

Medidas topográficas en superficies atómicamente planas en condiciones ambiente mediante un microscopio de efecto túnel, un enfoque didáctico

Topographical measurements on atomically flat surfaces at room conditions through scanning tunneling microscope, a didactic insight

Medidas topográficas em superfícies atómicamente planas em condições ambiente através de um microscópio de tunelamento quântico, um enfoque didático

Lilliana Delgado-Jiménez

lilliana.d.jimenez@gmail.com

Laboratorio de Materiales Industriales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

Orcid: <http://orcid.org/0000-0002-8143-8391>

Carlos Sabater-Piqueres

carlos.sabater@weizmann.ac.il

Huygens-Kamerlingh Onnes Laboratorium, Leiden University, Netherlands.

Orcid: <http://orcid.org/0000-0001-8586-9976>

Sofía Chacón-Vargas

sofiamelissa107@gmail.com

Laboratorio de Materiales Industriales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

Orcid: <http://orcid.org/0000-0001-5042-1311>

Giovanni Sáenz-Arce

gsaenz@una.cr

Laboratorio de Materiales Industriales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

Orcid: <http://orcid.org/0000-0003-1848-7980>

Recibido-Received: 27/oct/2017 • Corregido-Corrected: 5/marzo/2018.

Aceptado-Accepted: 4/jun/2018 • Publicado-Published: 31/ene/2019.

Resumen

Uno de los grandes avances en la nanotecnología fue el desarrollo del microscopio de efecto túnel, herramienta que ha permitido poder manipular átomos, moléculas, estudiar el transporte electrónico en un solo átomo e incluso la obtención de imágenes con precisión atómica en superficies eléctricamente conductoras. En este artículo describimos el microscopio de efecto túnel, su funcionamiento, una metodología de calibración y cómo medir topografía de superficies planas con una resolución atómica en condiciones ambiente. Todo ello desde un punto de vista didáctico para los nuevos usuarios o investigadores no familiarizados con la técnica. Dependiendo del tipo de medida y calibración, se usaron dos tipos de muestras conductoras, el oro orientado en la dirección cristalográfica (111) y el grafito pirolítico altamente orientado (HOPG).

Palabras claves: microscopía de efecto túnel; calibración; superficies; Au (111); HOPG.



Abstract

One of the great advances in nanotechnology has been the development of the scanning tunneling microscope, a tool that permits the manipulation of atoms and molecules, the study of electron transport in a single atom, and the generation of images with atomic precision in electrically conductive surfaces. In this paper we describe the tunneling microscope, its operation, a calibration methodology, and how to make topographic measurements on flat surfaces with atomic resolution at room conditions. This is done from a didactic point of view, intended to assist new users or researchers unfamiliar with the technique. Depending on the type of measurement and calibration, we used two conductive samples, gold (111) oriented along the crystallographic direction, and highly oriented pyrolytic graphite (HOPG).

Keywords: scanning tunneling microscope; calibration; surfaces; Au (111); HOPG.

Resumo

Um dos grandes avanços na nanotecnologia foi o desenvolvimento do microscópio de tunelamento quântico, ferramenta que tem permitido a manipulação de átomos, moléculas, o estudo do transporte eletrônico em um só átomo, e inclusive, a obtenção de imagens de precisão atômica em superfícies eletricamente condutoras. Neste artigo descrevemos o microscópio de tunelamento quântico, seu funcionamento, uma metodologia de calibração e como medir topografia de superfícies planas com uma resolução atômica em condições ambiente. Tudo isso desde um ponto de vista didático para os novos usuários ou pesquisadores não familiarizados com a técnica. Dependendo do tipo de medida e calibração, foram usadas dos tipos de amostras condutoras, o ouro orientado na direção cristalográfica (111) e o grafite pirolítico altamente orientado (HOPG).

Palavras-chaves: microscopia de tunelamento quântico; calibração; superfícies; Au (111); HOPG.

En 1986, G. Binnig y H. Rohrer ganaron el Premio Nobel de Física por la invención del Scanning Tunneling Microscope (STM) (Binnig, Rohrer, Gerber y Weibel, 1982). Dicha invención supuso un impulso muy grande para las investigaciones en la nanoescala, ya que permitió el control y el entendimiento de estructuras atómicas. Este tipo de microscopio está basado en el efecto túnel, el cual es un fenómeno cuántico y, por lo tanto, debe explicarse mediante la física cuántica. Según la física clásica, un electrón, considerado como una partícula, no podrá atravesar una barrera de potencial de mayor energía a la suya, sin embargo, la física cuántica establece que un electrón puede considerarse dualmente partícula-on-

da y, por ello, hay cierta probabilidad de que pueda atravesar la barrera de potencial de mayor energía. Imaginando una superficie conductora y una punta afilada metálica a una distancia muy cercana, por efecto túnel se puede explicar el flujo de los electrones entre ambas. La corriente túnel puede expresarse mediante la relación de proporcionalidad siguiente, denotada como expresión matemática 1 y cuya deducción está detallada en las referencias (Binnig y Rohrer, 1987; Sáenz-Arce, 2011; Sabater, 2013).

(Expresión 1)

$$I \propto e^{-\frac{\sqrt{2m\Phi}}{h}d}$$



En la expresión 1, se muestra la relación entre la corriente (I) y la distancia punta-muestra (d), donde m es la masa de los electrones, h es la constante de Planck y Φ la función de trabajo del metal.

Todo STM principalmente se basa en una punta metálica afilada y una superficie eléctricamente conductora. Conectando en serie la muestra a una batería y la punta a un amperímetro, acercando el sistema punta-muestra a una distancia aproximada al nanómetro (1×10^{-9} m), algunos de los electrones de la superficie pueden llegar a la punta mediante efecto túnel. Los electrones que atraviesan esa barrera de potencial crean una corriente túnel que puede ser registrada, método no invasivo que puede ser

utilizado para la detección de la superficie. Por lo tanto, una de sus inmediatas aplicaciones es la obtención de imágenes de la superficie de materiales conductores, con el fin de estudiar sus propiedades electrónicas y su topografía (Binnig, Rohrer, Gerber y Weibel, 1982; Binnig y Rohrer, 1987)

La punta del STM debe ser lo más afilada posible, con el propósito de que en el extremo quede un solo átomo. Cuando la punta se encuentra lo suficientemente cerca de la muestra, se registra una corriente túnel, por lo que podemos considerar que entre punta y muestra se ha generado una resistencia túnel. En la Figura 1, se detalla el circuito equivalente cuando la muestra y la punta están en régimen túnel.

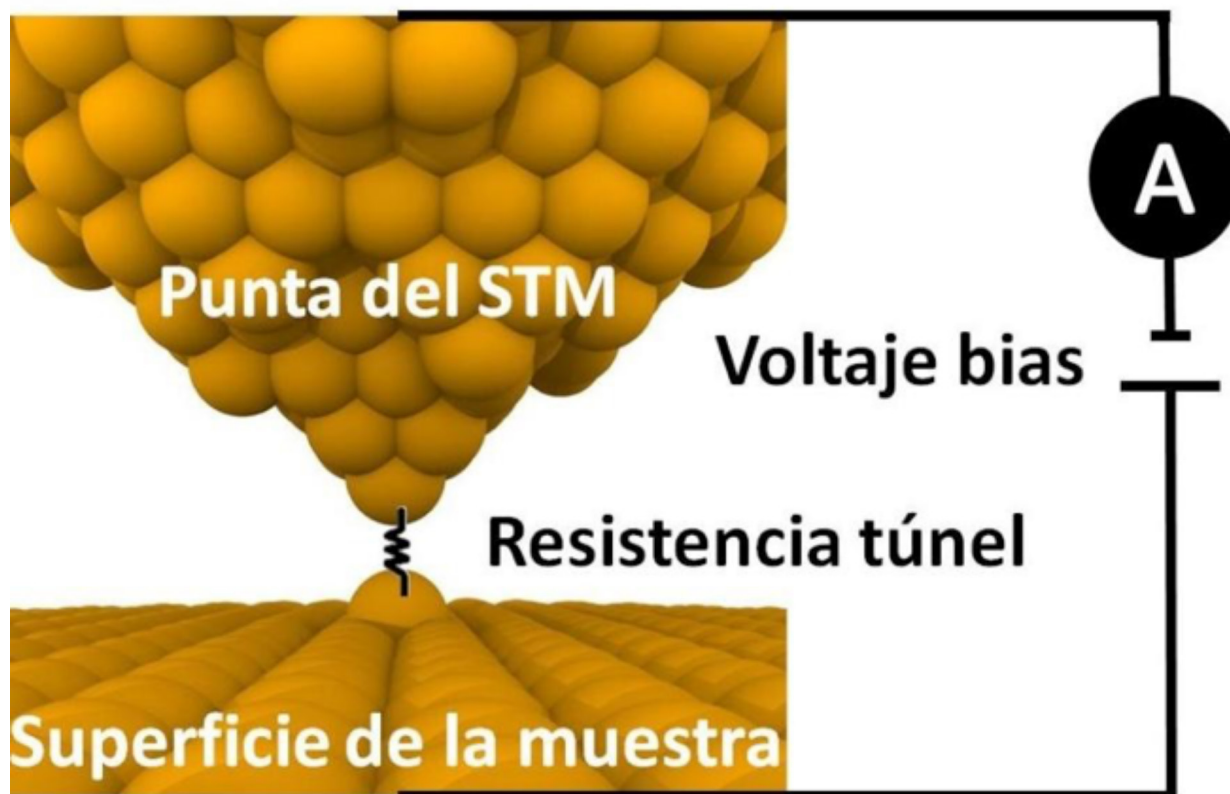


Figura 1. Ilustración del circuito equivalente cuando el sistema punta-muestra se encuentra en régimen túnel Imagen propia del estudio.



En la Figura 2A se muestra una ilustración de un microscopio no comercial, que cuenta con conectores para la electrónica de control, un sistema de posicionamiento compuesto por materiales piezoeléctricos, los cuales permiten acercar o alejar la punta del microscopio a la muestra conductora, un portamuestras con su muestra y una cabeza de microscopio (Figura 2B).

Los materiales piezoeléctricos pueden deformarse al aplicarles un voltaje y viceversa. Al aplicar un alto voltaje a las piezo-pilas, se logra acercar o alejar el portador de puntas, que se encuentra en el móvil de la Figura 2B, mediante un movimiento inercial (Riquelme, 2008). La deformación de los materiales piezoeléctricos depende de la polarización eléctrica interna; estas deformaciones pueden ser tipo cizalla o normal. Una deformación tipo cizalla se da cuando

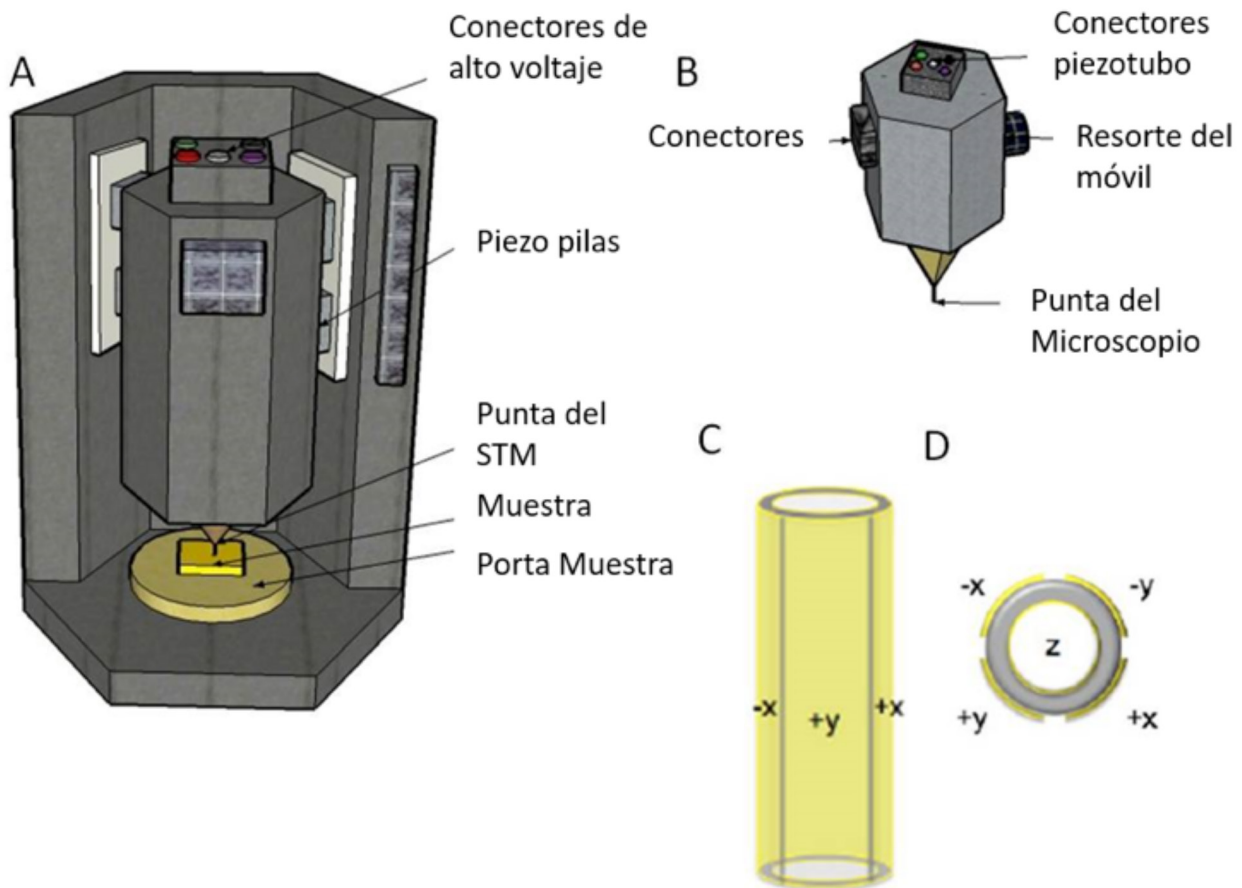


Figura 2. (A) Esquema de la cabeza del STM. (B) Representación esquemática del móvil, el cual es la parte del STM que porta la punta y permite acercarla y separarla de la muestra. (C) Ilustración de un piezotubo, donde son visibles tres de sus cinco electrodos. (D) Ilustración cenital de un piezotubo, donde se aprecian los cinco electrodos. Imagen propia del estudio.



el voltaje se aplica perpendicular a la polarización eléctrica interna del material, este se presenta en las cuatro piezopilas mostradas en la figura 2A. En el modo de deformación normal, la polarización eléctrica de los piezoelectricos es paralela al voltaje aplicado, dando como resultado una elongación con contracción lineal del material. Dentro del sistema móvil, se encuentra un piezotubo, el cual soporta el portador de puntas en uno de sus extremos. Como muestra la Figura 2 en sus ilustraciones C y D, el piezotubo cuenta con cinco electrodos denominados ($x+$, $x-$, $y+$, $y-$, z). Dependiendo donde se aplique la diferencia de potencial, podrá hacer un barrido en las tres coordenadas cartesianas (Riquelme, 2008; Sáenz-Arce, 2011).

Como se observó en la expresión 1, la corriente túnel depende exponencialmente de la distancia entre punta y muestra. Esta dependencia hace que, por ejemplo, un desplazamiento relativo de un 1nm entre la punta y la muestra se manifieste en un aumento de un orden de magnitud, si la distancia desplazada es de acercamiento, y de un orden de magnitud menor en la corriente, si dicha distancia es de alejamiento. Generalmente, esta corriente es amplificada y convertida a voltaje, mediante un dispositivo llamado, amplificador IV. Por lo tanto, la dependencia entre corriente y distancia provoca que existan dos metodologías de escaneo, dependiendo de si queremos hacer un barrido manteniendo la corriente constante, o bien si queremos hacer un barrido de la superficie manteniendo la distancia entre punta y muestra constante.

El método conocido como de corriente constante consiste en desplazar la punta sobre la superficie, al mismo tiempo que se ajusta la distancia vertical entre ambas mediante el piezo z, para mantener constante la corriente túnel. La señal empleada por el

piezo z para mantener constante la corriente túnel constituye la topografía de la superficie. Esto se consigue gracias a la unidad de control, que compara en todo momento un valor de referencia con la corriente túnel medida, y además genera la señal necesaria que se ha de enviar al piezo z, para que esta corriente permanezca constante e igual a dicho valor de referencia. Este sistema de generación de señal está gobernado por uno de retroalimentación basado en un algoritmo Proporcional-Integrador-Diferencial (PID). La ilustración mostrada en la Figura 3A presenta las curvas corriente y distancia relativa (curva color azul y negra, respectivamente), ilustrando cómo la corriente permanece constante, mientras que la distancia relativa punta muestra es la que varía (Sáenz-Arce, 2011; Sabater, 2013).

El método conocido como altura constante consiste en apagar o limitar el sistema de realimentación, enviando una señal constante al piezo z y registrando la variación de corriente túnel durante el barrido de la punta sobre la muestra. En este caso, la imagen de topografía será una constante y la imagen de corriente viene dada por los cambios en la corriente túnel asociados a la variación de la distancia relativa entre la punta y la muestra, producidos por la corrugación de la superficie, tal y como muestra la ilustración de la Figura 3B. Este modo de funcionamiento está restringido a regiones muy planas, donde las posibles estructuras en la superficie tengan una altura menor que la distancia entre la punta y la muestra, ya que de otra forma se dañaría la punta o la superficie.

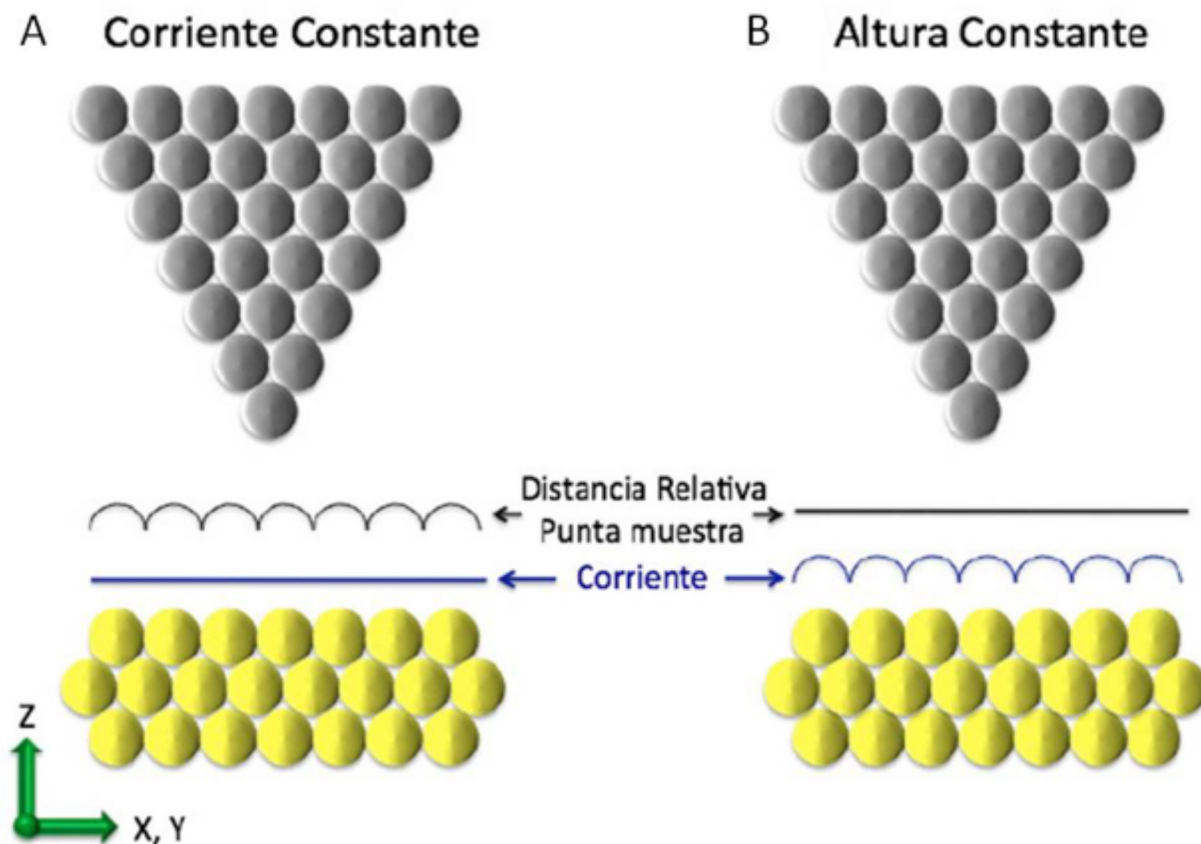


Figura 3. (A) Modo a corriente constante. (B) Modo de altura constante. Extraído de: G. Sáenz, 2011; C. Sabater, 2013.

Materiales y métodos

Para la elaboración de este artículo, se utilizaron dos tipos de muestras, grafito pirolítico altamente orientado (HOPG) y Au (111), las cuales, tras su correspondiente tratamiento o preparación, quedan con áreas atómicamente planas y regularmente utilizadas para la calibración del STM (Barth, Brune, Ertl y Behm, 1990; Rubio-Verdu et al., 2017). El Au (111) presenta terrazas y escalones de tamaño atómico. Medidas experimentales han mostrado que un escalón cuya altura es de un solo átomo mide $0,20 \pm 0,05$ nm (Barth, Brune, Ertl y Behm, 1990),

valores que coinciden también con el diámetro atómico del Au $0,25 \pm 0,02$ nm (Untiedt et al., 2002). Por lo tanto, conociendo el valor de estos escalones podemos calibrar la distancia que en nuestro sistema de ejes hemos decidido nombrar z (véanse ilustraciones C y D de Figura 2), con lo cual queda así calibrado el microscopio en dicho eje. Una vez calibrado el eje z, debemos calibrar el plano XY. Para ello, hemos de utilizar una muestra HOPG. Una de las ventajas de este tipo de grafito es que en condiciones ambiente el STM puede obtener imágenes de los átomos de carbono. Por lo tanto, la calibración puede realizarse a través de la



comparación de los parámetros de red del HOPG y las medidas de dichos parámetros en la imagen tomada del STM. De este modo, se ajustan los valores correctos de conversión de voltios aplicados al sistema piezo versus distancia.

IIa. Muestras

Au (111)

Las muestras de oro utilizadas fueron compradas a la casa comercial Arrandee (Arrandee, 2016). Sus dimensiones nominales son de 11 x 11 mm.; el Au se presenta como una fina capa depositada en una superficie de vidrio. Aquí enumeramos los pasos de la preparación de las muestras.

1. Primera limpieza. La muestra se debe lavar secuencialmente con acetona, etanol e isopropanol. Finalmente, debe secarse con un soplado de nitrógeno, dejando la superficie lista para un tratamiento térmico.
2. Recocido térmico. Con la llama de un quemador de butano se debe calentar varias veces la superficie del Au hasta que tome un color anaranjado. Mediante este proceso, se obtiene una orientación de la superficie en la dirección cristalográfica (111).
3. Segunda limpieza. Tras haber calentado la superficie de oro con llama de butano, la muestra posee partículas orgánicas en su superficie. Uno de los métodos más eficaces es realizar varias inmersiones de la muestra en solución piraña (compuesta por peróxido de hidrógeno y ácido sulfúrico en la proporción 1:3). Una vez extraída la muestra de la disolución, debe ser lavada con agua ultrapura.

HOPG

La muestra de HOPG (SPI Supplies, 2017) está compuesta por carbono de alta pureza, donde el contenido de impurezas del HOPG es de aproximadamente 10 ppm, además tiene una superficie lisa, característica fundamental para ser utilizada con el STM. El HOPG es un material con una superficie fácilmente reparable y atómicamente plana, con una estructura bien definida. La preparación de la muestra es conocida como el método de exfoliación mediante cinta adhesiva (Novoselov et al., 2004; Rubio-Verdu et al., 2017), que se basa en depositar la cinta sobre el HOPG y retirarlo. Consideraremos que la muestra está lista tras lograr una exfoliación que cubra el área de la muestra.

El HOPG se puede ver como hexágonos con dobles enlaces entre los carbonos, provocando que sea plano y rígido, es decir, los carbonos poseen hibridación sp^2 , lo cual ocurre cuando un orbital s del átomo se mezcla con dos orbitales p , dando como resultado tres orbitales sp^2 y permitiendo el enlace de los carbonos vecinos, además del orbital p_z que se mantiene perpendicular al plano. Como resultado de esto, no se permite la rotación en los enlaces. Debido a lo anterior, se generan láminas, unidas por fuerzas débiles de van der Waals, hecho que nos permite que se puedan separar fácilmente una de la otra, por medio de la cinta adhesiva. La Figura 4A muestra una vista cenital de un apilamiento de dos láminas de grafito. En color negro, se muestra la capa superior, mientras que, en amarillo, la capa inferior. En este apilamiento, se puede observar que la capa inferior tiene una translación en el plano XY con respecto a la capa superior; en consecuencia, solamente tres átomos de la estructura hexagonal del grafito coinciden con los del plano inferior.



Por la estructura de apilamiento del grafito, tendrán más densidad de estado aquellos átomos de carbono que estén alineados en el eje z, dando una mayor corriente túnel. De acuerdo con la Figura 4, el STM resaltará aquellos átomos coloreados en negro que justo debajo tengan un átomo coloreado de amarillo. En esta Figura 4A, hemos resaltado un pequeño hexágono, donde en azul hemos representado los átomos que poseen otros átomos debajo, esos que serán percibidos con una intensidad mayor en el STM. En el panel B de esta Figura 4, vemos una ampliación del hexágono. Además, se detalla que la distancia de enlace existente entre

dos átomos de carbono de este hexágono es de unos 0,141 nm. La Figura 4B muestra también la distancia entre dos átomos azules y denotada como L_{ats} , cuyo valor es de 0,246 nm y representa la constante de red del grafito, material cristalino que consta de una sola capa de carbonos.

IIb. Software y unidad de control

El sistema experimental usado para este manuscrito consta de una unidad de control Nanotech modelo Dulcinea y un STM no comercial (Sáenz-Arce, 2011). El software empleado para la comunicación con el sistema experimental es WSxM

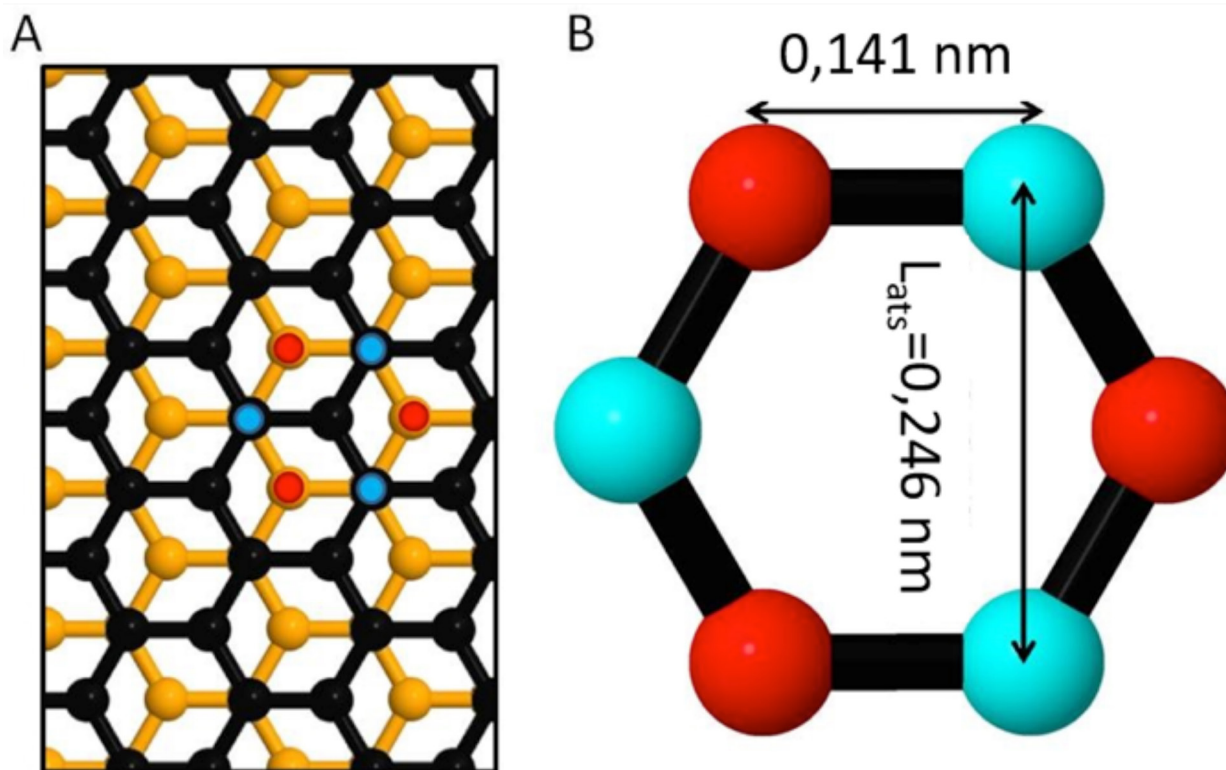


Figura 4. (A) Ilustración de una vista cenital de una capa de HOPG. Átomos en negro: primera capa de los de carbono; átomos en amarillo: los de la capa situada debajo de la primera. En la figura, se ha sobrepuesto en puntos rojos los átomos que poseen un átomo debajo de su capa y en cian los átomos que no. (B) Ilustración de las proporciones en la red hexagonal de grafito. Imagen propia del estudio.



(Horcas, 2017), el cual consta de varios comandos que permiten controlar el microscopio, obtener las imágenes de las muestras, adquirir datos y realizar un análisis postexperimento de los datos e imágenes.

Resultados y discusión

Como se explicó en el apartado de materiales y métodos, primero se ha de medir la altura de los escalones en la muestra de Au, para poder así calibrar el eje z. Una vez realizado esto, mediremos la muestra de HOPG y, otra vez, la altura de los escalones del HOPG; en este caso, la medida debe ser muy cercana a 0,335 nm, que es el valor teórico y experimental esperado para los escalones de HOPG. Listo lo anterior, debemos medir la resolución atómica para así poder calibrar el piezotubo en el plano XY. Las imágenes de STM de las figuras 5A y 5C fueron tomadas en condiciones ambiente y con una punta de oro cortado en bisel que fuese lo más afilada posible.

En la Figura 5A, se muestra una imagen de STM tomada mediante el método de corriente constante sobre una muestra de Au, donde se utilizó voltaje bias de 100 mV y una amplificación de 10^9 . En el panel A, se muestran las diferentes terrazas y escalones correspondientes a la dirección cristalográfica (111) del Au. Debajo de la imagen de topografía, se ha colocado la escala de colores utilizados y su rango equivalente en nanómetros. Además, en la imagen hemos denotado, con una línea gris, la zona donde se realizaron las medidas de perfil para proceder a la calibración.

En la Figura 5B, se muestra el perfil correspondiente a la línea gris de la Figura 5A; en particular, se ha seleccionado el escalón que está comprendido entre las dos cruces de la Figura 5A y, como vemos, es

de aproximadamente un 0,306 nm. Dicho valor dista un poco de los 0,25 nm, lo cual nos hizo concluir que inicialmente el microscopio estaba desajustado. Por lo tanto, debimos configurar el software correctamente, para que quede bien correspondidos la distancia y los voltios aplicados al piezo. Ajustando los parámetros, volvimos a medir el escalón, ajustándose esta vez al valor de 0,25 nm y, por ello, procedimos al cambio de muestra.

La Figura 5C es la imagen de STM correspondiente a la muestra de HOPG, tomada con un voltaje de bias de 100 mV, y se utilizó una amplificación de 10^9 , también mediante el método de corriente constante. En este panel, se observan los escalones atómicos y las terrazas HOPG. Al pie de la figura, sita la escala de colores correspondiente a la altura en el eje z de los escalones. Además, se observa una línea de color gris, la cual representa la zona donde se ha analizado el perfil topográfico de los escalones. En el panel D se muestra, en el eje vertical, la altura de los escalones, mientras que el eje horizontal representa el desplazamiento de la punta en la superficie, en el eje x.

La medida de la altura del escalón en el HOPG fue de 0,335 nm, valor que coincide perfectamente con los medidos por otros autores (Chang y Bard, 1991). En esta Figura 5C, correspondiente al HOPG, se puede observar claramente, en comparación con la Figura 5A que el tamaño de las terrazas es bastante mayor. Una vez localizadas las terrazas en el HOPG, podemos buscar una zona suficientemente plana para resolver la estructura atómica del grafito altamente ordenado. Con el afán de tomar este tipo de imágenes, debemos hacerlo mediante el método de altura constante, ya que la zona del barrido es de aproximadamente unos nanómetros cuadrados.

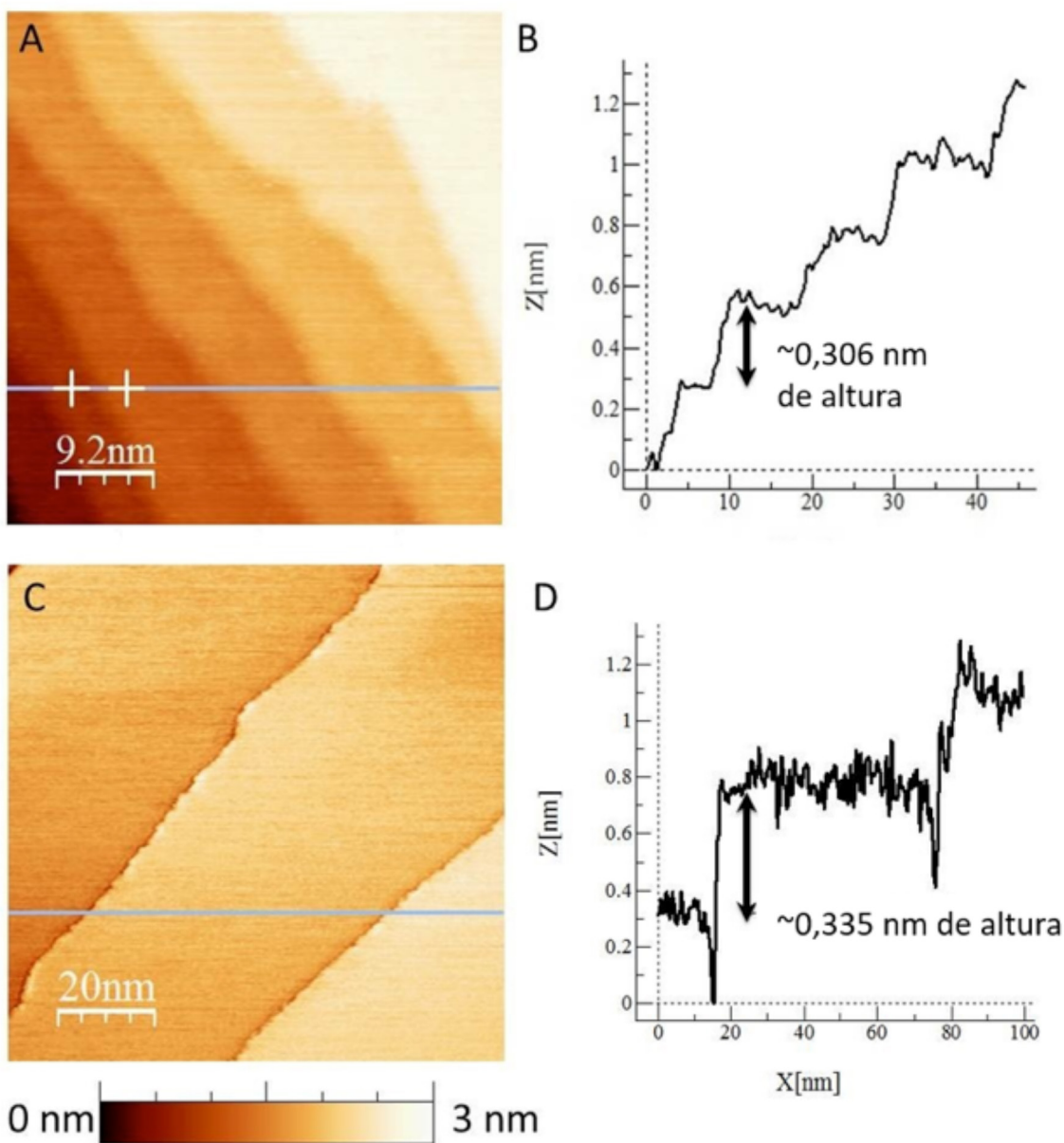


Figura 5. (A) Imagen de STM a corriente constante de una superficie de Au (111). (B) Medidas del perfil de los escalones y terrazas de Au. (C) Imagen de STM a corriente constante correspondiente a la superficie de HOPG. (D) Medidas del perfil de los escalones y terrazas de HOPG.

La Figura 6A muestra una imagen a altura constante de HOPG, de aproximadamente $5 \times 4,8$ nm. Para esta imagen, se ha utilizado un voltaje bias de 100 mV y una

ampliación de 10^8 . Las zonas más brillantes representan las posiciones de aquellos átomos que están superpuestos, como mostraba la Figura 4A.

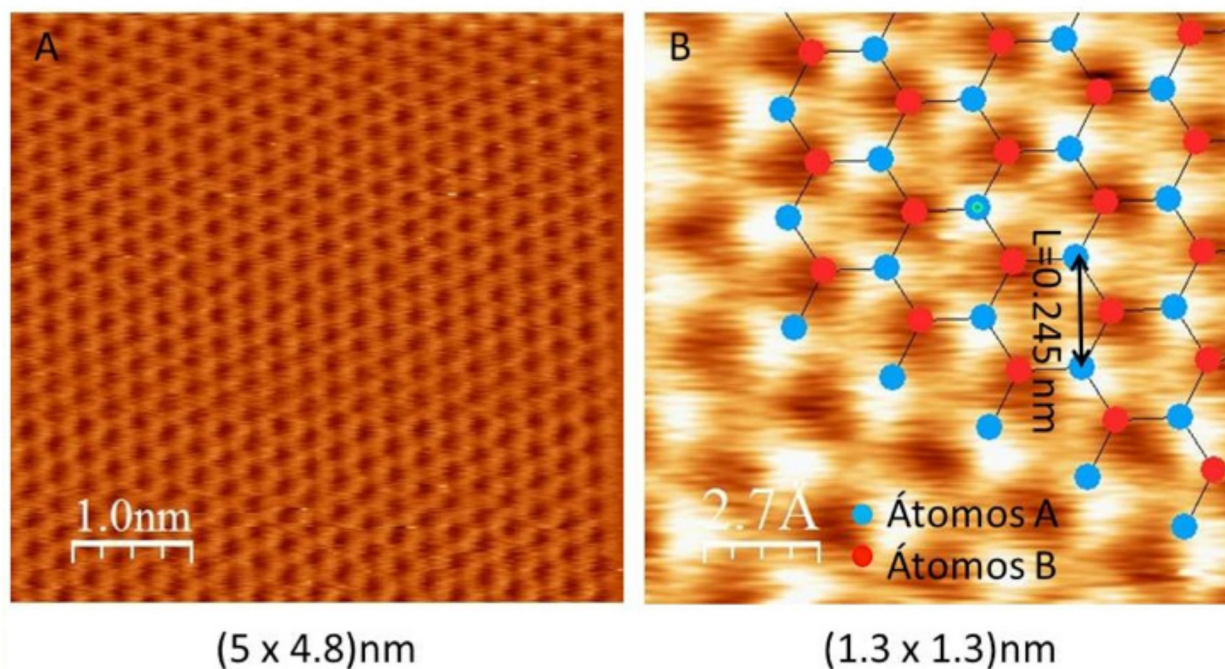


Figura 6. (A) Imagen STM de HOPG en condiciones ambiente. (B) Resolución atómica del HOPG, identificación de la estructura hexagonal del grafito, donde los átomos tipo A son de carbono y están uno sobre el otro entre las capas, mientras los tipo B son carbonos que no tienen otro átomo directamente debajo de ellos en la capa inferior; la L corresponde a la distancia entre dos átomos A. Imagen propia del estudio.

Por lo tanto, a partir de la Figura 6A, si se hace un zoom, como muestra la Figura 6B, cuya zona de escaneada es de (1,3 x 1,3) nm, y superponiendo encima una red hexagonal, como también se observa, se ha medido la distancia que existe entre dos átomos del tipo A (es decir, los átomos de color azul que se ilustraban en la Figura 4A). Dicha distancia entre dos átomos del tipo A es de 0,245 nm, como muestra la etiqueta y la flecha del B, de la Figura 6. Así, podemos comparar la distancia calculada llamada Lats (0,246 nm) con la distancia L medida en la Figura 6B, siendo la diferencia entre ambas 0,001 nm. Dicha comparación muestra que la distancia medida es 0,001 nm inferior a la distancia calculada.

Según lo planteado, la última medida nos muestra que el microscopio está perfectamente calibrado en sus XY, y, como previamente lo habíamos calibrado en el eje z, podemos concluir que el microscopio tiene tales condiciones idóneas de calibración en todos los planos, con error de 0,001 nm.

Conclusiones

En este artículo se ha detallado una metodología de preparación de muestras de Au (111) y HOPG para ser analizadas en un microscopio de efecto túnel. Además, se ha mostrado un procedimiento de calibración mediante la toma de imágenes del STM, tanto en el modo de corriente constante



como en el de altura constante. En conclusión, hemos mostrado una metodología para tomar medidas topográficas en superficies atómicamente planas en condiciones ambiente, todas enfocadas en nuevos usuarios o investigadores no familiarizados con el microscopio de efecto túnel.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado a través de los Fondos del Sistema del Consejo Nacional de Rectores (FEES-CONARE), Costa Rica, y el plan de mejoramiento institucional de la Universidad Nacional. Carlos Sabater agradece el soporte a la Foundation for Fundamental Research on Matter (FOM), la cual recibe el apoyo financiero de la Netherlands Organization for Scientific Research (NWO).

Referencias

- Arrandee. (2016). Arrandee - gold substrates - Au (111). [Online]. Recuperado de: <http://www.arrandee.com/>
- Barth, J. V.; Brune, H., Ertl, G. y Behm, R. J. (1990). Scanning tunneling microscopy observations on the reconstructed Au (111) surface: Atomic structure, long-range superstructure, rotational domains, and surface defects. *Physical Review B*, 42(15), 9307-9318. Doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.42.9307>
- Binnig, G. y Rohrer, H. (1987). Scanning tunneling microscopy - from birth to adolescence. *Reviews of Moderns Physics*, 59(3), 615-625. Doi: <https://doi.org/10.1002/anie.198706061>
- Binnig, G.; Rohrer, H.; Gerber, Ch. y Weibel, E. (1982). Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy. *Physical Review Letters*, 49(1), 57-61. Doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.57>
- Chang, H. y Bard, A. J. (1991). Observation and Characterization by Scanning Tunneling Microscopy of Structures Generated by Cleaving Highly Oriented Pyrolytic Graphite. *Langmuir*, 7(6), 1143-1153. Doi: <https://doi.org/10.1021/la00054a021>
- Horcas, I.; Fernández, R.; Gómez-Rodríguez, J. M.; Colchero, J.; Gómez-Herrero, J. y Baro, A. M. (2007). WSXM: a software for scanning probe microscopy and a tool for nanotechnology. *Review of Scientific Instruments*, 78(013705), 1-9. Doi: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.2432410>
- Novoselov, K. S.; Geim, A. K.; Morozov, S. V.; Jiang, D.; Zhang, Y.; Dubonos, S. V.; Grigorieva, I. V. y Firsov, A. A. (2004). Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 306(5696), 666-669. Doi: <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
- Riquelme Ballesta, J. J. (2008). *Propiedades mecánicas y transporte electrónico en nanoestructuras metálicas a bajas temperaturas*. (Tesis doctoral). Universidad Autónoma de Madrid, España. Recuperado de file:///C:/Users/CARLOS~2/AppData/Local/Temp/documentop.com_propiedades-mecanicas-y-transporte-electronico-en-_598bbefd1723dd5c-695f0e93.pdf
- Rubio-Verdu, C.; Saenz-Arce, G.; Martínez-Asencio, J.; Milan, D. C.; Moaied, M.; Palacios, J. J.; Caturla, M. J. y Untiedt, C. (2017). Graphene flakes obtained by local electro-exfoliation of graphite with a STM tip. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19(11), 8061-8068. Doi: <http://dx.doi.org/10.1039/C6CP07236D>
- Sabater, C. (2013). *Theoretical and experimental study of electronic transport and structure in atomic-sized contacts*. (Tesis doctoral). Universidad de Alicante, España. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/257692003_Theoretical_and_experimental_study_of_electronic_transport_and_structure_in_atomic-sized_contacts
- Sáenz-Arce, G. (2011). *Estudio de estructuras de tamaño atómico mediante un STM con detección resonante de fuerzas*. (Tesis doctoral). Universidad de Alicante, España. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/320068596_Study_of_Atomic-Size_Structures_using_a_Scanning_Tunneling_Microscope_with_Force_Resonant-Detection



- SPI Supplies (2017). SPI Supplies - HOPG. [Online]. Recuperado de <http://www.2spi.com/category/hopg/substrates/>
- Untiedt, C.; Yanson, A. I.; Grande, R.; Rubio-Bollinger, G.; Agraït, N.; Vieira, S. y Ruitenbeek, J. M. van. (2002). Calibration of the length of a chain of single gold atoms. *Physical Review B*, 66(85418), 1-6. Doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.085418>



Medidas topográficas en superficies atómicamente planas en condiciones ambiente mediante un microscopio de efecto túnel, un enfoque didáctico (Lilliana Delgado Jiménez y otros) por *Revista Uniciencia* se encuentra bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 3.0 Unported](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/).