

# Estudio de superficies usando un microscopio de efecto túnel (STM)

## A study of surfaces using a scanning tunneling microscope (STM)

Alba Graciela Ávila Bernal<sup>1</sup> y Ruy Sebastián Bonilla Osorio<sup>2</sup>

### RESUMEN

Los microscopios de barrido se han convertido en las manos y los “ojos” de experimentadores de nuestro siglo, son herramientas necesarias en los laboratorios de educación e investigación para la caracterización a nanoescalas. El presente artículo presenta las modificaciones en la implementación electrónica (caracterización de los piezoeléctricos y sistema de barrido) y mecánica (diseño de un sistema de antivibración) de un microscopio de barrido de efecto túnel que han permitido visualización y modificación de superficies a nanoescala. Se describe una metodología para la correcta visualización y caracterización de superficies usando el instrumento implementado, alcanzando la cuantificación bidimensional de características de hasta  $1300\text{nm}^2$ , con resolución  $\sim 15\text{nm}$ . Esta metodología, determinada experimentalmente, tiene en cuenta parámetros críticos para la estabilización de la corriente túnel, como lo son la velocidad de barrido y las geometrías y dimensiones de las agujas del microscopio. La versatilidad del microscopio permite modificar y visualizar los defectos introducidos en muestras de HOPG al aplicar voltajes entre la punta del microscopio y la muestra. Los resultados aquí descritos permiten presentar fácilmente los conceptos de barrido topográfico y litografía.

**Palabras clave:** STM, efecto túnel, piezoeléctrico, control PI, bias, histéresis, deriva.

### ABSTRACT

Sweeping/scanning microscopes have become an experimental scientist's hands and eyes in this century; they have become a powerful and necessary tool for nanoscale characterisation in education and research laboratories all around the world. This article presents the modifications made in the mechanical (isolation or designing an anti-vibration system) and electrical (piezoelectric and scanning system characterisation) implementation of a scanning tunnelling microscope (STM), thereby allowing nanoscale surfaces to be visualised and modified. A methodology for visualising and characterising surfaces using the aforementioned instrument is described, bidimensional quantification of up to  $1,300\text{ nm}^2$ , with  $\sim 15\text{ nm}$  resolution being reached. This experimental methodology took critical parameters for tunnelling current stability into account, such as scanning speed and microscope tip geometry and dimensions. This microscope's versatility allowed defects in highly oriented pyrolytic graphite (HOPG) samples to be modified and visualised by applying a voltage between the tip and the sample. The concepts of topography scanning and lithography can be easily understood by using the instrument implemented here.

**Keywords:** STM, tunnel effect, piezoelectric, PI control, bias, hysteresis, drift.

Recibido: noviembre 25 de 2008

Aceptado: octubre 15 de 2009

### Introducción

El control de la materia a escala atómica es uno de los más importantes retos científicos de los últimos 30 años (Binnig y Rohrer, 1987). Este control hace necesario el desarrollo apropiado de herramientas que permitan observar y cuantificar las modificaciones a pequeñas escalas. Visualización y caracterización han sido las tareas en las que los microscopios de barrido se han concentrado, en especial el microscopio de barrido de efecto túnel (STM, por sus siglas en inglés).

Su funcionamiento fue introducido por Binnig y Rohrer en 1982 (Binnig y Rohrer, 1982), y su importancia fue reconocida cuando en 1986 recibieron el Premio Nobel de Física (Binnig y Rohrer, 1987) gracias a la descripción a escala atómica de una estructura 7

x 7 de silicio usando el microscopio (Binnig y Rohrer, 1983).

La necesidad de un instrumento con el cual realizar espectroscopía local a escala nanométrica fue la motivación principal que dio origen al STM (Binnig y Rohrer, 1987). Su versatilidad se hizo evidente cuando ésta y otras técnicas como la potenciometría y la litografía de barrido fueron realizadas usando el mismo instrumento (Doyen et al., 1990). El STM es principalmente usado como una herramienta de caracterización de superficies con resolución atómica; sin embargo, su experimentación ha demostrado la posibilidad de manipular y crear estructuras de escala nanométrica, dando así la oportunidad de fabricar patrones y geometrías útiles en el posterior diseño de dispositivos electrónicos (Ruess y Oberbeck, 2004).

El avance tecnológico demanda la familiarización y experimenta-

<sup>1</sup> Física, Ingeniera eléctrica y M.Sc., en Ciencia de Ingeniería Electrónica, Universidad de los Andes, Colombia. Ph.D., en filosofía de Física, Universidad de Cambridge, Reino Unido. Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes, Colombia. a-avila@uniandes.edu.co

<sup>2</sup> Ingeniero eléctrico e Ingeniero Electrónico, Universidad de los Andes, Colombia. Fue colaborador en el experimento CMS del LHC, en la Organización Europea para la Investigación Nuclear, Suiza. Estudiante de M.Sc., en Nanotecnología, Dept. Material Science and Metallurgy, Universidad de Cambridge, Reino Unido. bonilla10@gmail.com

ción de las técnicas de microscopía de barrido en los programas de ciencia e ingeniería alrededor del país. Los proyectos que implementan kits de bajo costo constituyen una oportunidad para iniciar el montaje de estos microscopios en universidades. Los kits de STM como el aquí descrito tienen funciones básicas de barrido que pueden ser extendidas de manera tal que el instrumento permita alcanzar resoluciones atómicas (*Interface Physics Group, Online*). La implementación y optimización de este equipo demuestra la posibilidad de “dar a todo el mundo una oportunidad de construir su propia experiencia práctica con el nanomundo” (*Interface Physics Group, Online*), en una de las más reconocidas técnicas de caracterización de superficies; a un costo cientos de veces más bajo que un equipo industrial; en este sentido, los kits generados se constituyen en una útil herramienta para exponer principios de nanotecnología en salones de clase.

En este artículo se da una breve descripción del funcionamiento básico y principios físicos de un microscopio de barrido de efecto túnel. Luego se describen las modificaciones y mejoras realizadas al STM-Uniandes tanto desde el punto de vista electrónico como mecánico y de procedimientos. Finalmente, se exponen los resultados alcanzados en la visualización y modificación de superficies a nanoescala haciendo uso del STM-Uniandes y se presentan las conclusiones y recomendaciones resultado del proyecto.

### Teoría básica de un STM

El STM consiste básicamente en mover controladamente (barrer o escanear) una aguja conductora muy fina, sobre la superficie de la muestra a una corriente de túnel constante, como se muestra en la figura 1 (Binnig y Rohrer, 1982).

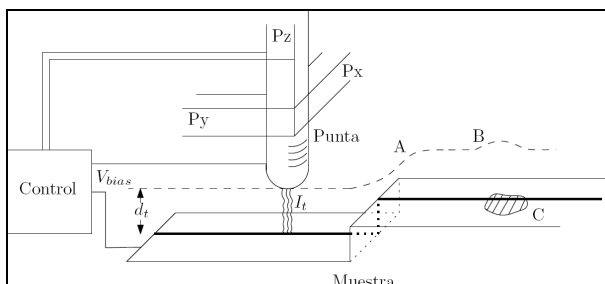


Figura 1. Principio de operación de un STM: una punta muy fina recorre la superficie de la muestra a una corriente de túnel constante. A - Cambio en la topografía. B - Variación de la altura de barrido debido a un cambio en la estructura electrónica C. (Binnig y Rohrer, 1982)

El principio físico de operación del microscopio es el efecto túnel. Si una diferencia de potencial  $V_{bias}$  es aplicada a través de una barrera de potencial (dos electrodos separados una distancia  $d_t$ , existe una corriente de túnel  $I_t$  proporcional a la distancia de separación y a la estructura electrónica de los electrodos (Tersoff y Hamann, 1985).

$$I_t \propto e^{-2\kappa d_t}$$

donde:

$$\kappa^2 = \frac{2m(V_{bias} - E)}{\hbar^2} e^{-2\kappa d_t}$$

Por ejemplo, para  $\frac{2m}{\hbar^2} = 1.025 \frac{1}{\text{Å}^2 \text{eV}}$ , usando la masa del electrón libre como lo es para el caso de vacío, y una barrera de potencial de unos cuantos eV, un cambio monoatómico  $\sim 2 - 5 \text{Å}$  en la distancia de tunelamiento produce un cambio en la corriente de hasta 3 órdenes de magnitud (Binnig y Rohrer, 1982).

Una combinación entre el control de la corriente de túnel y los desplazamientos de la punta de barrido, dados por los voltajes aplicados a los elementos piezoeléctricos ( $P_x$ ,  $P_y$  y  $P_z$  en la figura 1), genera un mapa detallado de isocorrientes que en el caso de los conductores corresponde a un mapa topográfico de la superficie de la muestra (Tersoff y Hamann, 1985). La figura 2 ilustra los componentes básicos necesarios de los que consta un STM.

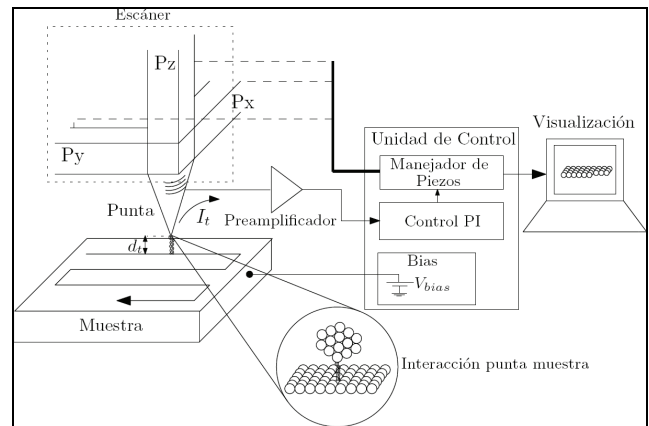


Figura 2. Diagrama de bloques básico de un STM

Dados los elementos expuestos, es necesario tener en cuenta las siguientes condiciones bajo las cuales operan este tipo de equipos:

- $d_t \sim 1 \text{nm}$ , lo cual implica un aislamiento de vibraciones mecánicas suficiente para mantener estable la distancia de tunelamiento, y un control de posición de la punta muy preciso.
- $I_t \sim 1 \text{nA}$ , lo cual requiere una etapa de amplificación bastante alta y un tratamiento de la señal sumamente delicado.
- Las puntas de barrido son uno de los puntos fundamentales en la resolución del instrumento, motivo por lo que éstas se requieren bastante agudas (Tersoff y Lang, 1993; Bernal, 2007).

### Modificaciones hechas al sistema STM-Uniandes y procedimientos

En esta sección se describen los cambios implementados en el kit de construcción, con el fin de obtener la funcionalidad que a la fecha presenta el STM-Uniandes, es decir, la posibilidad de visualizar y modificar superficies a nano escala. Adicionalmente se presentan los procedimientos y metodologías estandarizadas en el uso y aplicación de la herramienta.

#### Modificaciones al sistema mecánico

Se propone un complemento al sistema mecánico descrito en Bernal (2007), el cual, aunque funciona adecuadamente bajo perturbaciones leves, puede ser optimizado en el rango de baja frecuencia. Con este fin se recurrió al uso de los materiales de fácil disposición. El sistema mecánico está entonces basado en el uso de una gran masa inercial suspendida sobre elementos elásticos tal como lo sugieren Oliva y Sosa (1992). Su esquema se describe en la figura. 3.

Los elementos viscoso, elástico e inercial descritos en la figura 3 son respectivamente:

1. Espuma de polietileno Superlon® de Poylon.
2. Cuatro Bolas de polietileno y caucho (pelotas de tenis).
3. Placas de mármol

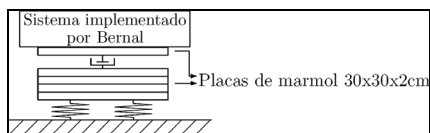


Figura 3. Sistema mecánico complementario implementado para el STM-Uniandes

A pesar de carecer de una simulación o caracterización del sistema mecánico, se puede afirmar la mejora notable en las imágenes tomadas en el sitio donde se ubica el instrumento. A partir de una simulación del sistema de alta frecuencia descrita en Bernal (2007), se estima que este sistema permite filtrar perturbaciones en el orden de  $\sim 10\text{Hz}$ . Para el montaje del microscopio se usaron cables flexibles fijados a diferentes partes mecánicas con el propósito de reducir la transferencia de vibraciones.

### Modificaciones al sistema electrónico

Luego de un análisis y revisión detallados del sistema electrónico propuesto por el *Interface Physics Group* y descrito en (*Interface Physics Group, Online*), se decidió cambiar considerablemente el diseño previamente implementado. Los siguientes puntos motivaron el cambio del sistema:

- Desacople y aislamiento electrónico entre los distintos bloques.
- Falta de linealidad en el restador que obtiene la función de error.
- Rango limitado en el valor de la constante  $K_I$  del control integral.
- No disponibilidad de introducir constante proporcional  $K_P$  al control.
- Respuesta del controlador del piezoeléctrico  $Z$ .
- Largo tiempo de establecimiento de los controladores de los piezoeléctricos  $x$  y  $a$  a respuesta escalón.

Las figuras 4 y 5 ilustran algunas de las fallas encontradas en la versión de STM sugerida por *Interface Physics Group, Online*. Estas fallas fueron corregidas a partir de la nueva implementación electrónica del STM, la cual se describe en R.S. Bonilla (2008).

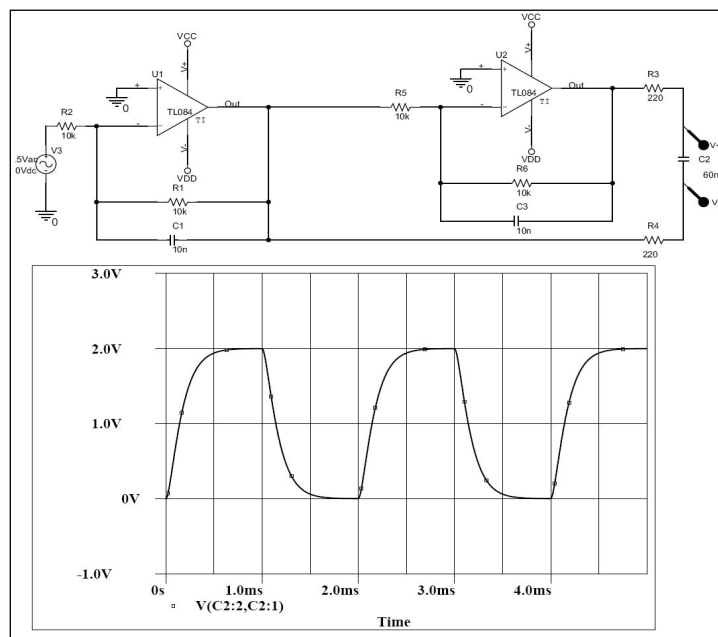


Figura 4. Circuito manejador de piezos sugerido para el STM (*Interface Physics Group, Online*), incluyendo la simulación en OrCAD de su respuesta escalón para una carga capacitiva de 70nF (*Piezomechanik, Online*)

### Procedimiento de barrido

La experimentación con el *kit* previamente implementado dio lugar a una depuración de fallas tanto en el diseño como en el procedimiento seguido para barrer una muestra específica. Al procedimiento de barrido descrito en Bernal (2007) se le hacen las siguientes modificaciones:

*-Instrumentación necesaria.* Se requiere de los medios electrónicos para observar 3 señales de voltaje entre 50 y 5.000 mV (i.e. 2 osciloscopios digitales); y una fuente dual  $\pm 15V_{DC}$ .

*-Señales observadas.* Las señales de interés son la corriente de túnel (salida del preamplificador), la corriente de referencia y el voltaje positivo del piezoeléctrico  $Z$  referido a tierra. Todas se encuentran en un rango de  $\pm 12V_{DC}$ .

*-Nivel de barrido.* Se debe procurar que cuando la aguja entre en régimen de tunelamiento las dos placas posicionadoras se encuentren lo más paralelas posible de tal forma que el barrido sea absolutamente horizontal.

### Procedimiento de modificación superficial

El procedimiento de modificación superficial seguido está basado en la experimentación hasta ahora reportada en la literatura. Se realiza una variación de la técnica mencionada en Albrecht y Dovek (1989) y Robin *et al.* (1992), en la cual se aplican pulsos rectangulares de voltaje punta-muestra de entre 1.5-3 V y duración promedio de 250  $\mu\text{s}$ , con el fin de modificar permanentemente la superficie de la muestra. Se adapta entonces esta técnica a la disposición local del equipo y se produce el siguiente procedimiento de modificación de superficies a nanoescala con el STM-Uniandes:

1. Barrer la muestra al menos dos veces, identificando detalles superficiales que permitan ubicar espacialmente las estructuras a fabricar.
2. Al iniciar un nuevo barrido, reducir la ventana a 0nm, posicionar la punta de barrido en el sitio deseado y aplicar un pulso de voltaje manualmente conforme lo ilustra la figura 6.
3. Aumentar la ventana de barrido al rango máximo (i.e. 1.300 nm).
4. Terminar el barrido en curso, y realizar un barrido posterior con el fin de observar y cuantificar la modificación realizada.

## Resultados

### Visualización de superficies a nanoescala

Siguiendo el procedimiento descrito por Bernal (2007) y aplicando las modificaciones expuestas en la sección anterior, se efectuaron barridos repetibles sobre una muestra de calibración de oro depositado sobre policarbonato ilustrada en la figura 7. La validez de estas imágenes se basa en:

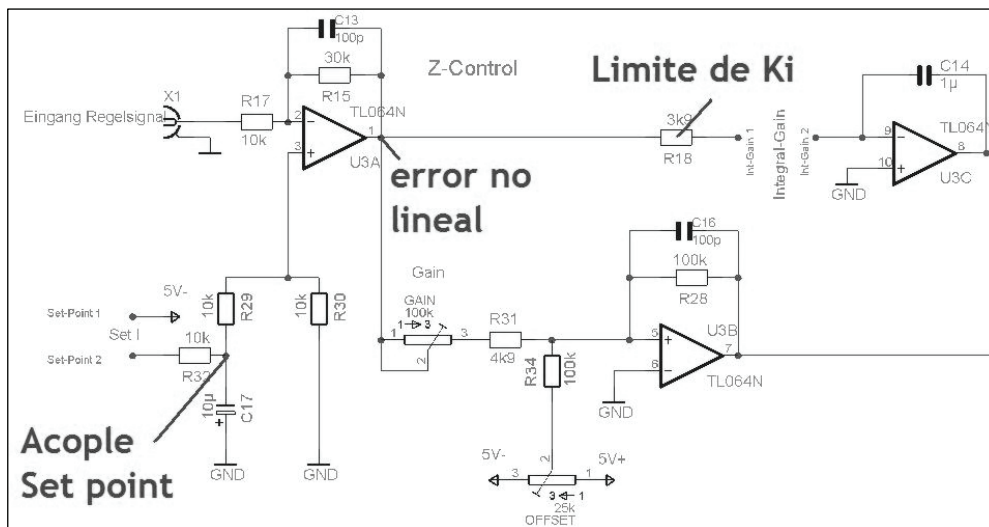
- Su similitud con la figura original provista por el fabricante.
- Reproducibilidad del barrido para diferentes direcciones de barrido y diversos materiales de la punta.

Las imágenes aquí presentadas siempre se realizaron siguiendo la metodología de Bernal (2007), la cual implica:

- Barrer unidireccionalmente para minimizar la distorsión causada

por la histéresis.  
 -Utilizar un  $V_{bias}$  del orden de 200 mV.

cuadamente, se lleva a cabo un procesamiento usando MATLAB® e ImageJ®, para dar lugar a la figura 9.



Barridos en variadas direcciones sobre esta muestra evidencian la misma periodicidad en las imágenes. Las diferencias entre la figura referencia del fabricante y los barridos del microscopio se atribuyen a la deriva e histéresis de los piezoeléctricos, como se explica en la siguiente subsección.

**Cuantificación, histéresis y distorsión**

Con el objeto de que el STM-Uniandes se considere una herramienta completa de caracterización, es necesaria la cuantificación tridimensional de la superficie observada. La situación respecto a los ejes longitudinales x,y

se considera satisfactoria, pues en este caso la calibración del instrumento muestra que efectivamente el área barrida tiene las dimensiones adecuadas de  $1.300 \text{ nm} \pm 130$ . La calibración del STM-Uniandes se hizo con base a la hoja de datos de los elementos piezoeléctricos que componen el escáner. Con base en la figura 23 de *Piezomechanik, Online*, el movimiento de los piezos para la actuación bipolar usada en el proyecto es de  $1.300 \text{ nm} \pm 130$  para una polarización de  $\pm 20\text{V}$ . Los tamaños de cuadro para valores más pequeños de voltaje son calculados linealmente a partir del máximo mencionado.

Figura 5. Circuito de control I sugerido para el STM (Interface Physics Group, Online)

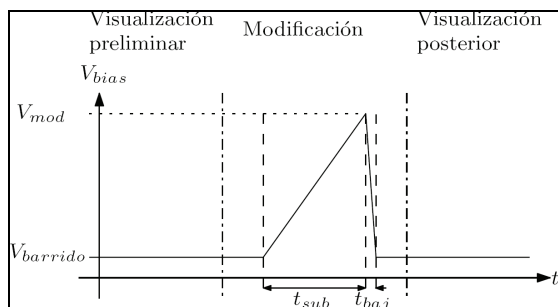


Figura 6. Metodología de modificación superficial a nanoescala

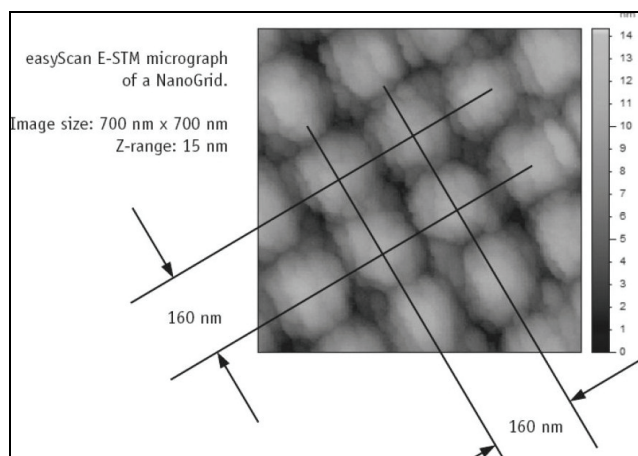


Figura 7. Imagen de referencia del fabricante del NanoGrid 160: T (Nanosurf®, 2008) .Tomada con Nanosurf easyScan E-STM

La figura 8 ilustra las imágenes producidas a partir del software SPM4All 3.5, provisto por el Interface Physics Group en (Interface Physics Group, Online), al barrir la muestra de calibración mencionada. Imágenes similares fueron obtenidas en varios experimentos, garantizando la confiabilidad del instrumento.

Con el fin de eliminar la pendiente de la imagen y visualizarla ade-

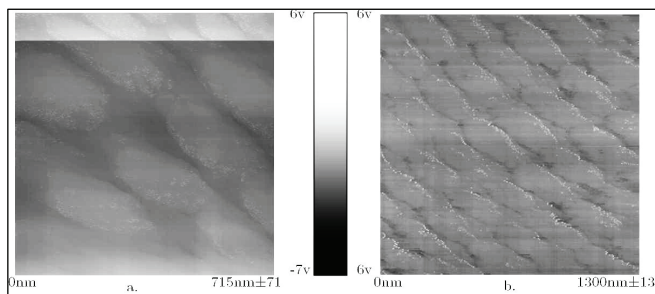


Figura 8. Barrido de muestra NanoGrid 160:T, Nanosurf. Barridos desde arriba e izquierda. a.  $V_{bias} = 200 \text{ mV}$ ,  $I_{ref} \sim 1.4 \text{ nA}$ ,  $v_{barrido} = 5 \text{ Hz}$ , punta estándar de  $W(r \sim 300 \text{ nm})$ . b.  $V_{bias} = 200 \text{ mV}$ ,  $I_{ref} \sim 1.5 \text{ nA}$ ,  $v_{barrido} = 1 \text{ Hz}$ , punta estándar de  $W(r \sim 300 \text{ nm})$ .

Un ejemplo de la fiabilidad del microscopio es la comparación directa entre las figuras 7 y 8. En éstas el patrón observado es el mismo y sí se describe cualitativamente la topografía de la superficie. Cabe notar que en las figuras mencionadas sólo se ha conservado el barrido y la escala de grises provista por el software SPM4All 3.5, puesto que se ha llegado a nuevas conclusiones con respecto a la ventana de barrido.

Esta situación es diferente para la cuantificación en el eje vertical z. En este caso la herramienta no presenta un funcionamiento óptimo, pues aunque las superficies observadas siempre revelan las mismas características en el barrido, la escala en z no está adecuadamente calibrada y aún no se puede hacer afirmación alguna sobre la "altura" de los defectos observados.

Un punto crítico en el funcionamiento del microscopio es la velocidad con la cual la muestra es escaneada. Como se mencionó, la

corriente de túnel puede cambiar en varios órdenes de magnitud con tan sólo la variación de un nanómetro en la distancia de tuneamiento. Esta característica en la interacción punta-muestra, además de la influencia de la geometría de la punta y la amplificación de corriente, constituyen una planta no caracterizada y bastante difícil de controlar.

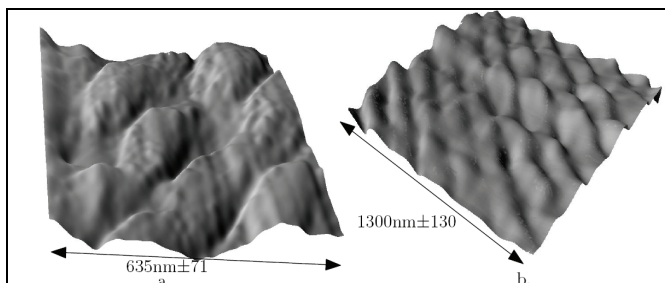


Figura 9. Imagen procesada en 3D del barrido sobre grid de oro. a.  $V_{\text{bias}}=200\text{mV}$ ,  $I_{\text{ref}}\sim 1.4\text{nA}$ ,  $V_{\text{barrido}}=5\text{Hz}$  b.  $V_{\text{bias}}=200\text{mV}$ ,  $I_{\text{ref}}\sim 1.5\text{nA}$ ,  $V_{\text{barrido}}=1\text{Hz}$ , Punta estándar de W( $r\sim 300\text{nm}$ ). ImageJ®

Es deseable entonces que el barrido se haga lo suficientemente lento para no afectar la respuesta del control. Un barrido de alrededor de 0,1 Hz en la señal más rápida se considera adecuado. No obstante, gran cantidad de la experimentación aquí presentada se llevó a cabo a 5 Hz, de forma tal que los resultados de la altura en z sólo constituyen la respuesta del control a excitaciones impulsivas.

Experimentación adicional fue llevada a cabo a una velocidad de 0.2 Hz revelando que cuando se controla completamente la corriente de túnel la señal en el piezo z describe adecuadamente la topografía de la superficie; pero, dadas las características de la muestra de calibración, estas imágenes se consideran útiles únicamente bajo un análisis profundo de ellas. Esto se debe a que un cambio de 14 nm del piezoeléctrico z sólo produce  $\sim 200$  mV de cambio en una escala de 256 grises entre  $\pm 10\text{V}$ .

Otra característica fundamental en el trabajo con esta herramienta es la distorsión introducida a las imágenes por efectos de deriva e histéresis en los piezoeléctricos. Como se ha mencionado, los barridos son llevados a cabo unidireccionalmente de tal manera que se minimice la distorsión introducida en ellos por efectos de histéresis. Por esta razón, los cambios de forma observados entre las figuras 7 y 8 son atribuidos principalmente al fenómeno de deriva.

Con el fin de caracterizar que tanta distorsión introducen estos fenómenos, se pueden comparar cualitativamente dos imágenes tomadas sucesivamente hacia abajo y hacia arriba (Figura 10). En estas imágenes se debe apreciar la distorsión introducida tanto por el piezo x como por el y. En el caso del piezo x se ve únicamente la distorsión introducida en una sola dirección, mientras que los dos barridos ilustran el comportamiento del piezo y bidireccionalmente.

Con el fin de cuantizar esta distorsión se generó un código en Matlab con el que fuese posible aplicar controladamente diferentes barridos distorsionados a un grid similar al Nanosurf 160 T de Nanosurf.

El código generado:

- Crea un grid similar al trabajado.
- Se rota este grid con el objeto de asemejarlo a los barridos realizados con el STM-Uniandes.
- Aplica barridos en (x, y), siendo x la señal rápida y y la señal lenta,

como se ilustra en la figura 11.

-La figura 11 ilustra el efecto de la histéresis en dos barridos consecutivos.

- La Figura 12a ilustra las curvas de deriva aplicadas al grid simulado para generar la distorsión de la Figura 12b.

### Modificación de superficies a nano escala

La nanofabricación se refiere a las herramientas y técnicas que pueden ser usadas para cambiar la estructura o propiedades de la materia a escala nanométrica (Shedd, 1990). En este sentido, la metodología expuesta en el capítulo anterior hace parte de una técnica de nanofabricación. La técnica de microscopía aquí presentada permite la modificación y visualización de superficies a nanoescala, *in situ*, lo cual provee un conocimiento inmediato de la modificación o la estructura fabricada (Shedd, 1990).

Siguiendo la metodología de visualización se llevaron a cabo múltiples experimentos sobre una muestra de grafito pirolítico de alto ordenamiento (HOPG). La muestra fue oxidada electroquímicamente al aplicar un voltaje  $V_m$  entre la punta y la muestra. Los voltajes negativos tienden a depositar material sobre el electrodo con menos voltaje (Albrecht y Dovek, 1989). De las figuras 13 y 14 se pueden observar los huecos fabricados sobre la superficie de la muestra.

### Conclusiones

Las modificaciones electrónicas introducidas al microscopio de barrido de efecto túnel y presentadas en este trabajo permitieron un mejor control de las señales enviadas a los piezoeléctricos, un desacople entre los diferentes bloques electrónicos y el control de las velocidades de barrido sobre la muestra. Por otra parte, las modificaciones mecánicas introducidas permitieron filtrar perturbaciones mecánicas dentro del rango de los 10 Hz. Los resultados reproducibles de barrido sobre muestras de HOPG justifican la eficacia de las modificaciones al microscopio y permiten extender sus aplicaciones para modificación de superficies a pequeñas escalas sobre barridos de  $1.300\text{ nm}^2$ .

Se introduce una metodología para la deposición de material de las agujas de *PtIr* sobre HOPG controlando la velocidad de barrido y el voltaje de excitación entre la aguja y la muestra. Al ser los defectos más grandes que los diámetros de las agujas, el microscopio versátilmente permite modificación y visualización del defecto creado en la superficie. Las imágenes obtenidas con el STM introducido en este trabajo permiten familiarizar fácilmente a los estudiantes e investigadores con técnicas de barrido a un bajo costo. El STM descrito fue completamente implementado con elementos y dispositivos que se consiguen a nivel nacional.

El trabajo futuro se concentrará en la caracterización por técnicas de contacto y no contacto de las estructuras fabricadas por microscopía de fuerza atómica, con el fin de validar los tamaños y su característica de remoción o adición de material sobre la superficie, para cada condición experimental de fabricación. Estas modificaciones superficiales se pueden investigar para una gama diferente de materiales en presencia de diversos medios –e.g., líquidos, no polares, o agua desionizada–.

### Agradecimientos

Al Grupo de Ingeniería Biomédica de la Universidad de los Andes, por su colaboración con la microscopía óptica. Al Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido de la Universidad Nacional, sede Bogotá. Al grupo de CMUA y sus miembros quienes han traba-

jado y mantienen este proyecto activo. A Rodrigo Bernal M., quien con enriquecedoras discusiones aportó grandes ideas al proyecto.

**Nomenclatura**

Símbolo	Definición
$I_t$ [nA]	Corriente de túnel
$k$ [1/nm]	Constante de onda
$m$ [kg]	Masa
$V_{bias}$ [V]	Voltaje de polarización
$E$ [eV]	Energía cinética
$h$ [eV.s]	Constante de Planck
$\text{Å}$ [ $1 \times 10^{-10} \text{m}$ ]	Amstrong (SI)
$P_i$	Piezoelectrico $i$
$d_i$ [nm]	Distancia de tunelamiento
$I_{ref}$ [nA]	Corriente de referencia del control PI
$r$ [nm]	Radio de punta
$W$	Tungsteno
$P_{tIr}$	Platino Iridio
$v_{barrido}$ [m/s o hz]	Velocidad de barrido del escáner en el STM

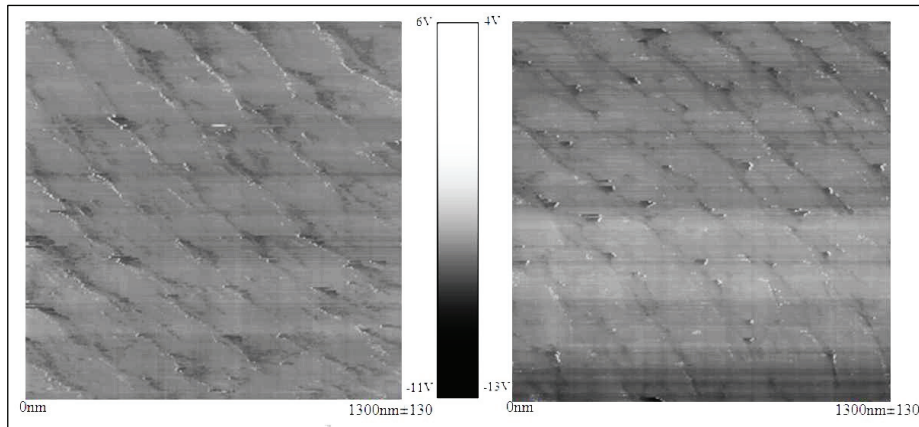


Figura 10. Dos barridos consecutivos del NanoGrid 160:T, Nanosurf. Barridos desde la izquierda.  $V_{bias} = 200 \text{ mV}$   $I_{ref} \sim 1 \text{ nA}$ . Izquierda: barrido hacia abajo, derecha: barrido hacia arriba.

**Bibliografía**

Albrecht, T. R., Dovek, M. M., Kirk, M. D., Lang, C. A., Quate, C. F., Smith, D. P. E., Nanometer-scale hole formation on graphite using a scanning tunneling microscope., *Applied Physics Letters*, Vol. 55, Oct. 1989, pp. 1727–1729.

Binnig, G., Rohrer, H., Scanning tunneling microscopy—from birth to adolescence., *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 59, No. 3, Jul 1987, pp. 615–625.

Binnig, G. Rohrer, H. Gerber, C., Weibel, E., Surface studies by scanning tunneling microscopy., *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 49, No. 1, Jul 1982, pp. 57– 1.

Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, C., Weibel, E., 7 x 7 reconstruction on si(111) resolved in real space., *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 50, No. 2, Jan 1983, pp. 120–123.

Bonilla, R. S., Visualización y modificación de superficies a nanoescala usando un microscopio de efecto túnel., Tesis de Grado presentada a la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, Para optar por el título de Ingeniero Electrónico, 2008.

Doyen, J. P. V. G., Koetter, E., Scheffler, M., Theory of scanning tunneling microscopy., *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, Vol. 51, Oct. 1990, pp. 281–288. Disponible en: <http://www.springerlink.com/content/132785615376810k>

Interface physics group, westfälische wilhelms-universität., SXM proyect: Scanning tunneling microscope, construction kit. Disponible en: <http://sxm4.uni-muenster.de/introduction-en.html>

Montoya, R. B., Fabricación de nanoestructuras usando un microscopio de efecto túnel: Una primera exploración., Tesis de Grado presentada a la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, Para optar por el título de Ingeniero Electrónico, 2007.

N. AG, NanoGrid 160: T, Datasheet. Nanosurf AG, Switzerland - BT01172, 2004.

Oliva, A. I., Sosa, V., de Coss, R., Sosa, R., López Salazar, N., Peña, J. L., Vibration isolation analysis for a scanning tunneling microscope., *Review of Scientific Instruments*, Vol. 63, June 1992, pp. 3326–3329.

Piezomechanik · Dr. Lutz Pickelmann GmbH. Low voltage co-fired multilayer stacks, rings and chips for actuation. [Online]. Disponible en: [www.piezomechanik.com/f/core/frontend/http.php?dl=67-file-1](http://www.piezomechanik.com/f/core/frontend/http.php?dl=67-file-1)

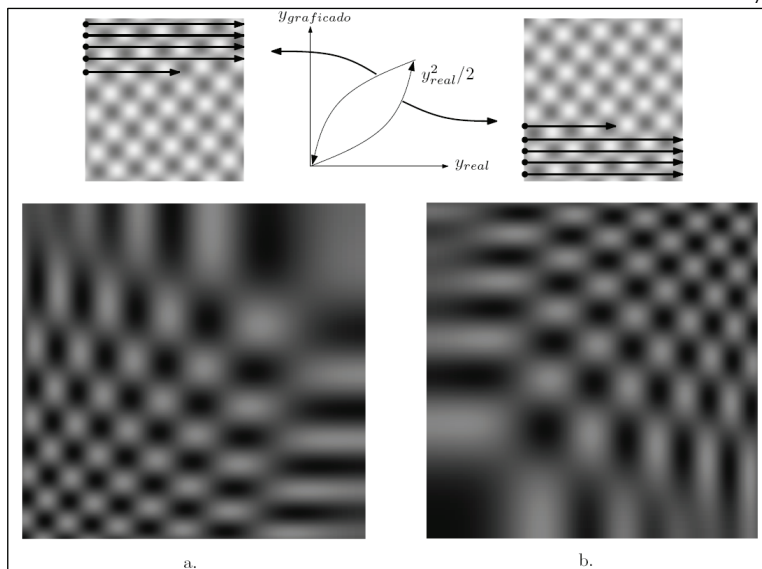


Figura 11. Cuantificación en Matlab® de la histeresis de los piezos a partir de la aplicación de un barrido con histeresis  $x^2/2$ , a la función  $z = f(x,y) = \sin(x) + \cos(y)$  rotada  $5\pi/18$ . a. Barrido hacia abajo, b. Barrido hacia arriba.

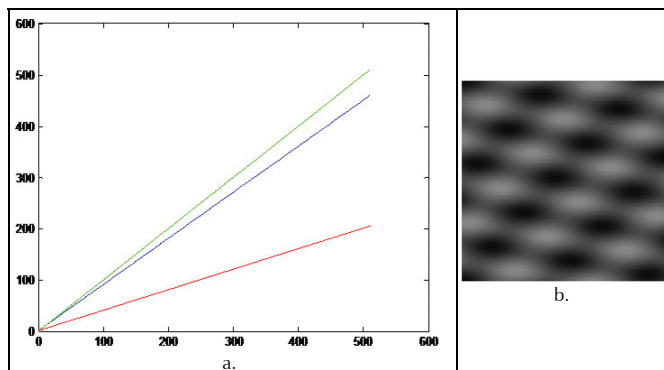


Figura 12. a. Curvas de distorsión aplicadas al grid simulado en Matlab. En el eje y el valor dibujado, en el eje x el valor real (tanto para el barrido en  $x$  como para  $y$ ). En verde un barrido completamente lineal, en azul la deriva aplicada al eje  $y$  y en rojo la deriva aplicada al eje  $x$ . b. Barrido con distorsión especificada en a. del Grid original simulado en Matlab, girado 22 grados en el sentido de las manecillas del reloj (Figura 11)

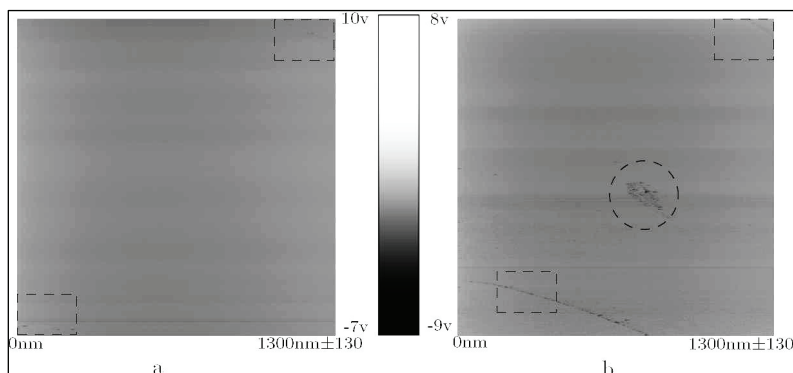


Figura 13. Modificación superficial a nanoescala sobre HOPG.  $V_{\text{bias}} = 200 \text{ mV}$ ,  $I_{\text{ref}} \sim 1 \text{ nA}$ ,  $V_{\text{barrido}} = 5 \text{ Hz}$ ,  $V_{\text{mod}} = 3 \text{ V}$ ,  $t_{\text{sub}} \approx 4 \text{ s}$ ,  $t_{\text{baj}} \approx 0.5 \text{ s}$ , punta estándar de W ( $r \approx 300 \text{ nm}$ ). a. Barrido previo, b. Modificación realizada.

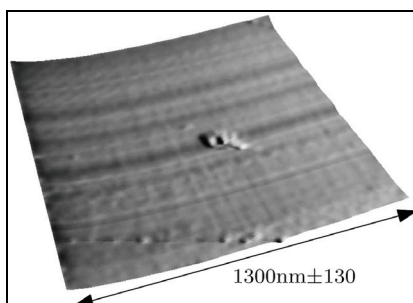


Figura 14. Imagen 3D de la modificación ilustrada en la figura 13. ImageJ®

Robin, S. A. H., McCarley, L., Bard, A. J., Controlled nanofabrication of highly oriented pyrolytic graphite with the scanning tunneling microscope., *J. Phys. Chem.*, Vol. 96, No. 25, Jan. 1992, pp. 10089–10092.

Rogers, B. L., Shapter, J. G., Skinner, W. M., Gascoigne, K., A method for production of cheap, reliable pt-ir tips., *Review of Scientific Instruments*, Vol. 71, No. 4, 2000, pp. 1702–1705. Disponible en: <http://link.aip.org/link/?RSI/71/1702/1>

Ruess, F., Oberbeck, L., Simmons, M., Goh, K., Hamilton, A., Hallam, T., Schofield, S., Curson, N., Clark, R., Toward atomic-scale device fabrication in silicon using scanning probe microscopy., *Nano Letters*, Vol. 4, No. 10, 2004, pp. 1969–1973. Disponible en: [http://pubs3.acs.org/acs/journals/doi/lookup?in\\_doi=10.1021/nl048808v](http://pubs3.acs.org/acs/journals/doi/lookup?in_doi=10.1021/nl048808v)

Sarmiento, A. F., Implementación de un microscopio de efecto túnel (STM). Tesis de Grado presentada a la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, Para optar por el título de Ingeniero Electrónico, 2007.

Shedd, P. R. G M., The scanning tunneling microscope as a tool for nanofabrication., *Nanotechnology*, Vol. 1, No. 1, 1990, pp. 67–80.

Tersoff, J., Hamann, D. R., Theory of the scanning tunneling microscope., *Phys. Rev. B*, Vol. 31, No. 2, Jan. 1985, pp. 805–813.

Tersoff, J., Lang, N. D., Theory of scanning tunneling microscope., in *Scanning Tunneling Microscope*, J. A. Stroscio and W. J. Kaiser, Eds., Academic Press Inc., Vol. 27. 1993.