>8</sup>, algunos máximos de difracción no pudieron ser atribuidos a otros compuestos, lo que indicaría la eventual presencia de otras fases cristalinas en las muestras que no pudieron ser identificadas.

Al comparar el producto sintetizado por PII con el obtenido por PI en la figura 4, se observa también una variación de las proporciones relativas de los máximos de difracción de las fases detectadas. En particular, se aprecia la disminución de la intensidad relativa de los máximos de difracción de la fase inorgánica cloruro de sodio, en beneficio del crecimiento de los máximos correspondientes a las fases orgánicas, vale decir, acetato de zinc dihidratado y citrato trisódico dihidratado. Todo esto sugiere que la presencia de etanol absoluto en el proceso de síntesis PII promueve la precipitación de las sales orgánicas y minimiza la presencia de cloruro de sodio en el producto de síntesis.

La identificación de las fases presentes en los productos de síntesis se complementó a través del uso de la técnica de FTIR. Los espectros obtenidos se muestran en la figura 5.

Entre las bandas de frecuencia remarcables en la figura 5, pueden citarse las correspondientes a las vibraciones del ión carbonilo ( $\text{COO}^-$ ), proveniente de los carboxilatos presentes en los productos sintetizados (acetato de zinc dihidratado, citrato trisódico dihidratado, y, eventualmente, otras fases no identificadas), con números de onda comprendidos en el rango de 1660 – 1550  $\text{cm}^{-1}$ , para las vibraciones asimétricas, y de 1456 – 1315  $\text{cm}^{-1}$ , para las vibraciones simétricas de dicho ión<sup>11</sup>.

Otras bandas de interés particular son las que se encuentran a bajas frecuencias, entre 575 y 440  $\text{cm}^{-1}$ , las cuales son atribuibles a vibraciones no específicas de los enlaces metal – oxígeno<sup>12</sup>, pudiendo ser el metal, en este caso, Zn ó Na, dependiendo de la molécula de sal orgánica que corresponda.

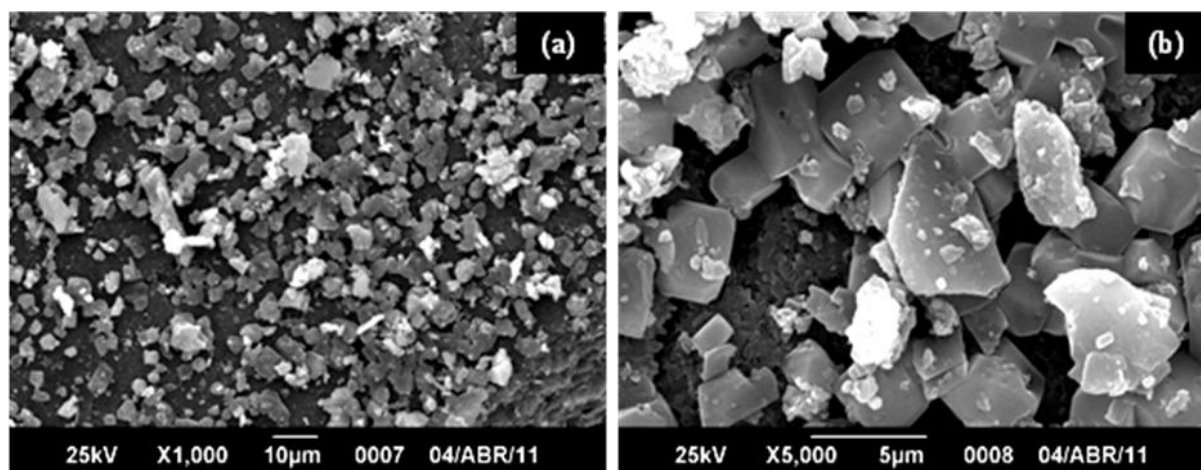
La banda de frecuencia ancha en  $3469\text{ cm}^{-1}$  se le atribuye al estiramiento del enlace O-H, mientras que los números de onda comprendidos entre  $715 - 620\text{ cm}^{-1}$  se asignan a los movimientos de flexión fuera del plano del mismo enlace.

También se resalta la presencia de las bandas espectrales comprendidas en el rango de  $1266 - 760\text{ cm}^{-1}$ , denominadas por algunos autores como “vibraciones de columna vertebral”<sup>13</sup>, debidas a las vibraciones de los enlaces C - C en las fases orgánicas presentes en las muestras.

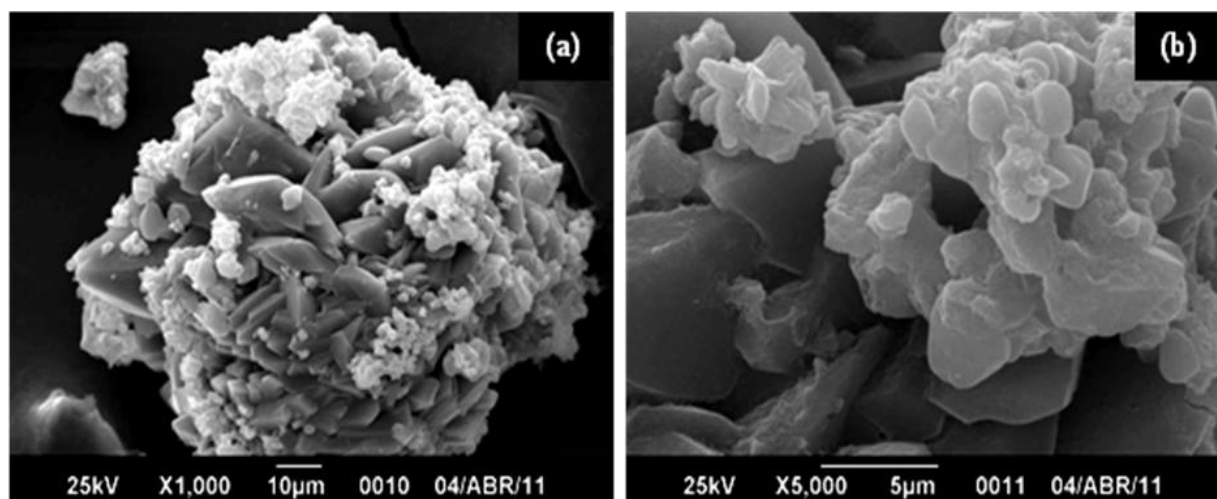
Debido a la ausencia de bandas entre  $1725 - 1700\text{ cm}^{-1}$ , características de los ácidos carboxílicos libres<sup>13</sup>, se puede inferir que en las muestras no se encontraba presente ácido

cítrico sin reaccionar, proveniente de los procesos de síntesis. Así mismo, el cloruro de sodio no pudo ser detectado por la técnica de FTIR, ya que este compuesto es invisible<sup>14</sup> en la región infrarroja comprendida entre  $400-4000\text{ cm}^{-1}$ .

Al establecer comparaciones de las bandas espectrales mostradas en la figura 5 con los espectros de la base de datos SDBS del *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology* (AIST) de Japón, se notaron coincidencias con las siguientes fases: acetato de zinc dihidratado ( $\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y citrato trisódico dihidratado ( $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), lo cual corrobora los resultados obtenidos mediante XRD.



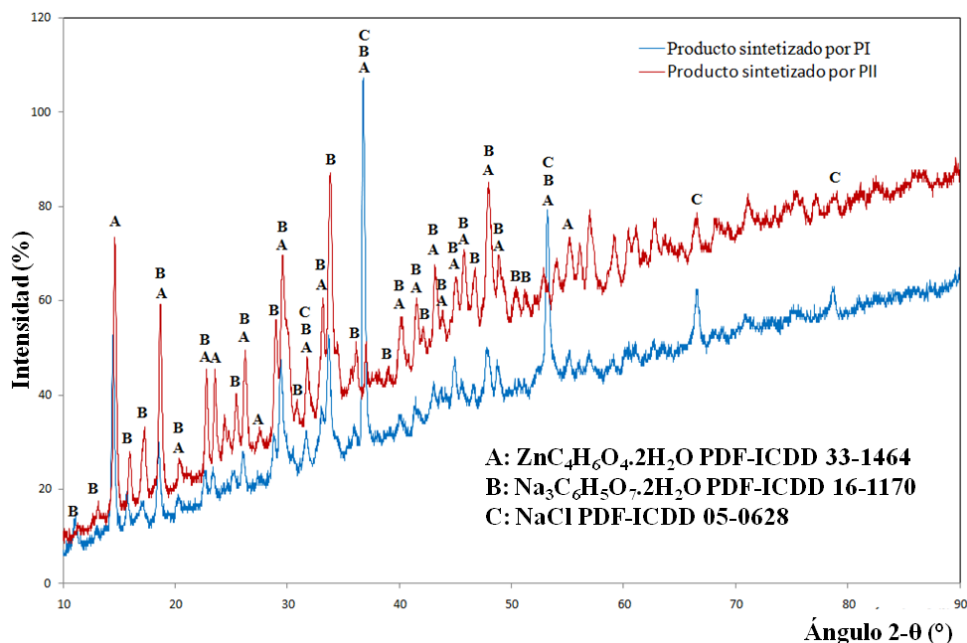
**Figura 2:** Imagen SEM del producto sintetizado por PI (sin adición de etanol). Voltaje de aceleración igual a 25 kV. Aumentos de las imágenes originales de (a) 1000X y (b) 5000X.



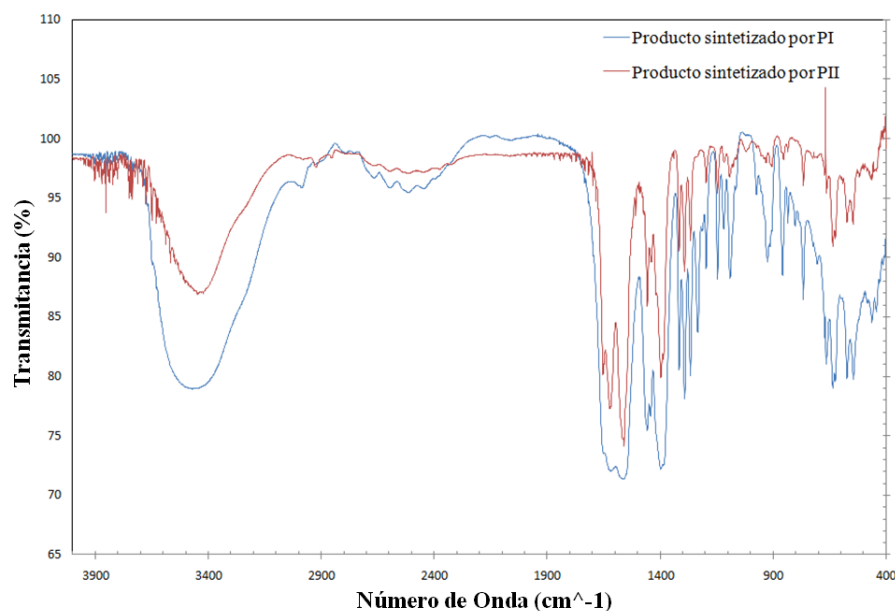
**Figura 3:** Imagen SEM del producto sintetizado por PII (con adición de etanol). Voltaje de aceleración igual a 25 kV. Aumentos de las imágenes originales de (a) 1000X y (b) 5000X.

A pesar de haber introducido ácido cítrico como único compuesto orgánico en los procesos de síntesis, no se observó la presencia de citrato de zinc en los productos obtenidos. En su lugar, sólo se detectó acetato de zinc

dihidratado como sal orgánica de zinc. La presencia de esta sal en los productos de síntesis puede ser explicada a través de un modelo de reacción química publicado por otros autores<sup>14</sup>.



**Figura 4:** Difractogramas conjuntos de los productos sintetizados por PI (curva azul inferior, proceso sin adición de etanol) y PII (curva roja superior, proceso con adición de etanol).



**Figura 5.** Espectros FTIR superpuestos de los productos sintetizados por PI (curva azul inferior, proceso sin adición de etanol) y PII (curva roja superior, proceso con adición de etanol).

Dicho modelo establece que el ácido cítrico puede descomponerse o transformarse, a pH=3 y bajo la presencia de catalizadores, en tres ácidos carboxílicos de menor complejidad, a saber: ácido fórmico (HCOOH), ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH) y ácido láctico (CH<sub>3</sub>CHOHCOOH).

La gran acidez ofrecida por la solución que contiene al residuo (pH entre - 0,5 y 1) pudiese brindar la fuerza motriz para la descomposición del ácido cítrico en ácido

acético, de acuerdo con el mecanismo propuesto por Nakui y colaboradores<sup>15</sup>, aún en ausencia de un catalizador. De acuerdo con estos mismos autores, la descomposición del ácido cítrico ocurre a valores de pH menores o iguales a 3, llegando a una tasa máxima de transformación de la citada molécula cuando se alcanza dicha igualdad. Esto permite inferir que, en ambos procesos de síntesis (PI y PII), la descomposición del ácido cítrico fue continua, desde el inicio del proceso hasta llegar a un pH igual a 3, durante la

adición controlada de la solución básica de NaOH 5 M. Luego de este punto, la transformación se minimizó o se detuvo, permitiendo que quedaran en solución iones citrato que se combinaron con el sodio presente para formar las moléculas de citrato trisódico dihidratado, aparentemente favorecidas en su formación frente a las de citrato de zinc.

En PII, la descomposición del ácido cítrico se ve disminuida en comparación con PI, ya que la adición de etanol absoluto aumenta el pH inicial de la solución, logrando así que el rango de pH comprendido desde el inicio de la adición de NaOH 5 M (pH= 0,5 en PI y pH=1 en PII) hasta el valor de pH de finalización de la transformación del ácido cítrico (pH=3), sea menor en PII al compararlo con PI. Esto trae como consecuencia un acortamiento del rango de transformación y, por tanto, una mayor cantidad de citrato trisódico dihidratado en el producto sintetizado mediante PII en comparación con el sintetizado por PI, tal como parecen indicar los análisis químicos por AS (tabla 1) y los resultados de XRD (figura 4), mostrados con anterioridad.

De la misma manera, la cantidad de cloruro de sodio es mayor en el producto sintetizado por PI en comparación con el generado por PII. En principio, esto se debe a que en el segundo procedimiento hay menos iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ) para combinarse con los iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) ya que dicha ruta de síntesis consume menos agente precipitante (NaOH 5 M). Adicionalmente, debe tomarse en cuenta que debido a que el citrato de sodio es insoluble en etanol, al estar presente dicho agente en el sistema, la mayoría del  $\text{Na}^+$  presente se combinó con los iones citrato ( $[\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7]^{-3}$ ) para dar lugar a la precipitación de una mayor cantidad de citrato trisódico dihidratado.

Los análisis de caracterización realizados en este trabajo no fueron concluyentes al momento de detectar otros compuestos que, tal y como lo predice el modelo de Nakui y colaboradores<sup>13</sup>, pudiesen contener iones citrato, lactato o formiato. Esta limitación puede producirse bien sea porque estos compuestos hayan sido removidos de los especímenes durante el proceso de lavado por centrifugación, o, bien porque los picos de difracción en XRD y las bandas espectrales en FTIR de estas posibles fases se hayan solapado con las señales más fuertes, provenientes de las fases mayoritarias detectadas mediante dichas técnicas.

## Conclusiones

Los experimentos realizados en el presente trabajo permitieron la conversión hidrometalúrgica del residuo, proveniente de la industria de galvanizado, en una mezcla en polvo que contiene sales orgánicas de zinc. Los resultados mostraron que ambos productos de síntesis generados en los procesos PI y PII están compuestos por

las mismas fases, vale decir: acetato de zinc dihidratado, citrato trisódico dihidratado y cloruro de sodio. Sin embargo, las proporciones relativas de estas fases y la morfología de las mismas, se vieron afectadas por la incorporación de etanol absoluto en el proceso de síntesis PII, en comparación con el proceso PI. Vale destacar, que las fases de sodio presentes, en ambos especímenes, actúan como contaminantes del producto deseado (las sales orgánicas de zinc). Esta contaminación es inherente a los procesos de síntesis empleados, los cuales se basaron en una disolución con HCl concentrado seguido de una precipitación por neutralización con NaOH. Eventualmente, este exceso de sodio impediría la utilización directa de los productos sintetizados en este trabajo, para industrias aguas abajo, tales como la farmacéutica o la de alimentos. Por estas razones, quedará contemplado en próximas investigaciones apuntalar adecuadamente el procedimiento de síntesis a seguir, para garantizar que las sales orgánicas de zinc obtenidas resulten libres de sodio.

## Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al aporte económico brindado por el Decanato de Estudios Profesionales y el Decanato de Investigaciones (DID) de la Universidad Simón Bolívar, así como a los aportes LOCTI hechos por la Corporación FBK C.A., bajo el proyecto FUNINDES-USB 49-2421 "Investigación e innovación en biominería y valorización de desechos generados por la industria extractiva nacional". Los autores desean también agradecer por su cooperación al desarrollo de este trabajo a la Ing. Nahir Durán, a la Lic. Lucía Ahn y al Prof. José Miguel Delgado (ULA, Venezuela).

## Referencias

1. X Castells. Reciclaje de Residuos Industriales: Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España. Pp 1–2, 15–18, 27–29, 45–48 (2000).
2. C Escudero. Valorisation of industrial wastes for the removal of metals and arsenic from aqueous effluents. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Química, Agraria y Agroalimentaria. Universidad de Girona. Girona, España. Pp 1–27 (2009).
3. N Durán. Estudios de los subproductos de cinc en el proceso de galvanizado en caliente por lote en Industrias UNICON C. A. Proyecto de grado en Ingeniería de Materiales. Coordinación de Ingeniería de Materiales. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela. Pp 29–32; 59–66; 75–79 (2010).
4. L Costello, R Franklin, P Feng. Mitochondrial function, zinc, and intermediary metabolism relationship in normal prostate and prostate cancer. *Mitochondrion*, **5**, 14–153 (2005).
5. R Franklin, L Costello. Zinc as anti-tumor agent in prostate cancer and in other cancers. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, **463**, 211–217 (2007).



6. S Lin, H Wei, D Maeder, R Franklin, P Feng. Profiling of zinc-altered gene expression in human prostate normal vs cancer cells: a time course study. **Journal of Nutritional Biochemistry**, **20**, 1000–1012 (2009).
7. J Casal. Síntesis de sales de zinc mediante la valorización de un residuo proveniente de una industria de galvanizado en caliente de Venezuela. Proyecto de grado en Ingeniería de Materiales. Coordinación de Ingeniería de Materiales. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela. Pp 19, 36, 39-46, 54 (2011).
8. PDF-ICDD Powder Diffraction File, International Centre for Diffraction Data, 12 Campus Boulevard, Newton Square, PA, USA, (2002).
9. <http://riodb01.ibase.aist.go.jp/sdbs/>
10. P Tonto, O Mekasuwandumrong, S Phatanasri, V Pavarajarn, P Praserthdam. Preparation of ZnO nanorod by solvothermal reaction of zinc acetate in various alcohols. **Ceramics International**, **34**, 57–62 (2008).
11. V Zelenak, Z Vargová, K Györyová. Correlation of infrared spectra of zinc(II) carboxylates with their structures. **Spectrochimica Acta Part A**, **66**, 262-272 (2007).
12. C Djordjevic. Metal-oxygen vibration modes in the infra-red spectra of aluminium, gallium and indium tris-acetylacetonates. **Spectrochimica Acta**, **17**, 448–453 (1961).
13. J Coates. Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. En: Encyclopedia of Analytical Chemistry. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, United Kingdom. Pp 10815–10837 (2000).
14. B Stuart. Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons Ltd. England. Pp25–28, 72 (2004).
15. H Nakui, K Okitsu, Y Maeda, R Nishimura. Formation of formic acid, acetic acid and lactic acid from decomposition of citric acid by coal ash particles at room temperature. **Journal of Hazardous Materials**, **168**, 548–550 (2009).