

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares*

Edgar Enrique Camps Carvajal,¹ Guillermo de Jesús Cruz Cruz,¹ Luis Escobar Alarcón,¹ Manuel Eduardo Espinosa Pesqueira,² María Eufemia Fernández García,² Guillermina Ferro Flores,³ Claudia Elizabeth Gutiérrez Wing,^{2,**} Régulo López Callejas,¹ Demetrio Mendoza Anaya,² Gilberto Mondragón Galicia,² María Guadalupe Olayo González,¹ María Teresa Olguín Gutiérrez,⁴ Marquidia Josseline Pacheco Pacheco,⁵ Joel Osbaldo Pacheco Sotelo,⁵ Rosendo Peña Eguiluz,¹ Raúl Pérez Hernández²

RESUMEN: Este documento describe brevemente el origen y objetivos del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), así como un panorama general de sus actividades dedicadas al avance de la nanociencia y nanotecnología (NyN), enmarcadas en las líneas de investigación institucionales a través del desarrollo de diversos proyectos. Se incluyen las líneas de investigación, contribuciones, patentes y principales logros en este campo obtenidos a través de los años. También se presenta la infraestructura con que se cuenta para llevar a cabo las investigaciones sobre nanomateriales y sus aplicaciones orientadas a áreas de energía, salud y medio ambiente. Se enfatiza la importancia del trabajo de colaboración nacional e internacional y de la formación de recursos humanos. Finalmente, se presentan las perspectivas de desarrollo en esta área en nuestra Institución.

PALABRAS CLAVE: ININ, investigación, radiación, nanomateriales, energía, ambiente, salud, nanocatálisis.

ABSTRACT: This document briefly describes the origin and goals of the National Institute of Nuclear Research (ININ) and a general view of its activities dedicated to the development of nanoscience and nanotechnology, within the frame of the institutional research lines through the development of several projects. Research lines, contributions, patents and main achievements obtained through the years in this field are included. Also, the infrastructure available to perform research on nanomaterials and their applications focused on energy, health and environment. The importance of national and international collaborative work and human resources training are emphasized. Finally, the development research prospects on this field in our Institution are presented.

KEYWORDS: ININ, research, radiation, nanomaterials, energy, environment, health, nanocatalysis.

Recibido: 14 de octubre de 2016. Aceptado: 21 de octubre de 2016.

* Se agradece a todos los colaboradores que se desempeñan en el área de NyN, por la información proporcionada para la elaboración de este documento.

Investigadores del ININ en NyN: ¹ Departamento de Física; ² Departamento de Tecnología de Materiales; ³ Departamento de Materiales Radiactivos; ⁴ Departamento de Química;

⁵ Departamento de Estudios del Ambiente.

** Correspondencia: (claudia.gutierrez@inin.gob.mx).

Introducción

El Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) es un organismo dependiente de la Secretaría de Energía. De acuerdo con la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear, que le dio origen, tiene como función planear y realizar investigación y desarrollo en el campo de las ciencias y tecnologías nucleares, así como promover los usos pacíficos de la energía nuclear y difundir los avances alcanzados para vincularlos al desarrollo económico, social, científico y tecnológico del país. El Artículo 43 de la citada ley establece que para el cumplimiento de su objeto, el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares tendrá, entre otras atribuciones, las siguientes: realizar e impulsar las actividades que conduzcan al desarrollo científico y tecnológico en el campo de las ciencias y tecnologías nucleares, así como promover la transferencia, adaptación y asimilación en esta materia; prestar asistencia técnica a las dependencias y entidades públicas y privadas que lo requieran, en el diseño, construcción y operación de instalaciones radiactivas; realizar actividades de investigación y desarrollo relativas a las aplicaciones y aprovechamiento de sistemas nucleares y materiales radiactivos para usos no energéticos requeridos por el desarrollo nacional; además, promoverá las aplicaciones de las radiaciones y los radioisótopos en sus diversos campos. Para tal propósito, en el ININ se trabaja en diversas líneas de investigación aprobadas por su Órgano de Gobierno, entre las cuales se incluyen: ciencias nucleares, fuentes energéticas, tecnología de reactores nucleares, materiales nucleares y radiactivos, seguridad nuclear y radiológica, gestión de desechos radiactivos, química y radioquímica, radiobiología y genética, ecología y protección del medio ambiente, aplicaciones de los aceleradores de partículas, aplicaciones de las radiaciones a los sectores industrial, salud y agropecuario. En el marco de estas líneas de investigación y buscando impulsar la incursión en temas emergentes, con el propósito de aprovechar las oportunidades coyunturales que representan y que abren nuevos espacios para el progreso y bienestar social, se realizan proyectos de investigación centrados en materiales con al menos una dimensión en la escala de los nanómetros, denominados nanomateriales, permitiendo el desarrollo de NyN en el ININ. Lo anterior se debe a que las fases, tamaños y morfologías de los nanomateriales tienen gran influencia en sus propiedades eléctricas, magnéticas, ópticas, fisicoquímicas y catalíticas, en algunos casos únicas y consecuentemente en sus aplicaciones potenciales. Para este fin, se han establecido en el ININ varios laboratorios en donde se realizan estudios sobre métodos físicos y químicos de síntesis, caracterización, diseño y aplicaciones de nanomateriales orientadas a energía, salud y medio ambiente, lo que lo ha llevado a ser partícipe en el desarrollo de la nanociencia y la nanotecnología realizando investigación científica de alta calidad.

Los investigadores del ININ dedicados al campo de investigación de NyN están conscientes de que el desarrollo actual de la industria basada en

nuevas tecnologías en el ámbito mundial, ha iniciado en algunas áreas la incorporación de nanomateriales con características y propiedades específicas en la elaboración de productos de uso común o bien de aplicaciones en áreas muy especializadas. Es importante mencionar que los materiales y fenómenos que ocurren en la nanoescala son de gran relevancia para el desarrollo científico y tecnológico en diversos campos, ya que permiten mejorar o ampliar el espectro de aplicaciones, respecto de los materiales convencionales, así como generar sistemas con nuevas funcionalidades. Áreas como catálisis, electrónica, biomedicina, industria aeroespacial, entre muchas otras, se han visto beneficiadas con el desarrollo de estos materiales. A partir de ellos, se han diseñado y desarrollado en el ININ diversos sistemas, entre los cuales podemos mencionar los siguientes: nanomateriales para detectar y cuantificar radiación ionizante y no-ionizante, nuevos catalizadores con base en nanopartículas metálicas y películas delgadas nanoestructuradas para aplicaciones ambientales y en energía, nanoestructuras metálicas para biomarcado, diagnóstico y tratamiento de algunas enfermedades, depósitos de nanopartículas sobre acero inoxidable con el fin de mitigar efectos de corrosión en reactores de agua en ebullición, desarrollo de agentes microbicidas con nanoestructuras metálicas, para la desinfección del agua. Es importante señalar que para diversas aplicaciones, como las mencionadas en éstas y otras áreas, se requiere que los materiales estén expuestos a diferentes campos de radiación, tanto ionizante como no-ionizante, para lo cual también se han dirigido esfuerzos al estudio de los efectos de la radiación en nanomateriales.

En el ININ se ha contribuido al avance de NyN a través de diferentes mecanismos; éstos incluyen la realización de investigación básica y aplicada, teórica y experimental, divulgación de los logros obtenidos en el campo de manera oral y escrita, instrumentos de protección de propiedad intelectual, así como participación en la organización de foros nacionales e internacionales para la difusión de conocimiento de vanguardia en esta área y formación de recursos humanos especializados.

Líneas de investigación, desarrollo e innovación relacionadas con NyN

Actualmente, la tendencia general en la investigación de nanomateriales, y la de algunos grupos del ININ en particular, va dirigida hacia la obtención de nanomateriales hechos “a la medida”; es decir, se busca desarrollar estrategias de preparación que permitan crear materiales con propiedades determinadas según las requieran aplicaciones potenciales específicas, sin excluir la investigación básica. Esto ha resultado en el establecimiento de muy diversas líneas de investigación en NyN, las cuales se pueden dividir en: síntesis y caracterización y aplicaciones de nanomateriales. A continuación se mencionan estas líneas:

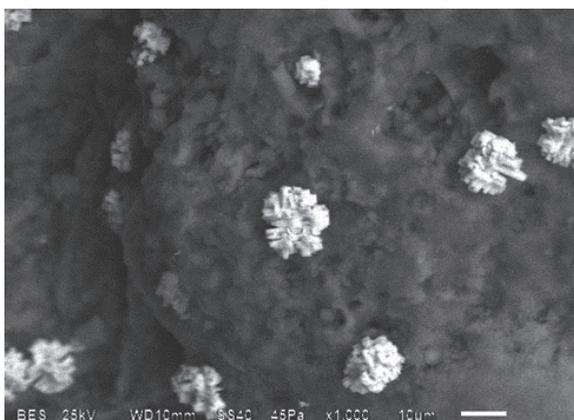
Síntesis de nanomateriales

- Síntesis de nanopartículas (0D) y nanoestructuras unidimensionales (1D), metálicas y bimetálicas por métodos coloidales, calentamiento convencional y asistido por microondas.
- Generación de nanocompositos de nanopartículas y nanoestructuras unidimensionales en matrices poliméricas y de óxidos metálicos, para aplicaciones en termoluminiscencia y catálisis, entre otras.
- Efecto de depósitos de nanopartículas metálicas sobre las propiedades electroquímicas de aceros.
- Efecto de la radiación sobre la estructura y propiedades ópticas de nanomateriales.
- Síntesis de partículas poliméricas esféricas de tamaño nano y micro para aplicaciones biológicas y ambientales.
- Desarrollo de configuraciones alternativas de preparación de nanomateriales utilizando configuraciones no convencionales de ablación láser.
- Preparación de películas delgadas nanoestructuradas multifuncionales por ablación láser.
- Preparación de nanopartículas por ablación láser a alta presión, en vacío y en medio líquido.
- Preparación de nanomateriales híbridos formados por nanopartículas soportadas o embebidas en películas delgadas o en otros materiales.
- Generación de nano- y micro-partículas mediante plasmas producidas en alta y baja presión.
- Diseño de nanomateriales con aplicaciones catalíticas.
- Producción de nanoestructuras para el cuidado del ambiente.
- Influencia de los parámetros de plasma sobre las características de los materiales nanoestructurados sintetizados.
- Depósito de películas delgadas nanoestructuradas con propiedades mecánicas y tribológicas mejoradas.

Caracterización de nanomateriales

- Caracterización de propiedades vibracionales de nanomateriales.
- Caracterización de propiedades ópticas de nanomateriales.
- Caracterización estructural, morfológica y químico-elemental de nanomateriales mediante técnicas como microscopía electrónica (barrido, transmisión y sonda por barrido), espectroscopía fotoelectrónica de rayos-X, espectroscopía infrarroja, así como análisis mediante técnicas de haces de iones.
- Análisis cristalográfico de polvos, películas delgadas, nanopartículas: identificación de fases cristalinas en compuestos, determinación de tamaño de cristalito, orientación cristalina, defectos.
- Refinamiento de estructuras cristalinas por el método de Rietveld.

IMAGEN 1. Micrografía SEM de micropartículas de Ag a tiempos largos de exposición a plasma.

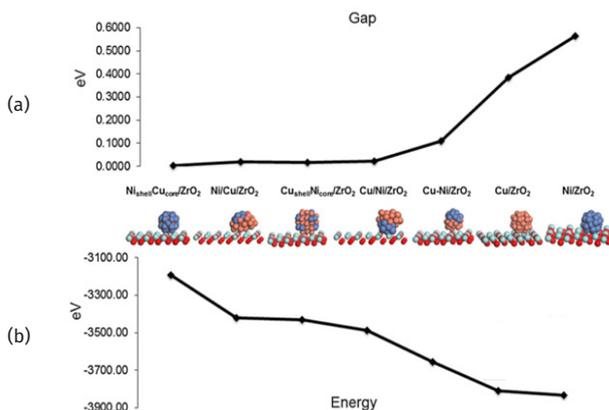


- Evaluación de las propiedades catalíticas de sistemas basados en nanoestructuras metálicas y bimetalicas.

Trabajo teórico

- Modelado de nanoestructuras metálicas.
- Modelado de nanoestructuras soportadas en óxidos.
- Optimización geométrica de las nanoestructuras por medio de métodos clásicos.
- Cálculo de energías y propiedades moleculares.
- Simulación de imágenes de microscopía electrónica de transmisión de alta resolución de nanoestructuras.

GRÁFICA 1. Modelos de nanopartículas bimetalicas Cu/Ni soportadas en ZrO₂. a) Brecha de energía entre los orbitales frontera (GAP), y, b) Energía total del sistema.



Aplicaciones

- Investigación y desarrollo de radiofármacos basados en nanosistemas para uso en medicina nuclear molecular.
- Desarrollo de apósitos bactericidas basados en nanopartículas metálicas.
- Desarrollo de nanomateriales avanzados con propiedades específicas, nuevas o mejoradas, con aplicaciones potenciales en catálisis, energía, dosimetría y ambiente, entre otras.
- Desarrollo de sustratos nanoestructurados para aplicaciones de espectroscopía Raman, específicamente SERS (Surface Enhanced Raman Spectroscopy) en biología, medicina, forense, ciencia de materiales y catálisis, entre otras.
- Implantes en tejidos neuronales de la médula espinal para promover la comunicación perdida entre el cerebro y el resto del cuerpo.
- Almacenamiento de hidrógeno, captura de gases tóxicos, mejoramiento de celdas solares.
- Nanomateriales en la lucha contra el cáncer y en lesiones de médula espinal en ratas de laboratorio para reconexión neuronal.

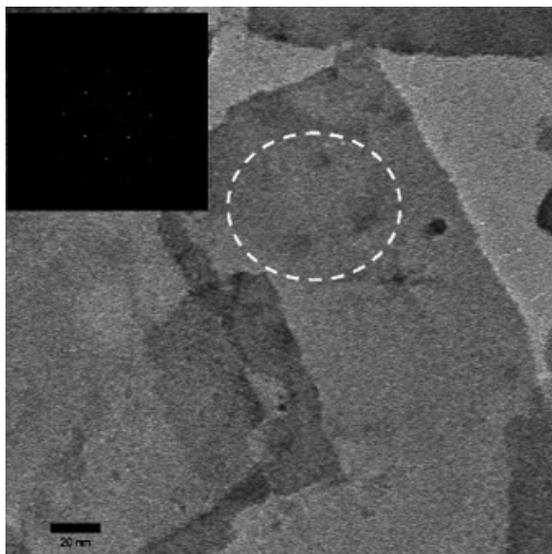
Colaboraciones y proyectos

En el ININ se ha propiciado el trabajo en colaboración con colegas de diferentes instituciones, tanto nacionales como internacionales, lo cual ha permitido aglutinar grupos de trabajo interinstitucionales que realizan investigación científica de alta calidad en la síntesis y caracterización de nanomateriales con aplicaciones potenciales en diversas áreas de la ciencia y la tecnología.

Colaboraciones nacionales

- Universidad Autónoma del Estado de México:
 - Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable, dependiente de la Universidad Autónoma del Estado de México y la Universidad Nacional Autónoma de México; Facultad de Medicina; Facultad de Ciencias; Facultad de Química.
- Universidad Nacional Autónoma de México:
 - Facultad de Química; Instituto de Investigaciones en Materiales; Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico; Centro de Nanociencias y Nanotecnología; Instituto de Física; Facultad de Ingeniería; Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Campus-Querétaro.
- Centro Académico Multidisciplinario de la Universidad de Querétaro.
- Departamento de Física de la Universidad Autónoma Metropolitana.
 - Universidad Autónoma de Nuevo León.

IMAGEN 2. Nanohojas de bismuto obtenidas por ablación láser en líquido asistida ultrasónicamente.



- Instituto Mexicano del Petróleo.
- Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo:
 - Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería.
 - Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales.
- Instituto Tecnológico de Toluca.
- Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey Campus Toluca.
- Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Hospital Siglo XXI del Instituto Mexicano del Seguro Social.
- Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía.
- Instituto Nacional de Cancerología.

Colaboraciones internacionales

- Universidad de Padua-Italia.
- Universidad de Missouri-USA.
- Centro Nacional para la Investigación Nuclear, POLATOM-Polonia.
- Universidad de Palermo-Argentina.
- Instituto de Óptica del Consejo Superior de Investigación Científica de Madrid, España.
- Universidad de Texas en San Antonio, USA.
- Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie, Toulouse, Francia.
- Centre d'Élaboration de Matériaux et d'Études Structurales, Toulouse, Francia.
- Faculty of Chemistry, Warsaw University, Polonia.

- Institut Supérieur de l'Automobile et des Transports, Francia.
- Department of Electrical Engineering & Electronics, University of Liverpool.

Proyectos CONACyT

Una fuente importante del financiamiento de la investigación desarrollada en el ININ en temas de nanociencia proviene de instituciones externas, principalmente de CONACyT; adicionalmente, es importante mencionar que un alto porcentaje de los investigadores que trabajan en esta área, pertenecen a la Red Temática de Nanociencias y Nanotecnología de CONACyT. A continuación, se listan algunos proyectos recientes.

- “Diseño y preparación de radiofármacos teragnósticos basados en sistemas hetero-bivalentes y -multivalentes de reconocimiento molecular específico.” (CB-242443).
- “Preparación de nanomateriales basados en TiO_2 y V_2O_5 utilizando configuraciones no-convencionales de ablación láser. (CB-240998).
- “Desarrollo de catalizadores a base de Cu y Ni soportado en ZrO_2 - CeO_2 para la generación de hidrógeno mediante la reacción de reformado de metanol con vapor de agua en atmósfera oxidante”. (J-023959).
- “Estudio de los efectos de la radiación en la estructura y propiedades de nanomateriales: nanopartículas, nanoestructuras unidimensionales y nanocompositos”. (CB-169682).
- “Síntesis y caracterización de estructuras metálicas unidimensionales para la generación de nanocables”. (J-49603).
- “Desarrollo de un sistema dosimétrico a partir de ZrO_2 y nanopartículas de cobalto”. (CB-04540).
- “Síntesis de nanoestructuras de carbono para su uso como catalizadores en el tratamiento de gases tóxicos”. (ICyT-DF-2007).
- “Síntesis de supercapacitores con nanotubos de carbono”. (CB- 245225).
- “Empleo de nanotubos de carbono para mejorar un sistema de plasma utilizado para tratar gases de efecto invernadero”. (CB- 234737).
- “Recubrimientos delgados de materiales transparentes con alta dureza”. (CB- 252972).
- “Modernización del Laboratorio de Difracción de Rayos-X del ININ”. (INFR-2015-01-251767).

Proyecto OIEA

- “Nanosized delivery systems for radiopharmaceuticals: Nanosized radiolabeled polyamidoamine dendrimers for tumor imaging and targeted therapy”. (Contrato de Investigación No. 18358/Regular Budget Fund).

Infraestructura

El ININ ha establecido laboratorios en los cuales se cuenta con técnicas y/o métodos de síntesis de nanomateriales, físicos y químicos, así como con diversos equipos, entre los que se tienen: molienda mecánica de alta energía, método de sol-gel, método de síntesis hidrotermal, método reducción química, reactor de arco corriente alterna y corriente directa, reactor de descarga luminiscente, sistema de descarga de microondas, reactor de plasma de radiofrecuencia inductivamente acoplado, sistema de depósito por ablación láser, sistema de depósito por pulverización catódica.

El ININ posee laboratorios y equipos destinados a la caracterización de nanomateriales tales como: tres microscopios electrónicos de barrido (SEM), un microscopio electrónico de transmisión (TEM); cada uno tiene acoplado un espectrómetro de dispersión de energía de rayos-X para análisis químico elemental (EDS). También se cuenta con un sistema para análisis elemental por microfluorescencia de rayos-X (μ -EDXRF) y un sistema de retrodispersión de difracción de electrones (EBSD). Se tiene una cámara digital sCMOS para la adquisición de imágenes con resolución atómica y de patrones de difracción de área selecta (SAED), nanodifracción (NBD) y haz convergente (CBDE) en TEM. Un microscopio de sonda de barrido con capacidad para hacer microscopía de fuerza atómica y tunelamiento. Se cuenta con un difractor de rayos-X para polvos con óptica de Bragg-Brentano y un difractor de rayos-X de óptica múltiple, que permite realizar distintas técnicas de análisis cristalográfico como difracción de amplio rango, microdifracción (μ -XRD), dispersión de rayos-X a bajo ángulo (SAXS), platina de calentamiento. Por otra parte, los equipos de preparación de muestras utilizados para microscopía electrónica son un ultramicrotomo, electropulidor Twin-Jet, equipos para recubrir la superficie con carbono y oro de muestras no conductoras. El ININ cuenta con equipos de caracterización por espectroscopías infrarroja, micro-Raman, UV-Vis con reflectancia difusa y fotoelectrónica de rayos-X (XPS). La caracterización de propiedades magnéticas se realiza con un espectrómetro Mössbauer, equipo de hipertermia,

IMAGEN 3. a) Síntesis de nanoestructuras de carbono por plasma; b) formación de nanoestructuras de carbono dentro del reactor.

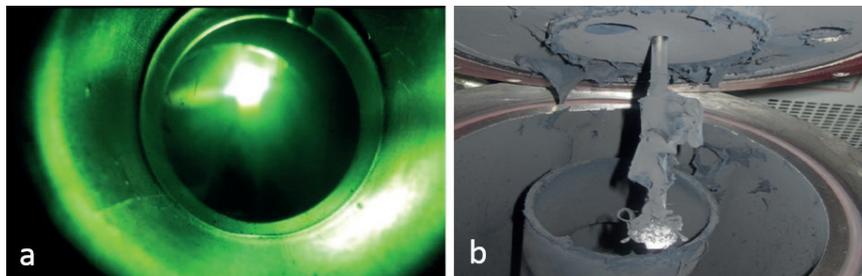


IMAGEN 4. Infraestructura disponible en el Laboratorio de Microscopía Electrónica y Difracción de Rayos X.



magnetómetros. Equipos para determinar área superficial por método BET; analizadores de poros, analizadores termogravimétricos y calorímetros diferenciales de barrido. Se utiliza un cromatógrafo de gases acoplado a un equipo multitareas, un equipo de caracterización de catalizadores, un nanoindentador así como un perfilómetro. Se cuenta con aceleradores de iones pesados en que se tienen implementadas técnicas de caracterización como espectroscopía de retrodispersión de Rutherford (RBS), emisión de rayos-X inducido por partículas (PIXE), análisis por dispersión elástica hacia adelante (EFA), análisis por dispersión elástica de retrocesos (ERDA) y análisis por reacción nuclear (NRA).

Para el desarrollo de radiofármacos basados en nanosistemas utilizados en medicina nuclear se emplea un equipo de imagen preclínica para la obtención de imágenes moleculares ópticas *in vivo*, por luminiscencia; dos cromatógrafos de líquidos de alta eficiencia (HPLC). Un equipo analizador de distribución de tamaño de partícula, potencial Z y peso molecular por dispersión de luz dinámica y un espectrómetro gamma con detector de germanio hiper-

IMAGEN 5. Áreas de investigación, desarrollo y producción de radiofármacos en el ININ.



puro. Se utiliza software Spartan, Topas y libre. Un hecho importante de destacar es que en el ININ se cuenta con infraestructura única en el país para estudiar el comportamiento de los nanomateriales en condiciones especiales, por ejemplo, ante diferentes campos de radiación ionizante y no-ionizante. En este sentido, el instituto tiene aceleradores de electrones, de iones pesados, fuentes de radiación alfa, beta y gamma de diferente intensidad, así como el único reactor nuclear de investigación del país.

Instrumentos de protección de propiedad intelectual solicitados u otorgados

En este rubro le han sido otorgadas al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares las siguientes patentes en México:

- “ ^{99m}Tc -EDDA/HYNIC-GGC-nanopartículas de oro-Manosa como un nuevo radiofármaco para la detección de ganglio centinela en cáncer de mama”. (No. Patente: 336321).
- “Reactor de plasma frío, de barrera dieléctrica con lecho de nanofibras de carbono y sistemas asociados para tratamiento de gases tóxicos en fuentes de emisión fijas y móviles”. (No. de Patente 213914/JUO/igm).

Tres patentes más se encuentran en trámite:

- “Nanopartículas de oro radiomarcada con ^{99m}Tc conjugadas a péptidos c[RGDFK(C)] como un nuevo radiofármaco para la detección *in vivo* de angiogénesis (MX/a/2012/003633)”.
- “Nanopartículas de oro radiomarcadas con ^{177}Lu y conjugadas a péptidos c(RGDFK)C como un nuevo radiofármaco para la terapia de tumores que sobre-expresan integrinas $\alpha(v)\beta(3)$ (MX/a/2012/003632)”.
- “Juego de reactivos para la preparación de radiofármacos de blancos moleculares específicos basados en nanopartículas oro marcadas con ^{99m}Tc (MX/a/2012/003635)”.

Docencia y formación de recursos humanos

Respecto a la formación de recursos humanos, es importante señalar que el ININ no otorga grados académicos, sin embargo, asesora a estudiantes de licenciatura, maestría y doctorado, en colaboración con académicos adscritos a las siguientes instituciones y programas académicos:

- Universidad Autónoma del Estado de México:
 - Facultad de Química: maestría y doctorado en ciencia de materiales; maestría y doctorado en ciencias químicas.
 - Facultad de Medicina: maestría en física médica, doctorado en ciencias de la salud.
- Universidad Nacional Autónoma de México:
 - Maestría y doctorado en ciencia e ingeniería de materiales.
- Universidad Autónoma de Querétaro:
 - Maestría en ciencias (nanotecnología).
- Benemérita Universidad Autónoma de Puebla:
 - Doctorado en dispositivos semiconductores.
- Universidad Autónoma Metropolitana:
 - Maestría y doctorado en ciencias (física).
- Instituto Politécnico Nacional:
 - Maestría en ciencias fisicomatemáticas.

La formación de recursos humanos en NyN ha dado como resultado durante la última década la formación de un considerable número de estudiantes desde licenciatura hasta posdoctorado.

Principales logros en NyN

El trabajo de investigación realizado en el ININ en los campos de NyN se puede resumir en los siguientes logros:

- En investigación teórica se han establecido metodologías para simular diferentes sistemas nanoestructurados geoméricamente estables utilizando métodos de mecánica clásica. Y, con métodos de mecánica cuántica, se han determinado las diferentes propiedades electrónicas de estas estructuras, tales como orbitales fronteras y energías de superficie.
- Se han desarrollado métodos para la producción en masa eficiente y rápida de nano- y micro-partículas de dióxido de titanio y de plata, soportadas en zeolitas mediante la aplicación de descargas eléctricas en agua, a presión y temperatura ambiente. Bajo el mismo principio de la aplicación de descargas eléctricas o plasmas, pero en atmósferas de diferentes gases se pueden obtener, diversos tipos de nanoestructuras de carbono (nanotubos, nanocápsulas) con reactores construidos en el ININ, o recubrimientos formados por nanocompósitos, en donde un cristal nanométrico se encuentra embebido en una matriz amorfa; como TiN, TiN/Si₃N₄, AlN/Si₃N₄, para mejorar propiedades mecánicas, tribológicas y ópticas. Empleando plasmas, también se ha logrado sintetizar partículas poliméricas a partir de alilamina, furano, anilina, pirrol y tiofeno, como homopolímeros y como copolímeros en combinaciones de pirrol-etilenglicol y pirrol-alilamina.
- Implementación de arreglos experimentales no-convencionales en que se hacen interaccionar plasmas producidos por láser de manera simultánea a partir de materiales diferentes, así como configuraciones híbridas de ablación con evaporación térmica, lo que ha permitido preparar películas delgadas nanoestructuradas de materiales ternarios, compositos y sistemas multicapa.
- Obtención de nanomateriales capaces de absorber luz visible para activarse como fotocatalizadores y emplearse en la degradación de compuestos orgánicos en solución, como fármacos o colorantes presentes en aguas residuales, utilizando luz solar.
- Preparación y caracterización de nanopartículas de Au, Ag y Bi por ablación láser en vacío y en medio líquido, logrando obtener nanopartículas y nanoestructuras novedosas con un buen control en el tamaño y forma y, por lo tanto, en sus propiedades físicas; preparación de nanoestructuras bidimensionales por ablación en medio líquido mediante un sistema asistido por ultrasonido.
- Preparación de películas delgadas bifuncionales para uso en celdas de combustible regenerativas y que pueden comportarse como celda de combustible al cambiar su polaridad, llevando a cabo la reacción de reducción de oxígeno de manera directa sin la presencia de agentes intermediarios de reacción.
- Obtención de nanomateriales soportados sobre compuestos porosos tales como zeolitas naturales y sintéticas para la remoción de contaminantes ambientales.

- Desarrollo de metodologías para el tratamiento de células cancerosas utilizando nanomateriales magnéticos en estudios de hipertermia.
- Aplicación de nanopartículas poliméricas obtenidas por plasma, en lesiones de médula espinal en ratas de laboratorio con resultados alentadores de reconexión neuronal.
- Síntesis de partículas organometálicas sobre películas del mismo material con aplicaciones en la remoción de contaminantes como cromo en aguas residuales, así como en aplicaciones optoelectrónicas como colectores solares.
- Investigación teórica y experimental en la formación y crecimiento de partículas de plata de tamaño nano y micro embebidas en una zeolita natural por medio de descargas de barrera dieléctrica pulsada, con el propósito de obtener sistemas de desinfección de agua.
- Nuevos reactores de plasma por arco eléctrico, de descarga dieléctrica para la síntesis de nanoestructuras.
- Autoensamblaje de nanopartículas de oro para la formación de superredes.
- Se estableció un protocolo para el diseño de nanopartículas funcionalizadas con péptidos obteniendo estos sistemas para su uso en diagnóstico de cáncer.
- Desarrollo de nanocatalizadores para la generación de hidrógeno a partir del reformado de alcoholes.
- En lo referente a infraestructura humana, se han conformado diferentes grupos de investigación en nanocatálisis y generación de fuentes alternas y almacenamiento de energía, limpieza de gases tóxicos. También se han conformado grupos con especialidad en la preparación de nanomateriales 0D, 1D, 2D y 3D, así como en su caracterización, a través de diferentes técnicas de microscopía electrónica, espectroscopías y difracción de rayos-X.

Perspectivas sobre el estudio de la NyN

Los diferentes grupos de investigación que trabajan en las áreas de NyN del ININ consideran que las investigaciones, aplicaciones y logros son muy promisorias, ya que pueden contribuir al desarrollo tecnológico que México requiere. En este sentido, se plantean algunas de estas perspectivas.

- Empleo de sistemas multifuncionales de nanopartículas radiomarcadas que de forma simultánea puedan detectar y tratar enfermedades en combinación con otros fármacos, lo que puede convertirse, en la primera alternativa de uso en medicina nuclear molecular.
- Reducción de la contaminación ambiental mediante el desarrollo de nuevas fuentes integrales de energía limpia (hidrógeno) y de supercondensadores para solventar la problemática del déficit en el almacenamiento

de energía. Se plantea mejorar su utilización, para el tratamiento de gases de efecto invernadero, así como explorar aplicaciones en el área de fotocatalisis, para el tratamiento de aguas residuales. Lo anterior, para promover la cultura de desarrollo sustentable en materia de energía y ambiente.

- En relación con el crecimiento de nanomateriales utilizando configuraciones de depósito novedosas, se combinarán diferentes técnicas de depósito para preparar nanomateriales híbridos, en los cuales se tenga control de las fases presentes así como en las fracciones de las mismas, que permitan modular alguna(s) propiedad(es) de interés, a través del control en los tamaños, formas y fases de los mismos. Incursionar en otras áreas de aplicación, que pudieran servir como base de nuevas líneas de investigación, en particular, se plantea trabajar en la desactivación de radionúclidos utilizando ablación láser en medio líquido, combiándola con procesos de plasmónica.
- Es fundamental continuar con el diseño de materiales poliméricos particulados y en nano y micro fibras para aplicaciones en el sistema nervioso central.
- Se pretende establecer un método para la síntesis de nanopartículas con propiedades físicas y químicas específicas, mediante la técnica de descargas eléctricas en agua; así como sistematizar la obtención de películas de TiO_2 , co-dopándolas con diferentes metales, a fin de optimizar sus propiedades foto-catalíticas mediante plasmas a baja presión.

Aunque el ININ cuenta con importante infraestructura física para la síntesis, caracterización y aplicación de los nanomateriales, es importante enriquecerla con equipos de última generación y por lo tanto de mayor sensibilidad; por ejemplo, microscopios electrónicos de emisión de campo, así como mantener un desarrollo propio de recursos humanos altamente especializados en NyN, siendo un sustento fundamental para alcanzar y superar los ciclos de investigación para insertarse en procesos productivos.

Considerando el número de instituciones que realizan investigación, infraestructura, número de publicaciones, convenios internacionales y cantidad de recursos humanos trabajando y formándose en el campo de la nanotecnología, México se encuentra en la segunda posición después de Brasil a nivel de América Latina. A pesar de este logro importante, en nuestro país no existe a la fecha una iniciativa nacional o un Plan Nacional de Nanotecnología que establezca objetivos en el mediano y largo plazo, que permita ubicar objetivos claros y que los esfuerzos en nanotecnología no estén dispersos ni aislados. En este sentido y desde 2001, el gobierno reconoce la nanotecnología como un área estratégica en sus políticas de ciencia y tecnología y ya existen considerables impulsos en el establecimiento de laboratorios nacionales como el Laboratorio Nacional de Nanotecnología en Chihuahua (Nanotech) y el Laboratorio Nacional en Nanociencia y Nanotecnología

(LINAN) en San Luis Potosí. Avanzando en esta dirección, el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares forma parte de la Red Internacional de Nanociencia y Tecnología y de la Red Temática de Nanociencias y Nanotecnología de CONACyT. El conjunto de proyectos que se han expuesto en este catálogo combina la ciencia de materiales, biotecnología, química y otras ramas de la ciencia, para alcanzar logros y aplicaciones novedosas que sirven de plataforma inicial para sustentar una economía basada en la gestión del conocimiento, en la cual México debe participar, atendiendo la Nueva Ley de Ciencia y Tecnología, que redunde en un crecimiento económico apoyado por el sector científico e instituciones gubernamentales asociadas con las empresas.