

Determinación de la microestructura cerámica mediante procesamiento óptico–digital de imágenes MEB

Determinação da microestrutura cerâmica através de
processamento óptico–digital de imagem MEV

Determination of ceramic microstructure by using optical–digital
image processing of SEM images

Oscar García–Palencia¹, Leonairo Pencue² y
Cristian Villacrez–Pastas³

Recepción: 17-jun-2009/Modificación: 20-oct-2009/Aceptación: 22-oct-2009

Se aceptan comentarios y/o discusiones al artículo

Resumen

En este trabajo se reporta el diseño e implementación de un software para análisis ceramográfico y control de calidad en ciencia de materiales, mediante el estudio de imágenes obtenidas por microscopia electrónica de barrido (MEB) de la superficie pulida de muestras de diferentes sistemas cerámicos. El sistema se apoya en el procesamiento óptico digital de imágenes para determinar: el tamaño de cada grano y poro, su factor de redondez y excentricidad como factor de forma. Este trabajo destaca el uso de las técnicas más eficientes de filtrado adaptativo y de detección de bordes, para la realización del cálculo

¹ Ingeniero físico, ogarcia@unicauca.edu.co, investigador, Universidad del Cauca, Popayán–Colombia.

² Ingeniero físico, leonairo@unicauca.edu.co, profesor titular, Grupo de Óptica y Láser, Ingeniería física, Universidad del Cauca, Popayán–Colombia.

³ Estudiante de Ingeniería física, cvillacrez@unicauca.edu.co, Grupo de bajas temperaturas, Universidad del Cauca, Popayán–Colombia.

de tamaño de partícula con alta precisión, en comparación con los métodos tradicionales encapsulados en las normas ASTM E112 y E1382. Los resultados más destacados de este análisis, como la posible aplicación de este sistema en otros campos de la investigación tales como la granulometría, la exploración petrolífera, la ingeniería de suelos y las películas delgadas, se presentan en este trabajo, con efectividad superior con otros software comerciales.

Palabras claves: microscopía MEB, análisis ceramográfico, procesamiento de imágenes.

Resumo

Este trabalho relata a concepção e implementação de um software para análise ceramografica e controle de qualidade em ciência de materiais, através do estudo das imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície polida das amostras de diferentes sistemas cerâmicos. O sistema se baseia no processamento óptico-digital de imagem para determinar: o tamanho de cada grão e poro, sua circularidade e fator de excentricidade. Este trabalho enfatiza o uso de técnicas mais eficientes de filtragem adaptativa e detecção de borda, para executar o cálculo do tamanho de partícula com alta precisão, em comparação com os métodos tradicionais encapsulados em ASTM E112 e E1382. Os resultados mais salientes desta análise, como a possível aplicação deste sistema em outras áreas de pesquisa como a exploração de petróleo, engenharia de solo e de filmes finos são apresentados neste trabalho com eficácia superior com outro software comerciais.

Palavras chaves: microscopia MEV, análise ceramografico, processamento de imagem.

Abstract

This paper reports the design and implementation of software to ceramographic analysis and quality control in materials science, through image study obtained by scanning electronic microscopy (SEM), of samples polished surface of different ceramics systems. The system is supported on optics-digital image processing to determine: the size of each grain and pore, its roundness and eccentricity as shape factor. This work stands out the use of more efficient techniques of adaptive filtering and edge detection, to the calculus realization for the particle size with high precision, compared with traditional methods encapsulated inside the norms ASTM E112 and E1382. The most outstanding results of this analysis, as the possible application of this system in other investigation areas such as granulometry, oil exploration, geotechnical engineering and thin films are presented in this paper, with superior effectiveness with other commercial software.

Key words: SEM microscopy, particle size, image processing.

1 Introducción

Para tener control sobre los procesos de síntesis y sinterización de materiales cerámicos es necesario contar con técnicas de caracterización que permitan conocer la evolución del material cerámico al ser sometido a estos procesos. Entre los métodos de caracterización utilizados para analizar estos sistemas, se destaca la caracterización microestructural utilizando la microscopia SEM y TEM, debido a su bajo costo respecto a otras técnicas.

Debido a la naturaleza de las imágenes, la extracción manual de los parámetros microestructurales implicaría largos tiempos de análisis, limitaciones en el tratamiento de datos estadísticos y el empleo de un criterio poco objetivo en las medidas, lo que conlleva a poca precisión. En realidad, el observador se puede distraer fácilmente de lo que es importante, por detalles triviales de la imagen, sumado al cansancio visual, tenderá a hacer suposiciones que pueden falsear la medida, por esa razón se hace necesario el desarrollo e implementación de un sistema automático de medida, basado en el procesamiento de imágenes digitales, el cual permita determinar los parámetros microestructurales de interés [1, 2].

Los procesos de medida de parámetros microestructurales, en los últimos 30 años, están condensados en normas técnicas, entre las cuales se destaca la ASTM E112 y E1382 (American Society for Testing and Materials), la Internacional Organization for Standardization (ISO) y la Swedish Standards Institution (SIS). Estas normas se fundamentan básicamente en tres métodos: de intersección, planimétricos y de comparación, los cuales han reducido los tiempos de análisis. Cabe anotar que en dichos métodos, la precisión en las medidas es relativamente baja [3, 4, 5].

Se debe tener en cuenta que la experiencia de varias décadas indica que en muchas aplicaciones de tipo industrial e investigativo, los métodos tradicionales han realizado una buena labor, pero si se quiere realizar un estudio en el cual se requiere una mejor descripción de los parámetros del sistema cerámico, se debe migrar a otras técnicas y métodos de análisis.

Por tal razón surge este trabajo de investigación, el cual está enfocado en la realización de medidas densitométricas, medidas de campo y medidas de objeto, en el cual se aísla cada grano y poro presente en la micrografía. De esta forma se aumenta la precisión durante el proceso ya que la técnica pro-

puesta permite extraer los parámetros morfométricos más significativos. Los resultados obtenidos son comparados con los métodos tradicionales, como el propuesto en el paquete comercial *IQmaterials* de la empresa Media Cybernetics que trabaja bajo las normas de la ASTM.

2 Fundamentos teóricos

2.1 Procesamiento general de una imagen

Los sistemas de análisis de imagen tratan las imágenes como un conjunto de puntos ordenados cada uno con un nivel de gris, estos puntos denominados píxeles se ordenan en una matriz para dar lugar a una representación digital de una imagen. El procesamiento de esta matriz, se centra en la necesidad de mejorar la visibilidad de las estructuras de interés y en la eliminación de defectos. Las operaciones que componen el procesado se pueden clasificar en tres grupos: transformaciones geométricas, transformaciones puntuales y convoluciones y/o filtros. Las transformaciones geométricas son aquellas que trasladan un píxel a una nueva coordenada, como por ejemplo la ampliación de una zona, la reducción, la corrección de distorsiones, rotaciones, etcétera. Las transformaciones puntuales son las más sencillas ya que no dependen de los niveles de gris de los píxeles vecinos. Como ejemplo se puede mencionar la modificación de contraste y brillo en una imagen. Mientras tanto, la convolución es una transformación que tiene en cuenta los niveles de gris de los píxeles vecinos. Dentro de los ejemplos más representativos se pueden mencionar la detección de bordes, el suavizado de una imagen y los filtros morfológicos. Este tipo de transformaciones son tal vez las más importantes en el desarrollo de este trabajo [6].

El procesamiento de una imagen consta básicamente de dos fases, las cuales están ligadas entre sí. Primero se realiza el filtrado de la imagen y posteriormente la detección de los bordes de los objetos de interés. Para ampliar esta idea, se debe ver una imagen como una señal digital: esta señal siempre presentará algún grado de ruido, el cual puede ser originado por diversas causas que van desde la digitalización, la calidad del proveedor de energía, hasta las propias partículas. Es por eso que existe todo un campo de investigación alrededor del filtrado de las señales digitales. La idea básica es eliminar los detalles irrelevantes en la imagen.

Posterior al filtrado se procede a la detección de los bordes. Existen infinidad de métodos, muchos basados en la neurofísica y la psicofísica, pero el propósito de esta etapa es obtener una imagen binaria, en la cual sólo estén presentes los contornos o fronteras de los objetos de interés [7].

Una vez se tiene una imagen con los detalles de interés segmentados, se procede a utilizar las herramientas que proporciona la morfología matemática. Estas permiten reconstruir bordes quebrados, eliminar detalles irrelevantes, adelgazar bordes, describir formas, etcétera. De esa forma es posible encontrar la frontera de cada partícula para posteriormente aislarla y realizar sobre ésta todas las medidas de campo y de objeto posibles [8, 9].

2.2 Medidas en el análisis de imagen aplicado a la determinación de la microestructura cerámica

De acuerdo al tipo de estudio que se quiera realizar y de los propósitos del mismo, los parámetros que describen los elementos analizados pueden ser de mayor o menor grado de utilidad. Los descriptores empleados son:

2.2.1 Descriptores de los parámetros morfométricos. A continuación se describen los factores de forma que mejor se ajustan a la morfología de las partículas presentes en las fotomicrografías:

Área: número total de píxeles encerrados dentro del contorno del elemento analizado, multiplicado por el área de un píxel previamente calibrado.

$$\text{Área} = \text{número de píxeles} \times \text{área de un píxel}.$$

Perímetro: longitud del contorno del elemento analizado.

Redondez: factor de forma, que da el valor mínimo de 1 al círculo, este parámetro se calcula por la conocida relación

$$\text{Redondez} = \text{Perímetro}^2 / \text{Área}.$$

Diámetro del círculo equivalente: diámetro de un círculo que tiene la misma área del cuerpo medido.

$$D.c.eq = \sqrt{4 \times \text{Área} / \pi}$$

Razón de aspecto: relación entre los diámetros de Feret.

$$R.\text{aspecto} = F_{\text{largo}} / F_{\text{corto}},$$

donde F se refiere a los diámetros de Feret.

Para los efectos de las esquinas producidas por la digitalización de los objetos en la imagen, el cálculo del perímetro debe ser corregido por el factor de ajuste calculado de 1,064.

2.2.2 Descriptores de las medidas de campo. Existen múltiples descriptores entre los que se pueden destacar: contaje de objetos, densidad de marcaje, medida porcentual de un área respecto a un campo de referencia, medida del volumen a partir de cortes seriados, entre otros. Para este análisis sólo se utilizará el porcentaje de área respecto a un campo en caso que se presenten segundas fases y la densidad de partículas en un campo, es decir, el número de partículas en un área determinada.

2.2.3 Parámetros densitométricos. El término densitométrico hace referencia a la medida de las cualidades lumínicas (de brillo) de los objetos. En otras palabras se establece una relación entre el brillo de un objeto y alguna propiedad física, química o biológica de éste, siendo un claro ejemplo la claridad de los granos frente la opacidad de los poros. Esto quiere decir que el valor de gris de una fase es relevante como parámetro cuando su intensidad lumínica se encuentra relacionada con alguna cualidad de dicha fase [10, 11, 12].

3 Procedimiento para realizar el análisis microestructural

El análisis de imagen aplicado al estudio de la microestructura cerámica se fundamenta en las etapas señaladas en la figura 1. Aunque las tres primeras etapas no tienen que ver con el procesamiento de imágenes, son importantes para el análisis ya que la imagen es la fuente de la información requerida. En estas tres etapas radica la adecuada preparación de la muestra. En todo momento se debe tener presente que una buena imagen proporcionará datos de buena fiabilidad. Obtener un buen pulido de la muestra es fundamental para obtener superficies suaves, con ruido relativamente bajo (debido a la rugosidad

de la superficie), niveles de gris homogéneos y fronteras de grano bien definidas, sin sombras, sin abolladuras ni material desprendido que confunda al sistema con falsos poros o bordes.

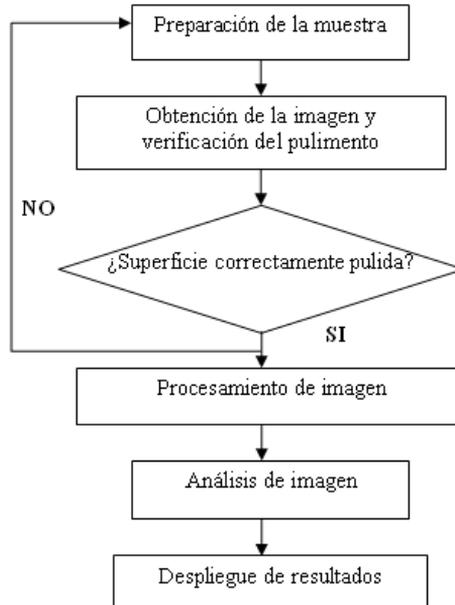


Figura 1: diagrama de flujo del procedimiento para realizar la extracción de la microestructura a partir de una imagen

Cuando se trabaja con sistemas cerámicos, no conductores en general, un recubrimiento metálico debe hacerse sobre la muestra, normalmente con oro, para lograr una buena conducción de la muestra y por tanto la formación de una buena imagen con el MEB (Microscopio Electrónico de Barrido). Es por eso que antes de depositar la película delgada de oro, se debe tener una muestra libre de impurezas, la seguridad de alcanzar el vacío adecuado y respetar el tiempo de deposición de la película, entre otros cuidados. Esto proporcionará en la imagen fronteras de grano bien definidas, pero el no hacerlo traerá problemas como la saturación de la imagen en las regiones mal recubiertas. La figura2 es un claro ejemplo de una muestra mal preparada (imagen proporcionada por el grupo de ciencia y tecnología de materiales cerámicos Cytemac de la Universidad del Cauca).

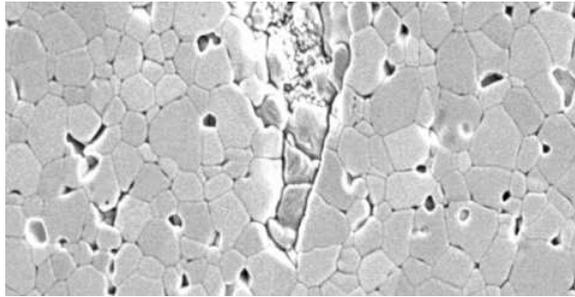


Figura 2: superficie de una muestra mal preparada. En ésta se observa mal pulimento, material desprendido y regiones saturadas, lo que produce falsos bordes

Una vez se haya obtenido una buena imagen, se procede con la cuarta etapa del procedimiento, el procesamiento de imagen, tal vez la más importante en el sistema de extracción ya que su salida entrega las partículas aisladas para ser medidas en el siguiente paso, el análisis de imagen. Siempre que se efectúe un buen procesamiento de la imagen de entrada, la extracción de la información se acercará al ideal.

El objetivo del procesamiento de la imagen es lograr la mejor ubicación posible de la frontera de grano y de poro detectada, porque de este resultado depende la precisión del sistema. Con base en esto se realizó un estudio para seleccionar un detector de borde que brinde la mejor respuesta, teniendo en cuenta que cada imagen presenta características diferentes. Dentro del estudio se revisaron los detectores de borde que estuvieron al alcance, entre los cuales se destacan aquellos basados en el gradiente como el Perwitt, Sobel, Canny; basados en la segunda derivada como el laplaciano, LoG, DoG; basados en redes neuronales y en texturas, entre otros métodos [6, 7, 8]. En este trabajo se eligió un detector basado en los momentos estadísticos, debido a su fácil cómputo, buena detección y fácil umbralización.

Cabe resaltar que una buena detección de borde está estrechamente ligada a un filtrado previo de muy buena calidad, evitando así falsos positivos debido al ruido o a imperfecciones en la preparación de la muestra. Para esto se hizo una revisión cuidadosa de las técnicas de filtrado, dada la importancia de eliminar el ruido al tiempo que se preservan los bordes. En las imágenes, el ruido y los bordes tienen la misma naturaleza frecuencial (altas frecuencias), que a la luz de los filtros lineales no se hacen distinguibles. Por esta razón se decidió emplear otros métodos más avanzados tales como el filtrado no lineal. Den-

tro de la revisión se destacan: el *adaptive local noise reduction filter*, *adaptive median filter*, *double window-modified trimmed mean filter*, *local mean and variance contrast enhancement*, y por último el *adaptive window edge detection filter* [6, 7, 8, 9], siendo este último el que exhibió un mejor comportamiento según las características encontradas en las imágenes.

Una vez se filtre la imagen base, se procede a detectar la frontera de los granos y los poros, para luego extraer cada partícula, con excepción de las que “tocan” el borde de la imagen, ya que se tiene total incertidumbre sobre lo que está fuera del campo mismo de la imagen (ver figuras 6 y 7).

En esta fase se pasa del procesamiento al análisis de imagen; una vez las partículas sean tratadas como objetos individuales es cuando se extraen los parámetros que las describen (se miden) según sea el propósito. La información realmente relevante para el objetivo de este trabajo es el cálculo del tamaño de partícula, área, el perímetro, la redondez, el diámetro equivalente y el nivel de gris medio [10, 11, 12].

Por último, los parámetros extraídos o descriptores de medida son presentados en hojas de MS-Excel para un posterior análisis por parte del usuario. Allí se presentan el tamaño de partícula, porcentaje de área ocupada respecto al campo analizado y distribución del tamaño de partícula. Estos resultados serán discutidos y analizados y comparados con otros métodos a continuación.

4 Resultados y discusión

En esta sección se presenta una metodología que busca evaluar que tan fiable es el sistema desarrollado; para esto se muestra una comparación del filtro implementado con los filtros tradicionales, la precisión en la ubicación de la frontera de grano y una comparación de los parámetros entregados por el software desarrollado con otros sistemas ampliamente utilizados.

4.1 Respuesta del filtro no-lineal y detección de borde

El interés por emplear filtros no lineales, radica en que estos se auto ajustan dependiendo de si los píxeles se encuentran en el fondo (para este caso la superficie de los granos) o si hacen parte de un borde (frontera de grano),

eliminando el ruido al tiempo que preservan los bordes. Esta idea se ilustra en la siguiente serie de imágenes, en donde se comparará la salida de un filtro tradicional con la salida de un filtro no-lineal.

La figura 3 o imagen base representa una muestra que se desea filtrar. El contenido de ruido de la figura 3 está indicado en su perfil de línea, por esta razón se señala. Como se puede ver en el perfil de línea, el contenido de ruido es alto.

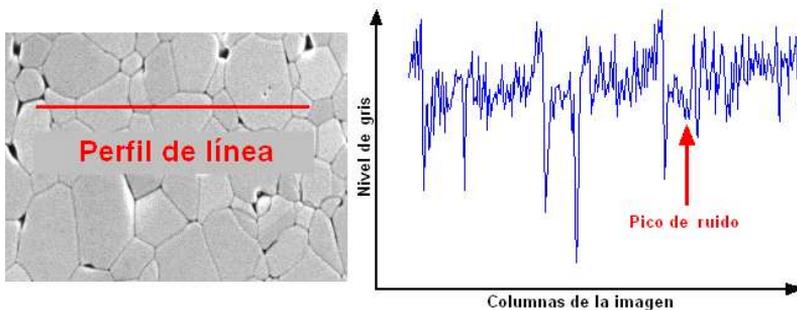


Figura 3: imagen de la superficie de una muestra y el respectivo perfil de línea señalado

En la figura 4 se muestra el perfil de línea en la misma ubicación, esta vez para la salida de un filtro gaussiano aplicado a la imagen de la figura 3. En este perfil queda señalada la pérdida de intensidad y el emborronamiento de los picos (ensanchamiento), además se aprecia que el filtro gaussiano es incapaz de filtrar ciertos picos de ruido como el señalado con la flecha en rojo.



Figura 4: perfil de línea de la salida de un filtro Gaussiano de 7 x 7; no se pueden ubicar con certeza ciertos picos

Pero a diferencia de lo anterior, lo que se aprecia en la figura 5 son picos afilados de buena intensidad y supresión del ruido. Gracias a la aplicación del Adaptive Window Edge Detection Filter (AWEDF) se pudo eliminar el pico señalado en rojo, algo difícil de igualar con otras técnicas.

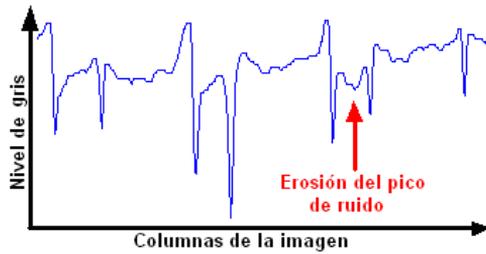


Figura 5: salida del AWEDF, nótese la diferencia en las intensidades de los picos reales y la erosión de los falsos picos

Una vez se haya filtrado eficientemente la imagen base, se procede a detectar los bordes o fronteras de grano. Hecho esto, se depura la detección con la ayuda de la morfología matemática, trazando automáticamente las fronteras de grano del tamaño de un píxel. Para evaluar el conjunto de: el filtro, el detector de borde y la asistencia que brinda la morfología matemática, se procesará la imagen mostrada en la figura 6. Esta imagen presenta un pulimento deficiente y bajo contraste, perfecta para una evaluación objetiva.

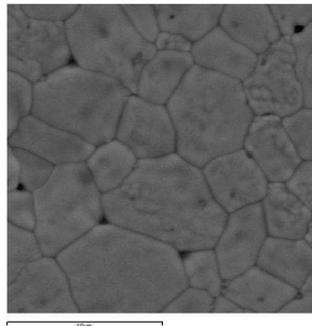


Figura 6: imagen original de una superficie con pulimento deficiente y bajo contraste, un buen ejemplo para testear la efectividad del filtrado adaptivo y la detección de borde. Fuente: Cytemac–Unicauca

Como salida se obtiene la imagen señalada en la figura 7a), donde se observa que la detección del sistema, señalada en rojo, es altamente precisa. La figura 7a) es una imagen donde los granos están diferenciados por sus fronteras y listos para ser analizados uno a uno. Por último, el sistema extrae los parámetros o descriptores de cada partícula y arroja una imagen similar a la mostrada en la figura 7b), en donde se muestran las partículas analizadas. Como se puede observar en b) no se analizaron los granos que tocan los bordes de la imagen.

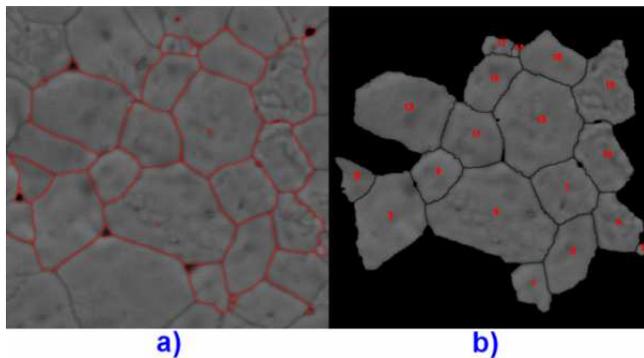


Figura 7: a) se muestra el trazado automático de la frontera de los granos en rojo. b) imagen entregada por el sistema donde se aprecian las partículas que fueron detectadas y medidas

4.2 Precisión de la medida del contenido de porosidad

Para comparar los resultados obtenidos del contenido de porosidad, el *AnaCe* (nombre del método desarrollado) se comparó con un sistema de caracterización de poros basado en procesamiento de imágenes, desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín [13], que ha sido validado con otros métodos. En ambos sistemas se cargaron imágenes patrones, y se calculó el tamaño medio de poro, como parámetro de comparación. La tabla 1 muestra los resultados obtenidos para ocho muestras, similares a las de las figuras 3 y 6, y de las cuales no se muestran sus fotografías.

Tabla 1: cuadro comparativo de la medición de tamaño medio de poro

Muestra	* <i>AnaCe</i> (μm)	** M. U. (μm)	Error porcentual (%)
1	0,49	0,48	2,04
2	0,47	0,49	4,25
3	0,52	0,50	3,84
4	0,80	0,77	3,75
5	0,10	0,10	0,00
6	0,32	0,29	9,37
7	0,12	0,11	8,33
8	0,10	0,09	10,0

*Método desarrollado en este trabajo

**Método desarrollado en la Universidad Nacional de Medellín

Como se puede observar, la variación en las medidas está por debajo del 10 %, lo cual se debe a unos cuantos píxeles que fueron detectados de más o que no se incluyeron en la segmentación. Otra manera de inducir error se presenta al redondear los valores de punto flotante y al calibrar el factor de conversión para pasar de píxeles a micras. En general, la desviación de la medida es pequeña, lo cual indica buena confiabilidad en los resultados.

4.3 Precisión de la medida del tamaño medio de grano

Para este estudio se comparó el método propuesto y el paquete *IQmaterials*, cuyos resultados se muestran en la tabla 2. En este caso se emplearon dos tipos de imágenes, unas corresponden a patrones de la ASTM y las otras son imágenes de polígonos regulares de diferentes lados y tamaños, simulando un material cerámico y asegurando la fidelidad del patrón. El parámetro seleccionado para determinar el tamaño de grano fue el diámetro del círculo equivalente y los diámetros de Feret, ya que estos son los que mejor se ajustan, debido a la morfología de los granos en los sistemas cerámicos.

Como se aprecia en la tabla 2, la efectividad en las mediciones del método propuesto manifiesta un alto grado de precisión. Nuevamente se debe tener en cuenta que la detección de la frontera de grano no es exacta y fluctúa debido al ruido en la imagen, lo que distorsiona el valor real de las medidas.

Tabla 2: Comparación del tamaño de grano medio obtenido por el método propuesto y el software comercial *IQmaterials*

Muestra	Patrón (μm)	<i>AnaCe</i> (μm)	*G.A	<i>IQMaterials</i> (μm)	Patrón de prueba	Error (%)
a	8,81	8,85	10	10,5	círculos	18,6
a	8,81	8,85	10	10,7	rectas verticales	20,3
b	5,97	5,93	33	14,0	círculos	136,1
c	7,70	7,71	14	10,9	círculos	41,6
d	3,75	3,73	166	13,0	círculos	248,8
d	3,75	3,73	166	1,95	rectas horizont.	47,7
d	3,75	3,73	166	4,16	rectas verticales	11,5

*Número de granos analizados por el *AnaCe*

El problema de las esquinas, debido a la digitalización y el factor de conversión, son los principales actores que falsean la medida.

El método de intersección da una buena aproximación en las medidas, unas veces por exceso y otras por defecto, dependiendo de la tendencia de la simetría de granos, si son alargados o redondeados, pero en términos generales la precisión fue mucho menor que la obtenida con el método propuesto en esta investigación.

Los parámetros restantes de gran importancia en el análisis como la distribución del tamaño de grano, no se compararon, ya que la distribución obtenida por la norma ASTM E112 corresponde a datos basados en medidas de campo.

4.4 Aplicaciones en otras áreas de la investigación

Las imágenes empleadas para medir el grado de porosidad en las rocas, con el fin de estudiar el almacenamiento de petróleo y de gas natural, al igual que la determinación del tamaño de partícula o granulometría en general, en los estudios geológicos, presentan similitudes con las imágenes empleadas en el estudio de la microestructura cerámica, lo que hace que las técnicas empleadas en este trabajo se puedan reproducir para tales fines, principalmente en la extracción de los parámetros morfométricos de cada uno de los elementos de estudio, como el tamaño, la forma, el área y la distribución de estos. En la

figura 8 se pueden ver muestras de material geológico en donde se aprecian estructuras similares a la de los sistemas cerámicos.



Figura 8: probetas de suelos a diferentes profundidades en donde se aprecian una gran gama de materiales. Fuente: Ingeniería de suelos y pavimentos–Unicauca

5 Conclusiones

Los resultados obtenidos, al realizar la comparación entre el método desarrollado y los métodos tradicionales, indican la eficacia del primero frente a los segundos, por lo cual se puede considerar como un sistema útil para la extracción de los parámetros microestructurales importantes en el estudio de los cerámicos, fusionando confiabilidad y rapidez en los tiempos de análisis.

Aunque en algunas aplicaciones industriales no se requiere un cálculo preciso de los parámetros microestructurales, lo que explica la vigencia de los métodos tradicionales, la tecnología actual va requiriendo cada vez más de exactitud en las medidas. Por otro lado, en las investigaciones que precisan de un enfoque sistémico, se requiere integrar una serie de herramientas que proporcionen precisión a las medidas realizadas, es allí donde tiene importancia este trabajo, pues los métodos tradicionales son muy limitados.

El método desarrollado, que propone una nueva forma de clasificar los parámetros estructurales, puede ser extendido a otras áreas de la investigación científica donde se encuentren estructuras similares a las exhibidas por los cerámicos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al doctor Jorge E. Rodríguez y al ingeniero Adolfo Mosquera del grupo Cytemac al igual que a la bióloga Patricia Mosquera de la unidad de microscopia electrónica de la Universidad del Cauca por toda la colaboración recibida y por suministrar las numerosas imágenes de este trabajo: *la materia prima*.

Referencias

- [1] Jesús R. Santamaría. *Relaciones microestructura-propiedades ferropiezoeléctricas en cerámicas de titanato de plomo modificado*. Tesis Doctoral en Ciencias físicas. Universidad Complutense de Madrid, 1994. Referenciado en 59
- [2] William Callister. *Materials Science and Engineering. An Introduction*, 7 edition, ISBN 978-0-471-73696-7. John Wiley & Sons, 2006. Referenciado en 59
- [3] José María Manero y Francisco Gil Mur. *Metalografía*, ISBN 8483018047, Ediciones UPC, 2005. Referenciado en 59
- [4] E. E. Underwood. *Quantitative Stereology*, ISBN 0201076500, Adison Wesley, Reading, 1970. Referenciado en 59
- [5] ASTM Technical Publication 839. *Practical Applications of Quantitative Metallography*. Symposium sponsored by ASTM Committee E-4 on Metallography and by the International Metallographic Society, Orlando, FL, ISBN 978-0-8031-4905-2, 1984. Referenciado en 59
- [6] Rafael González and Richard Woods. *Digital Image Processing*, 3 edition, ISBN 9780131687288, Prentice Hall, 2008. Referenciado en 60, 64, 65
- [7] William K. Pratt. *Digital Image Processing*, 4 edition, ISBN 978-0-471-76777-0, Wiley-Interscience, 2007. Referenciado en 61, 64, 65
- [8] I. Pitas, Ioannis Pitas and Anastasios N. Venetsanopoulos. *Nonlinear digital filters: principles and applications*, ISBN 0-7923-9049-0, Kluwer Academic Publishers, 1990. Referenciado en 61, 64, 65
- [9] Harley R. Myler and Arthur R. Weeks. *Computer Imaging Recipes In C*, ISBN 0131898795, Prentice Hall-Gale, 1993. Referenciado en 61, 65
- [10] Leszek Wojnar. *Image analysis: applications in materials engineering*, ISBN 978-0-8493-8226-0, CRC Press, 1999. Referenciado en 62, 65

- [11] Luciano da Fontoura and Roberto Marcondes. *Shape Analysis and Classification: Theory and Practice*, 1 edition, ISBN 0849334934, CRC Press, Inc., 2001. Referenciado en 62, 65
- [12] Jose F. Pertusa Grau. *Técnicas de análisis de imagen*, ISBN 9788437056678, Universitat de València, 2003. Referenciado en 62, 65
- [13] John W. Branch y Hugo de Jesús Mesa. *Caracterización de poros en carbones tratados térmicamente empleando procesamiento digital de imágenes y microscopía asistida por computador*. Revista Avances en Sistemas e Informática, ISSN 1657-7663, **1**(1), 35-39 (2004). Referenciado en 68