Revista Ciencia y Naturaleza

¿Cómo la electricidad puede crear implantes más seguros?

Ciencia al Instante

Imagina que un simple tornillo dentro de tu cuerpo pudiera enfermarte. En México no existe una norma oficial que regule los materiales para implantes quirúrgicos desde 2009, y el acero 316L se usa masivamente por su bajo costo, aunque puede liberar metales tóxicos. Científicos mexicanos descubrieron que, aplicando electricidad durante solo 30 minutos, es posible crear sobre el acero una coraza atómica de óxido de cromo que multiplica por 16,000 la dificultad de que los iones metálicos escapen al organismo. Una solución accesible, rápida y con enorme potencial para transformar la salud pública.

De Actualidad

¿Cómo la electricidad puede crear implantes más seguros?

Cómo citar este artículo: Márquez-Herrera A, Montesinos-González S, Zapata-Torres MG. 2026. ¿Cómo la electricidad puede crear implantes más seguros?. Revista Ciencia y Naturaleza (1262).

El acero inoxidable

¿Te has preguntado alguna vez qué tienen en común una olla de cocina, el tubo de escape de un coche y un implante de cadera? La respuesta es que muchos de ellos están hechos de acero inoxidable. Este material es uno de los grandes héroes anónimos de la ingeniería moderna. Es resistente, relativamente barato. Pero lo más importante es que no se oxida con facilidad. “No oxidarse con facilidad” no significa que sea invencible. Cuando hablamos de un tornillo que llevaremos dentro del cuerpo durante décadas, el estándar debe ser mucho más alto.

Esta historia inicia con un problema real y vigente en México. Desde 2009, nuestro país no cuenta con una norma oficial que regule los materiales para implantes quirúrgicos, ya que la NOM-153-SSA1-1996 fue cancelada [1]. Esto ha llevado a que, por su bajo costo y disponibilidad, se utilice masivamente el acero inoxidable 316L, un “primo hermano” del acero 304 que analizó el equipo científico.

La diferencia clave es que el 316L incorpora molibdeno en su composición. Lo que le otorga mayor resistencia a la corrosión en ambientes agresivos como el cuerpo humano. Por eso es el material más usado en implantes, a pesar de la falta de regulación. El problema, documentado por investigadores [2, 3], es que con el tiempo los fluidos corporales pueden corroer estos implantes. Con ello se liberan iones de níquel, cobalto y molibdeno que pueden causar desde alergias, erupciones cutáneas y hasta daños en el ADN o cáncer [4, 5]. En lugar de usar materiales o recubrimientos costosos que serían imposibles de implementar en el sistema de salud público [6, 7], podemos utilizar electricidad para esculpir, a nivel atómico, una coraza casi perfecta sobre el acero.

¿Cómo proteger un material barato y bueno para que se convierta en un implante seguro?

La corrosión: un enemigo silencioso

Antes de entrar al detalle experimental, vale la pena entender qué es exactamente la corrosión. Imagina que los metales están formados por piezas diminutas (los átomos) ordenadas como ladrillos en una pared. Algunos líquidos, como los fluidos del cuerpo humano, pueden "desprender" esos ladrillos poco a poco. Es como si el metal se disolviera en gotas invisibles que pasan al torrente sanguíneo. A la larga, esas partículas metálicas pueden causar desde alergias hasta problemas más graves.

Para combatir este problema, la naturaleza nos dio una pista. Algunos metales, como el cromo, al reaccionar con el oxígeno crean una película muy fina (miles de veces más delgada que un cabello). Esta película actúa como un escudo protector. El problema es que esa capa natural se desgasta con el tiempo dentro del cuerpo.

A la capa de óxido que se forma naturalmente, se le llama película pasiva, y al proceso de crearla artificialmente se conoce como pasivación.

El jardín de los potenciales eléctricos: cómo funciona el experimento

Para mejorar la pasivación, se sumergieron placas de acero inoxidable 304 en una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4). ¿Por qué algo tan peligroso? Porque si logran proteger el acero en ese ambiente tan hostil, con mayor razón lo protegerán en condiciones más suaves como las del cuerpo humano.

El montaje experimental consistió en una celda electroquímica, un recipiente con tres electrodos sumergidos en el ácido, como se muestra en la Figura 1. Pero ¿qué es un electrodo? Es simplemente un conductor metálico que permite que la corriente eléctrica entre o salga del líquido. En términos más precisos, un electrodo es el lugar donde ocurre la reacción electroquímica.

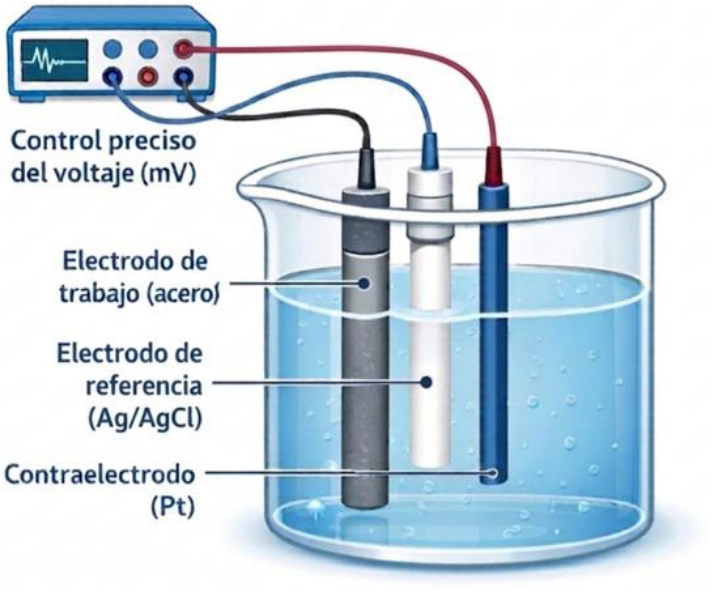


Figura 1. Esquema de una celda electroquímica

En su superficie, los electrones se transfieren entre el metal y las sustancias disueltas en el líquido. Dependiendo de si el metal pierde electrones (se oxida) o los gana (se reduce), el electrodo será un ánodo o un cátodo. En nuestro experimento, usamos tres electrodos diferentes cada uno con una misión específica para poder controlar y medir con exactitud lo que sucede en la superficie del acero.

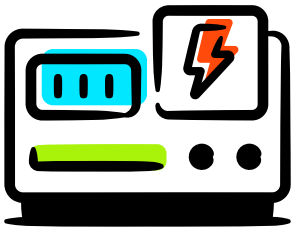
La configuración incluye: el electrodo de trabajo, la pieza de acero que se quiere proteger; electrodo de referencia (Ag/AgCl), un sensor con un potencial eléctrico estable y conocido, que sirve como punto de comparación (igual que usamos el nivel del mar como referencia para medir la altura de una montaña); contraelectrodo (comúnmente un alambre, malla o placa de platino o grafito, materiales inertes que no interfieren en la reacción); y cierre del circuito eléctrico para que la corriente fluya.

Aquí viene la parte clave. En electroquímica, hablamos de potencial en lugar de voltaje, aunque para facilitar la comprensión puedes pensar en voltaje. No simplemente es conectar a una pila o batería y esperar.

Debemos utilizar un equipo llamado potenciostato, un dispositivo que permite controlar con enorme precisión el voltaje que se aplica entre el electrodo de trabajo y el de referencia, mientras mide la corriente resultante. Es como un director de orquesta que le dice a cada instrumento exactamente qué nota tocar y cuándo. Antes de probar el tratamiento eléctrico, los investigadores evaluaron el método químico tradicional. Imagina que el metal sumergido en ácido es como un jardín. Dejado a su suerte (la muestra “Control”), las malas hierbas (la corrosión) crecen sin control.

Los átomos de hierro y níquel se disuelven. Dejan una superficie débil y llena de agujeros microscópicos. El método químico tradicional, regulado por la norma internacional ASTM A967, consiste en sumergir el acero en ácido nítrico o cítrico caliente.

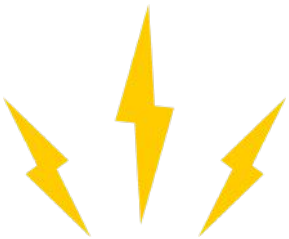
Es como lavar el jardín con un herbicida suave: quita la suciedad superficial y espera que el propio jardín se regenere formando una capa natural de óxido de cromo. Sin embargo, el estudio demostró que este método no es mejor que no hacer nada. Sus curvas de protección fueron prácticamente idénticas a las del material que no recibió ningún tratamiento (la misma muestra “Control” del inicio).



Pero si conectamos el acero a un potenciostato y aplicamos voltajes muy precisos, creamos diferentes “climas eléctricos” para el jardín metálico. ¿Qué voltajes? Primero se hace un “barrido de reconocimiento”, se aumenta lentamente el voltaje desde un valor negativo hasta uno positivo y se mide la corriente que pasa.

Por ejemplo, para el acero 304, este barrido va desde -150 milivoltios hasta +1200 milivoltios mientras se mide la corriente (un milivoltio es la milésima parte de un voltio; para que te des una idea, una pila AA tiene 1,500 milivoltios). Con esos datos se dibuja una curva (Figura 2) que muestra cómo se comporta el metal.

En esa curva se identifica una zona llamada región pasiva, que va de +482 mV a +1282 mV. En esa región, aunque el voltaje sube, la corriente es baja y es la señal de que se está formando algún tipo de capa protectora. Lo relevante no es simplemente estar dentro de esa región pasiva, sino fijarse en la pendiente de la curva, es decir, si la corriente está subiendo o bajando.



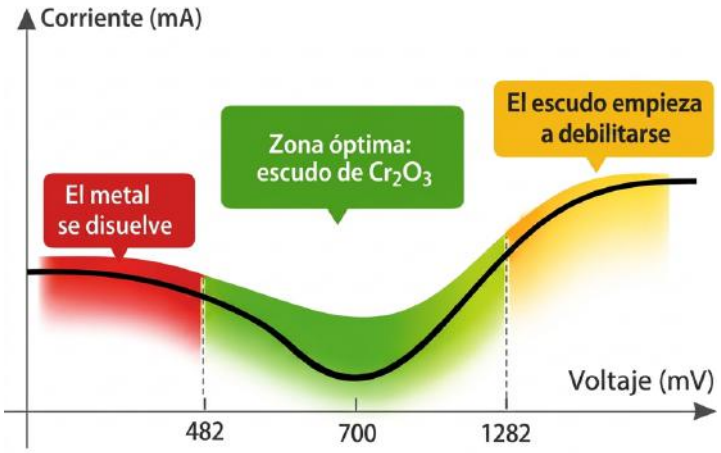


Figura 2. Esquema representativo de una curva de polarización para el acero 304 en un medio de ácido sulfúrico.

En la primera parte de la región pasiva (de +482 mV a +700 mV), la pendiente es negativa, aunque el voltaje aumenta, la corriente disminuye. Es como si al darle más “energía” al metal, este se dedicara intensamente a construir su armadura. En la segunda parte (de +700 mV a +1282 mV), la pendiente es positiva, la corriente empieza a subir, señal de que la capa comienza a disolverse o dañarse. Esto es clave, no basta con aplicar cualquier voltaje; hay que elegir el punto exacto donde el metal se “esfuerza” por protegerse sin dañarse.

La aplicación de la electricidad

Se aplicó una **pasivación potenciostática** (CP, por sus siglas en inglés). Se mantuvo el voltaje fijo en un punto específico durante 30 minutos. Por ejemplo, CP01 se fijó en +482 mV, CP02 en +700 mV (justo donde la pendiente cambia de negativa a cero), y CP03 en +1228 mV (con pendiente positiva). Es como plantar una tienda de campaña en diferentes lugares del jardín y ver qué cosecha obtenemos. También, se aplicó una **pasivación potenciodinámica** (PD, por sus siglas en inglés). En lugar de un voltaje fijo, se hizo un barrido continuo entre dos voltajes durante 30 minutos. PD01 barrió de +482 mV a +700 mV (solo la zona de pendiente negativa), PD02 barrió de +700 mV a +1228 mV (solo la zona de pendiente positiva) y PD03 barrió todo el rango de +482 mV a +1228 mV. Es como mover lentamente el aspersor de agua para regar la zona más fértil del jardín. ¿Y todo esto para qué? Para lograr que un tornillo o una placa de implante libere la menor cantidad posible de metales tóxicos dentro del cuerpo.

¿Cómo se midió qué tan buena era la protección?

Se utilizaron dos técnicas analíticas que vale la pena entender. La primera fue la **Espectroscopía de Impedancia Electroquímica** (EIS, por sus siglas en inglés). El nombre suena intimidante, pero el concepto es sencillo; imagina que quieres saber qué tan sólida es una pared sin destruirla. Podrías golpearla suavemente con diferentes ritmos y escuchar cómo vibra.

Una pared gruesa y sin grietas vibrará de forma distinta a una delgada y agrietada. La EIS hace algo parecido, pero en lugar de golpes, aplica pequeñísimas señales de corriente alterna (tan pequeñas que no dañan la capa protectora) a muchas frecuencias distintas —desde muy lentas hasta muy rápidas— y mide cómo responde el material. A bajas frecuencias o ritmos, la señal tiene tiempo de penetrar hasta lo más profundo de la capa, revelando qué tan gruesa y compacta es; a altas frecuencias, solo "toca" la superficie, dando información sobre la parte más externa.

Para entender qué tan buena es la capa protectora, los científicos miden, por ejemplo, su "resistencia": un valor alto significa que la corrosión tiene muchas dificultades para atravesarla. Es como comparar una cerca de madera podrida (baja resistencia) con un muro de concreto (alta resistencia). El valor más importante que se obtiene es cuánto se opone la capa al paso de la corrosión: a mayor resistencia, mejor protección. Los resultados fueron espectaculares, la muestra sin tratar apenas alcanzó una resistencia de 77 ohmios (como una cerca de alambre oxidado). Mientras que las tratadas en la zona de pendiente negativa llegaron a más de 500,000 ohmios.

La mejor de todas, la PD01, alcanzó 1,260,000 ohmios: ¡una fortaleza de concreto! Eso significa que los iones metálicos tienen 16,000 veces más dificultad de salir del implante, lo que reduciría enormemente el riesgo para el paciente. La segunda técnica fue el análisis de **Tafel**.

¿Recuerdas la curva de polarización que mencionamos? Se toma una pequeña porción de esa curva alrededor del potencial de reposo (el voltaje al que el metal se estabiliza sin intervención externa) y se aplica un modelo matemático desarrollado por el científico Julius Tafel hace más de cien años. La genialidad del método de Tafel es que, al graficar el logaritmo de la corriente contra el voltaje, aparecen dos líneas rectas: una para la oxidación (cuando el metal pierde electrones) y otra para la reducción (cuando algo en la solución gana electrones).

Extrapolando esas rectas hasta el punto donde se cruzan, se puede calcular tanto la corriente de corrosión (I_{corr}), que indica qué tan rápido se está oxidando el metal (expresada en microamperios por centímetro cuadrado), como el potencial de corrosión (E_{corr}), que indica la tendencia que tiene el metal a corroerse.

Es como medir cuántos ladrillos por segundo está perdiendo nuestra pared metálica, como se muestra en la Figura 3. La muestra sin tratar perdía 303.1 ladrillos por segundo (por así decirlo), mientras que la PD01 apenas perdía 0.0183: ¡una reducción muy significativa!

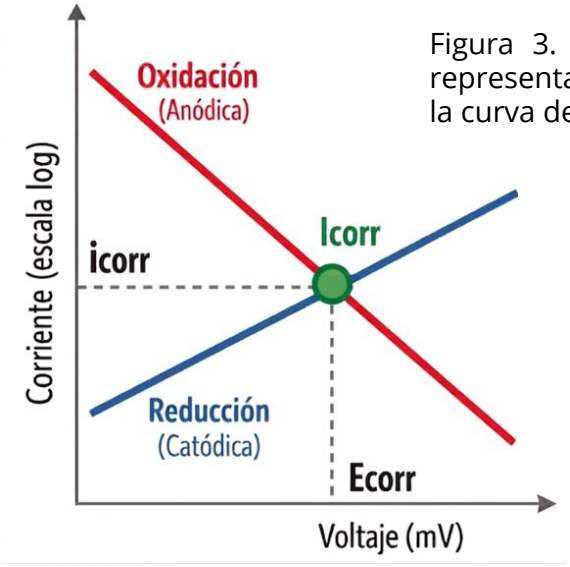


Figura 3. Esquema representativo de la curva de Tafel.

La mirada atómica y la promesa para la salud

Para confirmar que no era magia sino ciencia, se utilizó una tercera técnica analítica, la **Espectroscopía de Fotoelectrones** emitidos por Rayos X (XPS, por sus siglas en inglés). Cuando los rayos X golpean la superficie del material, arrancan electrones de los átomos. Cada elemento químico (oxígeno, cromo, hierro) emite electrones con una energía característica, como si tuvieran una "huella dactilar". Midiendo cuántos electrones salen y con qué energía. Los científicos pueden determinar exactamente qué átomos hay en la superficie y, más importante aún, cómo están enlazados entre sí.

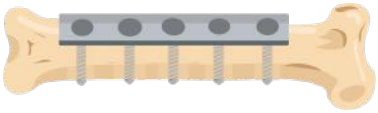
Esta técnica permite distinguir, por ejemplo, si el cromo está en forma de metal puro (poco protector), como óxido de cromo (excelente escudo) o como hidróxido de cromo (débil). El resultado fue contundente, la muestra tratada eléctricamente (PD01) había transformado su superficie en un 78.75 % de óxido de cromo puro (Cr_2O_3), cristalino y estable. Mientras que la muestra sin tratar tenía casi la mitad de su superficie cubierta de hidróxidos, que son menos protectores, además de una cantidad preocupante de metal expuesto.

En otras palabras, se logró convertir la superficie del acero en una sola capa continua de un material ultra protector. La belleza de este hallazgo es su potencial impacto social. Mientras que muchos estudios actuales se enfocan en recubrimientos caros y difíciles de aplicar, como los de dióxido de titanio (TiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) u óxido de cerio (CeO_2), esta técnica electroquímica es rápida (30 minutos), no requiere químicos costosos y controla la calidad de la protección "a la carta".

"La naturaleza, con su habitual benevolencia, ha limitado el poder del hierro infligiéndole el castigo del óxido." *Plinio el Viejo*

En un país donde no hay una regulación estricta para los materiales de implantes [1], donde se depende de materiales económicos como el acero 316L; esta tecnología podría significar la diferencia entre un implante que enferma al paciente y uno que lo acompaña de por vida sin degradarse.

La próxima vez que veas un tornillo, recuerda que, con un poco de ingenio eléctrico, puede convertirse en una fortaleza casi indestructible.



Aunque faltan pruebas de inmersión a largo plazo para confirmar la estabilidad absoluta de esta película en el cuerpo humano, los números iniciales son asombrosos y marcan un camino claro. Con un tratamiento eléctrico de apenas 30 minutos, un acero económico como el 316L podría convertirse en un implante seguro, accesible y duradero, incluso en un sistema de salud con recursos limitados. Esta investigación demuestra que México no solo importa tecnología, sino que genera conocimiento de frontera para resolver problemas cotidianos.

Agradecimientos

Se reconoce al grupo editorial de la revista Ciencia y Naturaleza por su valiosa labor en la divulgación de temas científicos.

Crédito de imágenes en orden de aparición: Manus 1.6 Lite, Stefanut Sava's Images, HL12 Studio, Alemedia.id, JulieK's Images, DAPA Images, Icons8, PhonlamaiPhoto's Images, Paramore, Getty Images, iconfield, Nana, sketchify, Jedsada Naeprai, Getty Images Pro, Getty Images Signature, pixabay, KrimKate, Africa images, Meidamz. Crédito de figuras: Todas las imágenes son de autoría propia y posteriormente fueron regeneradas con apoyo de IA Gemini. Los autores confirmaron que ningún párrafo del manuscrito ha sido generado completamente o con más del 50% de sus palabras con esta herramienta.

Dra. Beatriz Escobar
Editora Asociada Revista CyN

Diseño de publicación: Sofia Paz

Conceptos

Pasivación potenciostática. Método electroquímico que consiste en mantener el voltaje o potencial del acero fijo en un valor constante durante un tiempo determinado. Es como programar un horno a una temperatura exacta y dejarlo así sin cambios. El voltaje se elige a partir de la curva de polarización del material (por ejemplo, en la zona de pendiente negativa, positiva o en el punto de transición). Este tratamiento busca formar una capa protectora de óxido estable y uniforme.

Pasivación potenciodinámica. Método electroquímico en el que el voltaje se varía de forma continua y lenta dentro de un intervalo predefinido durante el tratamiento. En lugar de un valor fijo, se "barre" el voltaje entre un límite inferior y uno superior. Esto permite construir la capa protectora en condiciones cambiantes.

Tafel. El análisis de Tafel es una técnica electroquímica que permite medir la velocidad con la que un metal se corroe. Para entenderlo, imagina que quieres saber cuánta agua pierde una manguera con una fuga: cuentas las gotas que salen por segundo. Tafel hace algo similar, pero a nivel atómico: mide cuántos átomos de metal se escapan del implante hacia el cuerpo. Esto se obtiene a partir de una pequeña porción de la curva de polarización, alrededor del potencial de reposo, graficando el voltaje contra el logaritmo de la corriente. El resultado clave es la corriente de corrosión (I_{corr}): entre más pequeña sea, mejor protegido está el metal.

Espectroscopía de Impedancia Electroquímica. La Espectroscopía de Impedancia Electroquímica, o EIS, es una técnica que evalúa la calidad de la capa protectora formada sobre un metal sin dañarla. Para visualizarlo, piensa en una pared: si la golpeas suavemente y suena sólida y grave, es gruesa y sin grietas; si suena hueca o débil, está dañada. La EIS hace algo equivalente, pero aplicando pequeñísimas señales de corriente alterna a muchas frecuencias diferentes —desde muy lentas hasta muy rápidas— y mide cómo responde el material. El parámetro más importante que se obtiene es la resistencia a la transferencia de carga que cuanto más alto es este valor, más difícil es que la corrosión atraviese la capa protectora.

Espectroscopía de Fotoelectrones de Rayos X. La Espectroscopía de Fotoelectrones de Rayos X, conocida como XPS, es una técnica que identifica exactamente qué átomos hay en la superficie de un material y cómo están enlazados químicamente. Su funcionamiento es fascinante: al golpear la superficie con rayos X, se arrancan electrones de los átomos, y cada elemento químico emite electrones con una energía característica única, como si tuviera una huella digital. Esto permite distinguir, por ejemplo, si un átomo de cromo está como metal puro, como óxido o como hidróxido.

Para Consulta

Fuente original: Márquez-Herrera A, Zapata-Torres M, Montesinos S. 2026. Electrochemical engineering of passive films on AISI 304 stainless steel in H2SO4: The critical role of polarization slope in optimizing corrosion resistance. Revista Mexicana de Ingeniería Química 25(2): 1–11.

- SS. 2009. AVISO de cancelación de la norma oficial mexicana NOM-153-SSA1-1996, Diario Oficial de la Federación México. [Link]
- Tiwar S, Mishra SB. 2018. Corrosion of stainless steel and its prevention through surface modification for biomedical application: a review. Asian Journal of Engineering and Applied Technology 7 (S2): 60-66. [Link]
- Manam NS, Harun WSW, Shri DNA, et al. 2017. Study of Corrosion in Biocompatible Metals for Implants: A Review. Journal of alloys and compounds 701: 698-715. [Link]
- Baumann CA,Crist BD. 2020. Nickel allergy to orthopaedic implants: A review and case series. Journal of clinical orthopaedics and trauma 11:S596-S603. [Link]
- Christensen TJ, Samant SA, Shin AY. 2017. Making sense of metal allergy and hypersensitivity to metallic implants in relation to hand surgery. The Journal of Hand Surgery 42(9): 737-746. [Link]
- Wang Y, Gao F, Yang J, et al. 2017. Comparative study on corrosion characteristics of Al2O3/316L and TiO2/316L stainless steel in supercritical water. International Journal of Hydrogen Energy 42(31): 19836-19842. [Link]
- Tayyeh AK, Hasan AF. 2026. Enhancing 316L stainless steel for biomedical applications: Advances in surface coatings. In AIP Conference Proceedings 3379 (1). [Link]

Alfredo Márquez Herrera

Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad de Guanajuato. Investigador y especialista en ingeniería de materiales.

contacto: amarquez@ugto.mx

Salvador Montesinos González

Instituto de Ingeniería Industrial y Automotriz (UTM). Investigador y especialista en Mejora Continua de Sistemas de Producción y Administración.

contacto: smontesinos@mixteco.utm.mx

Martin Guadalupe Zapata Torres

Instituto Politécnico Nacional,CICATA Legaria. Profesor-Investigador, Área de investigación Física del Estado Sólido. Encargado del laboratorio de materiales funcionales.

contacto: mzapatat@ipn.mx