

**DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS  
PARTÍCULAS DEL CATALIZADOR TITANATO DE ESTRONCIO DOPADO CON  
EUROPIO MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SEM**

**JUAN CARLOS MONTES CALA**

**MÓNICA ESPERANZA VELÁSQUEZ TORRES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2015**

**DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS  
PARTÍCULAS DEL CATALIZADOR TITANATO DE ESTRONCIO DOPADO CON  
EUROPIO MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SEM**

**JUAN CARLOS MONTES CALA**

**MÓNICA ESPERANZA VELÁSQUEZ TORRES**

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Químico

Director:

**HENRY ARGUELLO FUENTES**

Ingeniero Eléctrico, PhD

Codirector:

**FERNANDO MARTÍNEZ ORTEGA**

Químico, PhD

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2015**

## AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio de microscopía de la Universidad Industrial de Santander por su colaboración para obtener las micrografías SEM. Al PhD. Henry Arguello Fuentes y al PhD. Fernando Martínez Ortega por su apoyo y conocimientos aportados en este proyecto.

También agradecemos considerablemente al Ms. Ariolfo Camacho Velasco y a la PhD. Yuri Hercilia Mejía por su paciencia y ayuda en las correcciones de este libro, Mil gracias.

También al grupo de investigación en procesamientos de señales de altas dimensiones (HDSP) perteneciente a la escuela de ingeniería de sistemas por darnos la oportunidad de trabajar en sus instalaciones y a todos sus integrantes.

Agradecemos también al centro de investigación en catálisis (CICAT), por sus aportes y conocimientos en los seminarios.

Finalmente damos las gracias a la Decana de facultad Físicoquímicas, la PhD. Sonia Azucena Giraldo Duarte por ser la que dio origen a esta idea como proyecto y sus clases de Catálisis las cuales ayudaron a ser creativos a la hora de plantear el problema.

Y a la Escuela de ingeniería química por ser parte de nuestras vidas. 😊

## DEDICATORIAS

*A Jehová Dios, nuestro señor Jesucristo y Espíritu Santo por darme fuerza y sabiduría en este largo camino, a mis señores padres Juan Antonio Montes Espriella y Agustina Cala Camacho por toda la paciencia que tuvieron conmigo, a mis hermanos Carlos Alberto Montes Cala y Ana María Montes Cala por compartir momentos de Alegría y tristeza, los cuales fueron parte de mi formación personal, a mi sobrino Jorge Andrés Caballero Montes por enseñarme a ser creativo como un niño, y a Miryam Díaz Parada por compartir estos momentos importantes en mi vida.*

*Juan Carlos Montes Cala*

*A Dios, a mis padres, a mis hermanas, a mis familiares y amigos. En memoria de mi abuelita Isabel.*

*A Lulú Fernanda y a Ricardo.*

*Mónica Esperanza Velásquez Torres*

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	17
1. LA CATÁLISIS .....	20
1.1 CARACTERIZACIÓN DEL CATALIZADOR.....	20
1.2 TRATAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES .....	21
1.2.1 Imagen digital.....	21
1.2.2 Tipos de imágenes digitales .....	22
1.3 HISTOGRAMAS .....	23
1.4 FILTROS.....	24
1.4.1 Filtros lineales .....	24
1.4.2 Filtros no lineales .....	25
1.4.3 Filtros detectores de bordes (contornos).....	26
1.5 MÉTODO DE LA MÁXIMA ENTROPÍA (MEM) .....	27
1.6 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES BINARIAS .....	27
1.6.1 Características de los objetos binarios .....	27
1.6.2 Área.....	27

1.7 PROGRAMAS COMPUTACIONALES APLICADOS AL TRATAMIENTO DE IMÁGENES .....	28
1.7.1 Matlab. ....	28
1.7.2 ImageJ. ....	28
1.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	29
1.8.1 Descripción gráfica de los resultados (histogramas) .....	29
1.8.2 Medidas de centralización .....	29
1.8.3 Medidas de dispersión.....	30
1.8.4 Regresión polinómica de grado m.....	30
1.8.5 Coeficiente de correlación (R <sup>2</sup> ).....	31
1.8.6 Sensibilidad estadística (S) .....	31
1.8.7 Especificidad estadística (E) .....	32
2. OBJETIVOS.....	33
2.1 Objetivo General.....	33
2.2 Objetivos Específicos.....	33
3. METODOLOGÍA .....	34
3.1 ADQUISICIÓN DE LA IMAGEN SEM DEL CATALIZADOR SEZT .....	35
3.2 PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES SEM DEL CATALIZADOR SEZT .....	37

3.2.1 Ecualización (histograma).....	38
3.2.2 Aplicación de filtros lineales y no lineales .....	39
3.2.3 Binarización.....	40
3.2.4 Detección de bordes de las partículas.....	41
3.2.5 Método de máxima entropía (MEM).....	42
3.2.6 Etiquetado y cuantificación de las partículas .....	42
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	44
4.1 ANÁLISIS DEL NÚMERO DE PARTÍCULAS DIFERENCIADAS POR SU TAMAÑO .	44
4.2 ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE TAMAÑOS DE ÁREA.....	46
4.3 ANÁLISIS DEL PERFIL DEL NÚMERO DE PARTÍCULAS .....	47
4.4 EVALUACIÓN DEL ALGORITMO CON RESPECTO AL SOFTWARE IMAGEJ .....	50
5. CONCLUSIONES .....	53
CITAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54
BIBLIOGRAFÍA.....	58
ANEXOS.....	62

## LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Estadística de los tamaños de partículas presentes en las tres imágenes SEM de la muestra catalítica SEZT calculados por el algoritmo desarrollado. ....	46
Tabla 2. Número de partículas detectadas por el algoritmo y el <i>software ImageJ</i> . ....	52

## LISTA DE FIGURAS

pág.

- Figura 1. Píxel A y su conectividad de a) 4 píxeles vecinos y b) 8 píxeles vecinos [18]. ... 22
- Figura 2. Aplicación del filtro de la mediana: a) imagen con ruido y b) reducción del ruido y mejora de los bordes en la imagen (a) por el filtro de la mediana . ..... 25
- Figura 3. Aplicación del filtro detector de bordes: a) imagen original y b) detección de los bordes de la imagen (a) . ..... 26
- Figura 4. Conjunto de imágenes SEM del *titanato de estroncio dopado con europio*: a) imagen de la muestra SEZT\_01 con etiqueta, b) imagen de la muestra SEZT\_02 sin etiqueta y c) imagen de la muestra SEZT\_03 sin etiqueta..... 36
- Figura 5. Diagrama de flujo del procesamiento de imágenes SEM utilizando el algoritmo computacional planteado. .... 38
- Figura 6. Mejoramiento del contraste y brillo de la imagen SEZT\_01 a partir de la ecualización del histograma: a) imagen original SEZT\_01 con su histograma antes de ecualizar y b) imagen SEZT\_01 ecualizada con su respectivo histograma. .... 39
- Figura 7. Aplicación de los filtros lineales y no lineales de la imagen SEZT\_01. Mejoramiento de la nitidez y reducción del ruido: a) Imagen de entrada para aplicar los filtros, b) resultado de la imagen SEZT\_01 después de aplicar los filtros lineales y no lineales donde se resalta en el recuadro la mejora en los bordes. .... 40
- Figura 8. Binarización de la imagen para eliminar falsas partículas (círculo rojo) producidas por ruido después de aplicar los filtros lineales y no lineales en la imagen SEZT\_01: a) Imagen de entrada obtenida en el paso 2, b) resultado de la imagen después de aplicar la binarización donde el blanco indica una intensidad de 1 y el negro una

intensidad 0, c) cambio de *background* de la imagen SEZT\_01 binarizada para una mejor visualización de las partículas representadas de color rosado. .... 41

Figura 9. Detección de los bordes de las partículas presentes en una micrografía SEM del catalizador SEZT\_01 por el filtro *Canny*: a) imagen SEZT\_01 binarizada, b) Imagen SEZT\_01 filtrada con el filtro de *Canny* que resalta los bordes (color blanco) y c) cambio de fondo de la imagen SEZT\_01 con filtro *Canny* para detallar mejor los bordes (color naranjado) de las diferentes partículas..... 41

Figura 10. Determinación del tamaño de partícula por el *software ImageJ*. a) imagen SEZT\_01 etiquetada con diferentes números, resultado del algoritmo planteado. b) segmento aleatorio de la imagen etiquetada. c) etiquetas asignada a cada partícula con su área en calculada por el *software ImageJ*. .... 43

Figura 11. Histogramas de distribución de tamaño de las partículas en las tres imágenes SEM del catalizador SEZT: a) histograma de la imagen SEZT\_01, b) histograma de la imagen SEZT\_02 y c) histograma de la imagen SEZT\_03. .... 45

Figura 12. Perfil polinómico de grado 10 para predecir el número de partículas en función del tamaño, residuos del perfil y expresión matemática del polinomio de: a) imagen SEM SEZT\_01, b) imagen SEM SEZT\_02 y c) imagen SEM SEZT\_03. .... 49

Figura 13. Segmentación y etiquetado de la imagen SEZT\_01, a) imagen original, b) segmento de la imagen original, c) detección de partículas por algoritmo y d) detección de partículas por el *software ImageJ*..... 50

## LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo A. Imágenes SEM originales del titanato de estroncio dopado con europio.....	62
Anexo B. Proceso realizado por el algoritmo planteado en la imagen SEZT_02 y la imagen SEZT_03.....	65

## RESUMEN

**TITULO:** DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DEL CATALIZADOR TITANATO DE ESTRONCIO DOPADO CON EUROPIO MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SEM\*

**AUTORES:** Juan Carlos Montes Cala y Mónica Esperanza Velásquez Torres.\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Catalizador, procesamiento de imágenes, distribución de tamaño de partículas, *Matlab* e *ImageJ*.

### DESCRIPCIÓN:

Los catalizadores son ampliamente empleados en la industria química y su eficiencia depende entre otros de su morfología. Se caracterizan siguiendo diversas técnicas que dependen de las propiedades fisicoquímicas y/o morfológicas que se desean conocer. Debido a la importancia de caracterizar los catalizadores, se ha propuesto realizar un tratamiento de las imágenes obtenidas por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, por su sigla en inglés) para obtener información cuantitativa acerca del tamaño de las partículas. Las imágenes SEM utilizadas para este tratamiento provienen de un catalizador tipo *titanato de estroncio dopado con europio*:  $Sr_{0,94}Eu_{0,03}Zr_{0,1}Ti_{0,9}O_3$ . El tamaño de las áreas de las partículas del sólido se calcula mediante un algoritmo computacional propuesto en este estudio que utiliza los programas *Matlab* e *ImageJ*. Se aplicaron filtros lineales, no lineales, detectores de bordes y otras técnicas de procesamiento digital en las imágenes SEM. Se realizó un análisis estadístico a la información obtenida de la imagen SEM del catalizador para determinar la distribución del tamaño de las áreas de las partículas. El algoritmo desarrollado detecta eficientemente las áreas de las partículas pequeñas del *titanato de estroncio dopado con europio* en las imágenes SEM utilizadas con una sensibilidad de 0,94 y especificidad de 0,06.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: PhD. Henry Arguello Fuentes. Codirector: PhD. Fernando Martínez Ortega.

## ABSTRACT

**TITLE:** DETERMINATION OF THE SIZE DISTRIBUTION OF CATALYST PARTICLES STRONTIUM TITANATE DOPED WITH EUROPIUM BY SEM IMAGES PROCESSING\*

**AUTHORS:** Juan Carlos Montes Cala and Mónica Esperanza Velásquez Torres.\*\*

**KEY WORDS:** Catalyst, image processing, particle size distribution, *Matlab* and *ImageJ*.

### DESCRIPTION:

Catalysts are widely used in chemical industry and its efficiency depends among others of its morphology. They are characterized following different techniques depending on the physicochemical and/or morphological properties you want to know. Because it is important to characterize the catalysts, image processing techniques are proposed for obtaining quantitative information of the particle size using images obtained by scanning electron microscopy (SEM). SEM images used for processing come from a strontium titanate type catalyst doped with europium:  $\text{Sr}_{0.94}\text{Eu}_{0.03}\text{Zr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_3$ . A computational algorithm proposed in this study using Matlab and ImageJ softwares calculates the size of the areas of solid particles. We applied linear filters, nonlinear filters, edge detectors and other digital processing techniques in the SEM images. A statistical analysis was conducted on the information obtained from the image SEM of the catalyst to determine the size distribution of the particles areas. The algorithm developed efficiently detects areas of small particles of strontium titanate doped with europium in the SEM images used with a sensibility of 0,94 and a specificity of 0,06.

---

\* Bachelor thesis.

\*\* Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director: PhD. Henry Arguello Fuentes. Codirector: PhD. Fernando Martínez Ortega.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente los catalizadores sólidos son de gran importancia en la industria química [1], están presentes en el 90% de las reacciones químicas [2] y son trascendentales en la economía mundial debido a su impacto en diversos procesos [3]. La investigación y preparación de nuevos catalizadores es un tema de investigación que permite nuevos diseños para los procesos y una mayor eficiencia en los existentes [1]. Las propiedades físicas y químicas de un catalizador son responsables de su actividad en una reacción dada.

La síntesis de un nuevo catalizador heterogéneo incluye la caracterización de su área superficial, la forma y el tamaño de sus granos y/o partículas entre otras [3]; estas propiedades físicas influyen en la actividad catalítica del sólido, dado que los sitios activos están presentes en la superficie del catalizador y la reacción química ocurre en la interfase [4]. Dado a la naturaleza compleja del catalizador y con el objeto de comprender cómo opera el catalizador a nivel molecular se busca establecer relaciones entre los factores que determinan la composición del catalizador y las que determinan el comportamiento catalítico, las cuales son importantes en el uso para la preparación del catalizador.

Diferentes técnicas espectroscópicas, microscópicas y de difracción se utilizan para caracterizar las superficies sólidas y se basan en la excitación de los orbitales electrónicos de las partículas adheridas en la superficie del catalizador. La Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, por su sigla en inglés) es una técnica para determinar el tamaño y la forma de las partículas. Los electrones tienen longitudes de onda menor a  $1 \text{ \AA}$  y permiten un monitoreo cercano al detalle atómico de la superficie, razón por la cual permite una caracterización morfológica del sólido.

SEM se basa en la interacción que se produce cuando un haz de electrones de alta energía incide sobre la superficie del sólido, produciéndose diversos tipos de señales tales como electrones retrodispersados, secundarios y Auger. Siendo los electrones retrodispersados y secundarios usados para la obtención de la imagen en el microscopio electrónico [3]. La microscopía electrónica se utiliza con frecuencia para estudiar catalizadores, particularmente para obtener datos sobre las formas, tamaños de granos y/o partículas, hábito cristalino, homogeneidad, el área relativa de las diferentes fases cristalinas y la presencia de compuestos amorfos ó cristalinos y su distribución [5-8].

Sin embargo, las imágenes SEM no proporcionan información cuantitativa de la distribución del tamaño de las partículas a simple vista. Además, el equipo del laboratorio de microscopia electrónica de barrido de la Universidad Industrial de Santander no utiliza ninguna herramienta computacional para realizar esta función. Esto limita a los ingenieros químicos, químicos y demás profesionales que trabajan en el área de la catálisis (ver sección 1.1).

En este proyecto se determina la distribución del tamaño de las áreas de las partículas presentes en el catalizador *titanato de estroncio dopado con europio*  $\text{Sr}_{0.94}\text{Eu}_{0.03}\text{Zr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_3$  (abreviado SEZT) mediante el procesamiento de imagen de tres microfotografías SEM, a través del algoritmo computacional propuesto en el presente estudio que involucra los programas *Matlab* e *ImageJ*. Para ello, en la sección 1.2 se describe la teoría básica de procesamiento de imágenes digitales, que se usa como herramienta matemática para el desarrollo de este proyecto, luego la sección 1.3 describe brevemente *Matlab* e *ImageJ* como *software* de procesamiento de imágenes. En esta última sección se desarrolla el cálculo de las áreas y distribución de partículas de la imagen SEM del sólido catalítico. Para

determinar la variabilidad de los resultados obtenidos en el algoritmo propuesto se utiliza la estadística descriptiva que se enuncia en la sección 1.4.

Los objetivos en el desarrollo del presente trabajo de grado se encuentran en la sección 2. En la sección 3 se muestra la metodología a seguir para cumplir los objetivos y en la sección 4 los resultados obtenidos con su respectivo análisis. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones de la investigación realizada en el presente trabajo.

## 1. LA CATÁLISIS

La catálisis es un proceso químico en el que se utilizan catalizadores para incrementar la velocidad de reacción [2]. Los catalizadores se puede clasificar en tres áreas importantes en la economía mundial actual: la refinación de petróleo [9], la fabricación de productos químicos [9] y los procesos que implican el tratamiento de la contaminación presente en el medio ambiente [10]; en esta última área, se diseñan productos y procesos químicos que reducen o eliminan el uso y generación de sustancias peligrosas, procesos clasificados como “verdes” [11] y adicionalmente se aplican en la eliminación de residuos de la industria nuclear [12].

La presencia de un medio gas-sólido o líquido-sólido se denomina catálisis heterogénea [4] y ha ocupado un lugar importante en la industria química, permitiendo una fácil separación del producto y el catalizador [11]. La forma y el tamaño de las partículas y la estructura de la superficie del catalizador, específicamente los sitios activos (donde se lleva a cabo la reacción química catalizada) afectan el desempeño de la catálisis heterogénea [4], [13]. Por lo tanto, detectar tamaños y cuantificar las partículas son procedimientos de gran importancia. El catalizador caracterizado en este proyecto pertenece a la catálisis heterogénea.

### 1.1 CARACTERIZACIÓN DEL CATALIZADOR

La caracterización es un campo importante en la catálisis. En la industria, el énfasis está principalmente en el desarrollo de un catalizador activo, selectivo, estable y mecánicamente robusto. Relaciones empíricas entre los factores que

rigen la composición de catalizador y los que determinan el rendimiento catalítico son de gran utilidad en el desarrollo de catalizador, aunque no siempre dan ideas fundamentales sobre cómo el catalizador opera a nivel molecular [14]. La espectroscopia, microscopía, la difracción y métodos basados en la adsorción y desorción o reacciones a granel (reducción o oxidación) son herramientas para investigar la naturaleza de un catalizador activo [14]. En el presente trabajo se utilizan herramientas computacionales y se plantea un algoritmo para determinar la distribución de tamaños de partículas de un catalizador por medio de imágenes SEM. De esta forma se obtiene información que no se puede detallar en una micrografía SEM a simple vista, facilitando al investigador un método alternativo de caracterización.

## 1.2. TRATAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES

El tratamiento de imágenes digitales es una serie de procesamientos que se utilizan para obtener y analizar determinadas características de un objeto de interés, en este caso, las imágenes SEM de un catalizador. Se pueden utilizar diferentes tipos de procesamiento: de bajo nivel (suavizado, eliminación de ruidos, definición de bordes, etc.), de medio nivel (definición de límites y extracción de características) y de alto nivel (relaciones semánticas entre los objetos de una escena) [15], en este trabajo se hace uso de los tres niveles.

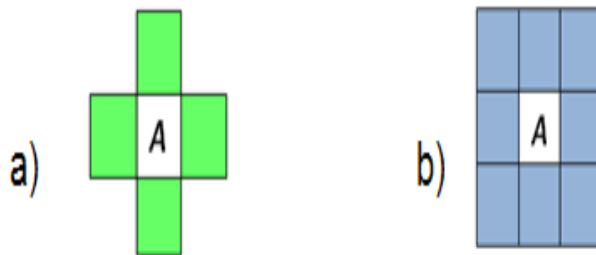
**1.2.1 Imagen digital:** Una imagen digital está compuesta por un número finito de elementos llamados elementos de la imagen y píxeles (término más comúnmente utilizado) [16]. Es representada por una función de dos variables independientes discretas de la forma  $I(m, n)$ , o puede ser descrita en forma matricial [15]:

$$I(m, n) = \begin{bmatrix} I(1,1) & \dots & I(1,N) \\ \vdots & & \vdots \\ I(M, 1) & \dots & I(M, N) \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde  $m$  y  $n$  designan las filas y columnas de la imagen, respectivamente, y cada elemento de la imagen se refiere al píxel (mínima unidad homogénea en color) para una posición dada  $(m, n)$ .

La relación que tiene un píxel con sus píxeles vecinos se llama conectividad y es importante en el procesamiento de imágenes puesto que muchas operaciones utilizan este concepto para definir un área local de influencia [17]. Un píxel puede tener conectividad de píxeles vecinos de 4 u 8 píxeles [18] (Figura 1).

**Figura 1.** Píxel A y su conectividad de a) 4 píxeles vecinos y b) 8 píxeles vecinos [18].



**1.2.2 Tipos de imágenes digitales:** Existen cuatro tipos de imágenes digitales [15]: de intensidad o escalas de grises, binarias, indexadas y de color (RGB). En el presente proyecto se utilizan las imágenes a escalas de grises debido a que las imágenes SEM son de esa clase y las imágenes binarias debido a que son usadas

para diferenciar las partículas en las micrografías para el proceso de etiquetado que se va a usar (ver sección 3.2.6).

- **Intensidad (grises):** Las imágenes a escala de grises son monocromáticas y representa un determinado número de intervalos en el cual los valores de la matriz han sido escalados y puede presentar dos diferentes tipos de datos: *uint8* (intervalo de píxeles [0, 255]) y *double* (intervalo de píxeles [0,1]) [15].
- **Binarias:** Las imágenes binarias son de tipo de dato *logical* caracterizadas por solo tener dos valores, cero (0) para el fondo y de uno (1) para el primer plano de la imagen [15], [17].

### 1.3 HISTOGRAMAS

Los histogramas son distribuciones que describen la frecuencia con la que se presentan los diferentes niveles de la escala de grises de una imagen [16], [19]. El análisis visual de un histograma muestra el contraste y la iluminación de una imagen [15], [17]. Con su ecualización se logra obtener un histograma uniforme en la imagen de salida mediante una operación de píxel de la imagen que permite mejorar la distribución a lo largo de los niveles de intensidad [15], [18].

## 1.4 FILTROS

Los filtros actúan sobre la imagen para cambiar los valores de los píxeles en una forma específica [17] y hace referencia a la aceptación o rechazo de determinados compuestos de frecuencia [16]. Su funcionamiento consiste en seleccionar un píxel de interés en la imagen, aplicarle una operación predefinida con la afectación de sus píxeles vecinos y luego reemplazar este nuevo píxel [17]. El resultado de aplicar filtros es obtener una imagen en donde la información es presentada en una forma más adecuada que en la imagen original, debido a la eliminación de ruido, extracción y/o mejoramiento de características propias [17].

Existen diferentes tipos de filtros: lineales, no lineales, binarios, morfológicos, para detectar esquinas, líneas, curvas, bordes (contornos). En este proyecto se utilizan los filtros lineales, no lineal, binario y detector de bordes.

**1.4.1 Filtros lineales:** El filtro lineal sirve para reducir la cantidad de variaciones de intensidad entre píxeles vecinos (suavizado) y eliminar aquellos píxeles cuyo nivel de intensidad es muy diferente al de sus vecinos (eliminar ruido), cuyo origen puede estar tanto en el proceso de adquisición de la imagen como en el de transmisión de la imagen SEM. El píxel resultante (filtrado) es una combinación lineal de los valores de intensidad de los píxeles dentro de la región de procesamiento por un filtro *kernel* (o también llamado *máscara*) [15], [17]. Existen diferentes tipos de filtros lineales como el filtro promedio y el filtro Gaussiano.

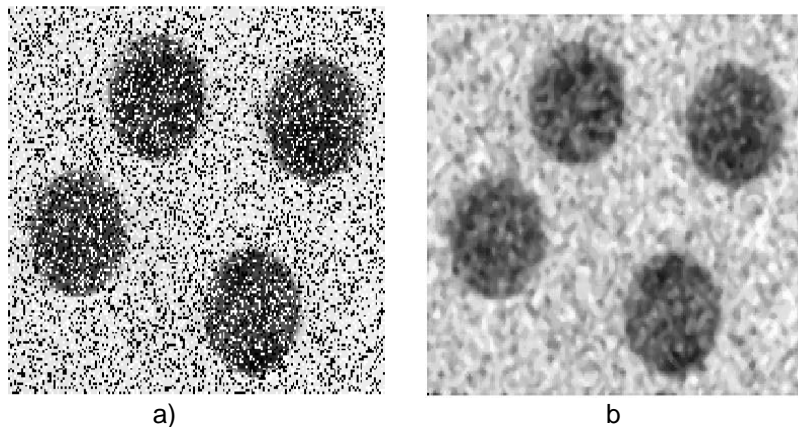
- **El filtro promedio:** es el filtro lineal más simple, opera otorgando la misma importancia (peso) a todos los píxeles de la vecindad y es usado como procesamiento preliminar para suavizar las imágenes SEM [17].

- **El filtro Gaussiano:** corresponde a una función de Gauss bidimensional [9]. El radio de cobertura de esta función es representado por la desviación estándar y disminución del ruido.

**1.4.2 Filtros no lineales:** Los filtros no lineales operan de la misma manera que los filtros lineales, con la diferencia que el valor filtrado es el resultado de una operación estadística no lineal con los píxeles vecinos [17]. Existen diferentes tipos de filtros no lineales como el filtro de la mediana, los filtros de máximos y mínimos. En este trabajo se aplica el filtro de la mediana porque quita las imperfecciones o ruidos de la imagen y al mismo tiempo mantiene intactas las partículas de la imagen del catalizador SEZT.

- **El filtro de la mediana:** es uno de los filtros estadísticos no lineales más usados en el procesamiento de imágenes [16]. No afecta significativamente los bordes, elimina artefactos y estructuras no deseadas en la imagen (Figura 2) [15]. En este filtro, el píxel de entrada es reemplazado por la mediana de los píxeles de una región de interés [18].

**Figura 2.** Aplicación del filtro de la mediana: a) imagen con ruido y b) reducción del ruido y mejora de los bordes en la imagen (a) por el filtro de la mediana [17].



**1.4.3 Filtros detectores de bordes (contornos):** Un borde es una discontinuidad o gradiente en la imagen [17] y los puntos en éste pueden ser considerados como píxeles con un cambio abrupto en el nivel de la escala de grises, indicando el principio y el final de una región (borde) [18]. Los filtros de derivadas son utilizados para detectar bordes [17]. El filtro *Canny* es eficiente detectando bordes y por eso es aplicado en este trabajo para limitar los bordes de las partículas en el catalizador.

- **El filtro *Canny*:** es un filtro basado en métodos de gradiente, con el criterio también de la segunda derivada o *Laplaciano* [15]. Minimiza los bordes falsos, localiza eficientemente los bordes (Figura 3) y genera una imagen cuyo ancho de borde es un píxel [15].

**Figura 3.** Aplicación del filtro detector de bordes: a) imagen original y b) detección de los bordes de la imagen (a) [17].



a)



b)

## 1.5 MÉTODO DE LA MÁXIMA ENTROPÍA (MEM)

La idea básica de MEM es encontrar partículas que no fueron detectadas por el filtro de *Canny* y encontrar consistencia teniendo en cuenta las incertezas debido al ruido y seleccionar entre todas ellas la única que contiene la mínima información o equivalente a la máxima entropía. Este método permite una reconstrucción de las imágenes para mejorar su caracterización morfológica [20].

## 1.6 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES BINARIAS

Un método para la extracción de características de imágenes binarias consiste en realizar una segmentación, teniendo en cuenta la vecindad y el etiquetado de una región de píxeles [18]. El etiquetado consiste en asignar una *label* o marca temporal y luego agrupar las etiquetas en un mismo objeto [15].

**1.6.1 Características de los objetos binarios:** Son medidas cuantitativas obtenidas por cálculo directo de los píxeles que componen el objeto [15]. Un objeto  $\sigma$  de una imagen binaria puede ser interpretado como una agrupación de puntos de valor uno  $X_i = (x, y)$ , bajo el criterio de vecindad [15]:

$$\sigma = \{X_1, X_2, \dots, X_N\} = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)\}. \quad (2)$$

**1.6.2 Área:** Puede ser calculada mediante el número de píxeles que conforman el objeto  $\sigma$  [15]:

$$Area(\sigma) = N = |\sigma|. \quad (3)$$

## 1.7 PROGRAMAS COMPUTACIONALES APLICADOS AL TRATAMIENTO DE IMÁGENES

**1.7.1 Matlab:** *Matlab* es un lenguaje de computación avanzado interdisciplinario que permite realizar cálculos por medio de funciones implementadas para diferentes disciplinas científicas como la comunidad de procesamiento de imágenes [15]. *Matlab* contiene funciones para realizar operaciones básicas con la imagen, la creación y ecualización de histogramas, la implementación de filtros, etc.

La caracterización morfológica de flóculos por análisis de imágenes en un reactor Taylor–Couette es un ejemplo del procesamiento de imágenes aplicado a la ingeniería química utilizando *Matlab* [21].

**1.7.2 ImageJ:** *ImageJ* es un *software* que ofrece herramientas para la manipulación interactiva de imágenes y además puede ser complementado escribiendo nuevos componentes de *software* por el lenguaje de programación (*Java*) en el cual está implementado [22]. Es utilizado en el procesamiento de imágenes para aplicar filtros y/o para extraer características de las imágenes como áreas, perímetros, longitud de líneas, etc [23].

*ImageJ* es una plataforma ideal para el procesamiento de imágenes y es utilizado para investigaciones y desarrollo de aplicaciones en diferentes laboratorios a nivel mundial, especialmente en imágenes de áreas biológicas y médicas [22].

La identificación de la forma y la distribución de tamaño de granos de cereales y partículas de biomasa por *ImageJ* es una aplicación práctica en la agricultura [24].

## 1.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico es un factor fundamental para la validación de las conclusiones a partir de los resultados obtenidos en el presente proyecto por el procesamiento de las imágenes SEM [25]. Para ello se utiliza procedimientos estadísticos básicos para la representación de los datos obtenidos en los resultados (ver sección 4) que se describirán a continuación:

**1.8.1 Descripción gráfica de los resultados (histogramas):** Es una descripción informativa de cualquier conjunto de datos y está dada por la frecuencia de repetición u arreglo distribucional de las observaciones en el conjunto [26]. En el presente trabajo se utiliza un histograma (ver sección 4.1) para representar la distribución de las áreas de partículas obtenidas por el algoritmo planteado.

**1.8.2 Medidas de centralización:** La misión de las medidas de centralización es dar una idea del valor central, alrededor del cual se reparten los valores de la muestra obtenida. En este trabajo (ver sección 4.2) se utiliza la media muestral ( $\bar{x}$ ) que se define como [27]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (4)$$

donde  $x_i$  es un dato y  $n$  el número total de los datos obtenidos por el algoritmo propuesto.

**1.8.3 Medidas de dispersión:** Las medidas de centralización, por si solas, son claramente insuficientes para resumir toda una muestra. Por lo tanto, conviene tener una medida de la dispersión de los datos con respecto a los valores centrales. Este es el objetivo de las medidas de dispersión. Para el trabajo propuesto se utiliza la varianza muestral y la desviación típica muestral [27] (ver sección 4.2) y se definen como:

a) la varianza muestral ( $\sigma^2$ ) se define como:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}, \quad (5)$$

b) la desviación típica (o desviación estándar) de la muestra es la raíz cuadrada positiva de la varianza muestral y se calcula como:

$$\sigma = \sqrt{S^2}, \quad (6)$$

Para predecir el comportamiento del número de partículas en función de los tamaños se utiliza en este trabajo un modelo de regresión polinómica (ver sección 4.3) y se describe a continuación:

**1.8.4 Regresión polinómica de grado m:** Es una técnica estadística para el modelado y la investigación de la relación entre dos o más variables. El análisis de regresión puede emplearse para construir un modelo que permita predecir el número de partículas para un tamaño dado [19].

Para el caso de la regresión polinómica de grado  $m$ , considera sólo un regresor o predictor  $x$  y una variable dependiente o respuesta  $\hat{y}$  representada como:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x + \hat{\beta}_n x^m \quad (7)$$

donde  $\hat{\beta}_0$  es la ordenada al origen y  $\hat{\beta}_1$  y  $\hat{\beta}_m$  son los coeficientes de regresión.

**1.8.5. Coeficiente de correlación ( $R^2$ ):** El coeficiente de correlación se utiliza con frecuencia para validar un modelo de regresión. A menudo se hace referencia de manera vaga a  $R^2$  como la cantidad de variabilidad en los datos que es explicada o tomada en cuenta por el modelo de regresión [19]. La cantidad  $R^2$  se representa como:

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n [\hat{y}(x_i)]^2 \right]}{\left[ \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]} \quad (8)$$

Finalmente para medir el desempeño del algoritmo planteado en este trabajo para detectar partículas verdaderas (ver sección 4.4), se hace uso del análisis de rendimiento con la sensibilidad y especificidad para determinar las probabilidades de los resultados positivos y falsos en la detección de partículas, se definen de la siguiente manera:

**1.8.6 Sensibilidad estadística (S):** La sensibilidad de una prueba representa la probabilidad de que una partícula tenga un resultado positivo en la prueba. La especificidad se define de la siguiente manera [28]:

$$S = \frac{\# \text{ Partículas verdaderas detectadas}}{\# \text{ Partículas verdaderas detectadas} + \# \text{ Partículas falsas detectadas}} \quad (9)$$

### 1.8.7 Especificidad estadística ( $E$ )

La especificidad de una prueba representa la probabilidad de que una partícula tenga un resultado negativo en la prueba. La especificidad se define de la siguiente manera [28]:

$$E = \frac{\# \text{ Partículas falsas detectadas}}{\# \text{ Partículas verdaderas detectadas} + \# \text{ Partículas falsas detectadas}} \cdot (10)$$

La sensibilidad indica que entre más cercano al valor de 1, la probabilidad de detección de partículas verdaderas es eficiente. La especificidad entre más cercana al valor de 0 indica que el cálculo de partículas verdaderas contiene un mínimo error de equivocación.

Todos los anteriores conceptos e introducción permiten una breve descripción de la teoría para la realización del presente proyecto. En la siguiente sección se muestra el objetivo general y los objetivos específicos. En la sección 3 se procede al desarrollo de la metodología para lograr los objetivos propuestos. En la sección 4 se presentan los resultados y finalmente en la sección 5 se realizan las conclusiones.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

El objetivo del presente trabajo es calcular la distribución de tamaño de partículas del *titanato de estroncio dopado con europio* mediante el tratamiento de imágenes de una microfotografía SEM.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un algoritmo computacional para determinar las diferentes partículas que se presentan en las imágenes SEM del *titanato de estroncio dopado con europio*.
- Analizar la distribución del tamaño de partículas en las diferentes imágenes SEM del *titanato de estroncio dopado con europio*.
- Verificar el desempeño del algoritmo desarrollado.

### 3. METODOLOGÍA

De manera general este proyecto involucra temáticas de diferentes disciplinas como la ingeniería química y la ingeniería de sistemas específicamente en la temática del procesamiento de imágenes digitales a partir de algoritmos computacionales.

Desde el punto de vista de la ingeniería química en la síntesis de catalizadores heterogéneos se busca el diseño de superficies catalíticas efectivas con el fin de optimizar procesos industriales que involucran reacciones químicas. Conocer la distribución de los tamaños de cada partícula presente en una imagen SEM de un catalizador heterogéneo es importante porque se puede cuantificar el tamaño de cada partícula y permite a los ingenieros químicos, químicos y demás profesionales en la rama de catálisis proponer métodos de preparación más adecuados a la hora de obtener nuevos diseños de catalizadores heterogéneos.

Por otro lado, desde la disciplina o ciencia computacional, el desarrollo de algoritmos computacionales permite una mejor cuantificación de la información que puede contener una imagen SEM de un catalizador heterogéneo para comprender su superficie, la cual es importante para determinar la uniformidad de la distribución de partículas y hallar posibles sitios activos.

Para el desarrollo de los objetivos planteados en este proyecto se ha fusionado la caracterización de catalizadores con el procesamiento digital de imágenes para encontrar la distribución de tamaño de partículas presente en una micrografía de imagen SEM del catalizador *titanato de estroncio dopado con europio* ( $\text{Sr}_{0.94}\text{Eu}_{0.03}\text{Zr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_3$ ) nombrado como SEZT a través del planteamiento de un

algoritmo computacional en el presente trabajo que permite o facilita cuantificar partículas en catalizadores sólidos a los ingenieros químicos y/o químicos en el proceso de caracterización de superficies.

A continuación, se abordan temas como el proceso de captura de la imagen SEM del catalizador SEZT, el diseño del algoritmo propuesto y su desarrollo. Un diagrama de flujo ilustra la secuencia de la metodología para cumplir los objetivos de este proyecto (ver sección 2). Finalmente se muestra en la sección 3.2 el uso de *softwares Matlab e ImageJ* y la implementación del algoritmo planteado.

### **3.1 ADQUISICIÓN DE LA IMAGEN SEM DEL CATALIZADOR SEZT**

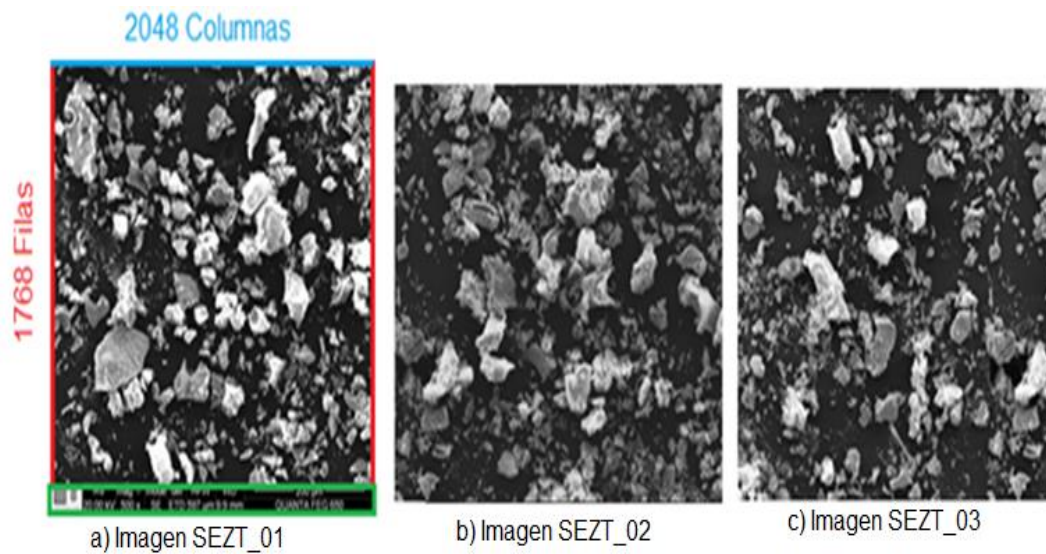
Para este estudio se utilizan 3 imágenes SEM en escala de grises (Figura 4) que fueron captadas de una muestra catalítica que se obtuvo del trabajo titulado “evaluación foto-catalítica de los óxidos mixtos  $\text{Sr}_{0.94}\text{Eu}_{0.03}\text{Zr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_3$ ,  $\text{Sr}_{0.94}\text{Sm}_{0.03}\text{Zr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_3$  y  $\text{Sr}_{0.94}\text{Ho}_{0.03}\text{Zr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_3$ ” del centro de investigación en catálisis (CICAT) de la Universidad Industrial de Santander [29]. Las tres imágenes SEM son segmentos del catalizador que fueron captados en diferentes áreas de la muestra total por medio del microscopio electrónico de barrido tipo FEI modelo QUANTA 650 FEG ubicado en el laboratorio de microscopia de la Universidad Industrial de Santander.

Las condiciones de operación del equipo de microscopia para captar la imagen fue en modo de alto vacío, con voltaje de 20.000 kV, una magnificación de 500x con detector ETD y en modo secundario. El ancho de campo horizontal es de 597  $\mu\text{m}$  y la distancia de la muestra catalítica al lente es de 9.9 mm para todas las imágenes SEM. Los nombres asignados a cada imagen usados en este proyecto

son: SEZT\_01, SEZT\_02, SEZT\_03 (Figura 4). El anexo A, contiene las tres imágenes a una escala mayor que facilita su visualización.

La dimensión final de cada imagen es de 1768 filas por 2048 columnas para un total de 3.620.864 píxeles, eliminando la etiqueta de las especificaciones (recuadro verde en figura 4.a).

**Figura 4.** Conjunto de imágenes SEM del *titanato de estroncio dopado con europio*: a) imagen de la muestra SEZT\_01 con etiqueta, b) imagen de la muestra SEZT\_02 sin etiqueta y c) imagen de la muestra SEZT\_03 sin etiqueta.



A continuación se describirán los pasos a realizar para el cumplimiento del primer objetivo específico (ver sección 2.2) que es el diseño e implementación del algoritmo computacional para determinar las diferentes partículas que se presentan en las imágenes SEM después de retirar las etiquetas del *titanato de estroncio dopado con europio*.

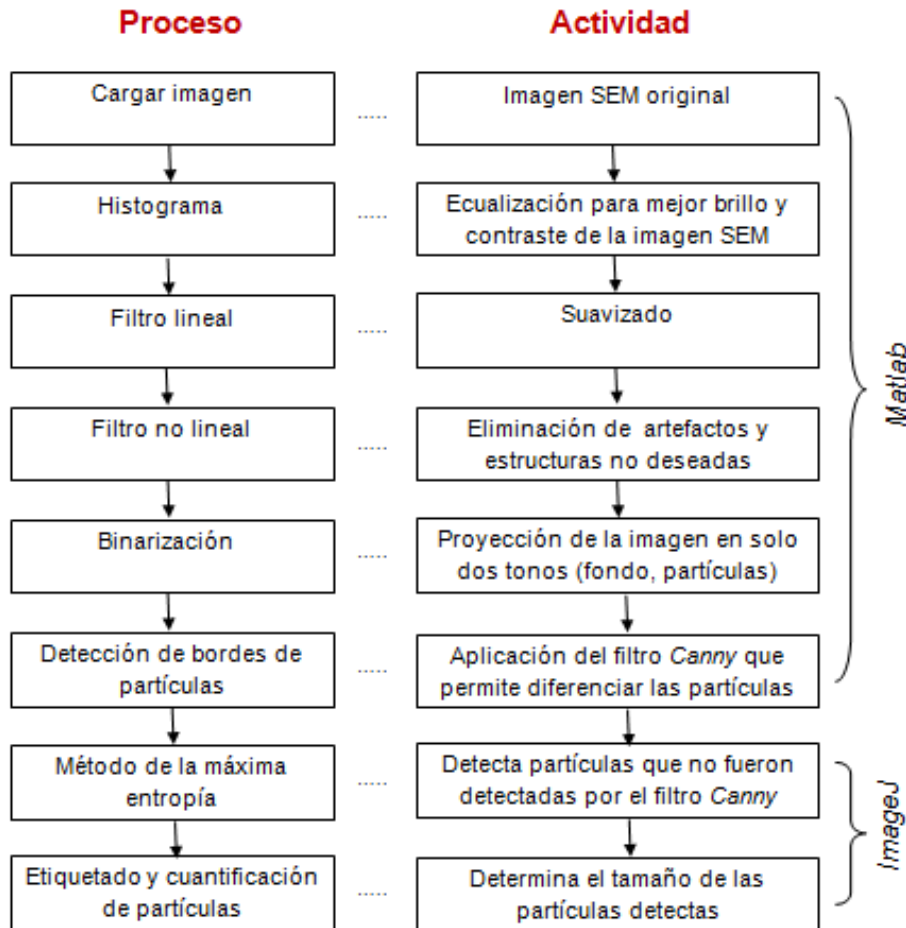
### 3.2 PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES SEM DEL CATALIZADOR SEZT

Para abordar el primer objetivo específico se plantea una secuencia de procesos utilizando *Matlab* e *ImageJ*. El algoritmo computacional utiliza en la primera parte el *software Matlab* (ver sección 1.3.1) por ser una herramienta de análisis matemático y científico que permite el uso de filtros que resaltan las características de una imagen. Después de aplicar los filtros de *Matlab*, se procede en la segunda parte a utilizar el *software ImageJ* (ver sección 1.3.2) debido a su caja de herramientas para detectar partículas en imágenes de micrografías SEM. La fortaleza del algoritmo planteado está en extraer las mejores funciones o proceso de cada *software*, donde los resultados de *Matlab* son la entrada de *ImageJ*.

El diagrama de flujo (Figura 5) presenta el flujo de trabajo del algoritmo aplicado a las imágenes SEM que determina el cálculo de la distribución del tamaño de partículas en el catalizador SEZT.

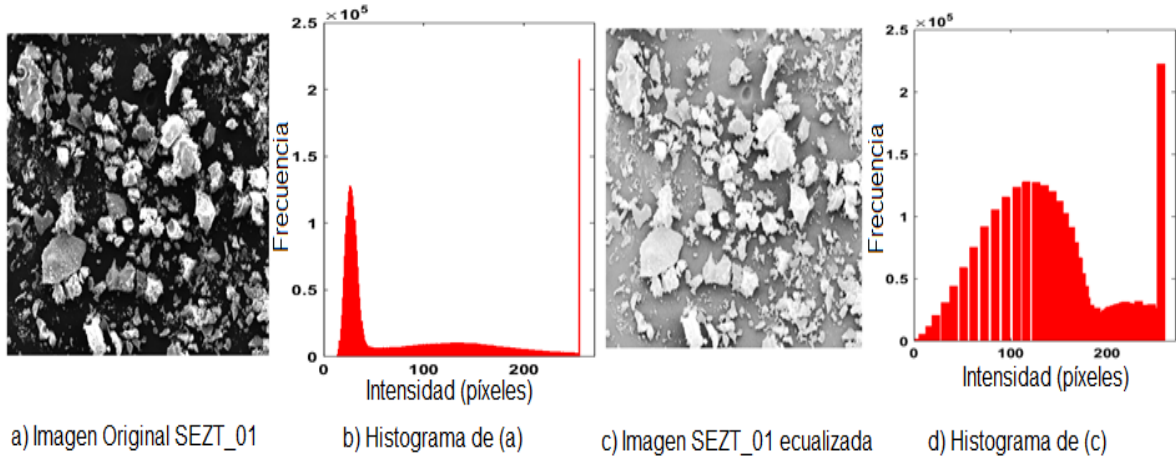
A continuación, se procede a ampliar cada etapa descrita en el diagrama de flujo (Figura 5), donde se ilustrará la entrada de la imagen SEZT\_01 y el respectivo resultado obtenido en cada etapa. Igual presentación de las imágenes SEZT\_02 y SEZT\_03 se encuentran en el anexo B para mejor visualización.

**Figura 5.** Diagrama de flujo del procesamiento de imágenes SEM utilizando el algoritmo computacional planteado.



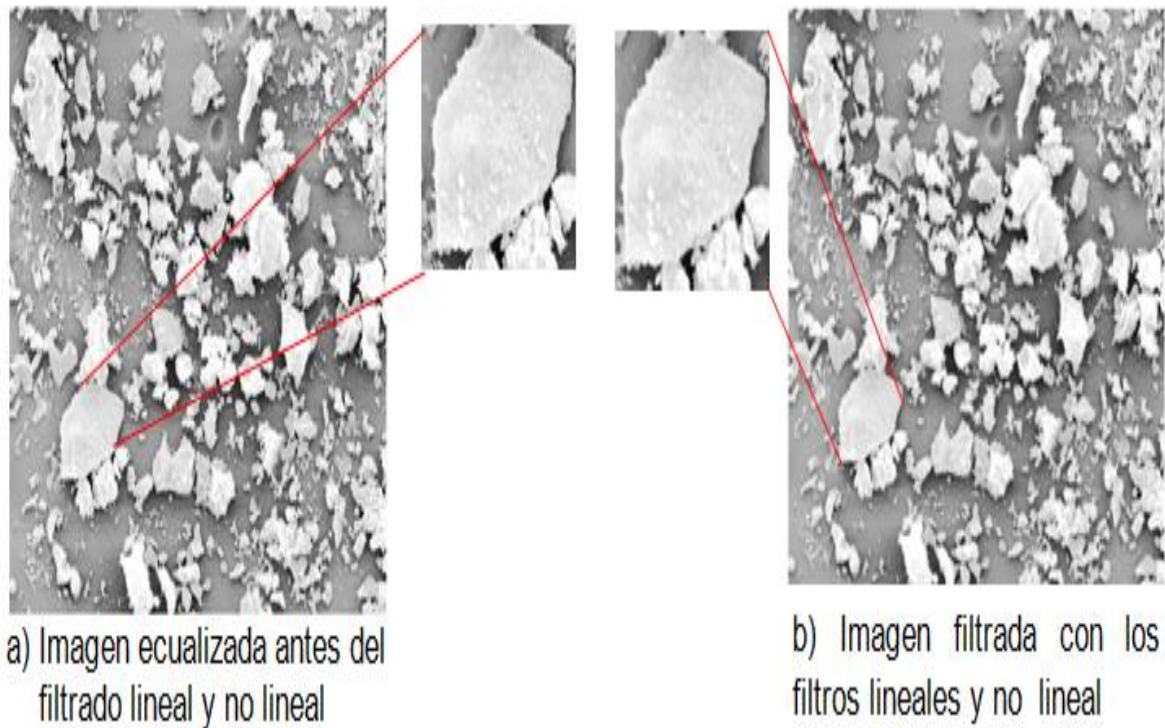
**3.2.1 Ecuación (histograma):** En esta fase se obtienen los histogramas (ver sección 1.2.2) de cada imagen para determinar la distribución del contraste. Se realiza una ecuación de los histogramas iniciales para obtener mayor calidad de la imagen, mejor brillo y contraste. La Figura 6 ilustra la imagen antes y después del proceso de ecuación del histograma. Como resultado de la ecuación (ver Figura 6.b) es posible visualizar mejoras en el brillo y contraste a partir de la ecuación, facilitando la detección de partículas.

**Figura 6.** Mejoramiento del contraste y brillo de la imagen SEZT\_01 a partir de la ecualización del histograma: a) imagen original SEZT\_01 con su histograma antes de ecualizar y b) imagen SEZT\_01 ecualizada con su respectivo histograma.



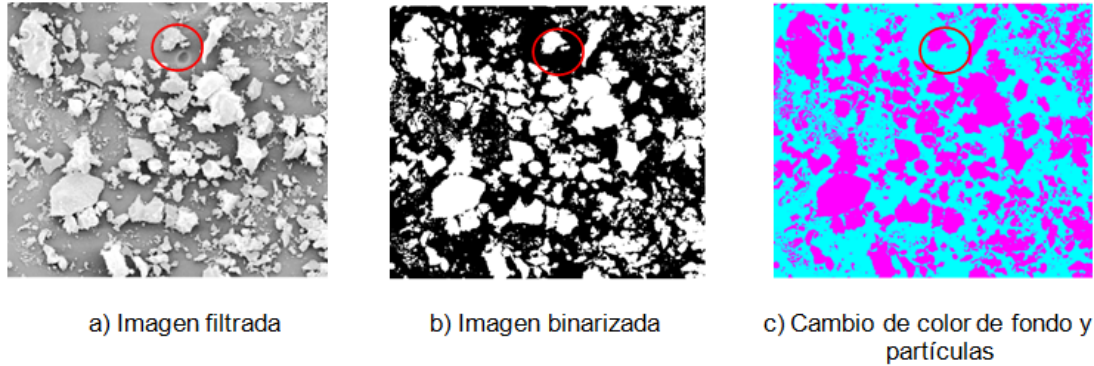
**3.2.2 Aplicación de filtros lineales y no lineales:** Para detectar las partículas del catalizador SEZT se procesa la imagen SEM usando filtros que detectan características morfológicas. La elección de estos filtros y su orden de aplicación es por prueba. Se aplican filtros lineales (ver sección 1.2.3) como el filtro promedio que permite dar más nitidez a la imagen y el filtro Gaussiano que reduce el ruido sin alterar los bordes de cada partícula de la imagen SEM. Después se realiza un filtrado no lineal mediante el filtro de la mediana que mejora los bordes de las partículas que permite una mejor detección de las partículas. La Figura 7.a muestra la imagen SEZT\_01 ecualizada (entrada) para la aplicación de los filtros lineales y no lineales, no es posible observar de primera mano las diferencias entre la imagen ecualizada (entrada) y la imagen con filtros (salida). Sin embargo, al ampliar la imagen (ver Figura 7.b) es posible observar en que la imagen filtrada (salida) tiene menos artefactos indeseados (partículas del recubrimiento de carbono utilizado para obtener las micrografías SEM).

**Figura 7.** Aplicación de los filtros lineales y no lineales de la imagen SEZT\_01. Mejoramiento de la nitidez y reducción del ruido: a) Imagen de entrada para aplicar los filtros, b) resultado de la imagen SEZT\_01 después de aplicar los filtros lineales y no lineales donde se resalta en el recuadro la mejora en los bordes.



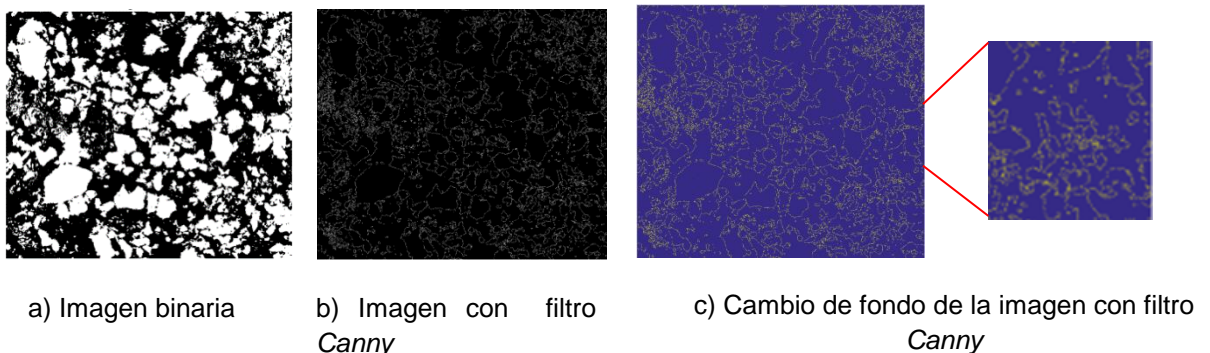
**3.2.3 Binarización:** Después de la aplicación de los pasos 1 y 2, se realiza un preprocesamiento a la imagen filtrada para lograr mayor precisión en la definición de los bordes de las partículas. Se procede a transformar la imagen de escala de grises a una proyección binaria (ver Figura 8.b) para eliminar partículas falsas producidas por el ruido. La Figura 8 muestra la imagen de entrada y su binarización. Se puede detallar en el círculo rojo la eliminación del ruido generado por el recubrimiento de carbono utilizado para obtener las micrografías, así mismo, el cambio de color en el fondo (ver Figura 8.c) facilita la visualización de partículas.

**Figura 8.** Binarización de la imagen para eliminar falsas partículas (círculo rojo) producidas por ruido después de aplicar los filtros lineales y no lineales en la imagen SEZT\_01: a) Imagen de entrada obtenida en el paso 2, b) resultado de la imagen después de aplicar la binarización donde el blanco indica una intensidad de 1 y el negro una intensidad 0, c) cambio de *background* de la imagen SEZT\_01 binarizada para una mejor visualización de las partículas representadas de color rosado.



**3.2.4 Detección de bordes de las partículas:** Los bordes son importantes para determinar el tamaño de cada partícula, para ello el algoritmo planteado emplea el filtro de *Canny* (ver sección 1.2.3) que mejora la detección de los bordes de cada partícula. La Figura 9.b (salida) muestra la imagen SEZT\_01 (entrada) después de aplicar el filtro de *Canny*, y la Figura 9.c facilita la visualización del proceso de detección de bordes a través de un cambio de fondo.

**Figura 9.** Detección de los bordes de las partículas presentes en una micrografía SEM del catalizador SEZT\_01 por el filtro *Canny*: a) imagen SEZT\_01 binarizada, b) Imagen SEZT\_01 filtrada con el filtro de *Canny* que resalta los bordes (color blanco) y c) cambio de fondo de la imagen SEZT\_01 con filtro *Canny* para detallar mejor los bordes (color naranja) de las diferentes partículas.



Finalmente, la imagen preprocesada (pasos 3.2.1 a 3.2.4) es la entrada al *software ImageJ*. El *software ImageJ* ha sido reportado en la literatura como un *software* eficiente para detectar partículas en imágenes digitales [30-32]. En la sección 4.4 de resultados se muestra con mayor detalle que los algoritmos de pre-procesamiento planteados y desarrollados en el *software Matlab e ImageJ* propuesto en el presente proyecto arrojan mejores resultados frente a desarrollo tradicional donde se realiza todo el proceso solo en el *software ImageJ*

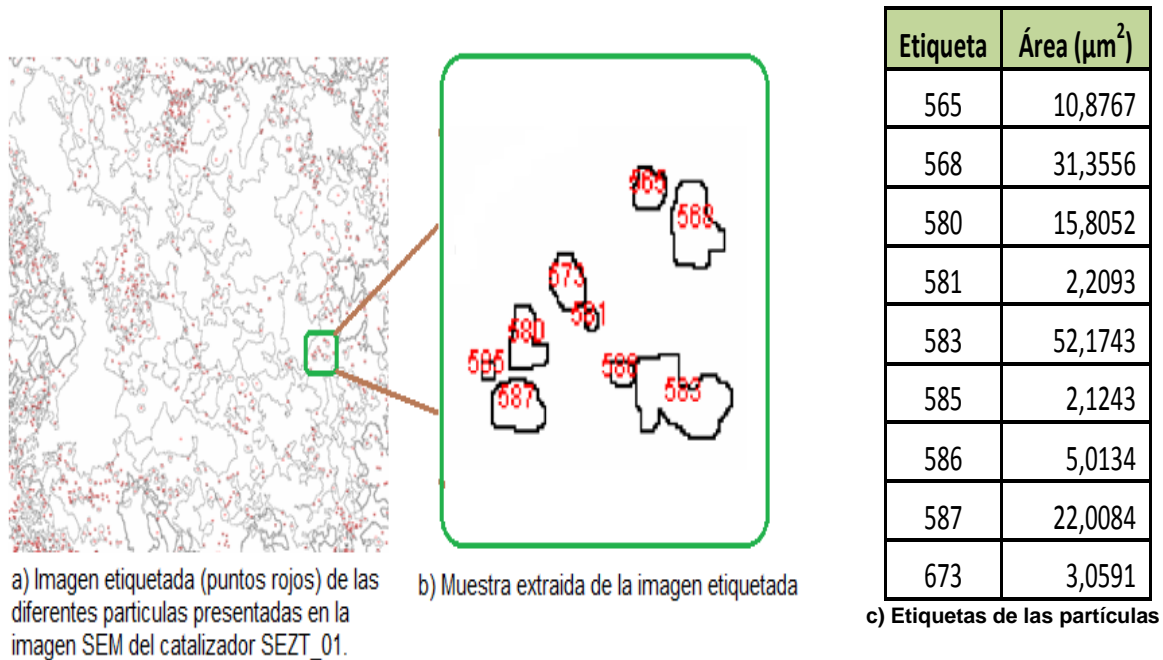
Para cumplir con la totalidad del objetivo uno de la presente propuesta, es necesario abordar la problemática de que la mayor parte de las irregularidades morfológicas y rugosidad son por lo general de naturaleza aleatoria, es por ello que se determina de forma estadística el tamaño de cada partícula presente en una imagen SEM del catalizador con el propósito de obtener un conocimiento de las propiedades superficiales que es importante en las reacciones químicas. Para ello es necesaria la aplicación del método de máxima entropía.

**3.2.5 Método de máxima entropía (MEM):** MEM permite encontrar partículas que no fueron detectadas por el filtro de *Canny*, para ello se toman las 3 imágenes preprocesadas en *Matlab* como entrada de *ImageJ* y se aplica el método de la máxima entropía (ver sección 1.2.4) para mejorar la binarización realizada en *Matlab*, permitiendo mejorar los resultados obtenidos. De igual manera en el *software ImageJ* se configura la escala de píxel a unidad métrica (0.292  $\mu\text{m}/\text{píxel}$ ) para medir las partículas y etiquetarlas según su tamaño real para ser etiquetas y cuantificadas.

**3.2.6 Etiquetado y cuantificación de las partículas:** Para este propósito el *software ImageJ* posee una caja de herramientas que etiqueta y extrae las

dimensiones de las partículas en una imagen digital (Imagen SEM del catalizador). El software *ImageJ* utiliza tres parámetros para identificar objetos tales como la relación recíproca de aspecto, ortogonalidad y la relación de los ejes de la geometría [24]. La Figura 10 muestra la cuantificación del área de cada partícula, sus etiquetas y tamaño.

**Figura 10.** Determinación del tamaño de partícula por el software *ImageJ*. a) imagen SEZT\_01 etiquetada con diferentes números, resultado del algoritmo planteado. b) segmento aleatorio de la imagen etiquetada. c) etiquetas asignada a cada partícula con su área en calculada por el software *ImageJ*.



## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La evaluación y análisis de resultados de la aplicación del algoritmo computacional planteado contempla estadística descriptiva (ver sección 1.4) con el propósito de cumplir el segundo objetivo específico que consiste en analizar la distribución de tamaño de partículas en las imágenes SEM. Se utiliza la distribución de frecuencias de los tamaños representada por un histograma (sección 4.1) y se usan las medidas de centralización y medidas de dispersión (sección 4.2) que permiten obtener la variabilidad de los tamaños de las partículas. Para lograr predicciones del número de partículas presentes en las imágenes SEM del catalizador *titanato de estroncio dopado con europio* (SEZT) se plantean tres modelos de regresión polinómica (sección 4.3) de las diferentes imágenes SEZT\_01, SEZT\_02 y SEZT\_03 capturas de la muestra catalítica SEZT con sus respectivos coeficientes de correlación (ver sección 1.4). Finalmente, se realiza una comparación entre el algoritmo planteado en esta propuesta frente a la solución completa que se realiza en el *software ImageJ* para determinar la eficiencia del algoritmo en detección de partículas (sección 4.4) en imágenes SEM aportando un método alternativo para los ingenieros químicos.

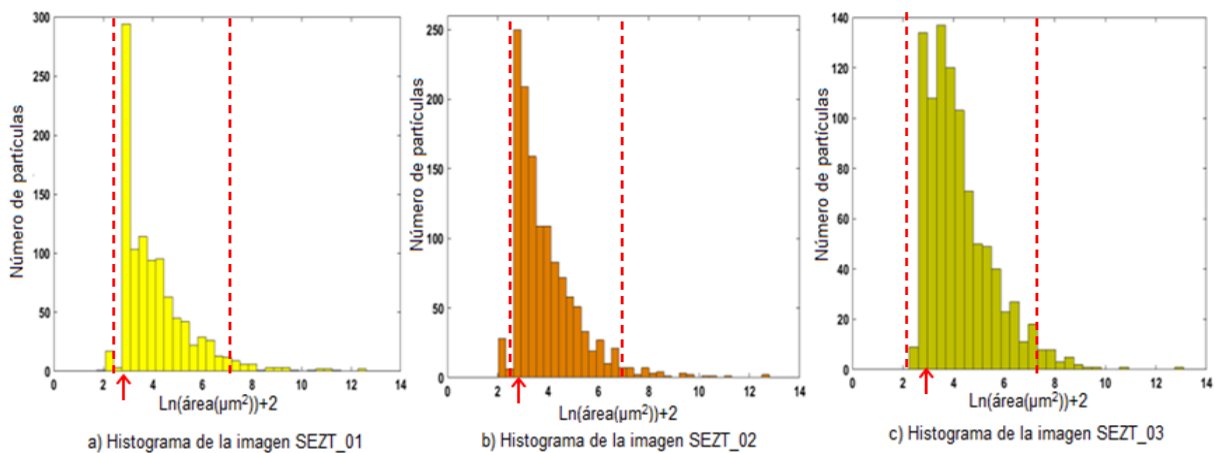
### 4.1 ANÁLISIS DEL NÚMERO DE PARTÍCULAS DIFERENCIADAS POR SU TAMAÑO

Para iniciar el análisis de resultados del algoritmo planteado es necesario conocer el número de partículas sólidas agrupadas por su tamaño (histogramas de distribución de tamaño), el cual permite conocer cuántas partículas existen para ciertos tamaños. Determinar el número de partículas pequeñas o grandes presentes en la superficie catalítica indica si la síntesis de preparación del

catalizador fue la correcta debido a la presencia de una distribución uniforme de las partículas, la cual proporciona mayores sitios activos.

La Figura 11 muestra el histograma de distribución de tamaño de las partículas por cada imagen (SEZT\_01, SEZT\_02 y SEZT03). El número total de partículas fue mayor en la imagen SEZT\_03 con un valor de 1285 partículas, seguida de la imagen SEZT\_01 con un número de 1013 partículas y 930 partículas en la imagen SEZT\_02. El eje de las abscisas del histograma, se encuentra en escala logarítmica para una mejor visualización de los datos calculados por el algoritmo computacional desarrollado en la presente propuesta.

**Figura 11.** Histogramas de distribución de tamaño de las partículas en las tres imágenes SEM del catalizador SEZT: a) histograma de la imagen SEZT\_01, b) histograma de la imagen SEZT\_02 y c) histograma de la imagen SEZT\_03.



El análisis de los tres histogramas muestra que es mayor el número de partículas con tamaños cercanos (flechas rojas) a 3 ( $\text{Ln}(\mu\text{m}^2)+2$ ) que en tamaño lineal corresponde a partículas con tamaños próximos a  $2,7183 \mu\text{m}^2$ . La mayoría de partículas desde el punto de vista de distribución de los tamaños para los 3 histogramas, la región entre 2,2775 ( $\text{Ln}(\mu\text{m}^2)+2$ ) (en escala lineal  $1,3198 \mu\text{m}^2$ ) y

6,9579 ( $\ln(\mu\text{m}^2)+2$ ) (en escala lineal  $142,2946 \mu\text{m}^2$ ) indicadas con líneas punteadas rojas reúne el 94% de las partículas en promedio.

#### 4.2 ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE TAMAÑOS DE ÁREA

El histograma de distribuciones de tamaño de partículas de las tres imágenes SEM, a las cuales se les aplicó el algoritmo computacional propuesto, no proporciona información cuantitativa de la dispersión y centralización de los datos. Por lo tanto, se aplica un análisis de variabilidad para obtener datos estadísticos básicos que son importantes para la caracterización y el control de la estructura superficial en la síntesis de catalizadores eficaces. La Tabla 1 presenta los valores estadísticos tales como valor mínimo, valor máximo, media y desviación estándar de los tamaños de partícula calculados con el algoritmo desarrollado en la metodología (ver sección 3).

**Tabla 1.** Estadística de los tamaños de partículas presentes en las tres imágenes SEM de la muestra catalítica SEZT calculados por el algoritmo desarrollado.

Valor numérico estadístico de los tamaños de partículas en las imágenes SEM	Áreas de la imagen SEZT_01 ( $\mu\text{m}^2$ )	Áreas de la imagen SEZT_02 ( $\mu\text{m}^2$ )	Áreas de la imagen SEZT_03 ( $\mu\text{m}^2$ )	Promedios de cada valor estadístico presente en las tres imágenes SEM ( $\mu\text{m}^2$ )
Mínima	<b>0,9066</b>	1,5265	1,1841	1,2057
Máxima	34200,6524	<b>54720,8453</b>	42192,5945	43704,6974
Media	175,739	289,455	223,1848	<b>229,4596</b>
Desviación estándar	3,2805	3,2674	3,1709	<b>3,2396</b>

Al analizar los resultados de las estadística básica, muestran que la imagen SEZT\_01 posee la partícula más pequeña con un valor de  $0,9066 \mu\text{m}^2$  y la imagen SEZT\_02 posee la partícula con mayor área ( $54720,8453 \mu\text{m}^2$ ). La media promedio de las tres imágenes del catalizador SEZT es de  $229,4596 \mu\text{m}^2$  con una desviación estándar promedio es  $3,2396 \mu\text{m}^2$ .

La mayor dispersión de las áreas se presentó en la imagen SEZT\_01 con un valor de la desviación estándar de  $3,2805 \mu\text{m}^2$ .

El análisis de variabilidad de los datos no genera información suficiente de las posibles irregularidades morfológicas que son de naturaleza aleatoria. Por lo tanto, se realiza tres modelos de polinomios que predicen el número de partículas en función del tamaño de partícula, explicado en la siguiente sección.

### **4.3 ANÁLISIS DEL PERFIL DEL NÚMERO DE PARTÍCULAS**

El conocimiento de las propiedades estadísticas del área de la superficie catalítica es importante en la comprensión de las propiedades locales y globales de la superficie del catalizador. Debido a esto, se determina tres modelos matemáticos de regresión para predecir el comportamiento de la distribución del área de partículas presentadas en las tres imágenes SEM del catalizador SEZT.

En este trabajo, el modelo de regresión lineal es inapropiado para describir el comportamiento aleatorio de las partículas (ver Figura 11), debido a la presencia de valores extremos grandes que afectan la pendiente y una manera de observar esto es con la media aritmética promedio (ver Tabla 1) de las tres imágenes con un valor de  $7,5 (\text{Ln}(\mu\text{m}^2)+2)$  (en escala lineal  $229,4596 \mu\text{m}^2$ ), que se encuentra fuera del rango del 94% de las partículas acumuladas según su tamaño (ver sección 4.1).

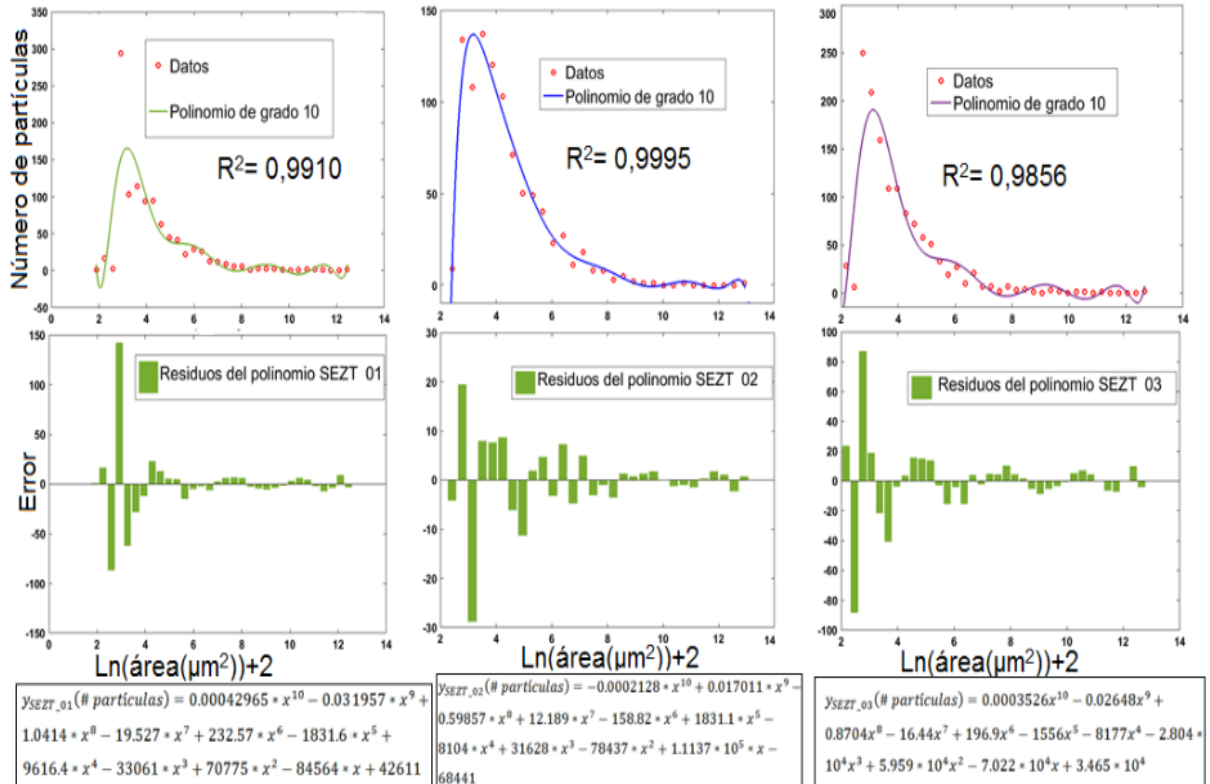
En el presente estudio se hallan los polinomios de regresión que predice el número de partículas en función del logaritmo natural del tamaño de cada partícula

presente en las imágenes SEZT\_01, SEZT\_02 y SEZT\_03. Así como los perfiles que permite describir el número de partículas en la superficie del catalizador con su respectiva expresión matemática, residuos que permiten analizar el error de cada perfil y el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) que valida la aproximación del modelo de regresión polinómica de cada perfil.

La Figura 12 muestra los tres gráficos de los perfiles de los polinomios para las tres superficies catalíticas analizadas con las imágenes SEM del catalizador SEZT. Los polinomios de grado 10 permiten predecir en el intervalo de 4 ( $\text{Ln}(\mu\text{m}^2)+2$ ) hasta 12 ( $\text{Ln}(\mu\text{m}^2)+2$ ) (en escala lineal de  $7,3891 \mu\text{m}^2$  hasta  $22026,4658 \mu\text{m}^2$ ) las partículas presentes en la imagen SEM del catalizador SEZT.

Para validar el intervalo de predicción de los polinomios es necesario realizar un gráfico residual donde se muestra el error de las predicciones con respecto al tamaño de las partículas (Figura 12), donde se puede observar la dispersión o variabilidad de los datos. Para las partículas de tamaños pequeños comprendidas entre 2 ( $\text{Ln}(\mu\text{m}^2)+2$ ) y 3,5 ( $\text{Ln}(\mu\text{m}^2)+2$ ), en escala lineal el intervalo es de  $1\mu\text{m}^2$  hasta  $4,4817\mu\text{m}^2$ , no es viable el polinomio de grado 10 para predecir el número de partículas pequeñas, como se muestra en las gráficas residuales que corresponden a los tres polinomios y donde el error (barras de color verde) es alto, para partículas pequeñas.

**Figura 12.** Perfil polinómico de grado 10 para predecir el número de partículas en función del tamaño, residuos del perfil y expresión matemática del polinomio de: a) imagen SEM SEZT\_01, b) imagen SEM SEZT\_02 y c) imagen SEM SEZT\_03.



a) Perfil, residuos y expresión matemática de SEZT\_01

b) Perfil, residuos y expresión matemática de SEZT\_02

c) Perfil, residuos y expresión matemática de SEZT\_03

La Figura 12 en su tercera fila, muestra la expresión matemática de los tres polinomios con coeficiente de correlación.

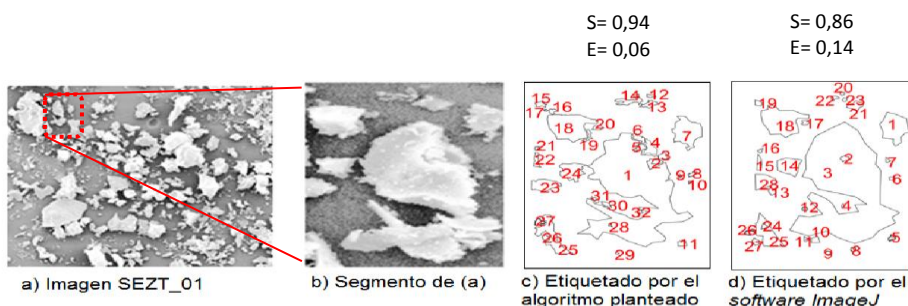
En la siguiente sección se desarrollará el cumplimiento del tercer y último objetivo específico (ver sección 2.2) del presente trabajo que consiste en demostrar que el algoritmo desarrollado es eficiente en la caracterización de superficies catalíticas por medio de imágenes SEM.

#### 4.4 EVALUACIÓN DEL ALGORITMO CON RESPECTO AL SOFTWARE IMAGEJ

Para el cumplimiento del último objetivo específico se compara el algoritmo computacional automático desarrollado en este trabajo frente al *software ImageJ* que requiere operación manual, de igual manera se valida la forma de calcular las áreas de las diferentes partículas presentes en las tres imágenes SEM (SEZT\_01, SEZT\_02 y SEZT\_03) del catalizador SEZT. Se segmentaron regiones del catalizador de las tres imágenes SEM para analizar la detección de partículas sólidas.

La Figura 13 muestra la secuencia de extracción de un segmento de la imagen SEM SEZT\_01 del catalizador SEZT (ver Figuras 13.a y 13.b) seguido de los procesos de etiquetado (números rojos) por el algoritmo del presente trabajo (ver Figura 13.c) y el *software ImageJ* (ver Figura 13.d).

**Figura 13.** Segmentación y etiquetado de la imagen SEZT\_01, a) imagen original, b) segmento de la imagen original, c) detección de partículas por algoritmo y d) detección de partículas por el *software ImageJ*.



Para validar el número de partículas detectadas por el algoritmo planteado se realizó el conteo de manera visual sobre la ampliación de un área de la imagen

SEZT\_01 (ver Figura 13.b) cuantificando 38 partículas de diferentes tamaños. El etiquetado realizado por el algoritmo planteado (ver Figura 13.c) detectó 32 partículas, donde 30 de ellas son verdaderas (Verdades Positivas - VP) y 2 son falsas (Falso Positivo - FP). En el proceso realizado por el *software ImageJ* (ver Figura 13.d) se detectaron 28 partículas, donde 19 son verdaderas (VP) y 9 falsas (FP). Del total de 38 partículas reales, el algoritmo planteado detectó 30 partículas verdaderas e *ImageJ* detectó 19 partículas verdaderas. Los mejores resultados se obtuvieron con el algoritmo planteado para la segmentación realizada.

Con el objetivo de dar mayor peso a la validación y los resultados satisfactorios obtenidos por el algoritmo planteado (ver Figura 13), se procedió a realizar el mismo ejercicio de validación con 15 diferentes segmentos de las imágenes estudiadas, dando iguales resultados positivos en la detección de partículas con el algoritmos planteado.

La Tabla 2 presenta el número de las partículas reales (Pr) de 15 segmentos capturados de las diferentes imágenes SEM (con el mismo procedimiento de la Figura 13). De estos segmentos se muestran el número de las partículas verdaderas (V), partículas falsas (F), la sensibilidad (S) y la especificidad (E) determinadas por el algoritmo planteado y el *software ImageJ*. Las partículas detectadas (Pdet) hacen referencias al total de partículas verdades y falsas.

La Tabla 2 muestra los valores de sensibilidad (S) y especificidad (E) demostrando que el rendimiento del algoritmo planteado es mayor frente al *software ImageJ* para detectar partículas, con una sensibilidad promedio sobre 15 pruebas de 0,94 para el algoritmo planteado frente a el *software ImageJ* con una sensibilidad promedio de 0,86 y con respecto a la especificidad promedio que es

de 0,06 para el algoritmo planteado y una efectividad promedio de 0,14 para el *software ImageJ*. Entre mayor sea la sensibilidad, mayor es la detección de partículas y entre menor es la especificidad, mayor es la detección de partículas reales.

**Tabla 2.** Número de partículas detectadas por el algoritmo y el *software ImageJ*.

Segmento	Pr	Algoritmo planteado					Software ImageJ				
		V	F	Pdet	S	E	V	F	Pdet	S	E
1	38	30	2	32	0,94	0,06	19	9	28	0,68	0,32
2	52	44	1	45	0,98	0,02	34	0	34	1,00	0,00
3	34	27	3	30	0,90	0,10	29	18	47	0,62	0,38
4	150	120	6	126	0,95	0,05	75	8	83	0,90	0,10
5	80	66	2	68	0,97	0,03	39	1	40	0,98	0,03
6	60	41	5	46	0,89	0,11	28	7	35	0,80	0,20
7	88	71	8	79	0,90	0,10	56	9	65	0,86	0,14
8	97	76	3	79	0,96	0,04	57	17	74	0,77	0,23
9	92	74	6	80	0,93	0,08	55	5	60	0,92	0,08
10	64	50	3	53	0,94	0,06	46	6	52	0,88	0,12
11	59	46	5	51	0,90	0,10	39	10	49	0,80	0,20
12	51	37	3	40	0,93	0,08	27	1	28	0,96	0,04
13	53	45	2	47	0,96	0,04	30	3	33	0,91	0,09
14	92	78	0	78	1,00	0,00	53	1	54	0,98	0,02
15	67	55	2	57	0,96	0,04	34	6	40	0,85	0,15
		<b>Promedio</b>			<b>0,94</b>	<b>0,06</b>	<b>Promedio</b>			<b>0,86</b>	<b>0,14</b>

Los resultados demuestran que el algoritmo computacional planteado en este proyecto es viable para ser utilizado en la caracterización de superficies catalíticas, permitiendo así, entender mejor el fenómeno de distribución de tamaños de las partículas que depende de la síntesis de preparación para obtener catalizadores eficaces.

## 5. CONCLUSIONES

- Se obtuvo la distribución de tamaño de partículas del *titanato de estroncio dopado con europio* procesando imágenes SEM mediante un algoritmo computacional semiautomático que utiliza los programas *Matlab* e *ImageJ*.
- El algoritmo desarrollado en *Matlab* e *ImageJ* fue comparado con un algoritmo que realiza las mismas operaciones pero utilizando solamente *ImageJ* de forma manual.
- el algoritmo desarrollado detecta más cantidad de áreas de partículas para el catalizador SEZT.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ZHAN W., Guo Y., Gong X., Guo Y., Wang Y. & Lu G. Current status and perspectives of rare earth catalytic materials and catalysis. En: *Chinese Journal of Catalysis*. 2014, vol. 35, p. 1238–1250.
- [2] FECHETE I., Wang Y., Védrine J.C. The past, present and future of heterogeneous catalysis. En: *Catalysis Today*. 2012. Vol.189, p. 2– 27.
- [3] NOVÁK V., Ortel E., Winter B., Butz B., Paul B., Kočí P., Marek M., Spiecker E. & Kraehnert R. Prototyping of catalyst pore-systems by a combined synthetic, analytical and computational approach: Application to mesoporous TiO<sub>2</sub>. En: *Chemical Engineering Journal*. 2014, vol. 248, p. 49–62.
- [4] VÉDRINE J. C. Revisiting active sites in heterogeneous catalysis: Their Structure and their dynamic behavior. En: *Applied Catalysis A: General*. 2014, vol.474, p. 40–50.
- [5] BUURMANS L. C. & Weckhuysen B. M. Heterogeneities of individual catalyst particles in space and time as monitored by spectroscopy. En: *Nature Chemistry*. 2012, vol.4, p.873–886.
- [6] FRIEDRICH H., Gommès C. J., Overgaag K., Meeldijk J. D., Evers W. H., de Nijs B., Boneschanscher M. P., de Jongh P. E., Verkleij A. J., de Jong K. P., van Blaaderen A. & Vanmaekelbergh D. Quantitative Structural Analysis of Binary Nanocrystal Superlattices by Electron Tomography. En: *Nano Lett.* 2009, vol. 9 no.7, p. 2719-2724
- [7] YU Y., Xin H. L., Hovden R., Wang D., Rus E. D., Mundy J. A., Muller D. A. & Abruña H. D. Three-Dimensional Tracking and Visualization of Hundreds of Pt-Co Fuel Cell Nanocatalysts During Electrochemical Aging. En: *Nano Lett.* 2012, vol. 12, p.4417–4423.

**[8]** GOMMES C. J., Friedrich H., Wolters M., de Jongh P. E. & de Jong K. P. Quantitative Characterization of Pore Corrugation in Ordered Mesoporous Materials Using Image Analysis of Electron Tomograms. En: *Chem. Mater.* 2009, vol.21 no.7, p. 1311–1317

**[9]** ARMOR J. N. A history of industrial catalysis. En: *Catalysis Today.* 2011, vol. 163, p. 3–9

**[10]** BARTHOLOMEW, C. H. & Farrauto R. J. Fundamentals of industrial catalytic processes. New Jersey: Wiley, 2006. p. 8, 119, 122, 124, 131.

**[11]** ANASTAS P., Kirchoff M. M. & Williamson T. C. Catalysis as a foundational pillar of green chemistry. En: *Applied Catalysis A: General.* 2001, vol. 221, p.3–13.

**[12]** ISMAGILOV Z.R., Kerzhentsev M.A., Shkrabina R.A., Tsikoza L.T., Lunyushkin B.I., Ostrovski Yu.V., Kostin A.L., Abroskin I.Ye., Malyi Ye. N., Matyukha V.A., Adamson M.G., Heywood A.C., Zundeleovich Yu., Ismagilov I.Z., Babko-Malyi S. y Battleson D.M. A role of catalysis for the destruction of waste from the nuclear industry. En: *Catalysis Today.* 2000. vol. 55, p.23–43.

**[13]** ZHOU W., Wachs I. E. & Kiely C. J. Nanostructural and chemical characterization of supported metal oxide catalysts by aberration corrected analytical electron microscopy. En: *Current Opinion in Solid State and Materials Science.* 2012, vol.16, p.10–22.

**[14]** CHORKENDORFF I. & Niemantsverdriet J. W. Concepts of Modern Catalysis and Kinetics. KGaA, Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2003. p. 129.

**[15]** CUEVAS E., Zaldívar D. & Pérez M. Procesamiento digital de imágenes con Matlab y Simulink. México D.F., México: Alfaomega Grupo Editor, 26, 27, 49, 52, 83, 127, 129, 137, 138, 158, 249, 385, 402-404.

**[16]** GONZALES R. C. & Woods R. E. Digital Image processing. United States of America: Prentice Hall, 3rd Ed. 2008. p. 23, 24, 167, 179, 817

**[17]** SOLOMON C. & Breckon T. Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab. New Jersey, United States of America: John Wiley & Sons Ltd, 2011. 63, 86, 87, 90, 91, 97, 197.

**[18]** JAIN A. K. Fundamentals of Digital Image Processing. New Jersey, United States of America: Prentice Hall, 1989. 241, 246, 347, 357, 358, 409

**[19]** MONTGOMERY D. C. Diseño y Análisis de Experimentos. México D. F., México: Limusa. 2da Ed, 2004. 27.

**[20]** MORALES Mendoza L. J., Vázquez Bautista R. F. & Shkvarko Y. V. Unificación de los Métodos de Regularización de Máxima Entropía y de Análisis Variacional para Reconstrucción de Imágenes de Percepción Remota. En: IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS. 2005, vol.3 no.4, p. 362-375

**[21]** VLIEGHE M., Coufort-Saudejaud C., Frances C. & Liné A. In Situ Characterization of Floc Morphology by Image Analysis in a Turbulent Taylor–Couette Reactor. En: AIChE Journal. 2014, vol. 60 no.7, p. 2389-2403

**[22]** BURGER W. & Burge M. J. Digital Image Processing: An Algorithmic Introduction using Java. New York, United States of America: Springer Science+Business Media, 2008. p. 28-29.

**[23]** IMAGEJ, “Analyze Menu” Internet:  
(<http://imagej.nih.gov/ij/docs/menus/analyze.html#ap>)

**[24]** IGATHINATHANE C., Pordesimo L.O., Columbus E.P., Batchelor W.D. & Methuku S.R., Shape identification and particles size distribution from basic shape parameters using ImageJ. En: Computers and electronics in agriculture. 2008, vol.63, p.168–182.

**[25]** KAZMIRUK V. Scanning Electron Microscopy. Rijeka, Croacia: InTech, 2012. p.17-29.

**[26]** CAVANOS G. C. Probabilidad y estadística. Aplicaciones y métodos. México D.F., México: McGraw-Hill/ Interamericana de México, 1ra Ed, 1998. p3, 4, y 5.

**[27]** DE LA HORRA Navarro J. Estadística Aplicada. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, 3ra Ed, 2003. p4, 5 y 6.

**[28]** MERY D., da Silva R. R., Calôba L. P. y Rebello J. M. A, "Detección de fallas en piezas fundidas usando una metodología de reconocimiento de patrones". Internet: ([http://www.romeu.eng.br/pan\\_domingo\\_final.pdf](http://www.romeu.eng.br/pan_domingo_final.pdf))

**[29]** MOTTA Nieto D. F., Martínez Ortega F. y Delgado Niño P. Evaluacion Foto-Catalitica de los oxidos mixtos  $Sr_{0.94}Eu_{0.03}Zr_{0.1}Ti_{0.9}O_3$ ,  $Sr_{0.94}Sm_{0.03}Zr_{0.1}Ti_{0.9}O_3$  y  $Sr_{0.94}Ho_{0.03}Zr_{0.1}Ti_{0.9}O_3$ . En: XXIV Congreso Iberoamericano de catálisis CICAT 2014.

**[30]** DEVÈS G., Daudin L., Bessy A., Buga F., Ghanty J., Naar A., Sommar V., Michelet C., Seznec H. & Barberet P. An ImageJ plugin for ion beam imaging and data processing at AIFIRA facility. En: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2015, Vol.348, p.62-67.

**[31]** SIRITANTIKORN S., Jintaworn S., Noisakran S., Suputtamongkol Y., Paris D. H. & Blacksell S. D. Application of ImageJ program to the enumeration of *Orientia tsutsugamushi* organisms cultured in vitro. En: Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene. 2012, vol.106 no.10, p.632-635.

**[32]** IGATHINATHANE C., Pordesimo L. O., Columbus E. P., Batchelor W. D. & Sokhansanj S. Sieveless particle size distribution analysis of particulate materials through computer vision. En: Comput. Electron. Agric. 2009, vol.66, p.147-158.

## BIBLIOGRAFÍA

ANASTAS P., Kirchhoff M. M. & Williamson T. C. Catalysis as a foundational pillar of green chemistry. En: *Applied Catalysis A: General*. 2001, vol. 221, p.3–13.

ARMOR J. N. A history of industrial catalysis. En: *Catalysis Today*. 2011, vol. 163, p. 3–9

BARTHOLOMEW, C. H. & Farrauto R. J. Fundamentals of industrial catalytic processes. New Jersey: Wiley, 2006. p. 8, 119, 122, 124, 131.

BURGER W. & Burge M. J. Digital Image Processing: An Algorithmic Introduction using Java. New York, United States of America: Springer Science+Business Media, 2008. p. 28-29.

BUURMANS L. C. & Weckhuysen B. M. Heterogeneities of individual catalyst particles in space and time as monitored by spectroscopy. En: *Nature Chemistry*. 2012, vol.4, p.873–886.

CAVANOS G. C. Probabilidad y estadística. Aplicaciones y métodos. México D.F., México: McGraw-Hill/ Interamericana de México, 1ra Ed, 1998. p3, 4, y 5.

CHORKENDORFF I. & Niemantsverdriet J. W. Concepts of Modern Catalysis and Kinetics. KGaA, Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2003. p. 129.

CUEVAS E., Zaldívar D. & Pérez M. Procesamiento digital de imágenes con Matlab y Simulink. México D.F., México: Alfaomega Grupo Editor, 26, 27, 49, 52, 83, 127, 129, 137, 138, 158, 249, 385, 402-404.

DE LA HORRA Navarro J. Estadística Aplicada. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, 3ra Ed, 2003. p4, 5 y 6.

DEVÈS G., Daudin L., Bessy A., Buga F., Ghanty J., Naar A., Sommar V., Michelet C., Seznec H. & Barberet P. An ImageJ plugin for ion beam imaging and data processing at AIFIRA facility. En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2015, Vol.348, p.62-67.

FECHETE I., Wang Y., Vedrine J.C. The past, present and future of heterogeneous catalysis. En: *Catalysis Today*. 2012. Vol.189, p. 2– 27.

FRIEDRICH H., Gommès C. J., Overgaag K., Meeldijk J. D., Evers W. H., de Nijss B., Boneschanscher M. P., de Jongh P. E., Verkleij A. J., de Jong K. P., van Blaaderen A. & Vanmaekelbergh D. Quantitative Structural Analysis of Binary Nanocrystal Superlattices by Electron Tomography. En: *Nano Lett.* 2009, vol. 9 no.7, p. 2719-2724

GOMMES C. J., Friedrich H., Wolters M., de Jongh P. E. & de Jong K. P. Quantitative Characterization of Pore Corrugation in Ordered Mesoporous Materials Using Image Analysis of Electron Tomograms. En: *Chem. Mater.* 2009, vol.21 no.7, p. 1311–1317

GONZALES R. C. & Woods R. E. Digital Image processing. United States of America: Prentice Hall, 3rd Ed. 2008. p. 23, 24, 167, 179, 817

IGATHINATHANE C., Pordesimo L. O., Columbus E. P., Batchelor W. D. & Sokhansanj S. Sieveless particle size distribution analysis of particulate materials through computer vision. En: *Comput. Electron. Agric.* 2009, vol.66, p.147-158.

IGATHINATHANE C., Pordesimo L.O., Columbus E.P., Batchelor W.D. & Methuku S.R., Shape identification and particles size distribution from basic shape parameters using ImageJ. En: *Computers and electronics in agriculture*. 2008, vol.63, p.168–182.

IMAGEJ, “Analyze Menu” Internet:  
(<http://imagej.nih.gov/ij/docs/menus/analyze.html#ap>)

ISMAGILOV Z.R., Kerzhentsev M.A., Shkrabina R.A., Tsikoza L.T., Lunyushkin B.I., Ostrovski Yu.V., Kostin A.L., Abroskin I.Ye., Malyi Ye. N., Matyukha V.A., Adamson M.G., Heywood A.C., Zundevich Yu., Ismagilov I.Z., Babko-Malyi S. y Battleson D.M. A role of catalysis for the destruction of waste from the nuclear industry. En: *Catalysis Today*. 2000. vol. 55, p.23–43.

JAIN A. K. Fundamentals of Digital Image Processing. New Jersey, United States of America: Prentice Hall, 1989. 241, 246, 347, 357, 358, 409

KAZMIRUK V. Scanning Electron Microscopy. Rijeka, Croacia: InTech, 2012. p.17-29.

MERY D., da Silva R. R., Calôba L. P. y Rebello J. M. A, “Detección de fallas en piezas fundidas usando una metodología de reconocimiento de patrones”. Internet: ([http://www.romeu.eng.br/pan\\_domingo\\_final.pdf](http://www.romeu.eng.br/pan_domingo_final.pdf))

MONTGOMERY D. C. Diseño y Análisis de Experimentos. México D. F., México: Limusa. 2da Ed, 2004. 27.

MORALES Mendoza L. J., Vázquez Bautista R. F. & Shkvarko Y. V. Unificación de los Métodos de Regularización de Máxima Entropía y de Análisis Variacional para Reconstrucción de Imágenes de Percepción Remota. En: IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS. 2005, vol.3 no.4, p. 362-375

MOTTA Nieto D. F., Martínez Ortega F. y Delgado Niño P. Evaluación Foto-Catalítica de los óxidos mixtos  $\text{Sr}_{0.94}\text{Eu}_{0.03}\text{Zr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_3$ ,  $\text{Sr}_{0.94}\text{Sm}_{0.03}\text{Zr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_3$  y  $\text{Sr}_{0.94}\text{Ho}_{0.03}\text{Zr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_3$ . En: XXIV Congreso Iberoamericano de catálisis CICAT 2014.

NOVÁK V., Ortel E., Winter B., Butz B., Paul B., Kočí P., Marek M., Spiecker E. & Kraehnert R. Prototyping of catalyst pore-systems by a combined synthetic,

analytical and computational approach: Application to mesoporous TiO<sub>2</sub>. En: *Chemical Engineering Journal*. 2014, vol. 248, p. 49–62.

SIRITANTIKORN S., Jintaworn S., Noisakran S., Suputtamongkol Y., Paris D. H. & Blacksell S. D. Application of ImageJ program to the enumeration of *Orientia tsutsugamushi* organisms cultured in vitro. En: *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*. 2012, vol.106 no.10, p.632-635.

SOLOMON C. & Breckon T. *Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab*. New Jersey, United States of America: John Wiley & Sons Ltd, 2011. 63, 86, 87, 90, 91, 97, 197.

VÉDRINE J. C. Revisiting active sites in heterogeneous catalysis: Their Structure and their dynamic behavior. En: *Applied Catalysis A: General*. 2014, vol.474, p. 40–50.

VLIEGHE M., Coufort-Saudejaud C., Frances C. & Liné A. In Situ Characterization of Floc Morphology by Image Analysis in a Turbulent Taylor–Couette Reactor. En: *AIChE Journal*. 2014, vol. 60 no.7, p. 2389-2403

YU Y., Xin H. L., Hovden R., Wang D., Rus E. D., Mundy J. A., Muller D. A. & Abruña H. D. Three-Dimensional Tracking and Visualization of Hundreds of Pt–Co Fuel Cell Nanocatalysts During Electrochemical Aging. En: *Nano Lett.* 2012, vol. 12, p.4417–4423.

ZHAN W., Guo Y., Gong X., Guo Y., Wang Y. & Lu G. Current status and perspectives of rare earth catalytic materials and catalysis. En: *Chinese Journal of Catalysis*. 2014, vol. 35, p. 1238–1250.

ZHOU W., Wachs I. E. & Kiely C. J. Nanostructural and chemical characterization of supported metal oxide catalysts by aberration corrected analytical electron microscopy. En: *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2012, vol.16, p.10–22.

## ANEXOS

**Anexo A.** Imágenes SEM originales del *titanato de estroncio dopado con europio*.

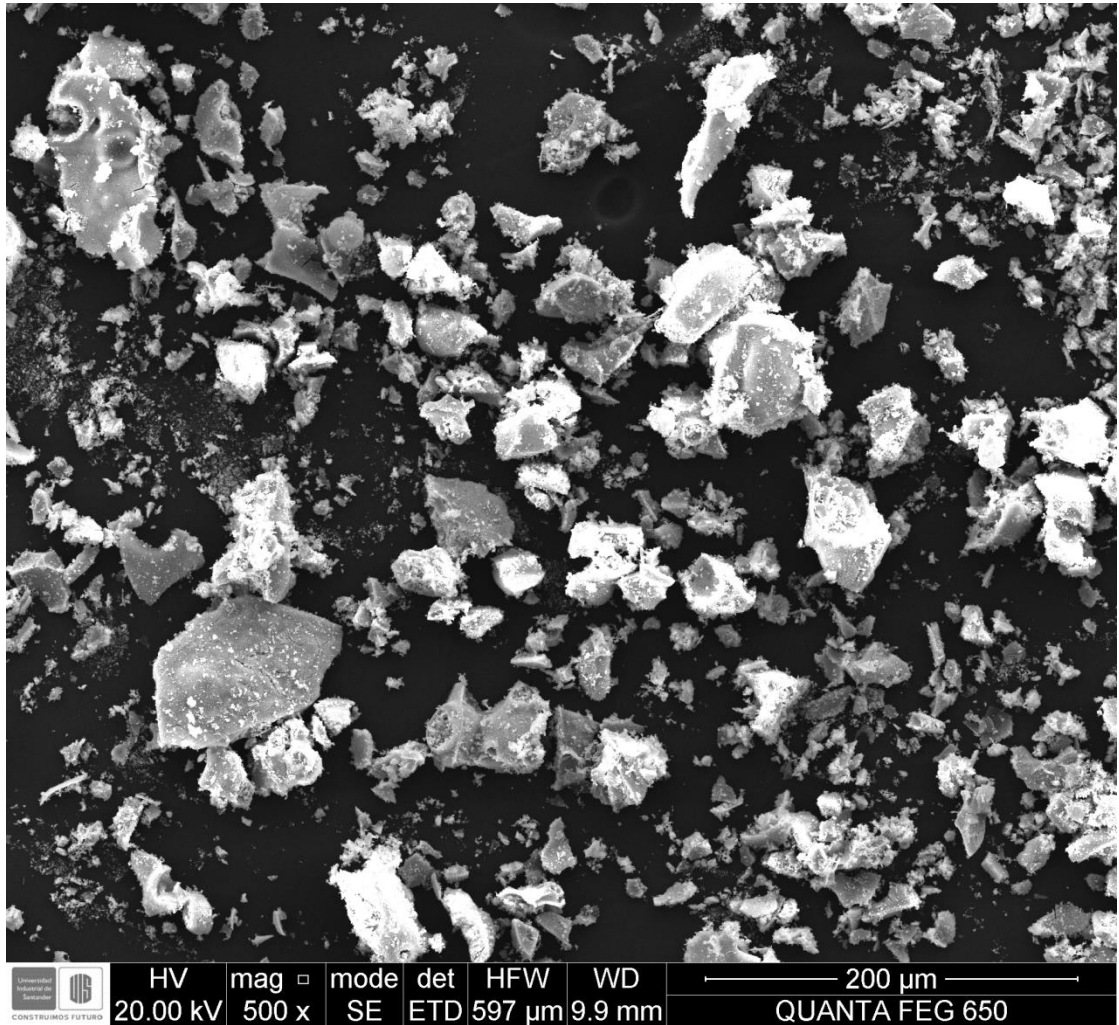
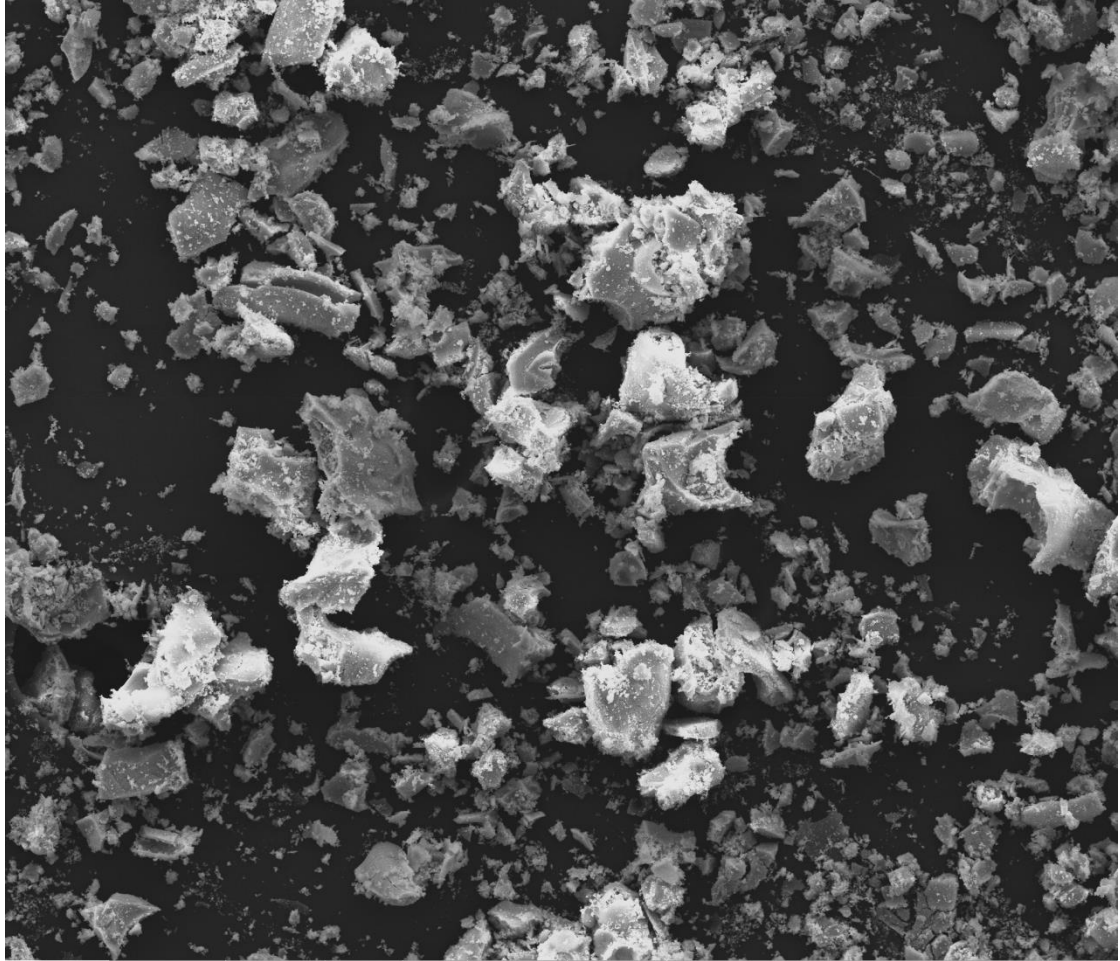


Imagen SEZT\_01



	HV	mag	mode	det	HFW	WD	200 $\mu$ m
	20.00 kV	500 x	SE	ETD	597 $\mu$ m	9.9 mm	

Imagen SEZT\_02

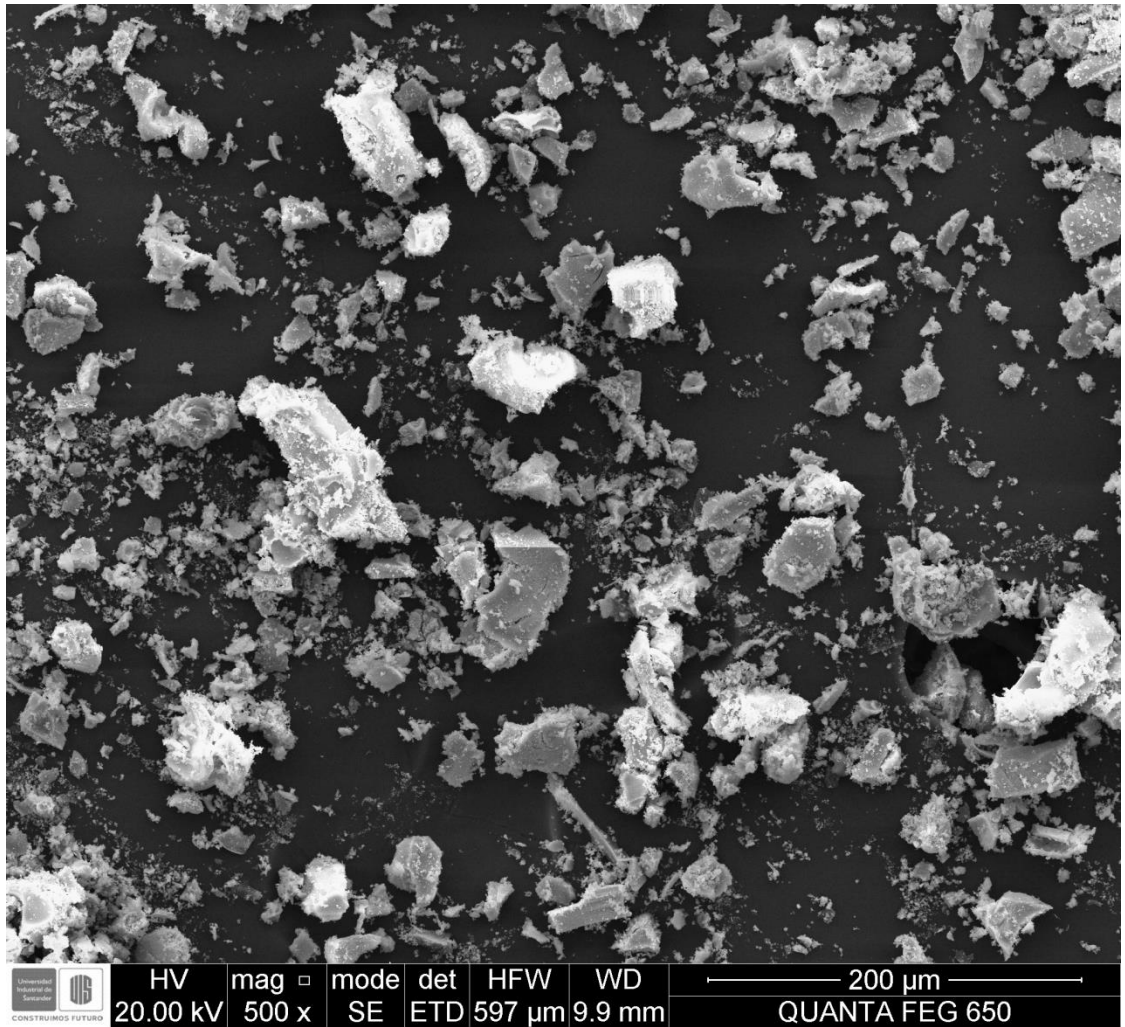


Imagen SEZT\_03

**Anexo B.** Proceso realizado por el algoritmo planteado en la imagen SEZT\_02 y la imagen SEZT\_03.

### **Imagen SEZT\_02**

Imagen SEM SEZT\_02 después del proceso de ecualización lineal del histograma.

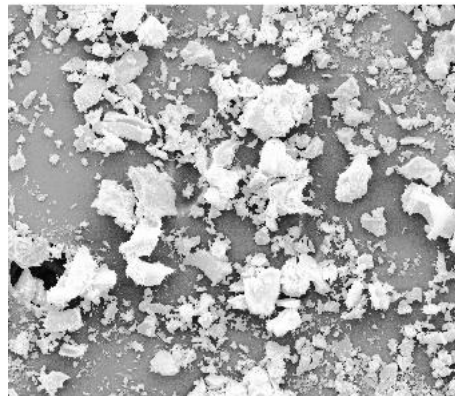


Imagen SEM SEZT\_02 después de aplicar los filtros lineales y no lineales.

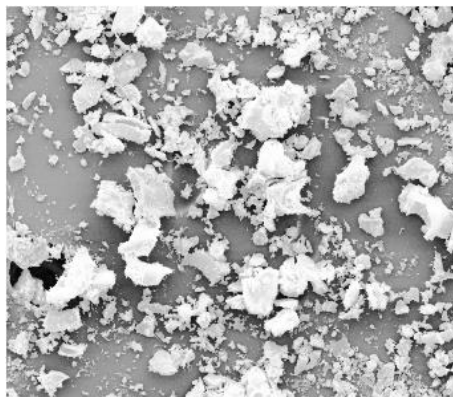
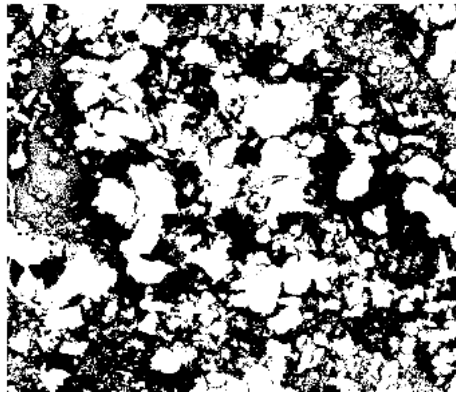
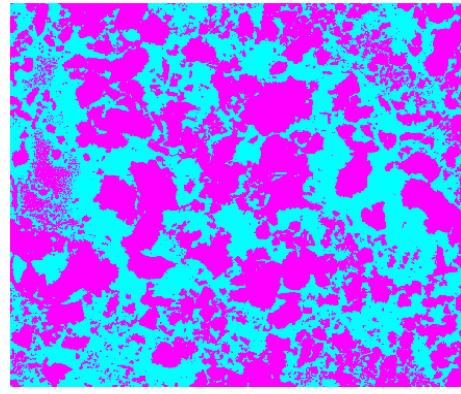


Imagen SEM SEZT\_02: a) después del proceso de binarización y b) cambio de background de la binarización.

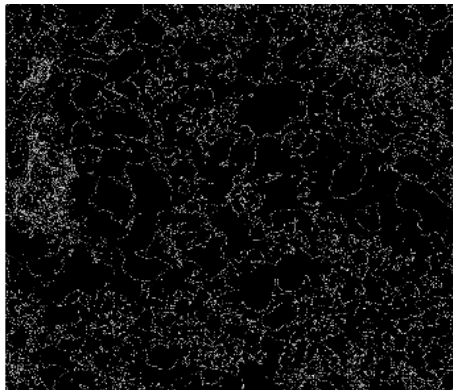


a)

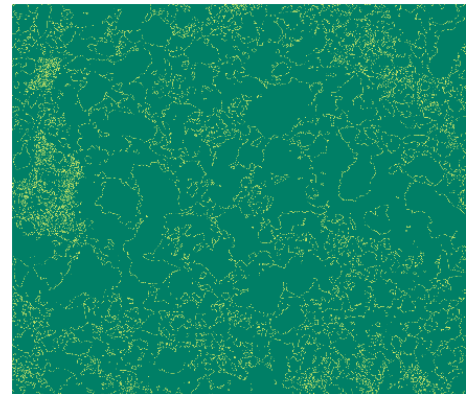


b)

Imagen SEM SEZT\_02, a) después del proceso de detección de bordes (*Canny*) y b) cambio de background de detección de bordes (*Canny*).

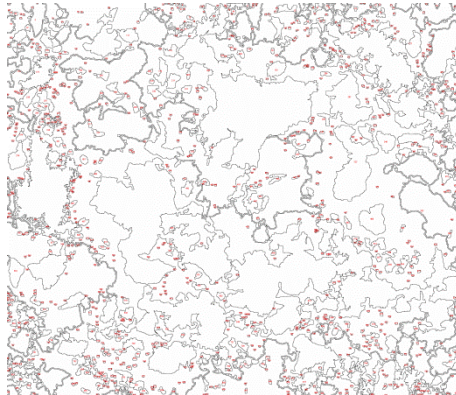


a)



b)

Imagen SEM SEZT\_02 después del proceso de etiquetado de las partículas.



**Imagen SEZT\_03**

Imagen SEM SEZT\_03 después del proceso de ecualización lineal del histograma.

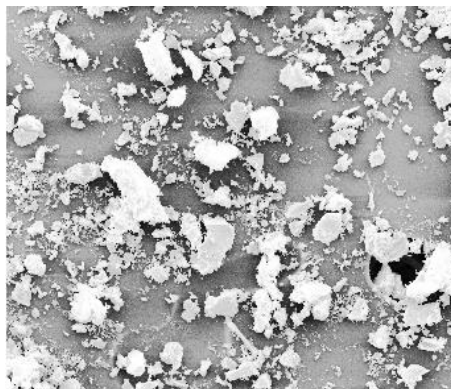


Imagen SEM SEZT\_03 después de aplicar los filtros lineales y no lineales.

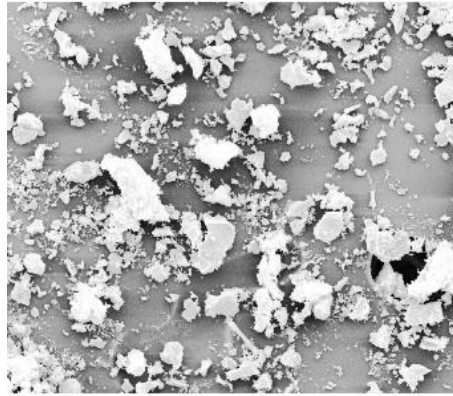
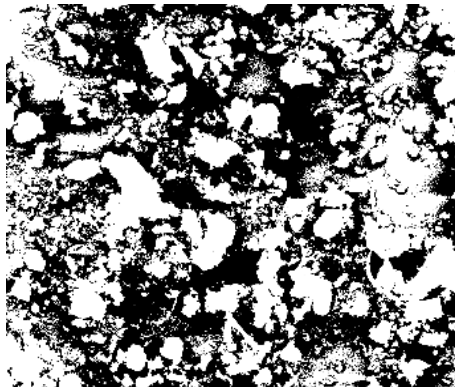
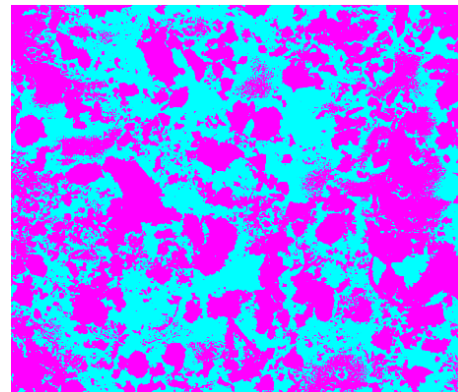


Imagen SEM SEZT\_03 a) después del proceso de binarización y b) cambio de background de la binarización.

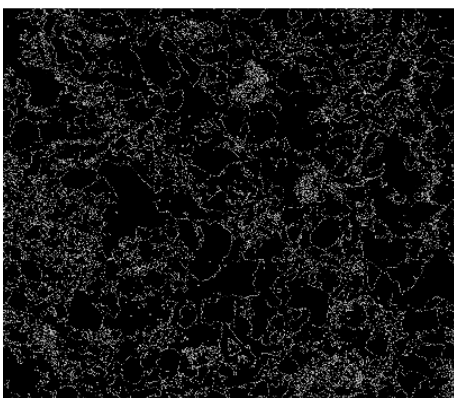


a)

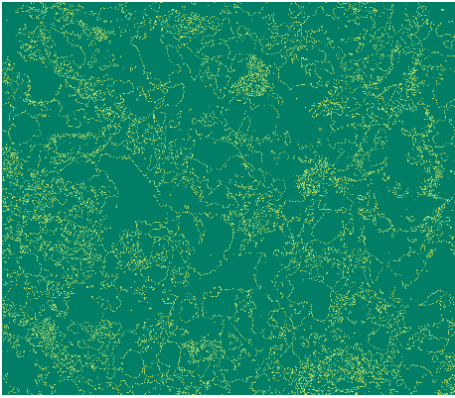


b)

Imagen SEM SEZT\_03: a) después del proceso de detección de bordes (*Canny*) y b) cambio de background de detección de bordes (*Canny*).



a)



b)

Imagen SEM SEZT\_03 después del proceso de etiquetado de las partículas.

