



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias de la Computación.

Procesamiento de Imágenes de SiC obtenidas mediante AFM

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACION

PRESENTA:
Andrea Alejandra Ramírez García.

ASESOR:
Dra. Araceli Ramírez Solís.

COASESOR:
Dr. Pedro García Juárez.

Puebla, Pue.

MARZO 2008.

Contenido

Agradecimientos.....	3
Introducción.....	4
Capítulo 1 Microscopia de Fuerza Atómica.....	6
1.1 Introducción.....	6
1.2 Microscopio de Fuerza Atómica.....	6
1.2.1 Piezoelectricidad.....	7
1.2.2 Actuador Piezoeléctrico.....	7
1.3 Principio de Operación del AFM.....	8
1.3.1 Fuerza de Van der Waals.....	9
1.3.2 Cantiléver.....	10
1.4 Modos de Operación del AFM.....	11
1.5 Imágenes del AFM.....	13
1.5.1 Topografía.....	14
1.5.2 Fuerza.....	15
Capítulo 2 Teoría del Procesamiento de Imágenes.....	18
2.1 Introducción.....	18
2.2 Digitalización de una imagen.....	18
2.2.1 Adquisición de la imagen.....	19
2.2.2 Procesamiento de la Imagen.....	21
2.2.3 Percepción de la imagen.....	22
2.2.4 Conceptos fundamentales del procesamiento de imágenes.....	28
2.2.5 Fuentes de la distorsión de la imagen.....	33
2.2.6 Pérdida de información.....	36
2.3 Técnicas de Procesamiento básicas de imágenes.....	38
2.3.1 Transformación monadica de un punto.....	40
2.3.2 Transformaciones diádicas en dos puntos.....	44
Capítulo 3 Imágenes obtenidas del AFM.....	49
3.1 Introducción.....	49
3.2 Imágenes de la muestra.....	49
3.2.1 Imagen de Fuerza en plano.....	49
3.2.2 Imagen de Fuerza en 3D.....	51
3.3 Imagen de Topografía.....	52
3.3.1 Imagen de Topografía en plano.....	52
3.3.2 Imagen de Topografía en 3D.....	54
Capítulo 4 Programa Generado en Matlab.....	56
4.1 Introducción.....	56
4.2 Diseño del programa.....	56
4.3 Diagramas del programa.....	56
4.3.1 Diagrama General.....	56
4.4 Pantallas del software.....	61
4.5 Operación del software.....	65
Resultados.....	66

Conclusiones.....	72
Bibliografía	74
ANEXO A	77

Agradecimientos

A Dios primeramente ya que tú me creaste como soy, y me has dado más de lo que pudiera pedir, gracias por tu misericordia y tu gracia en mi vida.

A mi esposo, Gracias Ale por tu apoyo, en serio aunque no parezca si te hago caso.

A Rebekah, gracias por venir a revolucionar mi mundo.

A mis padres, a mi mama por darme la vida, y a mi papa por infectarme en mi pubertad.

A mi Asesora y Coasesor por apoyarme para cerrar este circulo de mi vida gracias.

Al Dr. Alfred Zehe director del Laboratorio de Nanotrónica de la Facultad de Ciencias de la Electrónica por permitir la realización de este trabajo.

Introducción

Actualmente la investigación en el área de los semiconductores, tiene el enfoque de estudiar las características físicas de éstos, ya que se busca el maximizar la funcionalidad de los mismos.

El estudio de los semiconductores es complejo, y es un área de investigación multidisciplinaria, donde intervienen áreas como la física, química, y computación, entre otras. Cada una de ellas esta inmersa en un proceso del estudio de los semiconductores, en particular la química o física son las encargadas del tratamiento de los materiales utilizados, así como las condiciones de laboratorio bajo las cuales, se obtienen las mejores cualidades del material. Por otro lado el área de computación es la encargada de proporcionar software con carácter específico, de acuerdo a las necesidades del estudio que se esté realizando.

Este trabajo está enfocado al estudio del Carburo de Silicio (SiC), el cuál es uno de los componentes principales en la fabricación de los polímeros semiconductores. Los Polímeros semiconductores, son plásticos diseñados con características propias de un semiconductor normal, los primeros polímeros semiconductores no tienen más de 10 años de estarse utilizado, dentro del desarrollo de Displays [7,8].

Otro desarrollo actual de los polímeros semiconductores, es la construcción de leds, debido a que éstos tienen la capacidad de emitir luz en un cierto rango, el cuál se puede modificar de acuerdo a las necesidades de luminiscencia requeridas, así como la creación de dispositivos con mayor duración de vida útil, debido a que no presentan corrosión o un desgaste muy grande [9,10,11].

La Microscopia de Fuerza Atómica (AFM), es una herramienta poderosa que permite el estudio de diversos tipos de materiales como: líquidos o sólidos, orgánicos e inorgánicos, a un nivel atómico y molecular, lo cuál nos permite estudiar a fondo la composición de dichos materiales y sus propiedades físicas y/o químicas según se requiera. En este trabajo la AFM se ha empleado, para la obtención de imágenes que nos muestra la estructura, y la superficie del SiC, así como información de conducción del mismo.

Ante la necesidad de obtener imágenes de mayor calidad, para el estudio de las características físicas de un polímero. Se planteó como objetivo principal dentro de mi área de especialización, la creación de un software que permita el procesamiento de las imágenes obtenidas mediante el AFM (Microscopio de Fuerza Atómica), y que cumpliera con resaltar las cualidades físicas de la imagen.

Este documento se encuentra dividido en cuatro capítulos. A continuación describiremos brevemente cada uno de ellos.

En el capítulo 1, se explica el funcionamiento del Microscopio de Fuerza Atómica (AFM), el modo de operación bajo el cuál se obtuvieron las imágenes que se procesaron, así como los tipos de imágenes que se obtienen. En el capítulo 2, se describen los conceptos fundamentales de la digitalización de una imagen, los operadores que se implementaron en el software, así como algunos problemas que se presentan al momento de procesar la imagen. El capítulo 3, trata sobre la información que nos proporcionan las imágenes obtenidas del AFM, así como las diferencias entre ellas. En el capítulo 4, se menciona la estructura del programa generado para el procesamiento de las imágenes obtenidas del AFM, así como una breve descripción del funcionamiento del mismo. En la parte de Resultados se presentan las imágenes ya procesadas por medio del software, así como la comparación entre las imágenes originales y procesadas. Y por último se presenta un conjunto de conclusiones y posibles aportaciones futuras al trabajo.

Capítulo 1 Microscopia de Fuerza Atómica

1.1 Introducción.

En este capítulo estudiaremos un poco la evolución del microscopio ocular, hasta la creación del Microscopio de Fuerza Atómica (AFM), así como su funcionamiento y modos de operación, esto con la finalidad de dejar claro la importancia del estudio de los polímeros con esta técnica.

1.2 Microscopio de Fuerza Atómica

El microscopio de fuerza atómica fue inventado en 1986. Su concepción deriva de su antecesor inmediato, el microscopio de tunelaje, inventado en 1982. Estos dos tipos de microscopio abrieron un nuevo campo en la investigación sobre la estructura de la materia, al posibilitar el análisis a resoluciones del orden de los nanómetros o ángstrom trabajando a presión ambiental. Sin duda, este tipo de instrumentos han coadyuvado al fortalecimiento de las nanociencias, tanto en el área de materiales como más recientemente, en el área de las ciencias biológicas.



Fig. 1.1 Microscopio de Fuerza atómica

Desde su aparición en los 80's, el Microscopio de Fuerza Atómica (AFM), ha sido un equipo importante para la elucidación de la microestructura de materiales. Basado en la interacción local entre la punta y la superficie de una muestra,

proporciona imágenes tridimensionales de superficies con alta resolución espacial en tiempo real. Debido a esto, el AFM es utilizado en la Caracterización de materiales para determinar sus propiedades físicas.

A continuación revisaremos el concepto de Piezoelectricidad para entender como funciona el Sensor Piezoeléctrico que contiene el AFM

1.2.1 Piezoelectricidad

La piezoelectricidad (del griego piezein, "estrujar o apretar") es un fenómeno presentado por determinados cristales que al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica en su masa, apareciendo una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie. Este fenómeno también se presenta a la inversa, esto es, se deforman bajo la acción de fuerzas internas al ser sometidos a un campo eléctrico. El efecto piezoeléctrico es normalmente reversible: al dejar de someter los cristales a un voltaje exterior o campo eléctrico, recuperan su forma.

Los materiales piezoeléctricos son cristales naturales o sintéticos que no poseen centro de simetría. El efecto de una compresión o de un cizallamiento consiste en disociar los centros de gravedad de las cargas positivas y de las cargas negativas. Aparecen de este modo dipolos elementales en la masa y, por influencia, cargas de signo opuesto en las superficies enfrentadas.

Pueden distinguirse dos grupos de materiales: los que poseen carácter piezoeléctrico de forma natural (cuarzo, turmalina) y los llamados ferroeléctricos, que presentan propiedades piezoeléctricas tras ser sometidos a una polarización (tantalio de litio, nitrato de litio, bernilita en forma de materiales monocristalinos y cerámicas o polímeros polares bajo forma de microcristales orientados).

1.2.2 Actuador Piezoeléctrico

Un actuador piezoeléctrico es un dispositivo que produce movimiento (Desplazamiento) aprovechando el fenómeno físico de la piezoelectricidad. Los actuadores que utilizan este efecto están disponibles desde hace 20 años y han cambiado el mundo del posicionamiento de precisión. El movimiento preciso que resulta cuando un campo eléctrico es aplicado al material, es de gran valor para el nanoposicionamiento

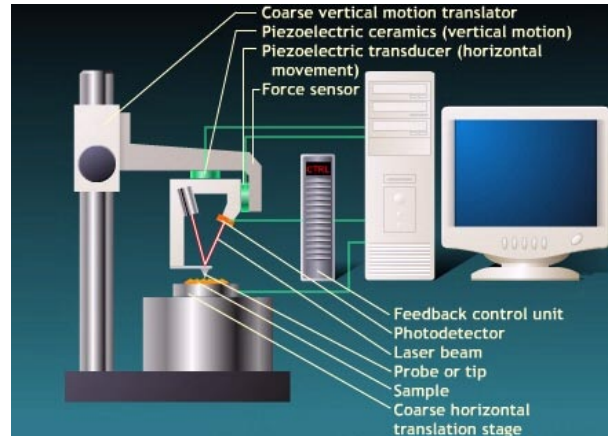


Fig. 1.2 Módulos de Operación del AFM

1.3 Principio de Operación del AFM.

El Microscopio de Fuerza Atómica monitorea la superficie de la muestra con una punta de radio de curvatura de 20 a 60 nm que se localiza al final de un cantiléver. Las fuerzas entre la punta y la muestra provocan la deflexión del cantiléver, simultáneamente un detector mide esta deflexión a medida que la punta se desplaza sobre la superficie de la muestra generando una micrografía de la superficie. La fuerza interatómica que contribuye a la deflexión del cantiléver es la fuerza de Van der Waals.

La fuerza atómica se puede detectar cuando la punta está muy próxima a la superficie de la muestra.

Es posible registrar la pequeña flexión del listón mediante un haz láser reflejado en su parte posterior. Un sistema auxiliar piezoeléctrico desplaza la muestra tridimensionalmente, mientras que la punta recorre ordenadamente la superficie

Cuando hablamos de ver la superficie de un material a escala nanométrica o bien en el plano molecular ya no podemos hablar de una física y mecánica clásica tal cuál se conoce en el mundo macroscópico. Actúan fuerzas y efectos distintos que debemos conocer para entender el principio de operación del microscopio.

Una de estas fuerzas que actúa a escala molecular es la fuerza de Van der Waals de la cual hablaremos en un momento.

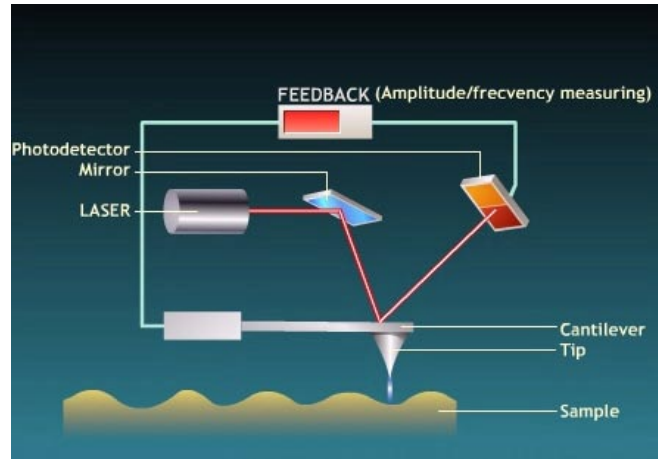


Fig. 1.3 Principio de Operación del AFM

1.3.1 Fuerza de Van der Waals

Atracción generada entre átomos cuando existe una nube compartida de electrones libres que circula de uno a otro redundando en una unión que aunque débil y transitoria los mantiene ligados.

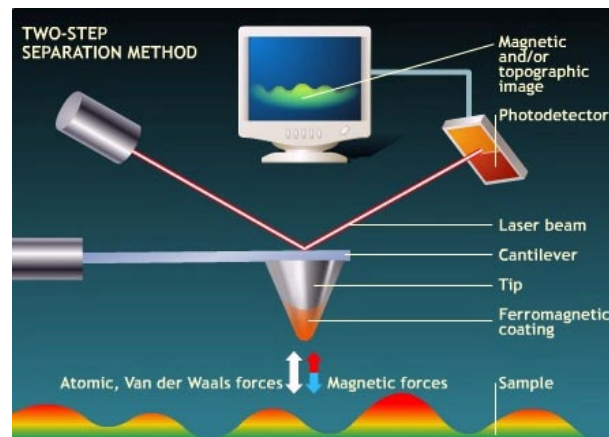


Fig. 1.4 Esquema de Interacción de las fuerzas de Van der Waals

1.3.2 Cantiléver

Históricamente los primeros cantilevers tenían un tamaño de varios milímetros y solían fabricarse con metal, por ejemplo a partir de un hilo de tungsteno con un extremo afilado y doblado en ángulo recto para producir la punta. Más tarde se hizo necesario, para mejorar la velocidad de barrido sin perder resolución, que los cantilevers tuvieran masas cada vez menores y simultáneamente frecuencias de resonancia mayores. La solución a este problema se halló en la microfabricación de los cantilevers. Los cantilevers se producen en la actualidad empleando métodos de microfabricación heredados inicialmente de la industria microelectrónica como litografía de superficie y grabados reactivos de plasma de iones (RIE y DRIE siglas en inglés de Reactive Ion Etching y Deep Reactive Ion Etching). Las puntas suelen fabricarse a partir de deposiciones de vapor de algún material idóneo sobre el cantiléver la palanca ya fabricada, en cuyo caso el resultado suele ser una punta cónica o más comúnmente cuando el silicio es el material de elección recurriendo a técnicas de grabado anisotrópico. El grabado anisotrópico involucra el uso de una solución grabadora que excava el material sólo o preferentemente en ciertas direcciones cristalográficas. De esta manera es posible producir puntas piramidales limitadas por planos cristalográficos del material.

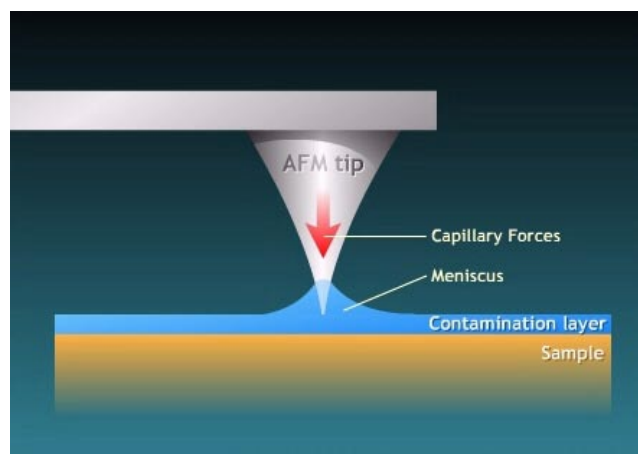


Fig.1.5 Imagen del cantiléver

El microscopio de AFM puede realizar dos tipos de medidas: imagen y fuerza. En el modo de imagen la superficie es barrida en el plano de la superficie (X-Y) por la punta. Durante el barrido la fuerza interatómica entre los átomos de la punta y los átomos en la superficie muestral provoca una flexión del cantiléver. Esta flexión es registrada por un sensor adecuado (normalmente balanza óptica) y la señal obtenida se introduce en un circuito o lazo de realimentación. Este último controla un actuador piezoeléctrico que determina la altura (Z) de la punta sobre la muestra de forma que la flexión del cantiléver se mantenga a un nivel constante (Normalmente introducido por el operador).

Representando la altura de la punta (Z) frente a su posición sobre la muestra (X,Y) es posible trazar un mapa topográfico de la muestra $Z=Z(X,Y)$. La fuerza interatómica se puede detectar cuando la punta está muy próxima a la superficie de la muestra. En medidas de fuerza la punta se hace oscilar verticalmente mientras se registra la flexión del cantiléver. La medida se expresa entonces representando fuerza (F) frente a altura (Z) sobre la muestra. Las medidas de fuerza son útiles en estudios de fuerzas de adhesión y permiten estudiar a nivel de una sola molécula interacciones específicas entre moléculas (Ej.: interacción antígeno-anticuerpo, interacción entre hebras complementarias de ADN) o interacciones estructurales de las biomoléculas (plegado de proteínas) así como caracterizar la elasticidad de polímeros. También es útil en estudios de indentación de materiales blandos (polímeros) que permitan caracterizar propiedades elásticas de la muestra como el módulo de elasticidad o viscoelásticas.

1.4 Modos de Operación del AFM

El Microscopio de Fuerza Atómica utiliza múltiples modos de operación de acuerdo a las características físicas de la muestra y de las propiedades a medir.

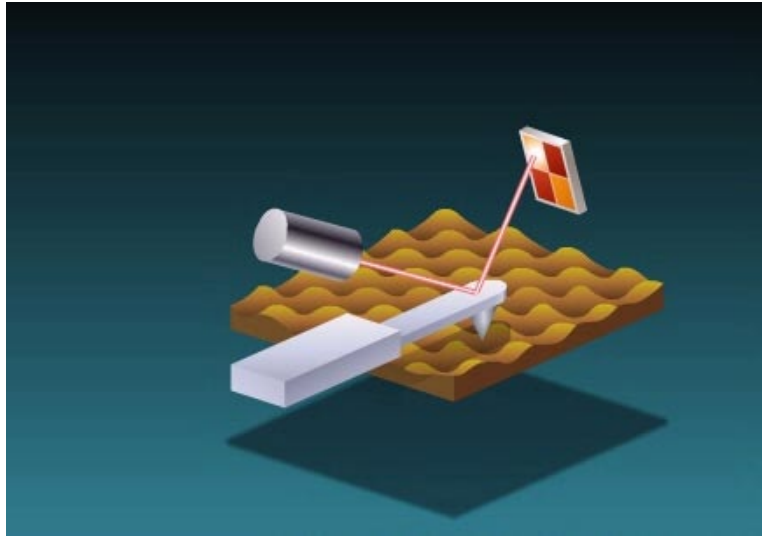


Fig. 1.6 Modo de operación del cantiléver sobre la superficie

Contacto: Mide la topografía de la muestra deslizando la punta sobre su superficie.

Tapping: También llamado contacto intermitente, mide la topografía de la muestra tocando intermitentemente su superficie.

Imagen de Fase: Proporciona una imagen contrastada generada por las diferencias de adhesión en la superficie de la muestra.

No Contacto: Mide la topografía de acuerdo a las fuerzas de Van der Waals que existen entre la superficie de la muestra y la punta.

Fuerza Magnética: Mide el gradiente de fuerza magnética sobre la superficie de la muestra.

Fuerza Eléctrica: Mide el gradiente de fuerza eléctrica sobre la superficie de la muestra.

Potencial de Superficie: Mide el gradiente de campo eléctrico sobre la superficie de muestra

Modo Lift: Técnica que utiliza dos modos de operación usando la información topográfica para mantener la punta a una altura constante sobre la superficie.

Modulación de Fuerza: Mide la elasticidad/suavidad relativa de la superficie de la muestra.

Fuerza Lateral: Mide la fuerza de fricción entre la punta y la superficie de las muestras.

Microscopía de Tunelamiento: Mide la topografía de superficie de la muestra utilizando la corriente de tunelamiento.

Microscopía Electroquímica: Mide la estructura de la superficie y las propiedades de los materiales conductores inmersos en soluciones electrolíticas.

Litografía: Se emplea una punta especial para grabar información sobre la superficie de muestra.

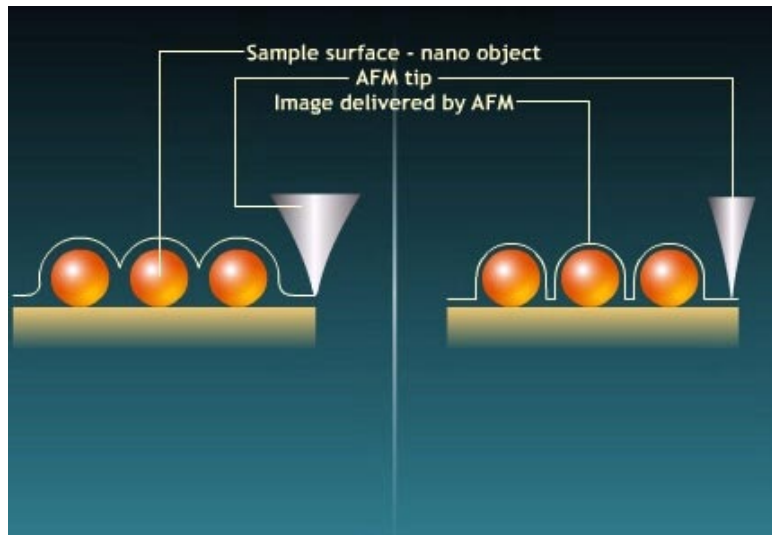


Fig. 1.7 Izq. Muestra del modo de operación de contacto, Der. Muestra del modo de operación por modo no contacto

1.5 Imágenes del AFM

En el microscopio de Fuerza Atómica se obtienen 2 tipos de imágenes, estas son las imágenes de Fuerza y de Topografía. Las imágenes se pueden tener en plano y en 3D dependiendo del análisis que se requiera hacer sobre la muestra.

1.5.1 Topografía

Las imágenes de Topografía, nos muestra una resolución natural de 50 nm, y pueden censar la superficie de la muestra e indicarnos valiosa información por ver la rugosidad de la muestra así como los picos y valles que pueda tener.

A continuación se muestran algunos ejemplos de imágenes de topografía obtenidas en el Microscopio de Fuerza Atómica, sobre una muestra de Diseleniuro de Cobre e Indio (CuInSe_2), Con condiciones iniciales de barrido:

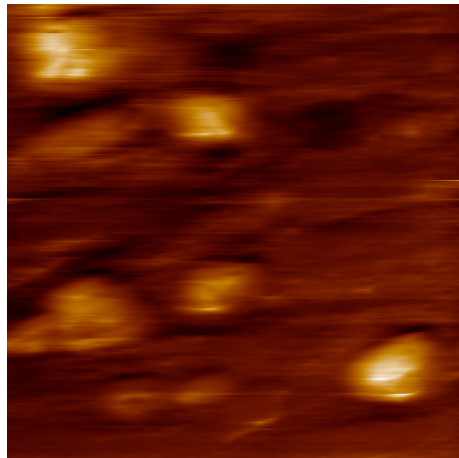


Fig. 1.8 Imagen 1 de topografía de CuInSe_2

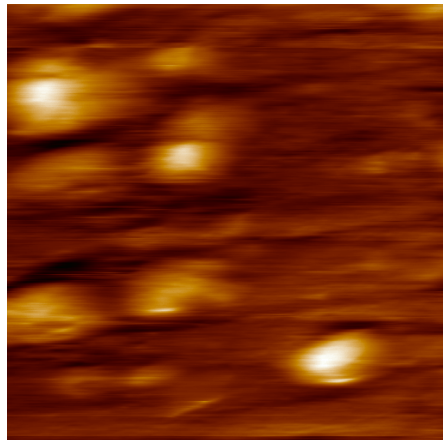


Fig.1.9 Imagen 2 de topografía de CuInSe_2

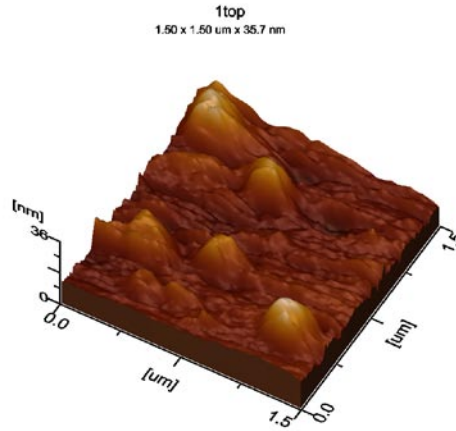


Fig. 1.10 Imagen 1 de topografía en 3D de CuInSe_2

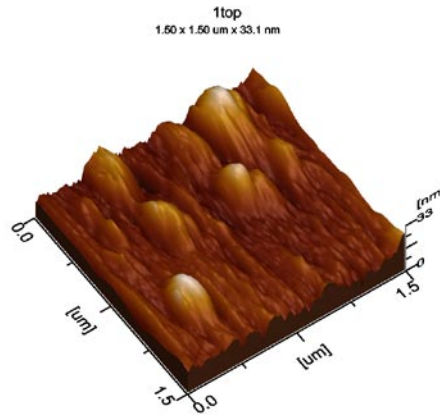


Fig. 1.11 Imagen 2 de topografía en 3D de CuInSe_2

1.5.2 Fuerza

Las imágenes de Fuerza, nos muestra una resolución natural de 50 nm, y puede censar la fuerza magnética que se ejerce sobre una parte específica de la superficie de la muestra, la fuerza que se puede censar es en el rango de 10 pN.

A continuación se muestran algunos ejemplos de imágenes de fuerza obtenidas en el Microscopio de Fuerza Atómica, sobre una muestra de Diseleniuro de Cobre e Indio (CuInSe_2), Con condiciones iniciales de barrido:

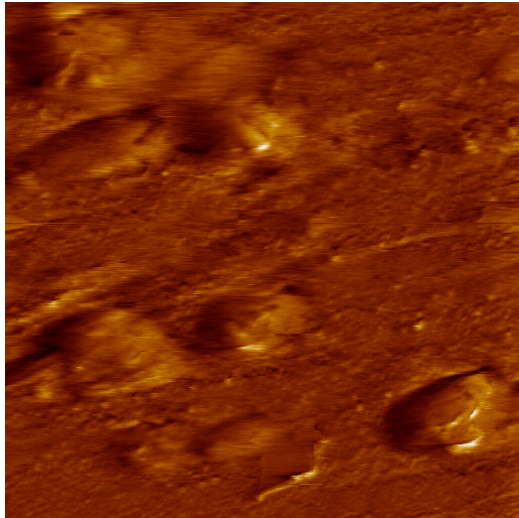


Fig. 1.12 Imagen 1 de fuerza de CuInSe₂

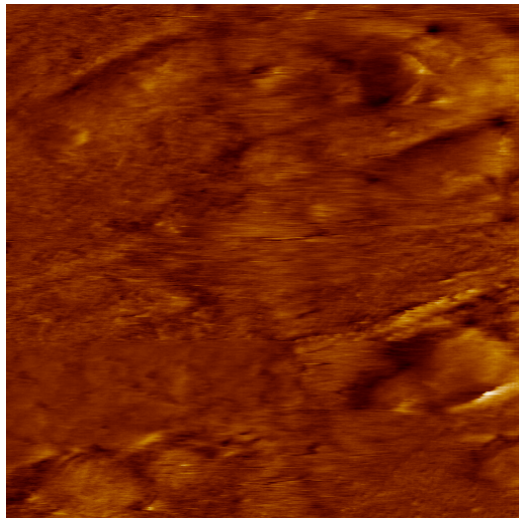


Fig. 1.13 Imagen 2 de fuerza de CuInSe₂

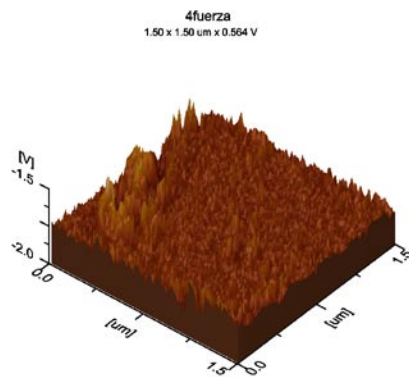


Fig. 1.14 Imagen 1 de fuerza en 3D de CuInSe₂

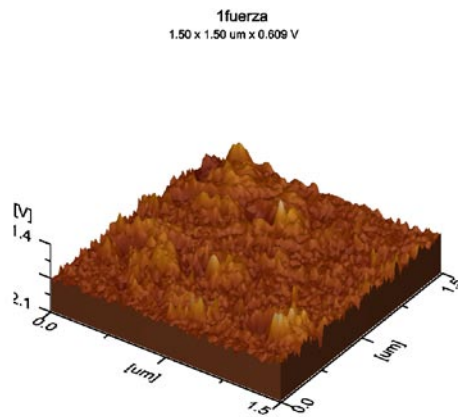


Fig. 1.15 Imagen 2 de fuerza en 3D de CuInSe₂

Capítulo 2 Teoría del Procesamiento de Imágenes.

2.1 Introducción

El objetivo principal de este capítulo es explicar brevemente como digitalizar una imagen ya obtenida previamente por algún medio, en este caso las imágenes que nosotros procesaremos se han obtenido mediante el AFM, pero antes de llegar a este punto se requiere conocer los conceptos básicos del procesamiento de imágenes, así como de los operadores utilizados para dicho fin.

2.2 Digitalización de una imagen

La visión de máquina puede ser comparada con la de un humano tomando en cuenta los parámetros funcionales pertinentes a los procesos industriales.

- Adaptabilidad al entorno
- Toma de decisiones
- Calidad de las medidas
- Velocidad de la respuesta
- Respuesta de espectro
- Dos o tres dimensiones
- Entrada/salida de datos
- Sensibilidad
- Color
- Percepción
- Consideraciones económicas

La visión o sistema de procesamiento de imágenes puede ser dividido en tres componentes funcionales:

1. Adquisición de la imagen
2. Reprocesamiento
3. Clasificación

2.2.1 Adquisición de la imagen

Imagine que la herramienta de adquisición transforma la imagen de un objeto físico y sus características intrínsecas en un conjunto de datos numéricos listos para procesarse. La Adquisición de la imagen puede consistir de cuatro fases:

2.2.1.1. Iluminación

- a) La iluminación direccional (para superficies mate Lambertian trabaja en la parte donde la irradiación depende del ángulo de luz sobre la superficie). Esta no se usa para superficies reflejantes (espejo).
- b) La iluminación difusa es buena para superficies mates y reflejantes (no se producen sombras delgadas)
- c) La iluminación posterior para contornos geométricos opacos (no transparentes) objetos planos (son usados para la separación del objeto y la base)
- d), e) La iluminación de campo clara y oscura, como el caso particular de la iluminación posterior (luz -- base iluminada, objeto oscuro)
- f) Conversión de iluminación tele céntrica de la distribución espacial de radiación de una fuente clara en rayos paralelos que reflejan la radiación del punto de la fuente. Es la fuente de varios tipos de la iluminación.
- g) La iluminación modulada por impulsos reduce los efectos de entorpecer y medición constantes sincronizados con la cámara fotográfica, para procesos rápidos.
- h) La iluminación modulada con cierta frecuencia en la termografía.

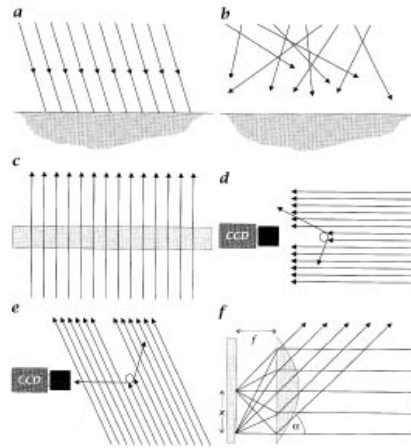


Fig. 2.1 Disposiciones de tipos de iluminación diferentes: a) directa, b) difusa, c) posterior, d) campo claro, e) campo oscuro, f) iluminación telecéntrica

2.2.1.2. Formación de imagen o enfoque

El lente es usado para enfocar las imágenes en elementos sensados. (Ampliación - tamaño real), distancia focal, profundidad de campo (desviación de la superficie todavía enfocada), montaje del lente.

2.2.1.3. Detección de Imagen o Sensado

La formación de la imagen es hecha por un sensor, que convierte la radiación reflejada del objeto, en una señal análoga o digital tomado en un entorno geométrico tomando en cuenta la correspondencia escena e imagen. Esto se logra por el posicionamiento adecuado de la cámara fotográfica con respecto a

La escena y por usar lentes con distancia focal apropiada, o de un tipo de zoom adecuado, cuando el campo de visión debe ser ajustable.

2.2.1.4. Formato de la señal de salida de la cámara fotográfica

El elemento básico es un digitalizador. (Convertidor analógico a digital - datos correspondientes al valor de iluminación de cada píxel en cada línea, como una función de la frecuencia de conversión)

La sucesión de la operación para la formación de la señal de salida de la cámara fotográfica es:

- a) La señal analógica debe ser muestreada (obteniendo el valor instantáneo de la señal en el punto de muestreo en el tiempo).
- b) El valor del muestreo debe ser medido en una apropiada escala de grises.
- c) Los valores medidos deben dar valores numéricos

La norma europea de barrido es de 64m

El estándar americano es de 63.7m

La frecuencia de 4 MHz es requerido para obtener 256 píxeles por línea y uno de 8 MHz para conseguir 512 píxeles

2.2.2 Procesamiento de la Imagen

Hay muchas aplicaciones y problemas para el procesamiento de imágenes. La clasificación base puede ser la siguiente presentada como un conjunto de clases:

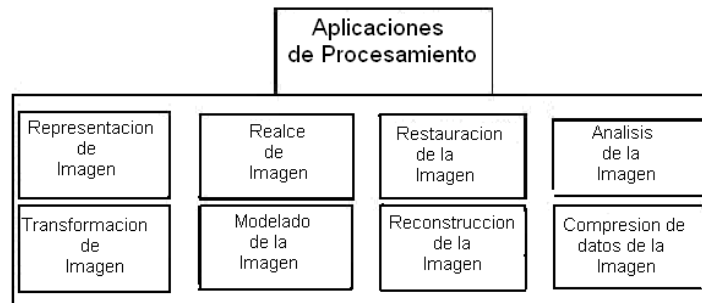


Fig. 2.2 Clasificación base del procesamiento de Imágenes

En la representación de una imagen uno está relacionado con la caracterización de la cantidad de elementos de la imagen (llamado píxel o pel) representados. Los modelos de imagen dan a una descripción lógica o cuantitativa de las propiedades de esta función.

2.2.3 Percepción de la imagen

2.2.3.1. Sistemas de Colores y diagramas de cromatismo

Existe color, escala de grises y digitalizaciones binarias. La digitalización Binaria es un caso particular de dos niveles de la representación de la imagen que elimina los efectos indeseables como sombras y reflexiones. Esto es bueno para las aplicaciones que consiguen la información directa en manchas ("sitios"), rupturas, porosidades de impurezas y así sucesivamente.

Color, en abstracto, es relativamente simple. Pero las dificultades reales se originan en lo que es requerido para adoptar el sistema de color en una vía óptima para mostrar e imprimir en los dispositivos, para la transmisión por la televisión, o para corregir para la resolución desigual de color del sistema visual humano.

La representación de color se basa en la teoría clásica de Thomas Young donde cualquier color se puede reproducir por mezclar apropiadamente el conjunto de los tres colores primarios (el mejor espectro de detección de la retina humana). Esto aparece en los diagramas de cromatismo de los espacios de color simples (la saturación de color en forma de v de la intensidad).

a) Leyes de la igualación de color

- (i) Cada color se puede obtener mezclando a lo más tres colores (podemos encontrar siempre los tres colores primarios)
- (ii) La luminancia de una mezcla de colores es igual a la suma de las luminancias de sus componentes
- (iii) El ojo humano no puede resolver los componentes de una mezcla de color (no puede resolver la longitud de onda de un color)

Existen mas leyes llamadas leyes de Grassman, en este caso no se enlistaran todas ya que nuestro capitulo de procesamiento de imágenes solo tiene el fin de darnos una introducción de lo que es.

Estas leyes son útiles en colorimetría de reproducción de color, la ciencia de la medición cuantitativa del color.

b) Cromaticidad RGB y Diagrama CMYB : (Luminiscencia (intensidad) usada para la descripción de colores)

El color de la imagen es definido por los niveles de intensidad de radiación que corresponde a las tres longitudes de onda principales (colores primarios: color rojo

- 700 nm, verde - 546.1nm, y azul - 435.8nm) representada por tres magnitudes normalizadas:

$$r = \frac{R}{R+G+B}; \quad g = \frac{G}{R+G+B}; \quad b = \frac{B}{R+G+B}$$

Como $R + g + b = 1$. Esto nos permite representar los colores en un diagrama cromático bidimensional desde la $b = 1 - r - g$ de

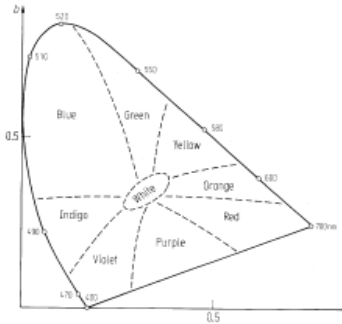


Fig. 2.3 Diagrama RGB cromático de los componentes azul y rojo. La curva formada en forma de u de los colores monocromos con la longitud de onda en nm,

El color con la máxima intensidad en RGB es el color blanco. La norma que se usa en la industria para imprimir es usando CMYB (cyan, magenta, amarillo colores que dan el negro). El sistema CMYB es considerado como el sistema para la adición o sustracción del color.

Una imagen de un color $ic(x, y)$ tiene una representación de RGB como $Ic(x,y) = [I_r(x,y), I_g(x,y), I_b(x,y)]$,

Donde los colores primarios son rojo, verde, y azul. Todos los colores se pueden obtener de estos tres como se muestra en el cubo RGB.

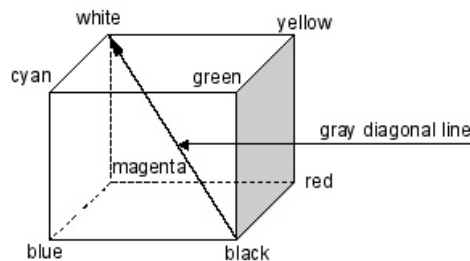


Fig. 2.4 De los colores primarios, se generan los secundarios, ejemplos el amarillo se obtiene de los colores rojo y verde, el cyan se obtiene del azul y magenta, el verde del azul y rojo.

c) Color y diagrama de saturación : (tipo del color (color) y la pureza del color (saturación) es usada para la descripción del color)

Color y saturación se pueden extraer de los diagramas de cromatismo por las transformaciones coordinadas simples que toman el punto esencial de "blanco" en medio del diagrama cromático.

d) Sistema de Color coordinado

Existen varios sistemas de colores coordinados que existen por una gran variedad de razones. El espectro CIE no producen una gama completa de los colores reproductibles (realmente no existe el conjunto práctico de tres elecciones preliminares para la producción de que todos los colores). Por lo tanto el sistema de coordenada de XYZ es tomado como hipotético (fuentes

Primarias son físicamente irrealizables) fuentes primarias son positivas para cualquier color. El blanco es el color con $X=Y=Z=1$.

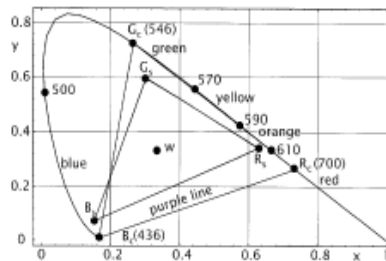


Fig. 2.5 Diagrama de cromatismo para el sistema coordinado de color de CIE XYZ (Todo el coeficiente positivo de los colores primarios) y representa la luminancia del color.

La escala uniforme de cromatismo (UCS) del sistema u,v , está relacionada con el sistema XYZ donde y es luminancia, u y v son las coordenadas de cromatismo. Este sistema es útil para medir las diferencias de color cuantitativamente.

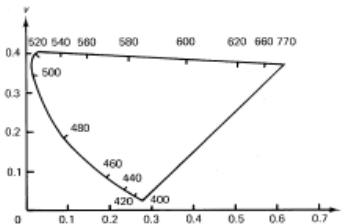


Fig. 2.6 Diagrama de cromatismo para el sistema coordinado de color de CIE UCS

El sistema nacional de comité de televisión (NTSC) sistema receptor primario (RN, GN, BN) ha sido desarrollado para los receptores de televisión (tal como $RN=GN=BN=1$).

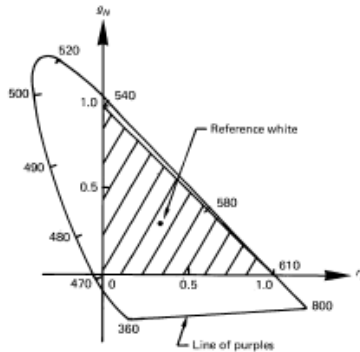


Fig. 2.7 Diagrama de cromatismo para el sistema primario de receptor de NTSC.

2.2.3.2. Propiedades temporales de la visión

Los aspectos temporales de la percepción visual se vuelven importantes en el proceso de las imágenes de movimiento o video.

La ley de Bloch: Las luces de Flash de diferente duración pero de igual energía son indistinguibles por debajo de una duración crítica. Esta duración crítica tiene casi 30 MS cuando el ojo es adaptado al nivel de iluminación

Moderado. El mayor tiempo que tarda el ojo humano en adaptarse a la oscuridad, es la duración crítica larga

Cuando una luz es observada lentamente, los destellos individuales son distinguibles. A los índices centelleantes sobre la frecuencia de fusión crítica (CFF no excede 50 60Hz), los destellos son indistinguibles de una luz firme de la misma intensidad media.

El entrelazado campo de imagen de muestreo y mostrado en el índice de CFF (60 cuadro/s) evita cualquier parpadeo.

2.2.3.3. Contraste Simultáneo

La luminancia o intensidad de un objeto son independientes de las luminancias del límite del objeto. La brillantez (también llamada brillantez aparente) de un objeto es la luminancia percibida y depende de la luminancia que hay en el ambiente. Fenómenos visuales: Dos objetos con los el limite diferentes pueden tener

idéntica luminancia pero diferente brillantez. Nuestra percepción es sensible a los contrastes de luminancia así como a los valores absolutos de luminancia.

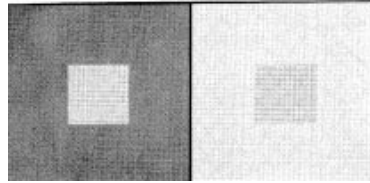


Fig. 2.8 Contraste simultáneo: Los cuadrados pequeños en el centro tienen luminancia igual aunque no parecen con la misma brillantez.



Fig. 2.9 Contraste simultáneo: Los cuadrados pequeños en el centro aparecen casi con la misma brillantes, pero sus luminancias son diferentes.

2.2.3.4. Bandas

La interacción espacial de luminancias de un objeto y su entorno crea un fenómeno llamado efecto de banda. Este efecto muestra que la brillantez no es una función monótona de la luminancia.

Considere la barra de la escala de grises con una constante de luminancia en cada barra. La transición en cada barra aparece BRILLANTE a la derecha y OSCURO a la izquierda (esto se muestra por la línea punteada con sobretiros y vados los cuales ilustras el efecto de banda)

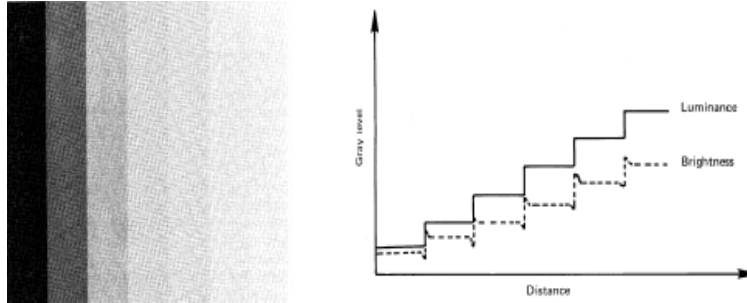


Fig. 2.10 Cartografía en barras de la escala de grises y efecto de banda

2.2.3.5. Criterios de fidelidad de la imagen

Los criterios de fidelidad de la imagen son útiles para medir la calidad de la imagen y para desertar la ejecución de una técnica de procesamiento de imagen o un sistema de visión. A continuación están dos tipos de los criterios que son usados para la evaluación de la calidad de la imagen, estos son subjetivos y cuantitativos.

a) Los criterios subjetivos : usan la clasificación de escalas tales como la escala de bondad y la escala de deterioro. El conjunto de imágenes de prueba son usadas para calibrar cada escala. La escala de bondad de grupo se basa en la comparación de un conjunto de imágenes.

Tabla 1 Escala de bondad en las Imágenes

Escala de bondad	Grupo de escala de bondad
Excelente (5)	Mejor (7)
Bien (4)	Bien sobre el promedio (6)
Justo (3)	Ligeramente sobre el promedio (5)
Pobre (2)	Promedio (4)
Poco satisfactorio (1)	Ligeramente debajo del promedio (3)
	Bien debajo del promedio (2)

	Peor (1)
--	----------

Los números en el paréntesis indican un peso numérico anexo a la clasificación.

b) Escala de deterioro : evalúa una imagen basándose en el nivel de la degradación que presenta dicha imagen cuando esta se compara con una imagen ideal.(útil en las aplicaciones tal como codificación de imagen, restauración, proyección...)

Tabla 2 Escala de deterioro

No perceptible	1
Solo perceptible	2
Definitivamente perceptible el deterioro	3
Deterioro no objetable	4
Algo objetable	5
Claramente objetable	6
Extremadamente objetable	7

c) Entre medidas cuantitativas: un tipo de criterio usado a menudo es llamado el criterio del cuadrado. Este se refiere a que cierta medida alcanza un promedio de la suma (o integral) del cuadrado del error entre dos imágenes. Para MxN imágenes $u(m, n)$ y $u'(m, n)$, (o $v(x, y)$ y $v'(x, y)$ en el caso continuo), la cantidad:

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |u(m, n) - u'(m, n)|^2 \quad \text{or} \quad \iint_R |v(x, y) - v'(x, y)|^2 dx dy$$

Donde R es la región sobre la cual la imagen es dada, es llamada el error promedio de los mínimos cuadrados (o integral cuadrada)

2.2. 4 Conceptos fundamentales del procesamiento de imágenes

Píxel: La imagen se describirá por una matriz de NxM valores de píxel (los elementos $p(i,j)$ son magnitudes escalares no negativas), que indican la

intensidad de luz en el elemento de pintura en (x, y) representadas por el píxel como se muestra en la figura.

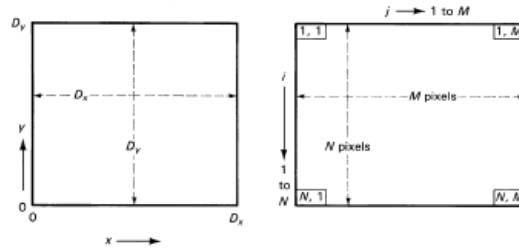


Fig. 2.11 a) Relación de los elementos de una imagen y b) Correspondencia de la distribución de un píxel en la matriz

El origen en la pintura y en la matriz es diferente: las coordenadas x y y empiezan en la esquina inferior izquierda de la imagen, mientras que la numeración de los píxeles en la matriz empieza en la esquina superior izquierda .

(*Ciertos programas usan $(0, 0)$ en lugar de $(1, 1)$ para la primera ubicación)

Paso de incremento: $x = Dx / N$ y $y = Dy / M$

El valor numérico o magnitud de un píxel indica la intensidad del promedio de luz sobre un elemento dentro del área de la imagen representada por un píxel.

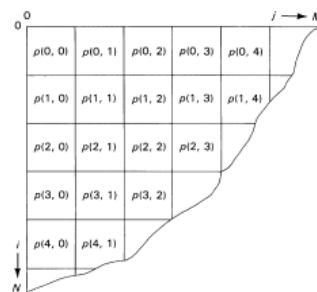


Fig. 2.12 Indexación de píxeles en la matriz de la imagen

El valor del píxel $P(i,j)$ en la representación binaria toma el rango 0 a1. Por ejemplo, el área oscura tomada como un área de píxel es el cero si no existe ninguna iluminación, y 1 si existe la iluminación máxima

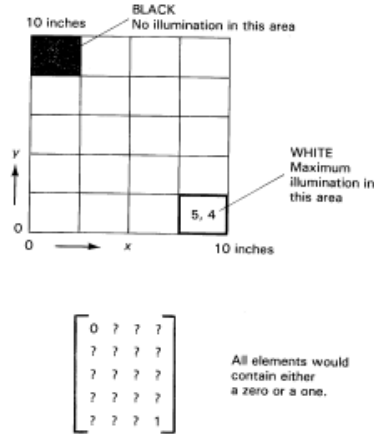


Fig. 2.13 superficie iluminada no uniformemente y Matriz resultante de los valores de píxel de la imagen.

El área de un píxel puede ser rectangular o circular con o sin traslape. (Existe áreas que no son medidas, o se miden dos veces)

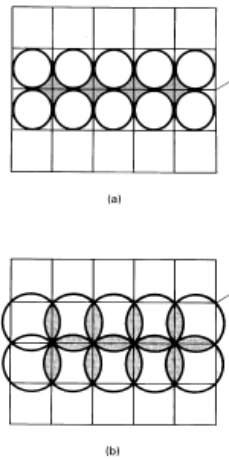


Fig. 2.14 Áreas no rectangulares representadas por un píxel: a) redondeado sin traslape y b) redondeado con traslape

Escala de grises

A fin de proporcionar información en los valores intermedios de iluminación, el número de bits que representa el valor de píxel se debe incrementar.

Número de bits para píxel = \log_2 (número de los niveles de la escala)

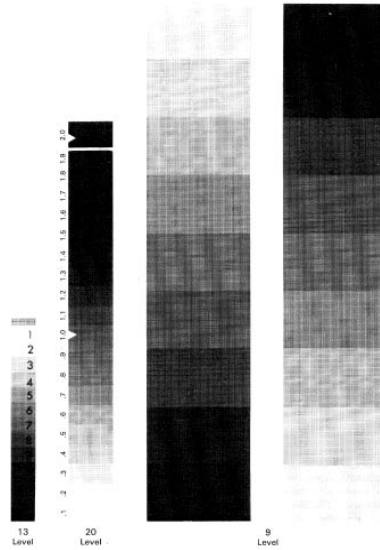


Fig. 2.15 Ejemplo de escala de grises

Por definición del valor de un píxel el área de la región oscura es calculada. (Introduciendo la cuantificación de los errores debido al valor no-entero, estimado del área oscura)

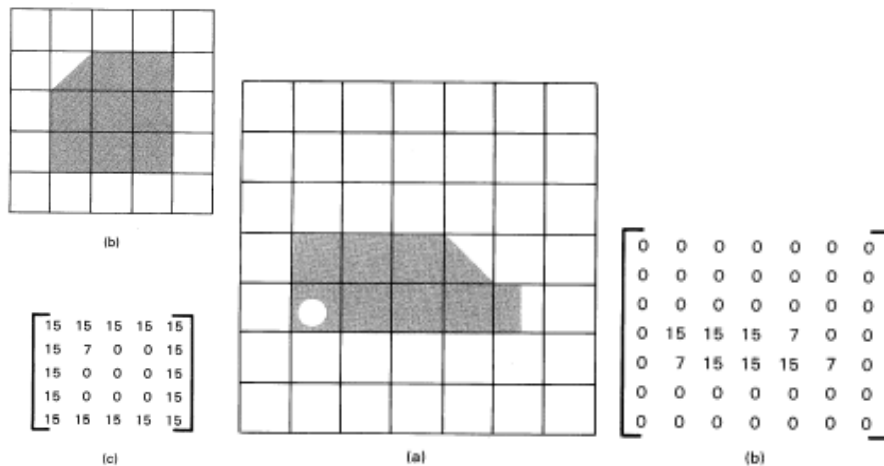


Fig. 2.16 Objetos irregulares con su correspondiente matriz de los valores de píxeles de la Imagen.

Histograma : es la presentación gráfica de la cuenta de la frecuencia de la ocurrencia de cada intensidad (nivel gris) en una imagen. El histograma es construido por:

Digitalizar los valores numéricos de la imagen

Contar los píxeles en cada nivel de escala de grises

Plotear la frecuencia de la cuenta de los píxeles a nivel de escala grises.

El histograma puede ser considerado como una colección de gráficos de barras donde

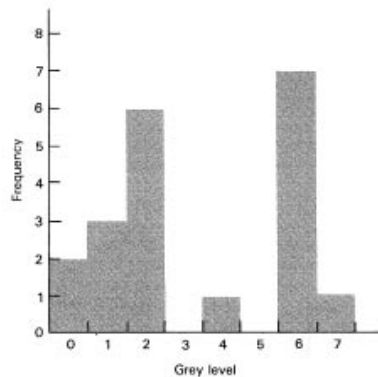


Fig. 2.17 Histograma para ocho niveles de escala de grises en cuatro arreglos de la imagen(x-valores de los niveles de grises, y-números de píxeles que tienen nivel de gris)

La probabilidad de el valor de un píxel b ocurra en un punto dado (x,y) en la pintura previa se calcula

$$p(b) \text{ en cada punto } (x,y) = (\text{valor } b)/(\text{número total de píxeles})$$

Por ejemplo, si el nivel gris es $b=6$ y el valor de la ocurrencia para este nivel son 7 , entonces $p(6) = 7/20 = 0.35$

El histograma proporciona la frecuencia de ocurrencias de píxeles con el mismo nivel de gris pero no da información sobre la ubicación del píxel. El histograma para una imagen específica es único. El diagrama agudo indica una falta del contraste. Los histogramas proporcionan información para igualar dos imágenes para propósitos de substracción

2.2.5. Fuentes de la distorsión de la imagen

Durante la digitalización y adquirimiento de la imagen en ambos pasos (consiguiendo las señales eléctricas por el sensor del sistema óptico adecuado y el problema del procesamiento cuantitativo) son las fuentes de distorsión de la imagen.

La interpretación correcta de la imagen es limitada por:

- **Distorsiones geométricas** : debido a la posición relativa del sensor y la escena (deformación propia de la perspectiva)
- **Distorsión** : debido al uso de iluminación del sistema (sombras o reflexiones)
- **Pérdida de información** : debido al hecho de que la imagen obtenida es generalmente una proyección bidimensional de una tridimensional (oclusiones o ambigüedades que requieren la interpretación inteligente basada en el contexto)

2.2.5.1. Distorsión geométrica

Se puede causar por la perspectiva que se deriva del posicionamiento de la cámara fotográfica con respecto a la escena y los parámetros del lente usado; normalmente se corrige por medio de la computadora.

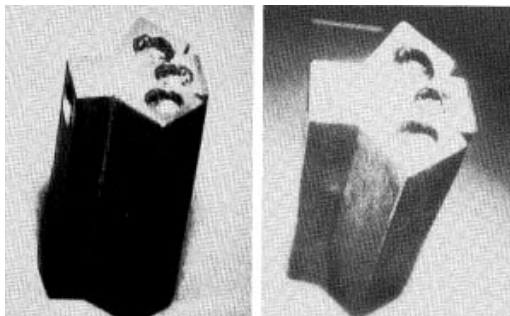


Fig. 2.18 Distorsión geométrica debido a la perspectiva

2.2.5.2. Distorsión de imágenes en movimiento durante el barrido

Este tipo de distorsión aparece en el tubo al vacío, debido al entrelazamiento, en la exploración línea por línea debido a un cambio progresivo de ciertas partes de la imagen. Un barrido de líneas uniformes e impares en las presentaciones de

información sucesivas introduce la distorsión dependiendo de la diferencia de la duración de la estructura de los barridos. (Reduciendo la exposición a un tiempo menor de 1/1000)

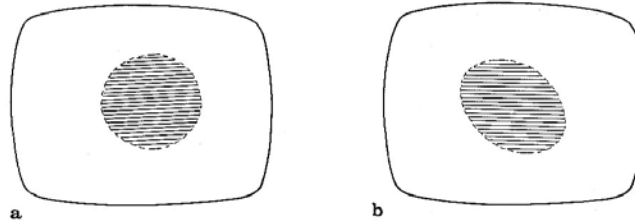


Fig. 2.19 Distorsión de imágenes en movimiento durante el barrido. A)Imagen de un objeto fijo; b)imagen del objeto al moverse

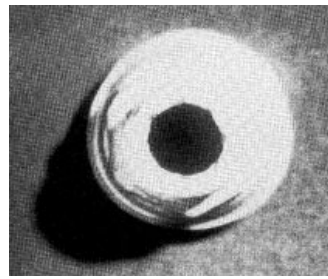


Fig. 2.20 Distorsión en imágenes de objetos en movimiento obtenida con una cámara fotográfica con entrelazado de barrido

2.2.5.3. Sombras

La distorsión debido al sistema de iluminación puede definirse básicamente en tres efectos diferentes:

- **Introducción de información falsa** : (proyección de sombras que son interpretadas como áreas del objeto o invariantes con la rotación, por ejemplo, la posición simétrica de los elementos causando una sombra proyectada)

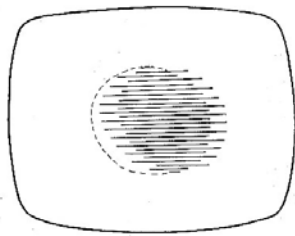


Fig. 2.21 Distorsión causada por la sombra creada por la rotación

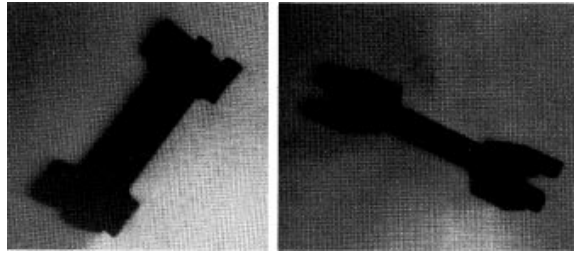


Fig. 2.22 Distorsión causada por sombras de acuerdo a la orientación

- **Distorsión dimensional** : es el resultado de la proyección de la sombra presente que puede llevar el cambio de los límites entre el objeto y la base ,alterando las magnitudes observadas geométricamente.

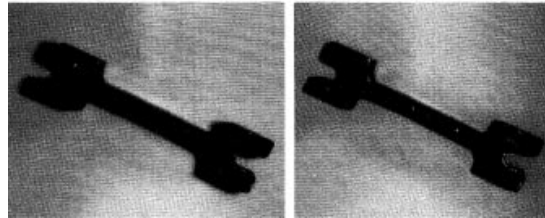


Fig. 2.23 Distorsión dimensional causada por la sombra

- **Ocultamiento de la información** : es otro efecto de la proyección de la en los objetos de la escena. Consiste de información encubierta a su reconocimiento (las ranuras, agujeros, juntas, filos, etc.).

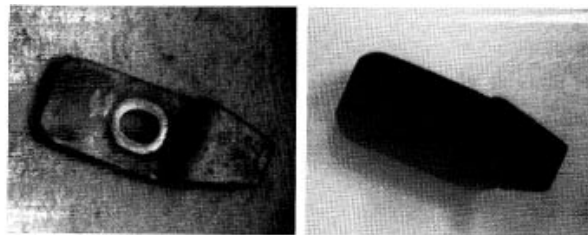


Fig. 2.24 Ocultamiento por sombras de características de un objeto

2.2.6. Pérdida de información

Se puede dar debido a diferentes causas que afectan varios campos:

- **Pérdida de información a nivel de intensidad** se divide en dos casos:

a) **Pérdida de información de color**: no afecta a las características dimensionales pero a veces puede causar una mala interpretación de las características distinguibles.

b) **Pérdida por cuantificación** : se debe a una resolución limitada de las intensidades de la luz para cada punto con limitados niveles de grises

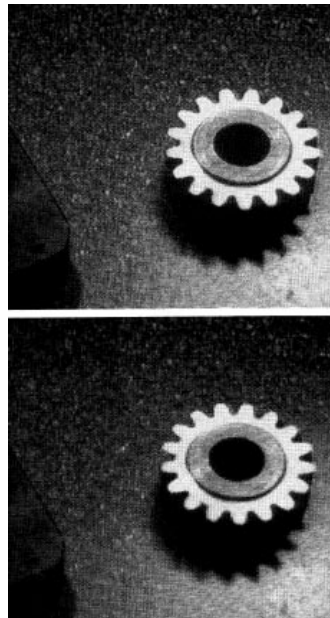


Fig. 2.25 Imagen digitalizada con diferentes escalas de grises; a) resolución de 6 bits, b) resolución de 4 bits.

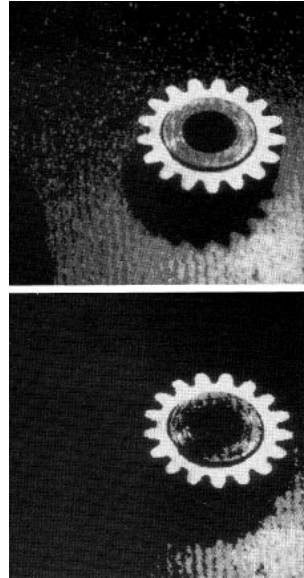


Fig. 2.26 Resolución de tres y dos bits

- **Pérdida de información a nivel dimensional** está formada por:

a) **Resolución** : (La digitalización de una imagen para su almacenamiento exige no solo la cuantificación en escala de grises sino también una muestra espacial. Los resultados de frecuencia de la muestra entre la reducción del espectro de frecuencia de la señal y el volumen de la información resultante = resolución)

b) **Limitación de Cuadros**: (La limitación de cuadro del área visible de la escena es dada por los parámetros geométricos de los lentes empleados)

c) **Pérdida de la tercera dimensión** : (normalmente, la imagen de 2D tiene bastante información para interpretar, la tercera dimensión no es eficiente en todos los casos)

d) **El ocultamiento parcial** : (enmascaramiento) de objetos (cuando el objeto contenido en una escena se encuentra parcialmente oculto. Puede ser el ocultamiento solapando en escenas de 2D, el ocultamiento de la parte del objeto tridimensional debido a su posición relativa con respecto a la cámara de fotografiar)

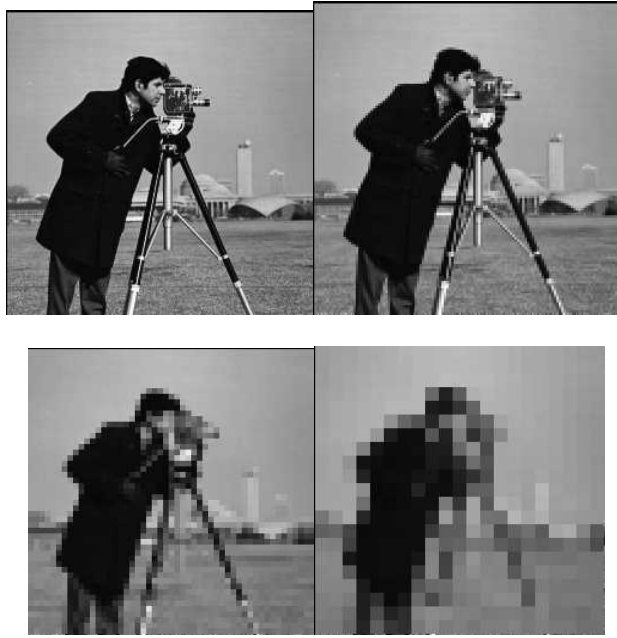


Fig. 2.27 Imagen digitalizada con diferentes niveles de resolución.

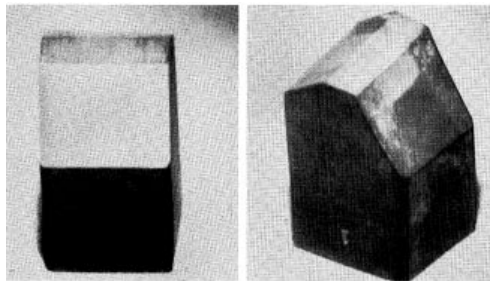


Fig. 2.28 Oclusión de una imagen en 3 dimensiones a) vista frontal b) vista lateral.

- **Pérdida de información a nivel dimensional** : (en escenas dinámicas debido al barrido, ocultamiento, rotación, oclusiones...)

2.3 Técnicas de Procesamiento básicas de imágenes.

El procesamiento de los datos en el sistema de visión se puede categorizar en:

(i) Punto a punto (monádico) alteración de datos en una escala global.

(ii) Múltiples puntos (diádica) determinación de elementos de un nuevo conjunto de la imagen.

La generación de la nueva matriz de la imagen será una función de los valores de ubicación del píxel o de los valores de los píxeles en las vecindades de una celda individual.

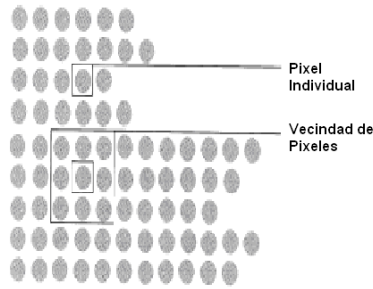


Fig. 2.29 Funciones de punto y de vecindad

Las operaciones monádicas : suponen la generación de un nuevo arreglo para modificar el valor del píxel en una ubicación sencilla basada en una regla global aplicada a cada ubicación en el arreglo original.

La secuencia de transformación uno a uno es:

Obtener el valor del píxel de una ubicación dada en el conjunto

Modificarlo por una operación lineal o no lineal simple

Poner el nuevo valor del píxel en la ubicación correspondiente específica del nuevo conjunto

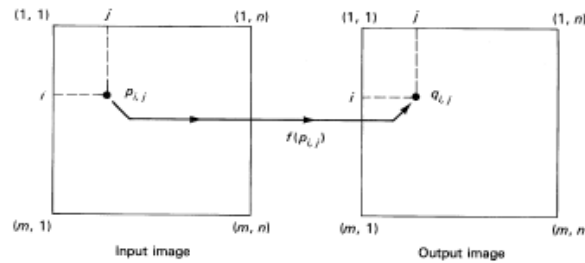


Fig. 2.30 Operador monádico . La f del operador transforma el valor a nivel gris de cada píxel independientemente de otros y el nuevo valor es definido como: $g(i,j) = f[p(i,j)]$.

La matriz resultante de la imagen será del mismo tamaño que la matriz de la imagen original.

Las operaciones diádicas usan esencialmente el mismo procedimiento que las monádicas exceptuando que la imagen de salida es generada en una de dos vías:

El valor de cada píxel en el conjunto es dependiente de una combinación de valores correspondientes a la ubicación del píxel en dos o más cuadros similares de la imagen.

El valor del píxel en la región adyacente a la ubicación del valor del píxel generando son combinados.

2.3.1 Transformación monádica de un punto.

(i) operador de identidad: (creación de una imagen idéntica de salida)

La función es una línea recta empezando en el origen y extendiéndose al valor máximo del píxel en la imagen.

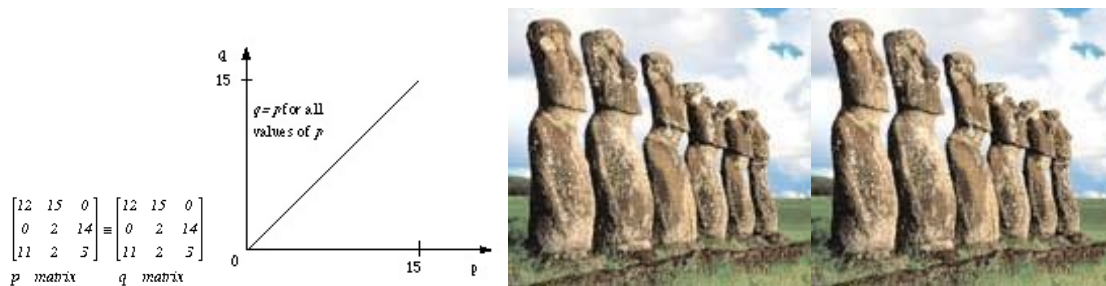


Fig. 2.31 Operador de identidad: entrada, salida, y función

(II) operador inverso : (creación de la salida inversa para una imagen de entrada)

La función es que la línea recta tenga el máximo valor de gris para el valor mínimo de gris de la entrada, y para el máximo valor de gris de la entrada se iguala a cero.

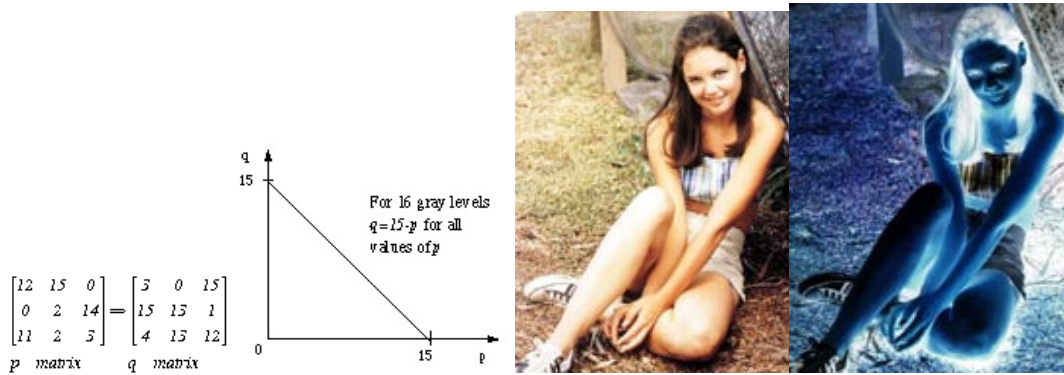


Fig. 2.32 Operador inverso: entrada, salida, y función

(iii) operador umbral : (da como resultado una imagen de salida binaria donde el nivel de la transformación es dado por el parámetro p de entrada conocido como el umbral)

Todos los valores del píxel por debajo de p se convierten a cero y todo valor del píxel que iguale o sea mayor que p se convierte a uno .

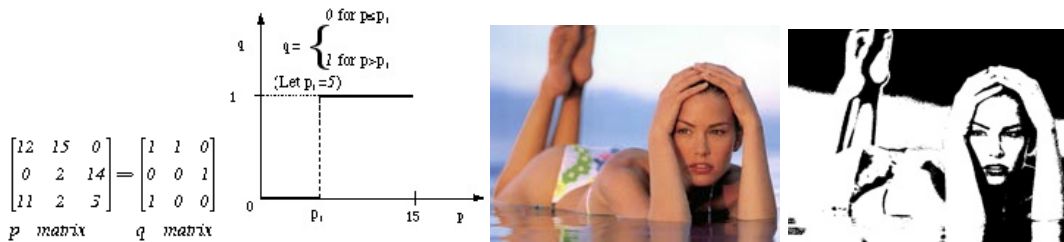


Fig. 2.33 Operador umbral: entrada, salida, y función

(iv) operador umbral invertido : (la imagen de salida se puede invertir al aplicar la función de umbral). Cada píxel en la imagen original que era claro será oscuro y los píxeles que eran oscuros serán claros.

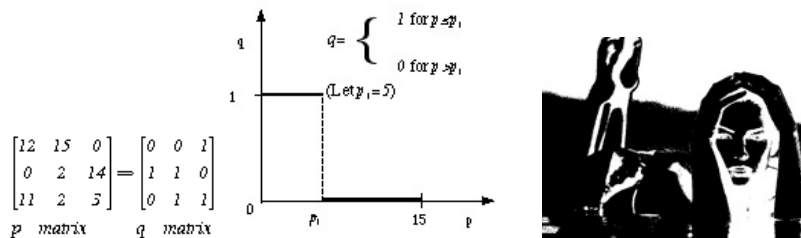


Fig. 2.34 Operador umbral invertido: salida, y función

(v) operador de intervalo umbral binario : (todos los píxeles con valor entre p_1 y p_2 se convierten en uno y los valores fuera del intervalo se convierten a cero.)

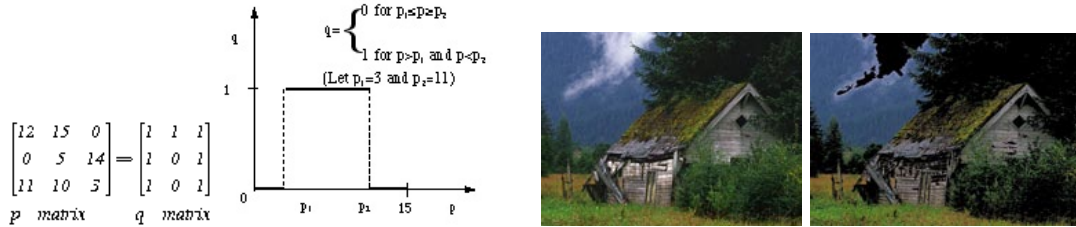


Fig. 2.35 Operador de intervalo umbral binario: entrada, salida, y función . El valor del píxel en el intervalo es entre $p_1 =100$ y $p_2 =150$ fuera de el es igual a cero.

(vi) operador umbral binario invertido : (es usado para convertir una imagen con múltiples niveles de grises a una imagen binaria o puede ser aplicado a una imagen binaria para propósitos de inversión)

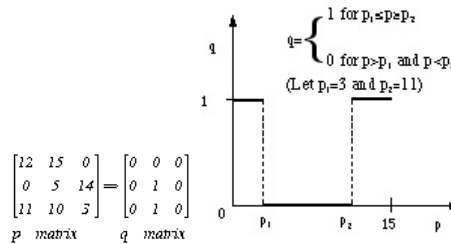


Fig. 2.36 Operador umbral binario invertido: función

(vii) operador umbral de escala de grises : (resulta en una imagen de salida en escala de gris, para la escala de gris los valores de la imagen están entre p_1 y p_2 , y todos los valores fuera del intervalo se hacen cero) Este operador se usa para la identificación de las características de imagen teniendo un valor específico para el pseudo color y aplicando técnicas de procesamiento.

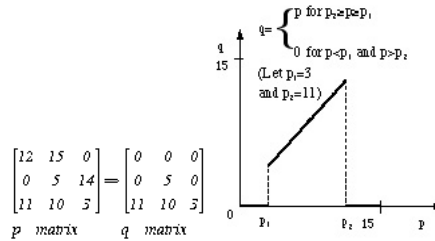


Fig. 2.37 Operator umbral de escala gris: función

(viii) operador umbral de escala de grises invertido : (este operador puede realizar las características específicas tales como caminos o todas las áreas similares en la imagen)

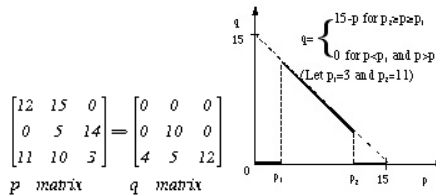


Fig. 2.38 Operator umbral de escala de grises invertido: función

(ix) operador elástico : (da como resultado de salida una imagen completa en escala de grises correspondiendo al intervalo de entrada p1 y p2 , suprime todo valor fuera de este rango)

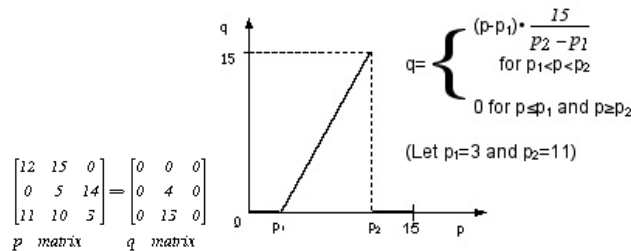


Fig. 2.39 Operator elástico: función

(x) operador reducción de nivel de gris : (la imagen de salida tiene un número más pequeño de nivel de gris nivelan que el número de niveles de gris de la imagen de entrada)

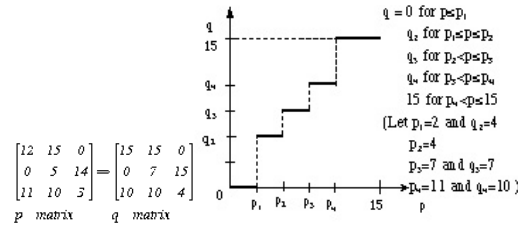


Fig. 2.40 Operator reducción de nivel de gris: a) función, b) salida con q1, q2, q3, q4,15 niveles de gris)

2.3.2. Transformaciones diádicas en dos puntos

El operador diádico punto a punto usa la información contenida en la misma ubicación en dos imágenes. El tamaño de la matriz no cambia y la el operador diádico f puede ser lineal o no lineal.

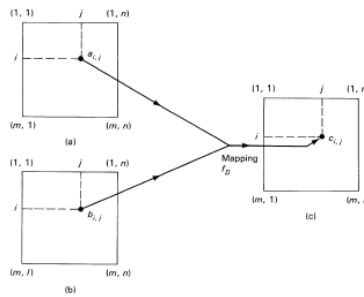


Fig. 2.41 Operador diádico multipunto a punto: a) entrada de la imagen, b) mapeo en una nueva imagen de salida

La función característica es dada por la ecuación:

$$c_{i,j} = f_D(a_{i,j}, b_{i,j})$$

Donde: la d es una función(f) de dos variables i e j recorre de 0 a m y n , respectivamente. La d de la función f contiene factor de escalamiento k apropiado para mantener la magnitud de los valores de salida dentro del rango a escala para evitar un exceso o una condición negativa.

(i) Adición de imágenes : (se usa para reducir el efecto del ruido en los datos)

El valor de la c de salida i,j es dado por

$$c_{i,j} = (a_{i,j} + b_{i,j}) / k$$

sobre el rango de i,j donde k es igual al factor de escalamiento.

$$\begin{matrix} \begin{bmatrix} 0 & 12 & 142 & 255 \\ 1 & 6 & 40 & 254 \\ 24 & 0 & 20 & 255 \\ 50 & 2 & 10 & 240 \end{bmatrix} & + & \begin{bmatrix} 14 & 11 & 9 & 255 \\ 5 & 5 & 39 & 254 \\ 11 & 1 & 19 & 255 \\ 18 & 2 & 11 & 255 \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} 7 & 12 & 76 & 254 \\ 2 & 6 & 40 & 254 \\ 18 & 1 & 20 & 255 \\ 25 & 2 & 11 & 245 \end{bmatrix} \\ \text{input 1} & a_{i,j} & \text{input 2} & b_{i,j} & \text{output} & c_{i,j} \end{matrix}$$

Fig. 2.42 Adición de imagen para i=j=4 ($c_{i,j} = (a_{i,j} + b_{i,j}) / 2$)

El proceso diádico de adición de imagen promedia los datos en las dos matrices de las imágenes de entrada. Existe un mejoramiento de exactitud y reducción de ruido cuando el procedimiento es usado con un gran número de muestras.



Fig. 2.43 Adición en escala de grises

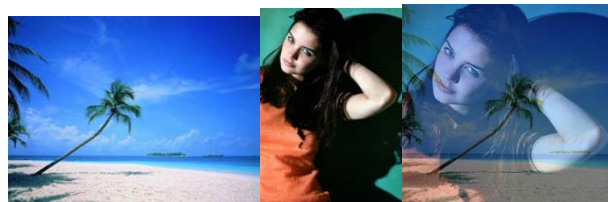


Fig. 2.44 Adición en imágenes de color

(II) Substracción de imágenes : (es usada para detectar cambios que han ocurrido durante intervalos de tiempo entre dos imágenes tomadas de la misma escena)

A fin de obtener los números positivos en la imagen de salida:

Reajustar donde el número negativo más grande es igual a cero y el número positivo más grande es puesto en el máximo nivel de (por ejemplo 255). La relación es definida como $c_{i,j} = (a_{i,j} - b_{i,j})$

Definir la diferencia como una diferencia sin signo o el valor absoluto de la diferencia (usando un número limitado de condiciones)

$$\begin{array}{l}
 \begin{bmatrix} 0 & 12 & 142 & 255 \\ 1 & 6 & 40 & 254 \\ 24 & 0 & 20 & 255 \\ 30 & 2 & 10 & 240 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 14 & 11 & 9 & 253 \\ 3 & 25 & 100 & 0 \\ 11 & 1 & 80 & 1 \\ 30 & 2 & 110 & 255 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -14 & 1 & 135 & 2 \\ -2 & -19 & -60 & 254 \\ 15 & -1 & -60 & 254 \\ 0 & 0 & -100 & -15 \end{bmatrix} \\
 \text{input 1 } a_{i,j} \quad \quad \quad \text{input 2 } b_{i,j} \quad \quad \quad \text{output_a) } c_{i,j} \\
 = \begin{bmatrix} 62 & 74 & 168 & 74 \\ 71 & 59 & 29 & 255 \\ 85 & 72 & 29 & 255 \\ 72 & 72 & 0 & 62 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 14 & 1 & 135 & 2 \\ 2 & 19 & 60 & 254 \\ 15 & 1 & 60 & 254 \\ 0 & 0 & 100 & 15 \end{bmatrix} \\
 \text{output_b) } c^*_{i,j} \quad \quad \quad \text{output_c) } c^{**}_{i,j}
 \end{array}$$

Fig. 2.45 Substracción de imagen: a) salida resultante con números negativos, b) en el mismo rango de 0 a 255, c) valores absolutos

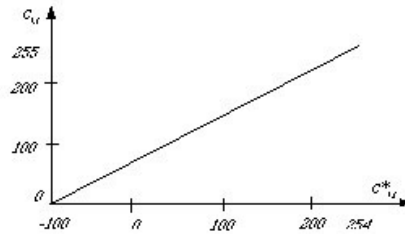


Fig. 2.46 Substracción de la imagen con la función para la salida $c^*_{i,j}$



Fig. 2.47 Sustracción en escala de grises

(iii) Multiplicación de la imagen : (es usada para corregir la no linealidad del sensor donde existe una sensibilidad no uniforme especial sobre el área vista (multiplicación por la matriz de corrección))

La relación es dada por la ecuación: $c_{i,j} = K [(a_{i,j} \times b_{i,j}) + a_{i,j}]$

Donde todos los valores son redondeados hasta el entero próximo, el valor máximo es 255 , y la $b_{i,j}$ es el factor de corrección.

$$\begin{bmatrix} 0 & 12 & 142 & 255 \\ 1 & 6 & 40 & 254 \\ 24 & 0 & 20 & 255 \\ 50 & 2 & 10 & 240 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} .3 & .4 & .1 & .1 \\ .3 & 0 & 0 & .1 \\ .3 & 0 & 0 & 0 \\ .4 & .1 & 0 & .1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 17 & 157 & 255 \\ 2 & 6 & 40 & 255 \\ 32 & 0 & 20 & 255 \\ 42 & 3 & 10 & 255 \end{bmatrix}$$

input $a_{i,j}$ correction $b_{i,j}$ output $c_{i,j}$

Fig. 2.48 Multiplicación de la imagen función

Otro uso del operador de multiplicación es reducir el procesamiento a un área específica del interés. La matriz de corrección $b_{i,j}$ que es dada por la ecuación $c_{i,j} = (a_{i,j} \times b_{i,j})$, donde $b_{i,j}$ es 1 para todos los pares dentro del área de interés y 0 para todos los pares fuera de esa área . El tamaño de la matriz de la imagen de salida es idéntico al tamaño de la matriz de entrada.

Ejemplo del multiplicación / división es

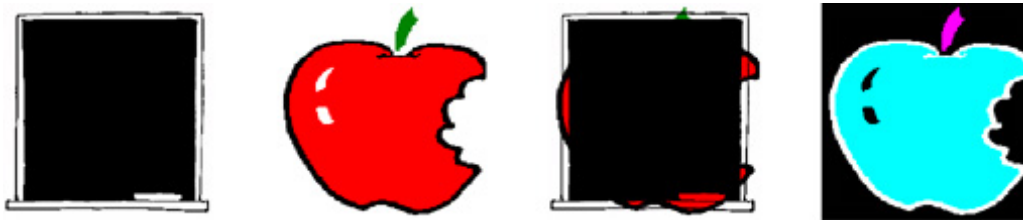


Fig. 2.49 a)Imágenes Originales b)Multiplicación c) División

(iv)Convolución de la imagen(transformación espacial)

Una nueva matriz de imagen se puede generar donde el valor del píxel asignado a cada ubicación, es una función de los valores de los píxeles de las localizaciones adyacentes por la convolución 3x3. En la convolución 3x3 el valor de píxel de la ubicación del centro es computado en base a los valores de las nueve ubicaciones vecinas. El tamaño de la matriz resultante es reducido por 2 en cada dirección debido al efecto de filo.

$$\begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} + & + & - \\ - & + & + \\ + & + & - \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} . & . & . \\ . & e^* & . \\ . & . & . \end{bmatrix}$$

$$e^* = +a + b - c - d + e + f + g + h - i$$

Fig. 2.50 Transformación de convolución (vecindad)



Fig. 2.51 Ejemplo de las operaciones de transformación: a) imagen original, b) interpolación, c) substracción de dos imágenes previas, d) convolución de imágenes substraídas y e) convolución del inverso de la imagen.

Existen mas técnicas de procesamiento de imágenes pero para el fin de nuestro trabajo solo mencionamos algunas para darle al lector una idea general de lo que implica el trabajar con imágenes.

Capítulo 3 Imágenes obtenidas del AFM

3.1 Introducción

En el capítulo 1 se habló del funcionamiento del AFM, y se mencionó de manera muy breve las imágenes que se obtienen del trabajo en éste, aquí se retoma nuevamente las imágenes que se obtienen del AFM, con el propósito de explicar algunos detalles interesantes que se pueden ver en las imágenes, así como explicar el por que la importancia de procesar dichas imágenes.

3.2 Imágenes de la muestra

El AFM nos permite la obtención de imágenes de la muestra, las imágenes obtenidas son las de fuerza y las de topografía. A continuación explicaremos las diferencias que se encuentran entre ellas, así como la información que cada una de ellas nos refleja.

Empezaremos por describir las imágenes de fuerza.

3.2.1 Imagen de Fuerza en plano

Ya en el capítulo anterior hablamos de las imágenes tomadas por medio del AFM. Ahora nos enfocaremos a hablar de las imágenes de fuerzas y tomadas directamente en la muestra.

En la imagen de fuerza, se hace una caracterización de la muestra en la cuál nos llega a detectar fuerzas del orden de los Piconewtons, así también nos da información sobre la conductividad del material en una zona seleccionada, nos muestra la información entre la interacción de las fuerzas intermoleculares e interatómicas.

En el presente trabajo las imágenes utilizadas son, obtenidas en un microscopio de fuerza atómica modelo JEOL SPM-5200. El cantiléver es de Silicio. Las mediciones se realizan a temperatura y atmósfera ambiental. Las imágenes de AFM en combinación con un análisis estadístico revelan diferencias distintas en las propiedades estructurales, dependiendo de las regiones escogidas.

A continuación se describen las condiciones iniciales en las cuales se maneja el AFM para obtener las imágenes de fuerza de la superficie de SiC. En todas las mediciones se aplicó el modo de contacto.

Muestra: Carburo de Silicio (SiC)

Condiciones iniciales de barrido:

Láser: -7.3

Diodo: -2.01 / -1.76

Scan Size: 1.5 μm

Clock: 66.67 μs

Referencia: -1.800 / -1.750

Filtro: 1.0 / 1.2

Loop Gain: 16

A continuación mostraremos unas imágenes de fuerza obtenidas sobre la muestra.

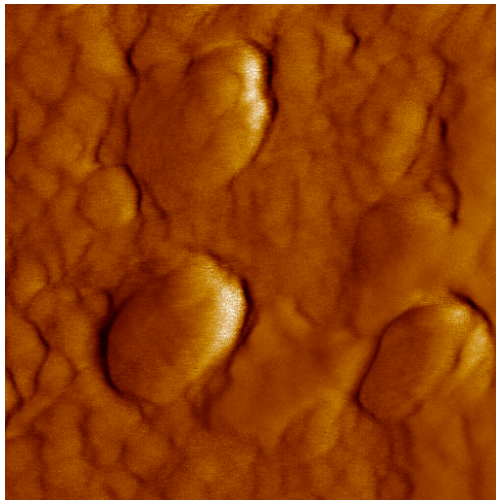


Fig 3.1 Imagen 1 de Fuerza obtenida en AFM en modo contacto de una muestra de SiC

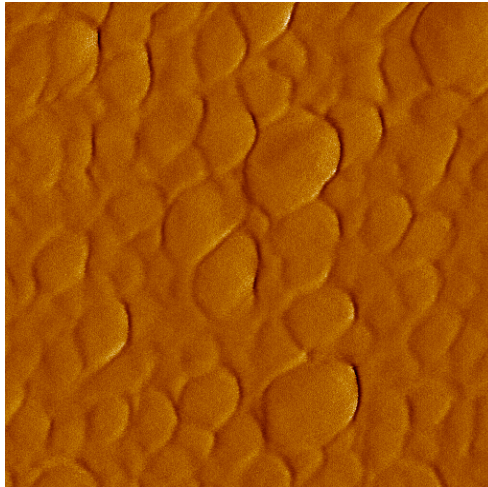


Fig 3.2 Imagen 2 de Fuerza obtenida en AFM en modo contacto de una muestra de SiC

Si se observa a simple vista el material se ve que este es plano, pero cuando se observa por medio del AFM nos encontramos irregularidades en la superficie que son el motivo de este estudio, ya que el entender el porque y como se originan estas irregularidades en el material nos puede ayudar para generar materiales con mayor resistencia y menores rango de error.

3.2.2 Imagen de Fuerza en 3D

También podemos obtener imágenes en 3D a partir de las imágenes ya tomadas, a continuación mostraremos unas imágenes en 3D de fuerza.

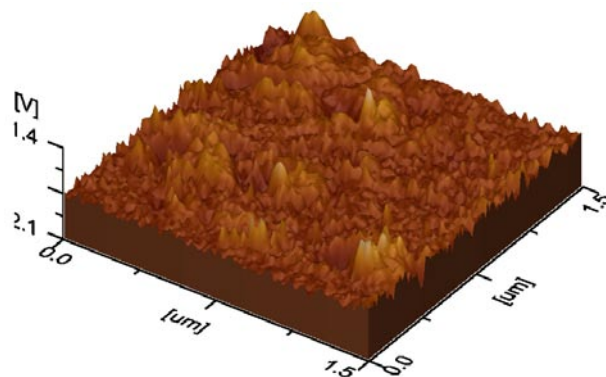


Fig 3.3 Imagen 1 de Fuerza en 3D obtenida en AFM en modo de contacto de una muestra de SiC

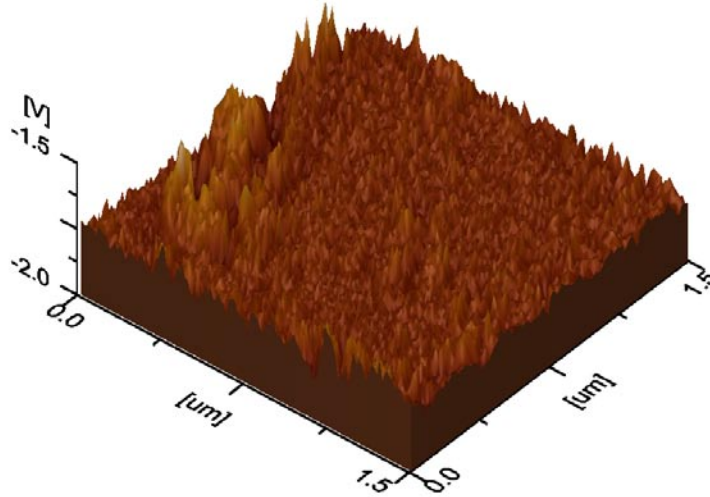


Fig 3.4 Imagen 2 de Fuerza en 3D obtenida en AFM en modo de contacto de una muestra de SiC

En las imágenes en 3D se puede apreciar claramente las variaciones de energía que se presentan en distintas áreas del material, los picos mas altos nos indican que ahí hay una recepción del material de un voltaje mayor.

También podemos decir que estos picos son puntos cuánticos que se encuentran en el material.

3.3 Imagen de Topografía.

A continuación describiremos las imágenes de Topografía, que principalmente se refieren al análisis topográfico que se hace de la muestra. Es decir nos da como resultado el relieve de la muestra a escala nanométrica.

3.3.1 Imagen de Topografía en plano

La imagen de Topografía que se obtiene en el AFM, se genera mediante la interacción de la muestra con la punta del cantiléver, de este modo se realiza la caracterización del material.

La imagen de topografía nos da información acerca de la rugosidad de la muestra, forma, periodicidad de aspectos superficiales.

Para este estudio, las muestras de SiC estuvo montada sobre la base de un microscopio de fuerza atómica JEOL modelo SPM-5200.

A continuación se describen las condiciones iniciales en las cuales se manejo el AFM para obtener las imágenes de la topografía de la superficie de SiC. En todas las mediciones se aplicó el modo de contacto.

Muestra: Carburo de Silicio (SiC)

Condiciones iniciales de barrido:

Láser: -7.3

Diodo: -2.01 / -1.76

Scan Size: 1.5 μm

Clock: 66.67 μs

Referencia: -1.800 / -1.750

Filtro: 1.0 / 1.2

Loop Gain: 16

A continuación mostraremos unas imágenes de Topografía obtenidas sobre la muestra.

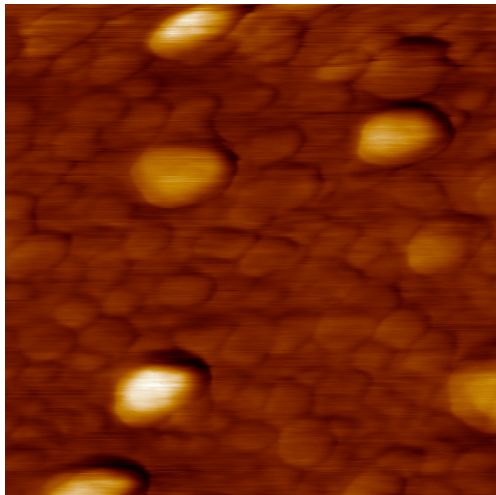


Fig 3.5 Imagen 1de Topografía obtenida en AFM en modo contacto de una muestra de SiC

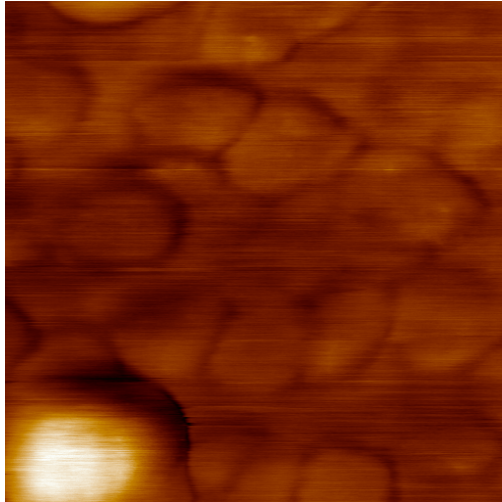


Fig 3.6 Imagen 2 de Topografía obtenida en AFM en modo contacto de una muestra de SiC

En las imágenes anteriores podemos ver como es la topografía real del material, las partes mas claras de la imagen nos indica que estamos ante montañitas o montículos que al realizar el muestreo sobre el material el cantiléver los detecta mas cerca de ella y por eso se ven con esa coloración.

Aun no podemos determinar que es lo que causa estos montículos en el material, pueden ser impurezas obtenidas en el proceso de dopamiento o bien como ya lo mencionábamos antes puntos cuánticos.

Algunas zonas en la imagen se ven un poco más oscuras, estas son pozos cuánticos, mas adelante explicaremos los conceptos de puntos y pozos cuánticos tan mencionados en esta parte.

3.3.2 Imagen de Topografía en 3D

Al igual que en las imágenes de fuerza, se pueden obtener imágenes de 3D de topografía, a continuación mostraremos unas imágenes en 3D de topografía.

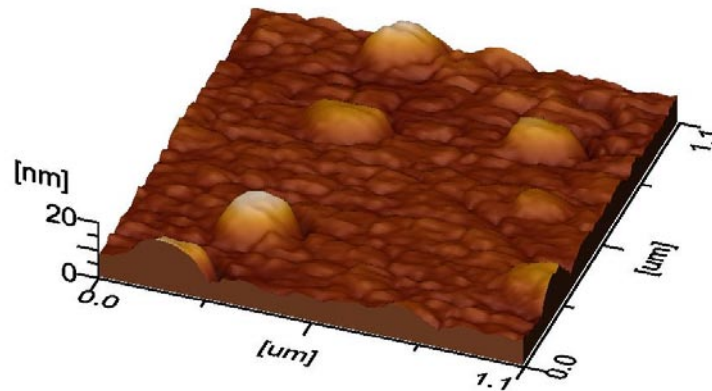


Fig 3.7 Imagen 1 de Topografía en 3D obtenida en AFM en modo de contacto de una muestra de SiC

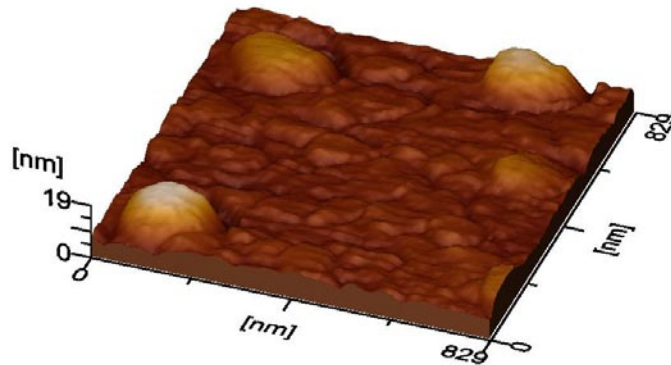


Fig 3.8 Imagen 2 de Topografía en 3D obtenida en AFM en modo de contacto de una muestra de SiC

Capítulo 4 Programa Generado en Matlab

4.1 Introducción

En este capítulo se describe el funcionamiento principal del programa que se generó en Matlab, se presentan los diagramas y ventanas de los que consta el programa, así como su manejo el cuál es muy sencillo.

4.2 Diseño del programa

Para realizar el procesamiento de imágenes se seleccionó el programa de Matlab, debido a la facilidad que nos presenta para realizar procesamiento matemático y por la rapidez con que lo realiza, ya que para procesar las imágenes se requieren implementar muchas ecuaciones matemáticas y resolverlas, si se trabajara en otro software esto nos tomaría más tiempo de ejecución y de procesamiento final.

4.3 Diagramas del programa

A continuación presentaremos los diagramas que se crearon, para el diseño del software, así como para cada uno de los módulos del mismo

4.3.1 Diagrama General

En este diagrama presentamos los módulos que componen el software de procesamiento, creado para analizar específicamente las imágenes obtenidas por el AFM.

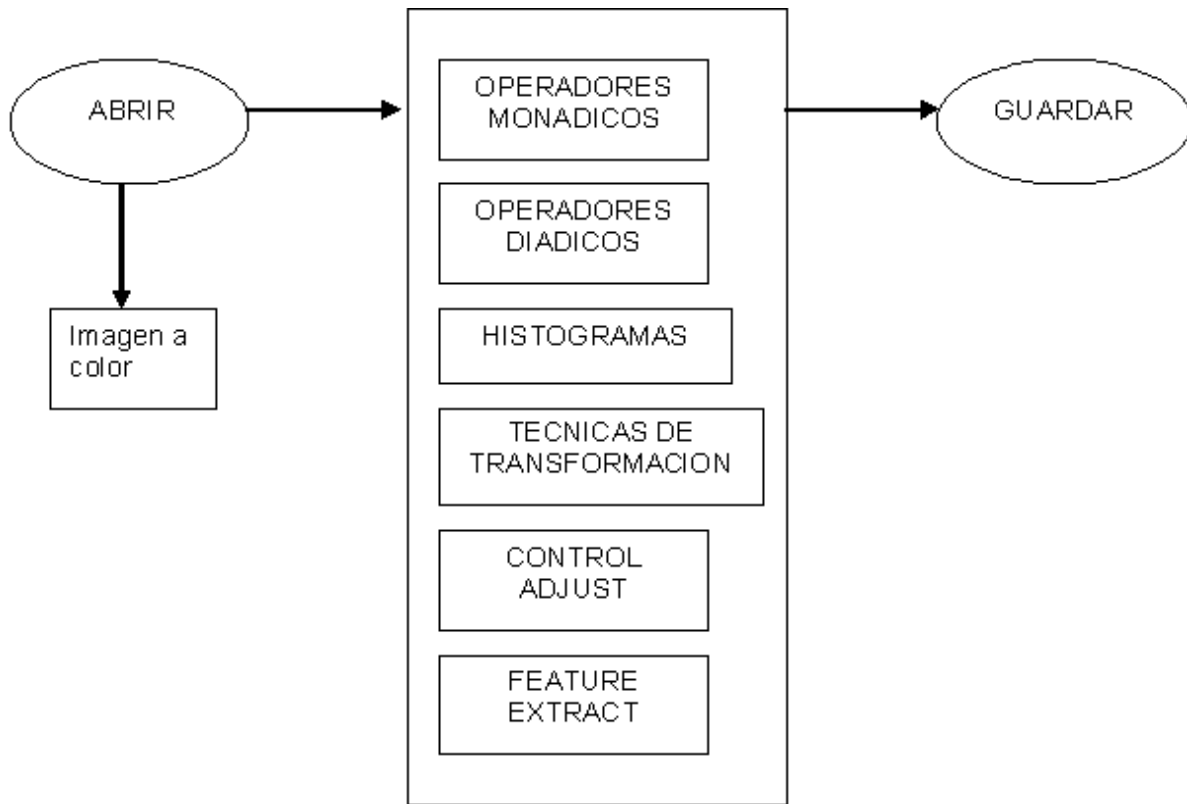


Fig. 4.1 Diagrama General del programa

4.3.1.1 Diagrama de los Operadores Monádicos

A continuación se presentan el diagrama para los operadores monádicos implementados, estos operadores ya se describieron en el capítulo 2. Dirigirse al epígrafe 2.3.1 para mayor referencia.

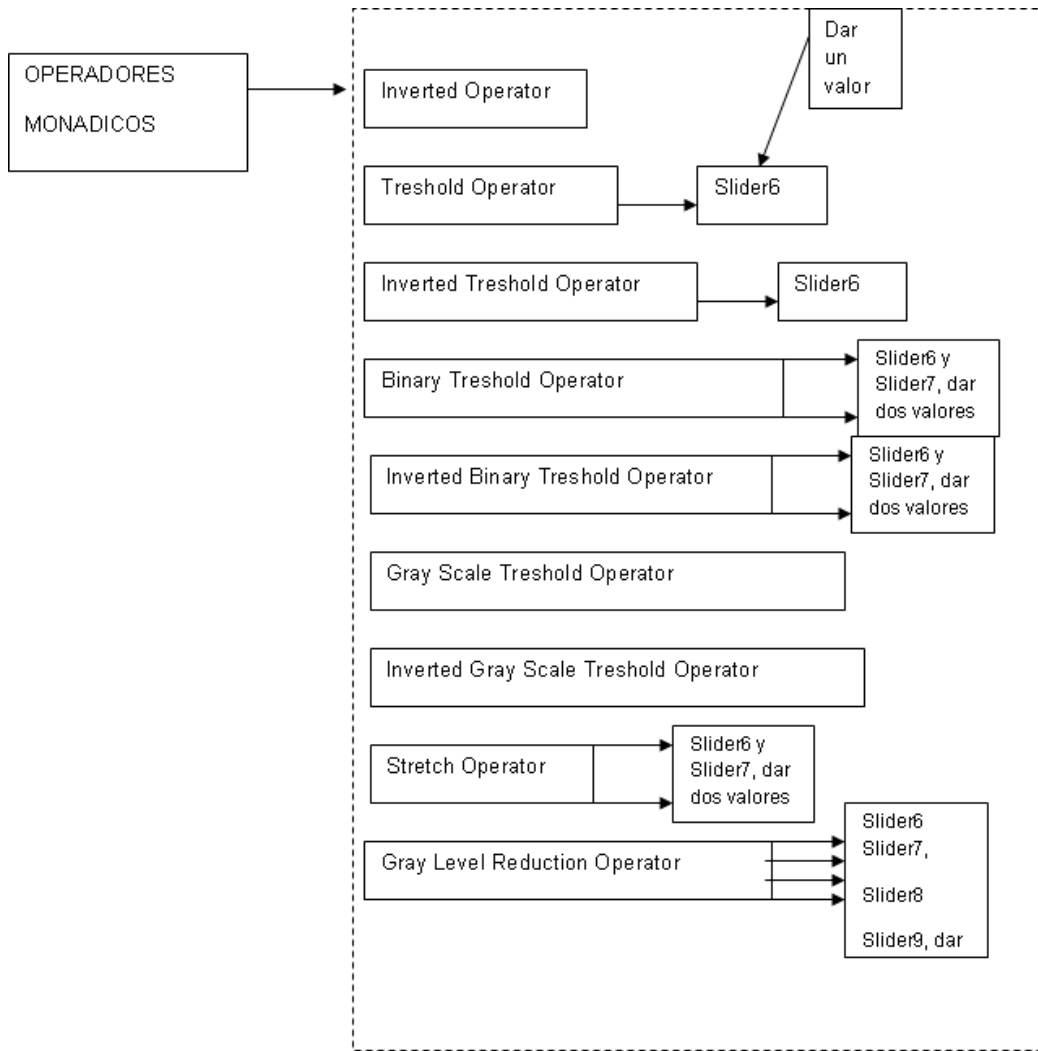


Fig. 4.2 Diagrama de los Operadores Monádicos

4.3.1.2 Diagrama de los operadores Diádicos

Se mostrara el diagrama de los operadores diádicos a continuación, como los anteriores estos también se encuentran descritos en el capítulo 2, epígrafe 2.3.2. Diríjase a esté para mayor referencia y descripción de los operadores

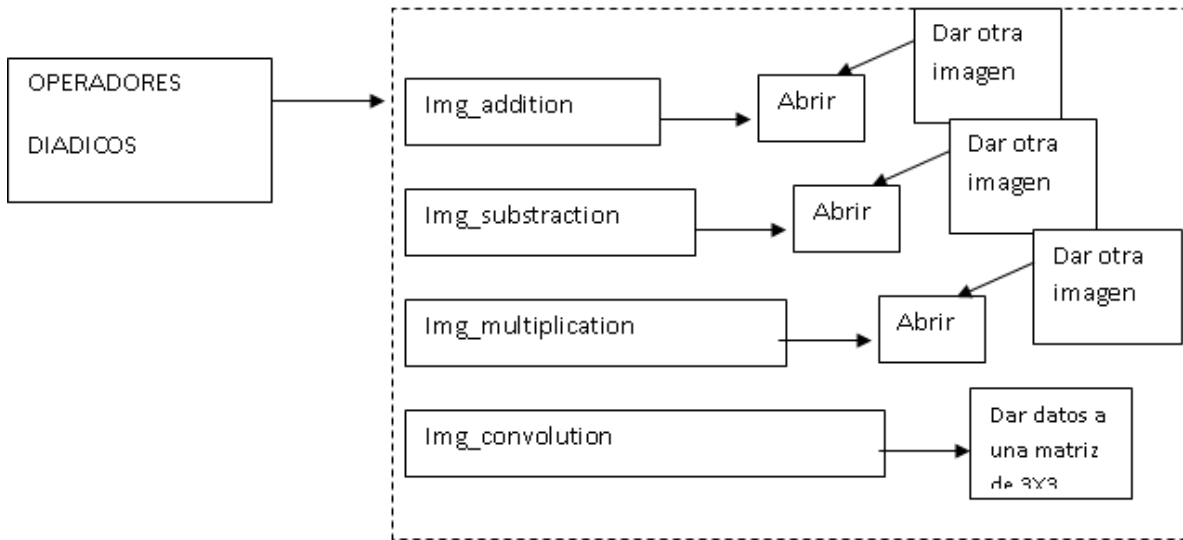


Fig. 4.3 Diagrama de los Operadores Diádicos

4.3.1.3 Diagrama de Técnicas de Transformación

A continuación mostraremos el diagrama de las técnicas de transformación.

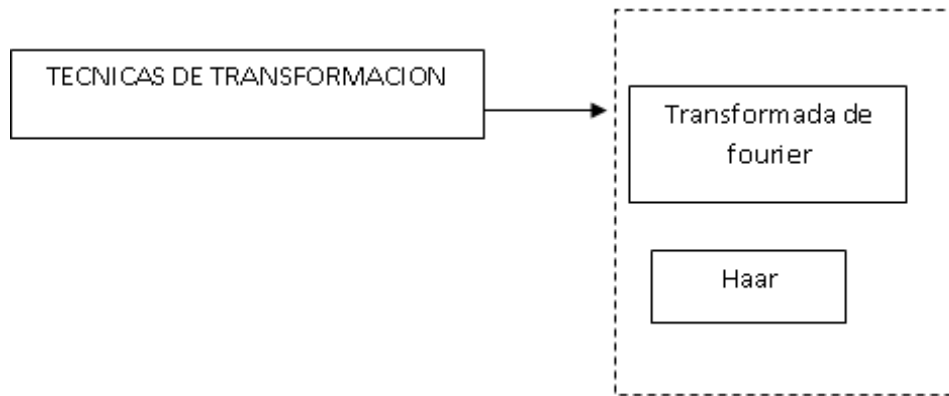


Fig. 4.4 Diagrama de las Técnicas de Transformación

Se implementaron la transformada de Fourier y la transformada Haar de imágenes debido a su eficiencia en cuanto a las operaciones al momento de evaluarlas. La transformada Haar se usa principalmente en la codificación de imágenes.

4.3.1.4 Diagrama de Adjust Control

El siguiente diagrama corresponde a la parte de Adjust Control.

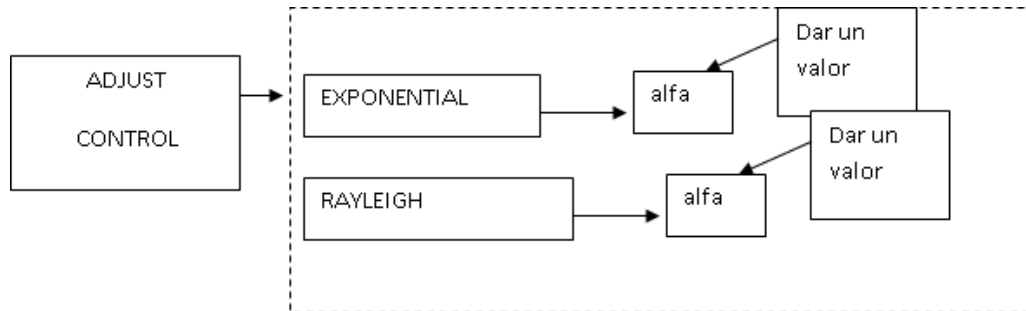


Fig. 4.5 Diagrama de Adjust control

Se usaron las distribuciones Exponencial y Rayleigh para tratar las zonas homogéneas de las imágenes, así como para la obtención de intensidad y amplitud respectivamente

4.3.1.5 Diagrama de Feature Extraction

Por último se presenta el diagrama de Feature Extraction

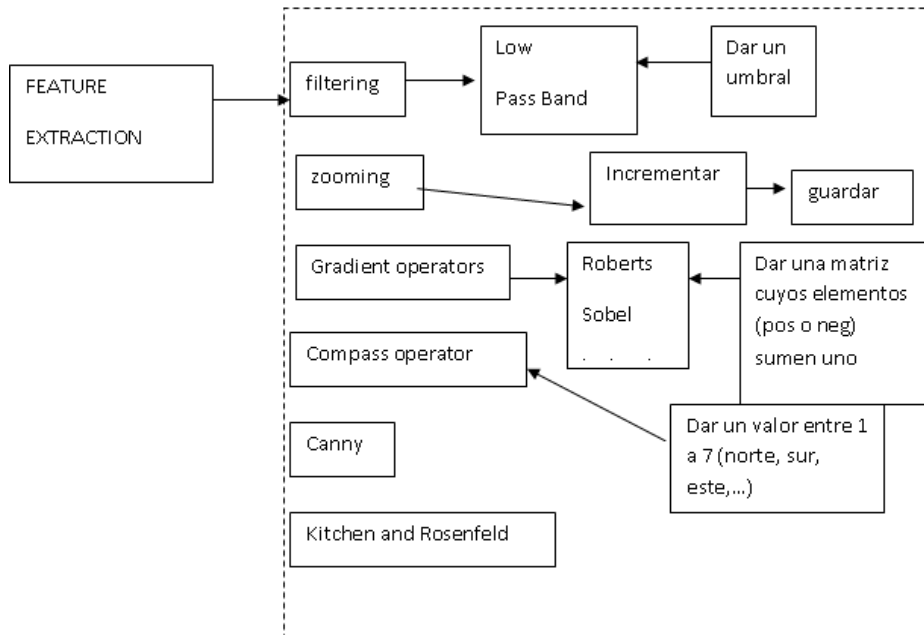


Fig. 4.6 Diagrama de Feature Extraction

En esta parte del programa es donde se aplicaron los filtros, gradientes, el zoom para ciertas áreas de la imagen.

4.4 Pantallas del software

El acceder al programa ejecutable es sencillo, éste se corre desde el editor de Matlab por medio del nombre del mismo. A continuación se muestra la ventana principal del programa en ejecución.

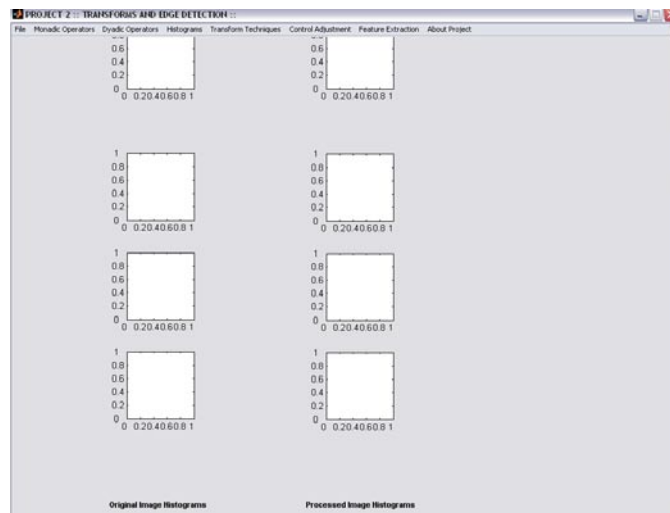


Fig. 4.7 Pantalla principal del programa

El primer menú es file, el cuál nos da las opciones básicas de abrir, guardar imagen, etc., en la figura 4.8 se muestra el despliegue del menú con todas sus opciones. Para iniciar con el manejo del software primeramente se carga la imagen, es decir se selecciona la opción de Open Image y la imagen seleccionada se muestra en pantalla para empezar a utilizarla

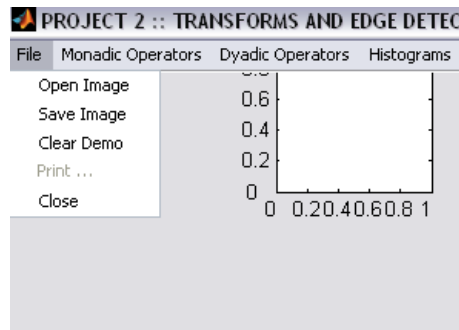


Fig. 4.8 Submenús del menú file

En el menú siguiente ya se empieza a realizar las operaciones con la imagen, las cuales son las operaciones monádicas (de un punto), descritas en el capítulo 2 de este trabajo.

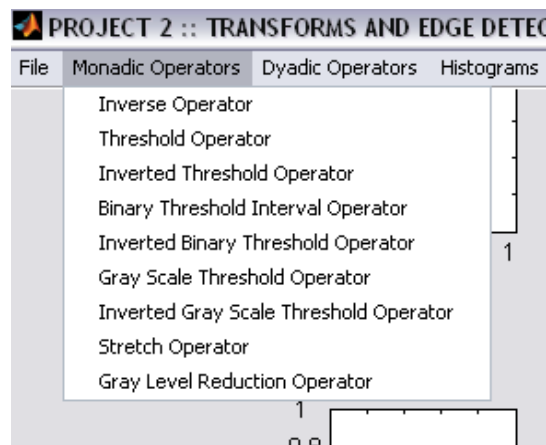


Fig. 4.9 Despliegue del menú de operaciones monádicas

Para empezar a utilizar los operadores monádicos simplemente se selecciona la opción que se desea ejecutar, ya cargando previamente la imagen a procesar.

En el tercer menú tenemos las operaciones monádicas (de dos puntos), las cuales nos permiten el trabajar con 2 imágenes y obtener una tercera a partir de las 2 anteriores, estas operaciones son útiles para realizar comparaciones.

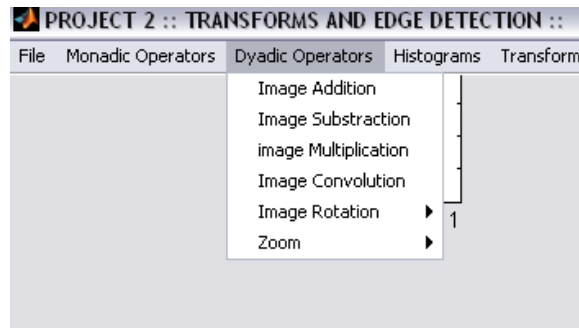


Fig. 4.10 Despliegue del menú de operaciones Diádicas

Las operaciones diádicas, como anteriormente lo comentamos nos sirven para realizar las comparaciones principalmente entre la imagen original y la ya procesada para verificar las mejoras que hubo en la misma.

En el siguiente menú tenemos la representación de los histogramas, la cuál nos ayuda para verificar si cierta información en la imagen es solo un pixelazo o es una deformación en el material.

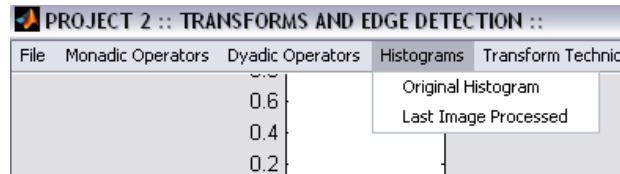


Fig. 4.11 Submenús del menú Histograms

El menú que se presenta a continuación es el de técnicas de transformación.

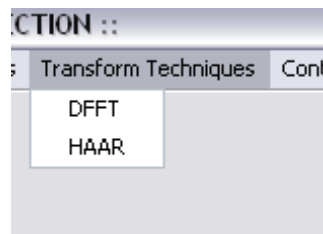


Fig. 4.12 Despliegue del menú de las técnicas de transformación

Debido a la eficiencia en el procesamiento de las operaciones y su implementación, se utilizaron las transformadas de Fourier y de Haar, para aplicarlas a las imágenes

A continuación mostramos el menú de control de ajustes

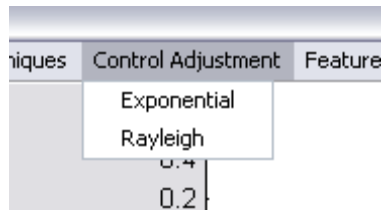


Fig. 4.13 Submenús del menú control Adjustment

Se usaron las distribuciones Exponencial y Rayleigh, para la obtención de intensidad y amplitud respectivamente, ya que parte importante en el tratamiento de nuestras imágenes es el verificar las cualidades físicas del material, y como las imágenes que obtenemos son en un solo color, era necesario dar mayor intensidad en ciertas áreas, así como obtener amplitud en las mismas.

Por último contamos con el menú de extracción de características, donde podemos ubicar a los filtros que se aplican a la imagen.

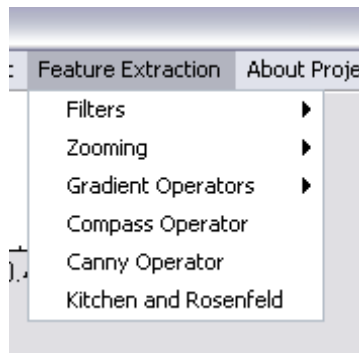


Fig. 4.14 Despliegue del menú de Feature Extraction

4.5 Operación del software.

El manejo de operación de software es muy sencillo se puede resumir en los siguientes pasos.

- Seleccionar el menú file y posteriormente en Open Image.
- Seleccionar la imagen que se quiere procesar.
- Seleccionar el operador o filtro que se quiera aplicar.
- Si se quiere procesar otra imagen, seleccionar en file y en el submenú clear, en caso contrario salir del programa con close.

Resultados

Se obtuvieron muy buenos resultados con el procesamiento de imágenes, ya que para el trabajo de investigación que se esta realizando sobre los semiconductores, nos permite tratar la imagen y obtener mas información acerca de sus características físicas, que no se pueden percibir ene la imagen tal cuál nos la da el software que realiza el barrido de la muestra en el AFM.

La imagen con la cuál vamos a estar trabajando para presentar el software es el siguiente:

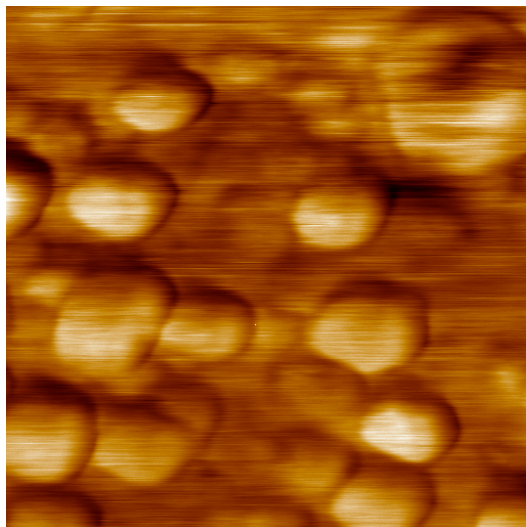


Fig. 1 Imagen obtenida de la muestra de SiC del AFM (Original)

Pantalla principal del programa con la imagen original cargada para trabajar con ella.

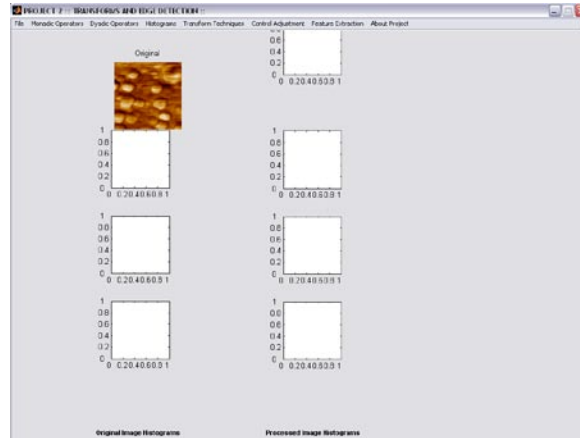


Fig. 2 Pantalla principal con la imagen que se va a procesar

Preprocesamiento

El preprocesamiento de las imágenes consistió en una umbralización para separar las regiones mas iluminadas del fondo, se probó para suavizar la imagen y hacerla mas clara, además de utilizar el gradiente y se probó algunos tipos de filtrado como el filtro pasa bajas y filtrados con máscaras especiales como Isotropic y Sobel.

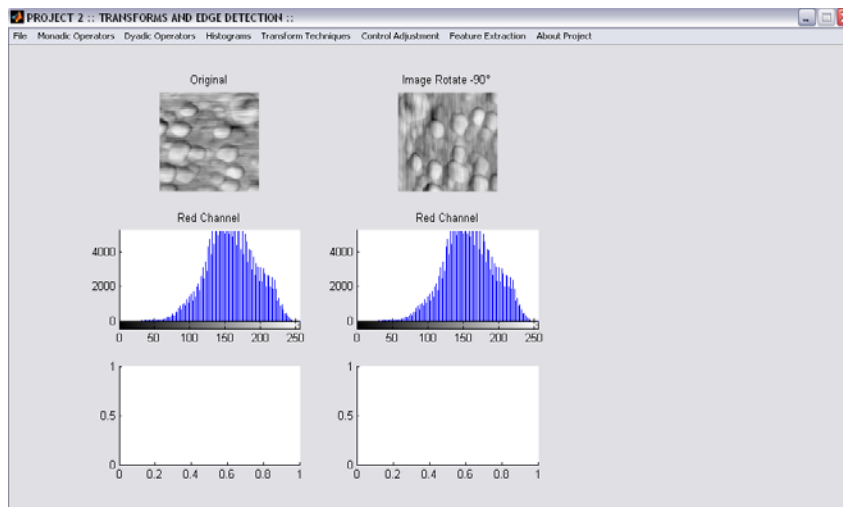


Fig. 3 Preprocesamiento en escala de grises.

SUAVIZADO

Como se puede apreciar en las imágenes siguientes, el aplicar el suavizado a la imagen original, nos da una serie de detalles que por la calidad de la imagen que saca el AFM no se obtienen, al aplicar esta técnica en otras imágenes que se veían aparentemente lisas, nos muestra una rugosidad y ciertos agujeros en la capa exterior del mismo lo cuál puede afectar en un momento dado la conductividad del mismo. Al hacer estos descubrimientos, solo queda el investigar las posibles causas de por que la aparición de esos agujeros en el material.

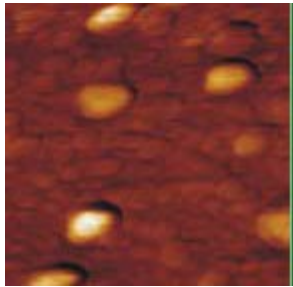


Fig. 4 Imagen Original

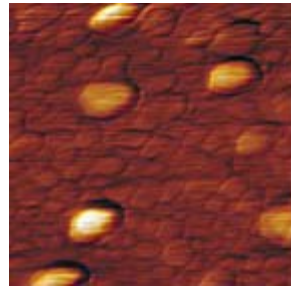


Fig. 5 Imagen Suavizada

Claramente se ve una mejora al procesar la imagen original, ya que el resultado es una mayor definición de los detalles de la imagen.

UMBRALIZACIÓN

El proceso de umbralización y conversión a escala de grises nos permitió extraer los objetos del fondo y detectar ciertos datos de iluminación que no se ven con un procesamiento menos complejo como se muestra en las siguientes figuras.

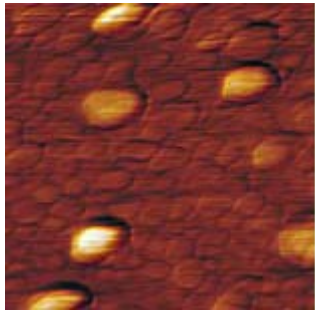


Fig. 6 Imagen Original

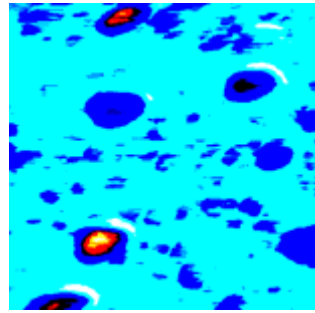


Fig. 7 Imagen Umbralizada

En la imagen umbralizada se detectan ciertas tonalidades amarillas y rojizas, estas nos indican picos dentro de la estructura del material; estos picos son protuberancias que tienen una conductividad mayor que el resto del material, no se sabe aun a ciencia cierta el por que de estas protuberancias; ya que las condiciones en las que se crecen estos materiales, son muy controladas. Cabe la posibilidad que una pequeña partícula, sea capaz de contaminar el material y causar estas anomalías que se detectan o bien una pequeñísima variación en las condiciones de crecimiento también pueden dar estos resultados.

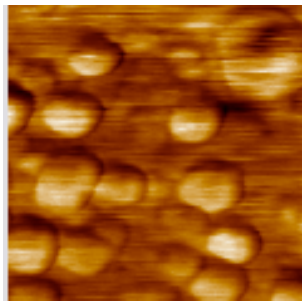


Fig. 8 Imagen Original

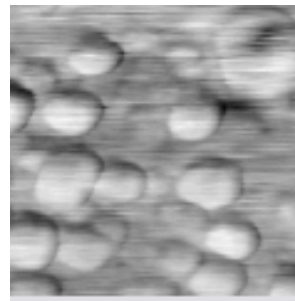


Fig. 9 Imagen en Escala de Grises

El procesado de la imagen en escala de grises, nos da la funcionalidad de que una vez que se tiene la imagen de esta manera; se puede aplicar los filtros para obtener una mejor definición de los contornos y detalles de ciertas zonas

Se opto por manejar las imágenes en tonos de grises, debido a que el software del microscopio nos da todas las imágenes de la muestra en una tonalidad naranja

cobrizo, lo cuál no nos ayuda mucho en el momento del procesado. Ya una vez manejando la imagen en tono de grises se pueden verificar rasgos de la superficie de la imagen que de otra manera no se puede identificar bien que es lo que se observa.

GRADIENTES Y FILTRADOS

El proceso gradientes y filtrados nos arroja resultados interesantes, de acuerdo a los gradientes, las partes sobresalientes de la imagen se muestran mas como valles que como colinas, como se aprecia a simple vista. Se utilizó el compass operator a dirección oeste y con un umbral de 0.9

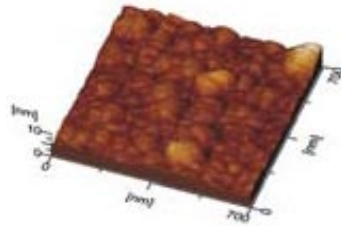


Fig. 10 Imagen Original

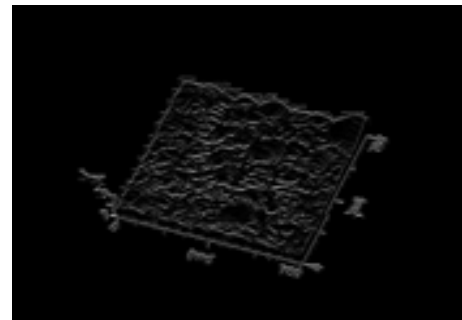


Fig. 11 Imagen Filtrada

La imagen filtrada nos muestra el esqueleto, de la estructura de nuestro material analizado, tomado de una imagen de 3D, estas imágenes tridimensionales, las obtenemos directamente desde el AFM, no es un tratamiento que nosotros hayamos realizado a esta imagen.

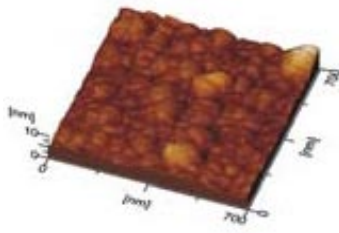


Fig. 12 Imagen Original

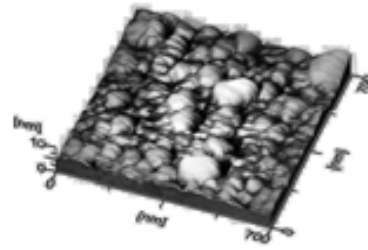


Fig. 13 Imagen en Escala de Grises

Al procesar la imagen y tenerla en escala de grises en la modalidad de 3D, nos da una perspectiva mas amplia de los pozos o huecos que encontramos en el material, y que desde la vista 3D original, podríamos confundir con una sombra de algún valle.

MEDICION DE ALTURAS EN IMÁGENES EN 3D

Aplicando una conversión a escala de grises podemos medir la altura de ciertas regiones en las imágenes como es el caso de la imagen siguiente en el cuadrante derecho superior dentro de una imagen de (1968X1365)

ALTURA MAYOR DENTRO DEL CUADRANTE: 757 pixeles

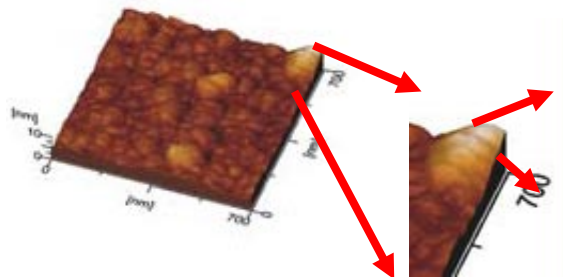


Fig. 14 Obtención de Altura de los valles.

Conclusiones

El procesamiento de estas imágenes nos ayudara para obtener mayor definición en la topografía del SiC y de esta manera tratar de obtener mas información acerca del origen de la estructura tal cual y se conoce; si esto se debe a alguna contaminación por partículas de polvo o deficiencia en el proceso al momento de crear la capa delgada se puede realizar una modificación y obtener una capa delgada con mejores características

Las imágenes de AFM en combinación con un análisis estadístico revelan diferencias distintas en las propiedades estructurales, dependiendo de las regiones escogidas. Esto se refleja particularmente en la distribución de tamaño y altura de los granos, además en la rugosidad RMS (root mean square) y de rugosidad pico-valle R (p-v).

No hay seguridad todavía en los modelos, que explican la formación de embolladuras en la superficie de películas delgadas. Ni siquiera hay estudios sistemáticos con bombardeos de superficies con partículas ionizados revelados los mecanismos para la creación de estos nanodefectos. En la mayoría de las veces ocurren los defectos tras una exposición a partículas e iones con alta energía cinética, que chocan con la superficie [8-12]. Otros casos toman en cuenta impurezas en la interface entre el sustrato y las primeras capas de la película en crecimiento. Un modelo interesante considera tal nombradas 'explosiones colombianos' [10] debido a la creación de pequeños lugares ('spots') cargados por la captura de electrones que vienen con las partículas de choque, y el subsiguiente rearrreglo de los átomos de superficie involucrados. Tanto montecillos como cráteres han sido observados de esta forma. No se puede excluir entre los mecanismos y orígenes de la formación de nanodefectos la actuación de partículas cósmicas en sus choques con la muestra, aunque es tal acercamiento al problema todavía altamente hipotético.

Al estar trabajando en un laboratorio de investigación, y en proyectos de investigación, como parte del equipo de trabajo se da cuenta uno, que hay mucho software de carácter específico por diseñar, ya que dependiendo de la rama y

carácter de la investigación, uno puede diseñar un cierto software que supla las necesidades que se requieren ya que hay muchas aplicaciones que se pueden diseñar, ya que en el mercado no se encuentran o en su defecto si se encuentran son muy caras.

En los años recientes la investigación a nivel mundial esta tomando un carácter interdisciplinario, ya no se queda solamente en trabajar puros biólogos, o químicos, o computólogos, se esta viendo que cada quien puede aportar desde su área de trabajo cosas muy interesantes para enriquecer los trabajos de investigación y dar una nueva perspectiva dentro del laboratorio.

Dentro de nuestro trabajo queda por mejorar el software, hacerlo mas amigable para cualquier persona que lo trabaje y que no tenga conocimientos muy profundos en el área de computación, así como también adaptar cosas nuevas que se vayan requiriendo dentro del proyecto de investigación.

En el procesamiento de la imagen aparte de mejorar el contraste, nitidez, selección de zonas de interés, se requiere calcular área, volumen de los picos y valles, buscar las escaleras o bien ciertos patrones en las imágenes, que nos de una información mas completo de su topografía, lo cuál queda abierto para trabajar en el software.

Bibliografía

- [1] Destriau, G.: J. chem. phys., 34, 327 (1937).
- [2] Lossev, O. W.: Telegrafía y Telefonía, 18, 61 (1932).
- [3] Welker, H.: AIII-BV Halbleiter, Deutsches Patent (1951).
- [4] Schadt, M., Helfrich, W. J.: J. Appl. Phys. Lett., 18, 127 (1971).
- [5] Blinov, L. M., Chigrinov, V. G.: "Electrooptic effects in liquid crystal materials" (ed. Lam and Langevin), Springer Verlag N.Y. 1994.
- [6] Deter, C.: Phys. B1., 52, 1129 (1996).
- [7] Tang, B., Van Slyke: Appl. Phys. Lett., 51, 913 (1989).
- [8] Bradley, R.: Nature, 347, 539 (1990).
- [9] Parker I. D.: J. Appl. Phys., 75, 1656 (1994).
- [10] Wheeler, J. P.: Photonics Spectra, 4, p. 130 (1997).
- [11] Yang, Y.: MRS Bulletin, 22, N° 6 (1997).
- [12] Hermann, M., Sitter, H.: "Molecular Beam Epitaxy", Springer Verlag, ISBN 3-540-19075-9, Berlin-Heidelberg 1989.
- [13] Zehe, A.: "Physics and Technology of Microstructures: Motivation for MBE". in: Crystal Growth of Adv. Mat. (Ed. World Scientific), ISBN 9971-50-730-7, Singapore 1997.
- [14] Ramirez-Bon, R. et al.: J. Phys. Condens. Matter, 9, 10051 (1997).
- [15] Wu, C. W. et al.: Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 281, 57 (1992).
- [16] Brümmer, O.: "Handbuch Fk-Analyse..." Vieweg, Braunschweig 1980.
- [17] Binnig, G., Rohrer, H.: "Scanning Tunneling Microscopy", IBM J. Res. Dev., 30, 355 (1986).
- [18] Wiesendanger, R.: "Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Methods and Applications", Cambridge Univ. Press, Cambridge 1994.

- [19] Hoechst,, A. G.: Deutsche Patentanmeldung DE-A 196 15 128 (1997).
- [20] Hoechst,, A. G.: European Patent EP-A 0676461 (1995).
- [21] Bhanu B., Das S. 2004, Computational Learning for Adaptive Computer Vision, Springer, USA
- [22] Del Bimbo A., 1999, Visual Information retrieval., Morgan Kaufmann Pub. Inc., California.
- [23] Gonzalez R., Woods R., 1992, Digital Image processing, Addison Wesley Pub. Comp. NY, USA
- [24] Fisher R., Perkins S., Walker A. 2003, Image Processing learning resources. Explore with Java HIPR, U.K.
- [25] Fleet D. 1992, Measurement of image velocity. Foreward by Allan Jepson, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts.
- [26] Galbiati J., 1990, Machine Vision and Digital Image Processing Fundamentals, Prentice-Hall, USA.
- [27] Hanjalic A. 2004, Content-Based Analysis of Digital Video, Springer, USA
- [28] Jain R., Kasturi R., Schunck B. 1995, Machine vision, McGraw-Hill, Singapore.
- [29] Jähne B. Haubecker H., 2000, Computer Vision and Applications, Academic Press, NY.
- [30] Kovalerchuk B., Schwing J., 2004, Visual and Spatial Analysis. Advances in Data Mining, Reasoning, and Problem Solving, Springer, USA
- [31] Laplante F., Stoyenko A. 1996, Real-time imaging. Theory, techniques, and applications. IEEE Press, USA.
- [32] Lew M., 2001, Principles of visual information retrieval, Springer-Verlag, N.Y.
- [33] Russ J., 1995, The image processing handbook, CRC Press, Florida, USA
- [34] Seul M., O`Gorman L., Sammon, M. 2001, Practical Algorithms for Image Analysis. description, Examples, and Code, Cambridge Press.
- [35] Shalkof R., 1989, Digital Image Processing and Computer Vision, John Wiley & Sons, Inc., NY.
- [36] Whelan P.F. and Molloy D. 2001, Machine Vision Algorithms in Java: Techniques and Implementation, Springer, USA

[37] Zhou Y., Rama Ch. Artificial 1992, Neural Networks for Computer Vision., Springer-Verlag, NY.

[38] <http://www.jenck.com/shim-spm9500-t.htm>

[39] http://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_de_fuerza_at%C3%B3mica

[40] www.reduaz.mx/eninvie/CDinvie/l_2MicroscopioFA.pdf

[41] www.invenia.es/oai:dialnet.unirioja.es:ART0000074171 - 20k

[42] www.ingenierias.uanl.mx/6/pdf/6_Xavier_Guerrero_et_al_Analisis_de_Superficie.pdf

[43] www.nanopolis.net.

Imágenes

http://www.otticamoreno.it/web2/images/Microscopio-400X_000.jpg

Imágenes de CuInSe_2 realizadas en el AFM del laboratorio de nanotrónica de la BUAP

<http://ict.udlap.mx/people/oleg/docencia/IMAGENES/curso.html>

ANEXO A

ABREVIATURAS USADAS EN EL TEXTO

AES AUGER electron spectroscopy

AFM atomic force microscope

ALE atomic layer epitaxy

AMEL active matrix EL - display

CBD chemical bath deposition

CRT cathode ray tube (tubo de BRAUN)

CVD chemical vapor deposition

EFM electric force microscope

EL electroluminiscencia

FED field emission display

FET field effect transistor

ITO indium tin oxide (Conductor eléctrico transparente).

LCD liquid crystal display

LED light emitting diode

LFM lateral force microscope

LPE liquid phase epitaxy

MBE molecular beam epitaxy

MFM magnetic force microscope

MO metal-orgánico

PLS photoluminescence spectroscopy

PVD physical vapor deposition

RHEED reflected high energy electron diffraction

RTM Raster Tunnel Mikroskop (los inventores son de lengua alemana)

SEM scanning electron microscopy

SIMS secondary ion mass spectrometry

SL super lattice

SPM scanning probe microscope (=RTM)

STM scanning tunneling microscope

TEM transmission electron microscopy

VFD vacuum fluorescence display