

# Caracterización petrográfica de partículas finas empleando microscopía asistida por computador

*John William Branch B. \**

## Resumen

El análisis petrográfico requiere de un operador calificado y los resultados obtenidos contienen alto grado de subjetividad. Así, para una muestra dada se estiman 500 puntos que consumen tiempo y fatigan al analista. Esto significa que aunque los datos petrográficos puedan dar información útil en diferentes áreas de aplicación, la técnica analítica es costosa y consume tiempo.

Este artículo presenta el desarrollo de una metodología basada en un enfoque sistémico para la clasificación de partículas finas, la cual integra elementos de técnicas y tecnologías modernas para la adquisición, procesamiento y extracción de información.

----- *Palabras clave:* oetrografía, análisis digital de imágenes, microscopía, conteo automático

## Abstract

Petrographic analysis require a highly skilled operator and the results obtained can have a high degree of subjectivity. Five hundred data points are assessed for a given sample, this is time consuming and tiring for the analyst. This means that, although petrographic data can give useful information in diferent areas of application, the analytical technique is time-consuming and expensive.

This paper present the development of a methodology based in a systematic approach for the classification of fines particles which integrate elements of moderns techniques and technologies for information acquisition, processing and extract.

----- *Key word:* petrography, digital image analysis, microscopy, automatic counting.

---

\* Departamento de Sistemas y Administración. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. [jwbranch@perseus.unalmed.edu.co](mailto:jwbranch@perseus.unalmed.edu.co).

## 1. Introducción

Este trabajo es el resultado de un proyecto de investigación en el cual se estudió en profundidad una metodología que genera cambios en la innovación de procesos en nuestro medio, con el objetivo de mostrar la esencia de los mismos para:

- Contrastarla con la metodología tradicional empleada para la caracterización de partículas finas utilizando técnicas computacionales.
- Desarrollar nuevos marcos conceptuales que, a partir de un concepto de procesamiento y análisis digital de imágenes, ayuden no sólo a comprender los casos observados empíricamente, sino también a plantear programas de cambio adecuados a cada situación y a diseñar planes de acción para implantarlos.

En todos estos cambios, merece destacarse cómo las tecnologías de la información han generado un aumento incesante de la productividad en el análisis petrográfico desarrollado en nuestro medio. Este aumento es debido, sin duda, a la irrupción de la tecnología, y el impacto más prominente se ha producido en las tareas que requieren procesar información.

Los estudios modernos sobre caracterización de partículas finas le dan relevancia a los conceptos estructurales y texturales, los cuales son de difícil captura debido a lo voluminoso del trabajo y a la imprecisión de los datos por no contar con una conceptualización que consulte las formas reales y las escalas de la naturaleza. De esta manera se inicia el desarrollo de metodologías basadas en un enfoque sistémico para la clasificación de partículas finas, que integran elementos tanto de técnicas como de tecnologías modernas para la captura, el procesamiento y la extracción de información.

## 2. Petrología

Es el estudio de las rocas en todos sus aspectos: mineralogía, texturas y estructuras

(petrografía), sus orígenes (petrogénesis), localizaciones y alteraciones (diagénesis, metamorfismo, etc.), y sus relaciones con otros tipos de rocas.

### 2.1. Caracterización petrográfica

El análisis petrográfico requiere de un operador calificado y los resultados obtenidos contienen un alto grado de subjetividad. Así, para una muestra dada se estiman 500 puntos que consumen tiempo y fatigan al analista, esto significa que aunque los datos petrográficos puedan dar información útil en diferentes áreas de aplicación, la técnica analítica es costosa y consume tiempo. Si se requiere un análisis de múltiples muestras, por ejemplo, para propósitos de control de calidad, el método no es factible.

Eliminar la subjetividad del análisis requiere el cambio del juicio humano, y un procedimiento potencial para esto es el uso de las técnicas de procesamiento digital de imágenes basadas en la captura de las logradadas en muestras de partículas finas, las cuales se caracterizan teniendo en cuenta su brillo, color y forma. Estas características se reconocen, se analizan y se modelan [1].

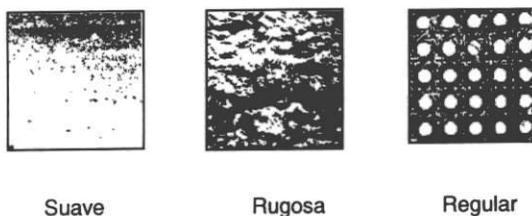
Puede decirse que la microscopía cuantitativa automática se originó en el momento en el que se pudo barrer ópticamente la superficie de la muestra con un campo variable. Sin embargo, el análisis con este instrumento se restringió a un pequeño microscopio de campo estacionario y desde entonces se requirió el registro manual de los datos para cada campo. Un sistema particular de la tercera generación, en los años 70, incorporó un computador IBM 1800 para procesar los datos de campo, que fue capaz de producir resultados precisos, en intervalos cortos de tiempo, lo cual, hasta entonces, había resultado ser muy difícil. La tabla 1, muestra algunos resultados producidos por la compañía Nippon Steel y compara los resultados de sus nuevos sistemas automáticos con los de conteo manual de puntos.

**Tabla 1** Resultados producidos por Nippon Steel al comparar un sistema automático con el conteo manual de puntos

	<i>Análisis manual</i>	<i>Sistema automático</i>
Capacidad de muestras	4/día	10/día
Conteo de puntos	500/ muestra	20.000/ muestra
Variación	20-25%	2,00%
Estatus del operador	Experto	No experto

Para distinguir las diferentes partículas es necesario usar parámetros como: color, forma, brillo, tamaño; ninguno es suficiente por sí mismo para efectuar la caracterización. La microestructura identificada para una partícula dada, por tanto depende del sistema de digitalización (calibración) que se use: resolución espacial (número de píxeles disponibles para la digitalización de un campo) y el número de bits que pueden ser asignados a cada píxel.

La identificación de objetos o regiones en una imagen a menudo se puede realizar, al menos parcialmente, usando descriptores de textura [2]. Aunque no existe una definición formal de textura, se puede ver este descriptor intuitivamente como una medida de propiedades, como la lisura, la regularidad y la rugosidad (véase figura 1). Los dos enfoques principales para la descripción de texturas son el estadístico y el estructural.



**Figura 1** Ejemplos de texturas

Las medidas de la textura calculadas únicamente con histogramas están limitadas por el hecho de que no dan información de la posición relati-

va de los píxeles. Una forma de obtener ese tipo de información en el proceso de análisis de textura es considerar no sólo la distribución de intensidades, sino también la posición de los píxeles con valores de intensidad iguales o parecidos y la medida de los parámetros morfológicos invariantes de la imagen en estudio.

Específicamente, en el estudio de superficies microscópicas se pueden clasificar dos tipos de representaciones de las imágenes, las que tienen que ver con el área y las que tienen que ver con el perfil [3]. La idea de usar una metodología de caracterización sencilla en procedimiento y rápida en tratamiento, permite establecer que el perfil tiene características que lo hacen mucho más manejable.

En las fotografías del perfil es posible extraer con gran facilidad la línea que forma su contorno. Dicho contorno puede ser analizado como una curva fractal. Para ello se contará con un instrumento que permita manejar las imágenes hasta el punto de poder extraer su línea de contorno y finalmente obtener características de su geometría, como lo es la dimensión fractal, mediante técnicas computacionales.

### 3. Percepción visual

El estudio de los mecanismos de procesamiento y representación de la información visual que percibe un ser vivo se encuentra en los orígenes de la ciencia y la filosofía. Desde la época de los clásicos griegos (Platón y Aristóteles) hasta nuestros días se han formulado teorías sobre cómo percibe el ser humano su realidad exterior y de qué manera usa y representa la información captada por sus sentidos. Más cercanos en la historia están los estudios de Kepler sobre el análisis geométrico de la formación de la imagen en el ojo, los de Newton sobre visión en color y, en este siglo, los de Helmholtz (1910) sobre óptica fisiológica y Wertheimer (1912) sobre el movimiento aparente de agrupaciones de puntos o campos. Estos trabajos, entre otros, han establecido las bases de las actuales teorías de percepción visual.

Sin embargo, el primer gran paso se dio a principio de este siglo con la aparición de la escuela de psicología de la Gestalt a partir de los trabajos de Wertheimer. Esta escuela estableció que los criterios de tipo generalista, como similitud, homogeneidad y cercanía, entre otros, eran suficientes para tratar de explicar las propiedades de los mecanismos psicofísicos de la visión humana. Pero esta aproximación con criterios tan globales se perdió años más tarde, al no poder dar respuesta a nuevos interrogantes dentro del proceso de percepción visual.

La reacción que nació, hacia los años 50, del fracaso de las teorías de la Gestalt se orientó hacia la búsqueda de explicaciones al más bajo nivel celular, lo que originó una nueva corriente de ideas y teorías que, con base en las potencialidades de las neuronas como células individuales, trataron de explicar los mecanismos y propiedades de la visión humana; Hubel & Weisel (1962, 1968) y Barlow (1972). Sin embargo, esta aproximación tampoco pudo dar respuesta a los problemas más profundos de cómo nuestro mecanismo visual codifica, representa y reconoce distintos tipos de información espacial.

### 3.1. Génesis y desarrollo del procesamiento y análisis digital de imágenes

A diferencia del estudio de los mecanismos de la visión humana, el procesamiento y análisis de imágenes digitales nace en el momento en que se dispone de recursos tecnológicos para captar y manipular grandes cantidades de información espacial en forma de matrices de valores. Esta distinción ubica el procesamiento y el análisis de imágenes digitales como una tecnología asociada a las ciencias de la computación y, por tanto, cabe pensar de ella como una proyección del término visión artificial dentro del ámbito de la inteligencia artificial.

Históricamente, la primera vez que se hizo uso de las técnicas de imágenes digitales fue en los años veinte, en la transmisión de imágenes de

fotografías periodísticas a través del cable submarino entre Londres y Nueva York (figura 2). Esto supuso que el tiempo entre emisión y recepción de las imágenes pasase de una semana, por barco, a tres horas, por cable. A partir de esto y durante algún tiempo, se desarrollaron las técnicas de codificación y reproducción de las imágenes, logrando pasar en la representación de imágenes de cinco a quince tonos de gris.



**Figura 2** Imagen enviada por cable, y no retocada luego, de los generales Pershing y Foch, transmitida en 1929 desde Londres a Nueva York con un equipo de quince tonos (De McFarlane, 1972)

Pero estos hechos pueden considerarse aislados y apenas en los años 50-60 aparecen las primeras computadoras digitales y la necesidad de disponer de técnicas para la transmisión y el procesamiento de imágenes desde satélite, cuando estas técnicas empiezan a ser desarrolladas en forma sistemática. Cabe citar el empuje dado por el Jet Propulsion Laboratory (EE.UU.) a las técnicas de transmisión, realce y restauración de imágenes, ya que era el centro encargado del procesamiento de las imágenes mandadas por los primeros satélites de la carrera espacial.

Al mismo tiempo, y como consecuencia de los resultados obtenidos sobre las imágenes de satélite, distintas administraciones y organismos llevaron a cabo, a finales de los sesenta y durante los años setenta, grandes proyectos de investigación para el desarrollo de técnicas relativas al estudio de los mecanismos de la visión y al tratamiento y análisis de imágenes digitales. Así,

el National Institute of Health (EE.UU.) dedicó un esfuerzo considerable al estudio de imágenes de rayos X, microscopía óptica y electrónica.

El MIT y la Universidad de Stanford trabajaron durante los años setenta en temas de visión aplicada a robótica, bajo el proyecto Hand-Eye. Otros proyectos que también han influido en el desarrollo de estas técnicas son el PIPS japonés (Pattern-Information Processing System) y el Norteamericano UIS (Understanding Image System). Este último proyecto marca el comienzo del uso de estas técnicas en aplicaciones de tipo militar, lo que ha supuesto, desde entonces, una fuente importante de inversiones para su desarrollo.

Dentro del contexto europeo tan sólo cabe destacar la investigación desarrollada, durante los años setenta, por los profesores G. Matheron y J. Serra de la École National Supérieure des Mines de París (Francia), con base en resultados de la geometría integral y el cálculo de probabilidades para la caracterización y medición de formas. Esta metodología se denomina morfología matemática y ha tenido sus principales áreas de aplicación en los campos de la geología, la biología y la medicina. Referencias obligadas del nivel alcanzado a comienzos de los ochenta por las técnicas de procesamiento y análisis de imágenes digitales son las que se citan en [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

Es a partir de este momento cuando se puede observar el comienzo de cierta especialización y catalogación de las técnicas existentes. Así, aparecen los conceptos de técnicas para el procesamiento de imágenes digitales, como el conjunto de todas aquellas técnicas asociadas a la captura, codificación y representación de las imágenes que no introducen sobre las mismas ningún tipo de interpretación, técnicas para el análisis de imágenes digitales y técnicas de visión por computadora o de visión mediante robot como acepciones que se refieren a aquellas técnicas que tratan de extraer la información presente en la imagen, con el fin último de hacer una interpretación de las escenas representadas por dicha imagen.

Durante los años ochenta las técnicas de análisis de imágenes digitales se desarrollan de forma vertiginosa, como consecuencia de la gran cantidad de aplicaciones que aparecen y la madurez alcanzada en el diseño de arquitecturas de computadoras. Los desarrollos han seguido en gran medida las pautas marcadas por Marr (1982), habiendo sido la línea marcada por el MIT la que más influencia ha tenido. Las mayores contribuciones se han centrado en el desarrollo de algoritmos para la detección de características (bordes, líneas, texturas) que ayudan a definir lo que Marr llamo el esbozo primitivo, así como en el desarrollo de técnicas globales de segmentación de una imagen en regiones. En este último aspecto cabe destacar aquellas aproximaciones que introdujeron la información de contexto en los procesos de clasificación y segmentación [10].

De especial significación han sido también los trabajos que han usado técnicas de representación del conocimiento, para los problemas de interpretación de imágenes, en relación con aplicaciones de ambiente industrial, iniciando una fuerte hibridación entre las técnicas de la inteligencia artificial para la representación del conocimiento y las técnicas de interpretación de escenas a partir de imágenes digitales.

A partir de la segunda mitad de la década de los 80 se inicia un creciente interés hacia el desarrollo de nuevas teorías y algoritmos para la interpretación de la imagen en dos dimensiones (2D) como proyecciones de escenas 3D. En particular, cabe mencionar los problemas asociados a la reconstrucción de escenas a partir de distintas proyecciones, el estudio del flujo óptico y sus múltiples aplicaciones a la caracterización de superficies 3D, la caracterización de superficies a partir del estudio del movimiento, el estudio de las formas a partir de las sombras, las técnicas de representación y búsqueda de objetos y el estudio de la orientación a partir de texturas.

Este interés por el estudio de problemas de mayor complejidad ha ido paralelo al desarrollo de

nuevas generaciones de computadoras que a precio asequible permiten la experimentación con imágenes cada vez más complejas en su interpretación.

De forma paralela, en el tiempo, al desarrollo de las técnicas y métodos matemáticos hasta ahora expuestos, se han venido desarrollando diferentes arquitecturas de computadoras específicas para el procesamiento de datos de imágenes digitales.

El concepto de arquitectura paralela SIMD (Single Instruction Multiple Data) ha sido, sin lugar a duda, la más usada en este tipo de aplicaciones. Los conceptos de procesadores con pipeline y procesadores vectoriales han sido también de amplio uso. Aunque en sus comienzos estas arquitecturas específicas fueron caras y con poco soporte de *software* básico, en la actualidad pueden considerarse como opciones razonables en los sistemas de procesamiento de imágenes. En cualquier caso, cabe destacar que el rápido aumento de las prestaciones en las computadoras de tipo estándar, ha desechado el uso de este tipo de arquitecturas en muchas aplicaciones de tipo rutinario.

### **3.2. Microscopía**

La microscopía frecuentemente se usa como un método absoluto de análisis de tamaño de partícula, puesto que es el único método por el que se observan y miden partículas individuales. La imagen de una partícula vista en un microscopio es bidimensional y de esta imagen se puede hacer una estimación del tamaño de la partícula. Todos los métodos de microscopía se llevan a cabo, básicamente, para muestras de laboratorio extremadamente pequeñas, es por esto que el análisis manual al microscopio es tedioso y expuesto a error. Se han desarrollado sistemas semiautomáticos y automáticos que aceleran el análisis y reducen el tedio de los métodos manuales.

El desarrollo del análisis cualitativo de imágenes ha hecho posible la clasificación rápida, al

usar pequeñas muestras de laboratorio. Los analizadores de imagen aceptan muestras de una gran variedad de formas: fotografías, micrografía electrónica e imagen en tiempo real. Esta técnica utiliza los avances recientes en computadoras e instrumentos ópticos.

Su aplicación se basa en el análisis de resultados para el modelo físico, normalmente representado por fotografías en blanco y negro directamente tomadas para el modelo evaluado. El lenguaje procesado de la imagen analizada es poderosa y flexible, y permite un amplio rango de procesamiento y técnicas de clasificación de datos para ser aplicadas a la imagen.

El uso de las técnicas de análisis de imágenes digitales ha mostrado ser una promisoría aplicación en la interpretación de resultados de modelos y cuantitativamente suministra información útil sobre las características que son objeto de estudio. En particular, ésta permite hacer una comparación cuantitativa entre modelos diferentes.

La versatilidad de la técnica, encuentra respuesta en la fundamentación matemática con la que fue creada. Todo el análisis de Fourier (series, descriptores, entre otros) son la base del desarrollo y la aplicación de análisis de imágenes digitales en el tema objeto de estudio en esta investigación; por ejemplo, la forma de las partículas es una propiedad importante en el comportamiento de los objetos. Por esta razón es necesario tener una medida objetiva y cuantitativa de la forma de una partícula de modo que los cambios y diferencias entre formas puedan ser identificadas.

### **4. Descripción de la metodología**

La modularidad de la metodología desarrollada en esta investigación aumenta la capacidad natural de seguir razonablemente la evolución de ésta en una forma relativamente sencilla; dividiendo las operaciones internas y las tareas de los programas en componentes más pequeños y más fácilmente manejables, que típicamente son repetitivos y de naturaleza compleja.

Desde el punto de vista de la dirección del proyecto y de la implementación funcional, la modularidad aplicada al entorno de la metodología total ofrece a ésta un grado de autonomía que le permite ser ajustado o modificado por segmentos. Algunas ventajas principales de gestión son:

- Implementación más rápida de la metodología con presentación reducida, permitiendo una filosofía de control de datos de procesos objetivos; además, ofrece la oportunidad de facilitar, a los futuros usuarios, cambios en su entorno de trabajo.
- Al ser gradual la metodología, el usuario tiene la oportunidad de familiarizarse con esta nueva influencia en su entorno, antes de que comience la alteración drástica de su rutina de trabajo; es importante que la metodología no entre en servicio hasta que pueda ser presentada al usuario y utilizada por éste.
- Permite la formación tanto de usuarios como del personal de sistemas. La pronta operación y pruebas de seguridad ofrecen la oportunidad de realizar correcciones sobre la marcha técnica y metodológica, con capacidad de reducir las consecuencias catastróficas y de esfuerzo.
- Una vez encontrados los objetivos convergentes en el proceso, se ha considerado estratégico presentar los diferentes subsistemas de la metodología en su evolución temporal, lo que garantiza la automatización sistémica del problema en estudio.

El estudio desarrollado en esta investigación para la caracterización de partículas finas presenta el mínimo número de pasos interactivos y manuales, lo cual se soporta en que:

- El tiempo de ejecución está entre 15 y 20 minutos por filtro, incluyendo procedimientos de calibración.
- El número de campos analizados por muestra son cinco (5), alcanzando de esta manera resultados con una correlación significativa.
- Se basa en datos específicos de tipo morfológico.

- El objetivo empleado en todas las observaciones es el mismo para todas (20 aumentos, (A x 10), alcanzando una magnificación del área hasta 200 veces).

#### 4.1. Plataforma del sistema requerido

El entorno de los sistemas de análisis de imágenes digitales debe estar centrado en el bajo costo de implementación y rapidez de los procesos. Para diseñar la metodología propuesta en esta investigación se tuvo en cuenta la plataforma que se muestra en la figura 3.

Todo el sistema descansa sobre un *hardware* de análisis de imágenes digitales LEICA Q500, ya que es necesario adquirir imágenes en tiempo real para el análisis de una muestra.

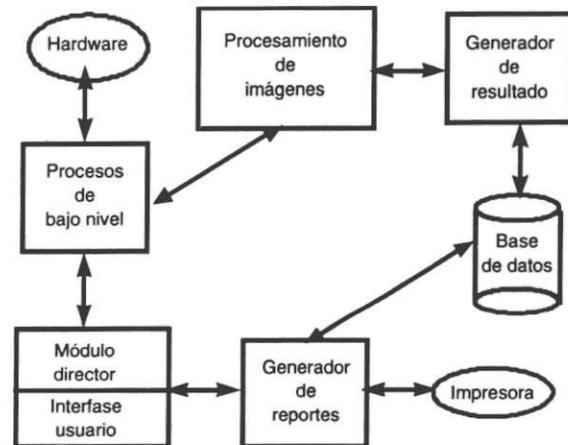


Figura 3 Plataforma del sistema

La metodología está estructurada para usarse en la caracterización de texturas de partículas finas, con extensión a otras aplicaciones como estructuras de hormigón y aceros, llevar a cabo su implantación teniendo en cuenta la utilización de la infraestructura ya existente y simplemente, hacer un acople de ésta con los dispositivos nuevos requeridos para la ejecución de la metodología.

Para el manejo y control de *hardware* de imágenes se debe utilizar una librería de funciones de bajo nivel, la cual permitirá realizar una comunicación entre la programación para desarrollar y el manejo operativo de la tarjeta de procesamiento digital de imágenes con miras a llevar a cabo la adquisición de las muestras por estudiar. En el siguiente nivel se encuentra el conjunto de operaciones para desarrollar tales como las correspondientes al análisis digital de imágenes y la morfología matemática.

#### 4.2. Subsistemas de la metodología

El enfoque propuesto en esta investigación consta principalmente de las siguientes etapas: la calibración, la captura, el mejoramiento de la imagen de entrada, la segmentación y la medición (véase figura 4).

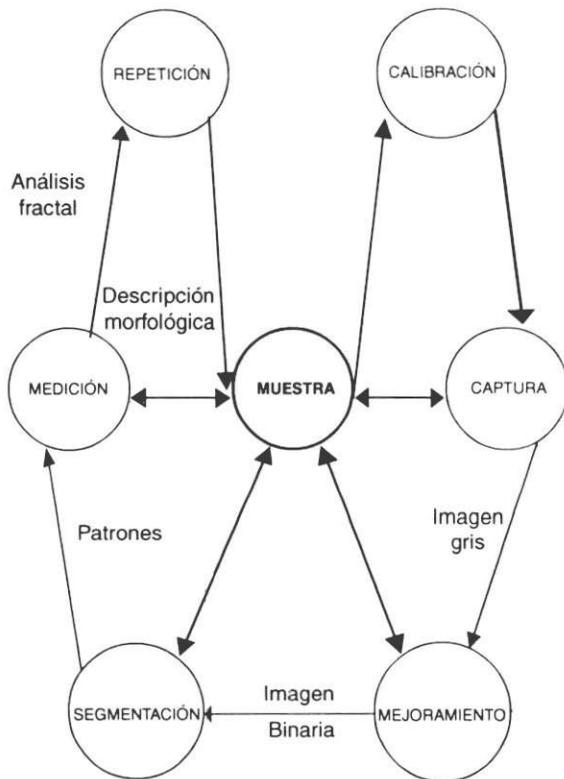


Figura 4 Diagrama funcional de la metodología.

##### 4.2.1. Calibración (C)

Los procedimientos de calibración incluyen la asignación de la identificación, la definición de

un modelo de búsqueda para la etapa de escaneo y la calibración interactiva de la función de contraste, sin embargo, la etapa de calibración más importante es establecer la fuente de luz blanca y los controles de la cámara de video para la configuración estándar, esto se hace de una manera tal que el centro del campo de observación tenga un valor de gris relativamente fijo al inicio de cada análisis, el campo de observación también se emplea para crear imágenes sombreadas de referencia para la correlación de todas las imágenes subsiguientes para efectos de iluminación desigual derivado del sistema óptico, lo cual es esencial para formalizar la segmentación automatizada. Procedimientos llevados a cabo una vez por muestra.

##### 4.2.2 Captura de imágenes de luz blanca reflejada (C.I.L.B.R.)

La imagen de luz blanca se captura y luego se almacena con una función de entrada, convertida a imagen binaria, y se determina el porcentaje relativo de objetos en el campo. Si este porcentaje es demasiado bajo, o alrededor del 30%, para hacer que valga la pena realizar un procedimiento (lo cual puede causar falla del contraste o segmentación imperfecta), la etapa está preparada para proceder a determinar la próxima posición por el patrón de búsqueda. Si el porcentaje de objetos está dentro de los límites aceptables, se ejecuta el contraste y la imagen se toma de nuevo, pero esta vez usando una función de reducción de ruido, que simultáneamente, promedia diez veces la imagen por multiplicación y división.

##### 4.2.3 Mejoramiento de la imagen de luz blanca (M.I.L.B.)

La imagen se corrige por sombras para remover algunos efectos de iluminación desigual. Los niveles de gris dentro de la imagen son re-escalados hasta que todos los píxeles del fondo están ajustados a un nivel de gris 255 (blanco perfecto), mientras que aquellos de los objetos permanecen inalterados. Se debe ajustar el umbral, inicialmente de manera interactiva, y, posteriormente, los mejores resultados se obtienen

mediante un tono fino periódico. El procedimiento incrementa el contraste entre los objetos y el fondo, y así se mejora significativamente la discriminación entre los objetos más reflectantes y el borde de las partículas, la cual de otra manera tendería a perderse o a modificarse.

4.2.4 Segmentación de la imagen de luz blanca (S.I.L.B.)

Se realiza un preajuste del nivel del umbral, lo cual permite la segmentación de todos los objetos a partir del fondo; esto se hace por discriminación dinámica (es decir, separación de los

objetos del fondo local usando una ventana móvil de tamaño especificado). El resultado es una imagen binaria (en la cual los pixeles del objeto son ajustados a 0 y los pixeles del fondo a 255).

4.2.5 Medición (M)

La parte más difícil y crítica de la visión artificial la constituye el sistema de procesado. Se requiere una computadora de velocidad y capacidad de proceso altas, para tratar una información muy grande en tiempos muy pequeños, ya que las imágenes hay que procesarlas en tiempo real; esto implica sistemas muy depurados y computadoras muy rápidas.

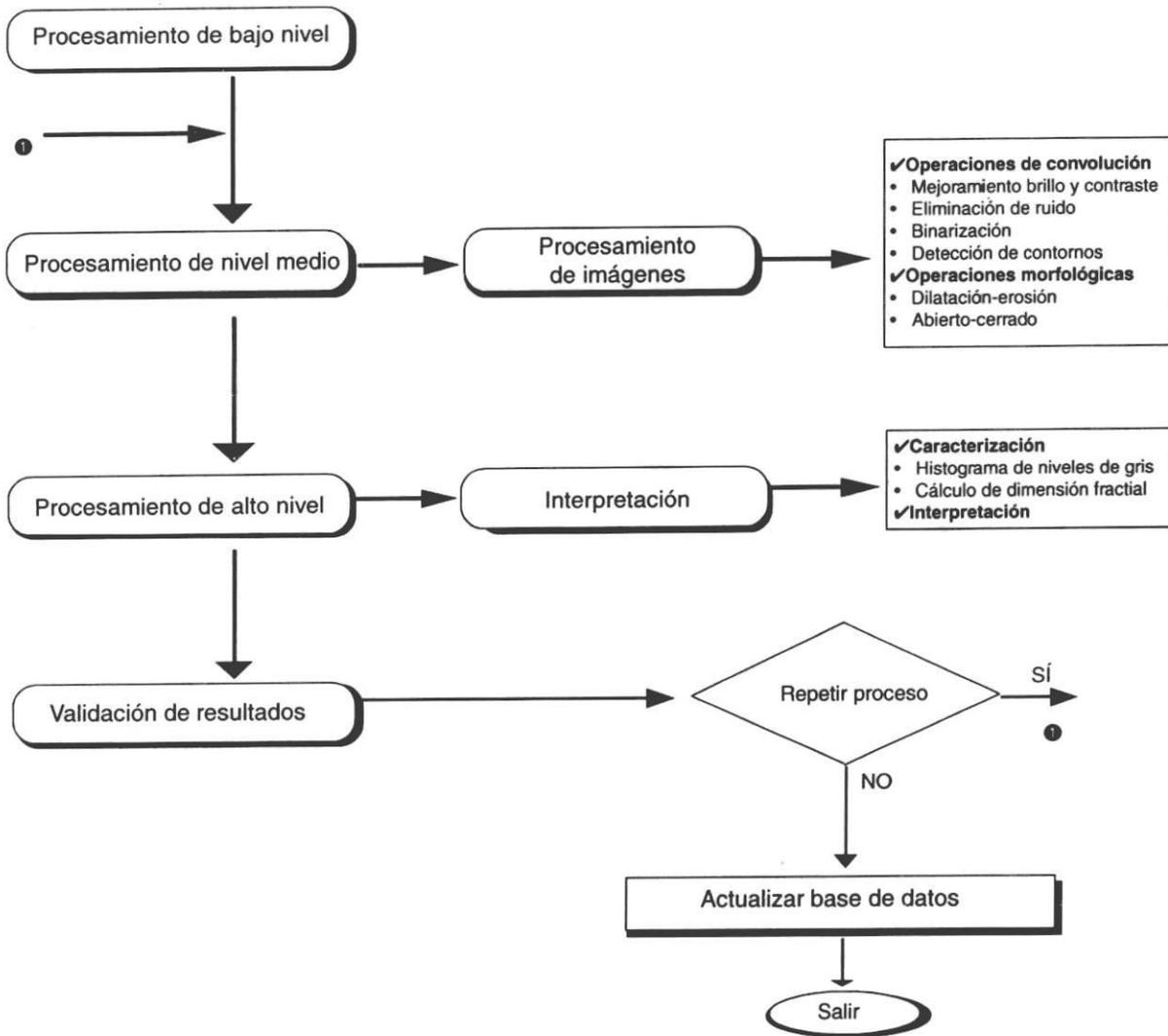


Figura 5 Operaciones básicas de medición en la metodología



Existen ciertos procesos que han sido probados y bajo condiciones especiales su rendimiento es bastante aceptable; lo cual es base para el presente diseño. Las operaciones básicas (figuras 5 y 6) que se deben realizar en la aplicación de la metodología son:

- La obtención de las imágenes para procesar.
- La digitalización de la imagen obtenida.
- El almacenamiento de la imagen.
- La binarización de la imagen para facilitar el proceso de los datos de la imagen.
- El reconocimiento de contornos para determinar los objetivos de la muestra.
- El cálculo de la longitud y del área del objeto para establecer su tamaño.
- La clasificación y análisis estadístico de distribuciones de frecuencia de tamaño.
- Las rutinas de calibración en tiempo real y previo del sistema.
- La interconexión con otros programas.
- El reporte de los resultados obtenidos.

#### 4.2.6 Repetición del procedimiento (R.P.)

Sigue el almacenamiento de los datos en el buffer (memoria), el movimiento automático en la etapa de escaneo para el nuevo campo de visión y una función enlace (macro) inmediatamente lleva al subsistema C.I.L.B.R., siguiendo la secuencia predeterminada de ejecuciones del ciclo de medición (cada uno toma aproximadamente 2 min en el modo de operación automático). Los datos se transfieren del buffer al disco duro interno para la evaluación estadística y el análisis fractal.

## 5. Conclusiones

Las ventajas que se obtienen con sistemas interactivos generadores de la componente metodológica, son evidentes frente al uso de técnicas computacionales individuales, lo que plantea la necesidad de mucha más exploración de alternativas con alta sinergia, pero siempre apoyadas en un conocimiento cada vez mejor de las técnicas individuales.

La eficacia en la metodología recae en mantener módulos estándares de entrada en la información, para garantizar que el análisis y procesamiento digital de imágenes, la morfología matemática y la geometría fractal, sean instrumentos que operen bajo entes sensibles a su estado estructural.

La metodología propuesta reúne las características de un enfoque sistémico, ya que se integran una serie de herramientas que permiten proponer una nueva manera de clasificar partículas finas a partir de parámetros morfológicos.

- La metodología propuesta reúne las características de un enfoque sistémico, ya que se integran una serie de herramientas que permiten proponer una nueva manera de clasificar partículas finas a partir de parámetros morfológicos.
- Los resultados de este trabajo indican que la metodología propuesta es competitiva con respecto a las convencionales y puede ser considerada como un método útil en el análisis petrográfico de partículas finas, por la eliminación de la subjetividad y por su confiabilidad en la teoría de medida, debido a que permite el acercamiento a una realidad física del objeto en estudio.
- El sistema CAM (microscopía asistida por computadora) comparado con el método manual, permite llevar a cabo las mediciones de una forma rápida y con un grado de precisión superior al obtenido por medio de una inspección visual.
- La metodología implementada ayuda al experto en petrografía a realizar análisis de muestras con gran precisión (por pixel) y a gran velocidad (un promedio de quince a veinte minutos por cada campo que se observe de una muestra). Además, mejora los procesos relacionados con el análisis, entre ellos la evaluación de medidas, el cálculo de parámetros estadísticos y la generación de reportes, reduciendo en gran parte la subjetividad que implica algunos de ellos.

## 6. Referencias

1. Branch, J. W., "Caracterización de minerales empleando técnicas algorítmicas de análisis de imagen y geometría fractal", *CLEI 98, XXIV Memorias Conferencia Latinoamericana de Informática*, Quito-Ecuador, 1998, pp. 723-735.
2. Rao, A. R. and Schunck, B., "Computing oriented texture fields", *Graphical model and image processing*, Vol. 53 No. 2, pp. 157-185.
3. Reimel, J. C., *Image processing and optical character recognition*, Ed. Springer, Dusseldorf, 1998.
4. Castleman, K. R., *Digital Image Processing*. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, 1979.
5. Duda, R. and Hart P., *Pattern Classification and Scene Analysis*, Wiley-Interscience, New York, 1973.
6. Fu, K. S., *Syntactic Pattern Recognition and Applications*. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, 1982.
7. González, R. C., Wintz P., *Digital Image Processing*. Addison-Wesley, Mass. 1979.
8. Herman G., *Image Reconstruction from Projections*. Academic Press, New York, 1980.
9. Marr D., "*Vision - A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*", Freeman, 1982.
10. Rosenfeld, A. and Davis L., "*Image Segmentation and Image Analysis*", *Proceedings of the IEEE*, vol. 67 No. 5, 1979, pp.764-772.
11. Serra, J., *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, Inc, New York, 1982.
12. Rosenfeld, A., Kak A. C., *Digital Picture Processing, (V.I y II)*. Academic Press, New York, 1982.