



# GACETA

# DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM



NÚMERO 149, JULIO - AGOSTO 2021  
ISSN 1870-347X

Nuevos enfoques  
de tecnologías híbridas  
para la eliminación de  
microcontaminantes  
de agua residual

Resiliencia de la Costa Norte  
de la Península de Yucatán  
ante el desarrollo  
de puertos pesqueros

Retos y oportunidades  
en el tratamiento  
de aguas residuales  
del sector metalúrgico

Módulo de control de  
temperatura para muestras  
biológicas en ambientes  
de microgravedad

## EL INSTITUTO DE INGENIERÍA Y EL PORQUÉ 65 AÑOS DE EXISTENCIA SÍ IMPORTAN

Trasladémonos a 1955, cuando un grupo de no más de veinte jóvenes ingenieros comenzó a cultivar la idea de crear un centro de investigación en ingeniería con el propósito de apoyar el desarrollo de la infraestructura del país. Gracias al entusiasmo y profesionalismo de estos jóvenes, altamente calificados y expertos en estructuras, geotecnia e hidráulica, fue posible iniciar sus actividades en el sótano de un edificio del Instituto de Geología en Ciudad Universitaria.

Un año después, en 1956, el reciente grupo de investigación pasó a ser el Instituto de Ingeniería A. C. Los argumentos para justificar y formalizar la existencia de un grupo de este tipo dentro de la UNAM fueron diversos, algunos apoyando la idea, otros, los menos, renuentes a ella, pero, finalmente terminaron aceptando su pertinencia y el cúmulo de beneficios que su existencia como División de Investigación de la Facultad de Ingeniería podría traer al desarrollo del país.

El Ingeniero Fernando Hiriart fue el primer director del IIUNAM, líder comprometido con una visión de la ingeniería que ha prevalecido, a través de los años, convirtiéndolo en el instituto de investigación más importante en Latinoamérica, en cuanto a ingeniería se refiere.

Muy pronto, el IIUNAM reunió rápidamente al personal calificado y la infraestructura necesaria para realizar sus actividades y empezar a transferir los resultados de sus investigaciones a las diferentes instancias públicas y privadas del país, algo que afortunadamente sigue ocurriendo cada vez con más intensidad.

El objetivo de este Instituto fue formar grupos que realizaran investigación para estudiar los problemas de ingeniería de un país inmerso en un desarrollo acelerado de su infraestructura. Esto dio lugar a una gran contribución para la generación de conocimiento, que ha quedado plasmada en grandes obras de ingeniería y en varias publicaciones, que muestran la evolución de este Instituto y sus aportaciones en este campo de la ciencia.

Es sorprendente ver que los más diversos gremios de ingenieros, dentro y fuera del país, saben del trabajo que se realiza

en el IIUNAM, pero es aún más asombroso, conocer el respeto que todos le tienen a esta labor. La investigación que se desarrolla en nuestras instalaciones siempre ha sido y será en beneficio del desarrollo del país, que a menudo, y como resultado de nuestras acciones, salvan la vida y el patrimonio de nuestras comunidades, protegiéndolas de los efectos destructivos de sismos, inundaciones y huracanes, además de ayudar a proteger y restaurar el medio ambiente. Algo importante que tiene el Instituto de Ingeniería que nos gustaría que se supiera en el exterior, es la diversidad de orígenes y género de nuestros grupos de investigación.

De los veinte ingenieros fundadores que inicialmente laboraban en un sótano, actualmente, se tiene una comunidad compuesta por 1209 personas (académicos, administrativos, becarios y honoristas). De ellos, 220 son investigadores y técnicos académicos, la mayoría de ellos, graduados en las mejores universidades del país y del extranjero, 212 son personal administrativo, 512 son estudiantes que colaboran en proyectos de investigación, como parte de su formación y desarrollo de sus tesis de grado, y los 265 restantes son personal contratado por honorarios de acuerdo con las necesidades particulares de los proyectos. Del total de miembros del personal académico, 94.7% de los investigadores cuenta con el grado de doctorado y 5.3% de maestría. De los técnicos académicos 21.2% cuentan con doctorado, 41.3% con maestría, 35.6% con licenciatura y 1.9% no tienen licenciatura.

Las instalaciones físicas del Instituto han aumentado en cantidad y ubicación de manera significativa, actualmente incluyen 24 edificios, 18 en el campus de Ciudad Universitaria, cuatro en el de Juriquilla y dos en nuestra sede de Sisal. Además de estas instalaciones, el Instituto cuenta con pequeños grupos de investigación en las ciudades de Morelia y Monterrey, donde sus académicos comparten instalaciones con otros grupos de la UNAM. El Instituto cuenta dentro de sus edificios con diversos laboratorios y equipos que permiten realizar experimentación para la mayoría de sus proyectos. Entre estos equipos se encuentran: una mesa vibradora y un canal de olas, sólo por mencionar algunos.

Los investigadores del Instituto han tenido la libertad y la capacidad de migrar de un área de interés a otra, en participar

### UNAM

Rector  
Dr. Enrique L. Graue Wiechers  
Secretario General  
Dr. Leonardo Lomeli Vanegas  
Secretario Administrativo  
Dr. Luis A. Álvarez-Icaza Longoria  
Secretario de Desarrollo Institucional  
Dr. Alberto Ken Oyama Nakagawa

Secretario de Prevención, Atención y Seguridad Universitaria  
Lic. Raúl Arcenio Aguilar Tamayo  
Abogada General  
Dra. Mónica González Contró  
Coordinador de la Investigación Científica  
Dr. William H. Lee Alardín  
Director General de Comunicación Social  
Mtro. Néstor Martínez Cristo

### IIUNAM

Directora  
Dra. Rosa María Ramírez Zamora  
Subdirector de Estructuras y Geotecnia  
Dr. Efraín Ovando Shelley  
Subdirector de Hidráulica y Ambiental  
Dra. Rosa María Flores Serrano  
Subdirector de Electromecánica  
Dr. Arturo Palacio Pérez  
Subdirector de Unidades Académicas Foráneas  
Dr. Germán Buitrón Méndez

Secretaría Académica  
Dra. Norma Patricia López Acosta  
Secretario Administrativo  
Lic. Salvador Barba Echavarría  
Secretario Técnico  
Arq. Aurelio López Espíndola  
Secretario de Telecomunicaciones e Informática  
Ing. Marco Ambriz Maguey  
Secretario Técnico de Vinculación  
Lic. Luis Francisco Sañudo Chávez

### GACETA DEL IIUNAM

Editor responsable  
Lic. Verónica Benítez Escudero  
Reportera  
Lic. Verónica Benítez Escudero  
Fotografías  
Archivo Fotográfico del IIUNAM  
Diseño  
Lic. Oscar Daniel López Marín  
Corrección de estilo  
Gabriel Sánchez Domínguez  
Distribución  
Guadalupe De Gante Ramírez

### GACETA DEL IIUNAM

Órgano informativo del Instituto de Ingeniería a través del cual se muestra el impacto de sus trabajos e investigaciones, las distinciones que recibe y las conferencias, los cursos y los talleres que imparte, reportajes de interés e información general. Se publica los días 10 de cada mes, con un tiraje de 1500 ejemplares. Número de Certificado de Reserva otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor: 04 2014 070409264300 109. Certificado de Licitud de Título: 13524. Certificado de Licitud de Contenido: 11097. Instituto de Ingeniería, UNAM, edificio Fernando Hiriart, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, CP 04510, Ciudad de México. Tel. 56233615.

en investigaciones interdisciplinarias y llevarlas a buen fin. Muestra de ello son las realizadas sobre la COVID-19.

El Instituto desde sus inicios se construyó sobre una cultura de investigación y transferencia de conocimiento y tecnologías, siempre dispuesto a colaborar para alcanzar los objetivos nacionales, desarrollando actividades y entregando resultados de investigación requeridos por las grandes obras de infraestructura, la administración y control de riesgos, problemas diversos de vivienda, urbanismo, medio ambiente, recursos hídricos, estuarios y zonas costeras, redes de transporte y comunicación, materiales de construcción, así como productos industriales entre muchos otros. El objetivo principal de estas actividades es contribuir a mejorar la calidad y seguridad de las obras, la protección y rehabilitación del patrimonio natural y del construido, así como la modernización e innovación tecnológica en el sector de la edificación, la minimización tanto de peligros naturales como tecnológicos, además, el desarrollo de los recursos naturales desde una perspectiva de desarrollo sostenible. La existencia de tan diversas líneas y proyectos sustentan nuestro plan de desarrollo teniendo en cuenta las necesidades nacionales de investigación detectadas en el ejercicio práctico de las diferentes ramas de la ingeniería.

El IIUNAM siempre ha tenido una gran vinculación con el gobierno, el sector privado y la academia para atender los problemas nacionales en ingeniería. Como resultado de esto, en 2020 se realizó un total de 73 proyectos, por un monto aproximado de 459 millones de pesos. Del total de esos proyectos de investigación, 68.5% fueron de patrocinio externo y el resto con patrocinio interno. Para el Instituto de Ingeniería siempre ha sido un reto contar con financiamiento público y privado para realizar sus proyectos. Somos *inusuales* entre otros institutos de investigación, tanto de la UNAM como de otras universidades del país por el vasto patrocinio de fuentes externas, públicas y privadas.

En la actualidad, el desarrollo de proyectos por los investigadores y estudiantes del Instituto se ve beneficiado por la disponibilidad de servicios de información, de equipos de cómputo, de herramientas de *software* de alta tecnología así como de diversos laboratorios con instalaciones y equipos propios que permiten llevar a cabo las actividades de experimentación tanto en modelos físicos como en ensayos de laboratorio requeridos por los proyectos, permitiendo realizar nuestra misión que ha sido, es y continuará siendo, desarrollar y usar la mejor tecnología y ciencia existentes para aplicarlas de la mejor manera posible en beneficio de nuestros proyectos. Es importante mencionar y no olvidar que, el Instituto de Ingeniería ha tenido en su génesis la doble perspectiva -investigación y experimentación-, perspectiva que continúa en la actualidad, como una de sus principales características.

En el futuro inmediato, el Instituto de Ingeniería deberá dedicar esfuerzos y recursos a la incorporación de nuevas

tecnologías para que, en conjunto con toda la experiencia adquirida en los últimos 65 años, sigamos siendo uno de los pioneros y referente internacional en temas de investigación y desarrollo tecnológico en ingeniería. En este sentido, el IIUNAM, al no contar con experiencia previa en algunas tecnologías, deberá promover, y a la brevedad posible, iniciar actividades de colaboración con otras instituciones dentro y fuera del país con probada experiencia en el desarrollo de proyectos de investigación que involucren estas tecnologías.

El Instituto de Ingeniería continuará realizando investigación de la más alta calidad, ofreciendo el apoyo técnico y tecnológico a diversas entidades públicas y privadas del país que requieran para garantizar la calidad y seguridad de sus obras. Del mismo modo, generará conocimiento científico y lo difundirá en publicaciones científicas y técnicas de la más alta calidad; además, formará nuevas generaciones de técnicos y científicos, impartiendo cursos y apoyándose en el Programa de Becas del IIUNAM. Organizará encuentros científicos y técnicos, tanto nacionales como internacionales (presenciales, si las condiciones lo permiten o a distancia) complementados por la actividad editorial y por la Unidad de Servicios de Información.

El Instituto, como parte del programa de Posgrado en Ingeniería de la Universidad, colabora con otros Institutos, Centros de investigación y Facultades de la Universidad en el desarrollo e impartición de cursos en temas de ingeniería y dirección de tesis relacionadas con nuestros proyectos de investigación, colaborando así, a formar profesionales de alto nivel. El Instituto de Ingeniería tiene alianzas estratégicas con otras instituciones, como universidades, centros tecnológicos y laboratorios asociados, tanto nacionales como extranjeros, buscando la complementariedad y la excelencia de sus investigaciones.

En sus 65 años de existencia, el Instituto nunca ha tenido que enfrentar situaciones que hayan impedido el desarrollo de sus actividades de investigación, hasta el evento más reciente de ellos: la pandemia debida a la COVID-19, la cual se ha enfrentado con acciones que, hasta el momento, han tenido un mínimo de efectos colaterales, por tanto, no han impedido su funcionamiento.

Espero que estos relatos les traigan buenos recuerdos a quienes han laborado en el IIUNAM a lo largo de estos 65 años. Para los más jóvenes, es mostrarles cuánto ha cambiado el Instituto, hasta llegar a ser lo que ahora es, una institución reconocida en el mundo de la ingeniería, la ciencia y la tecnología, así como un gran orgullo fehaciente de muchos de los que trabajamos en él. |

**Dra. Rosa María Ramírez Zamora**  
Directora

# NUEVOS ENFOQUES DE TECNOLOGÍAS HÍBRIDAS PARA LA ELIMINACIÓN DE MICROCONTAMINANTES DE AGUA RESIDUAL

ULISES DURÁN, DENISSE SERRANO,  
PERLA A. GONZÁLEZ TINEO Y NANCY E. NACIMBA

Los Fármacos y Productos de Cuidado Personal (FPCP), plaguicidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados son ampliamente utilizados por la sociedad moderna. Estas sustancias son desechadas como residuos al ambiente, y son catalogadas como “microcontaminantes” o “contaminantes emergentes”, tanto por sus bajas concentraciones (en el orden de ng/L a µg/L), como por la dificultad para ser detectadas en el ambiente. Su persistencia, baja biodegradabilidad y su capacidad para provocar interacción sinérgica les confiere un potencial elevado para alterar el equilibrio ecológico e incidir en la salud pública. Hay evidencias de que algunos son bioactivos para seres humanos, mamíferos, peces e invertebrados,

debido a que su presencia en las descargas urbanas provoca: a) toxicidad crónica en mamíferos, b) disrupción endócrina en peces, c) resistencia de microorganismos a antibióticos, y d) efectos carcinógenos en organismos acuáticos. Por otro lado, en México las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) tradicionales no los remueven, sólo los dispersan en los ecosistemas acuáticos. Adicionalmente, por su compleja estructura y sus características recalcitrantes, su paso por las PTAR puede generar metabolitos más tóxicos y persistentes que el microcontaminante original (Lapworth *et. al.*, 2012). Esta problemática, ha motivado el desarrollo de tecnologías híbridas que eliminen eficientemente los microcontaminantes del agua residual. Por tanto, es importante abordar la problemática ocasionada por estos contaminantes, describir lo que ocasiona su persistencia en el ambiente y proporcionar un panorama general de algunas de las nuevas tecnologías para su tratamiento.

Los microcontaminantes han provocado una creciente preocupación en México, debido a que sus descargas en el ambiente no están reguladas por normas oficiales y el conocimiento acerca de su destino es muy limitado. La Figura 1 muestra su distribución y cómo son diseminados en agua superficial, subterránea, océanos y suelos por las PTAR (Balakrishna *et. al.*, 2017).

Tabla 1. Clasificación y usos de diversos microcontaminantes (Luo *et. al.*, 2014).

Categoría	Clase	Ejemplos	Usos	Medios de exposición
Plaguicidas	Organoclorados	DDT, Aldrín, Endrín	Insecticida	Descargas domésticas y de la agricultura. Lixiviación de suelos
	Organofosforados	Paratión, Diazinon, Malation	Herbicidas	
	Piretroides	Resmetrina, Aletrina,	Plaguicida	
	Carbamatos	Decametrina		
	Bipridilos	Aldicarb, Carbofuran, Carbaril		
Aditivos industriales	Retardantes	Tetrabromobisfenol A,	Recubrimientos	Descargas domésticas e industriales
	Bromados y fosfatados	Hexabromociclododecano	Retardantes,	
	Parafinas cloradas	y Difenil-éteres	Plastificantes,	
	Compuestos perfluorados	polibrominados	Selladores	
	Surfactantes	Sulfonato de perfluorooctano, Perfluorooctanoato Alquilfenolpolietoxilado	Antiadherentes, Detergentes, Lubricantes,	
Fármacos y productos de cuidado personal (FPCP)	Analgésicos	Diclofenaco, Naproxeno	Médico	Descargas y desechos hospitalarios, domésticos y pecuarios. Escorrentía de afluentes
	Antihipertensivos	Atenolol, Metoprolol	Pecuario	
	Antibióticos	Tetraciclinas, Macrólidos	Recreativo	
	Hormonas	Testosterona, Cortisona,		
	Drogas	Cafeína, Nicotina, Cocaína,		
	Cuidado personal	Benzofenonas, Compuestos aromáticos lipofílicos		

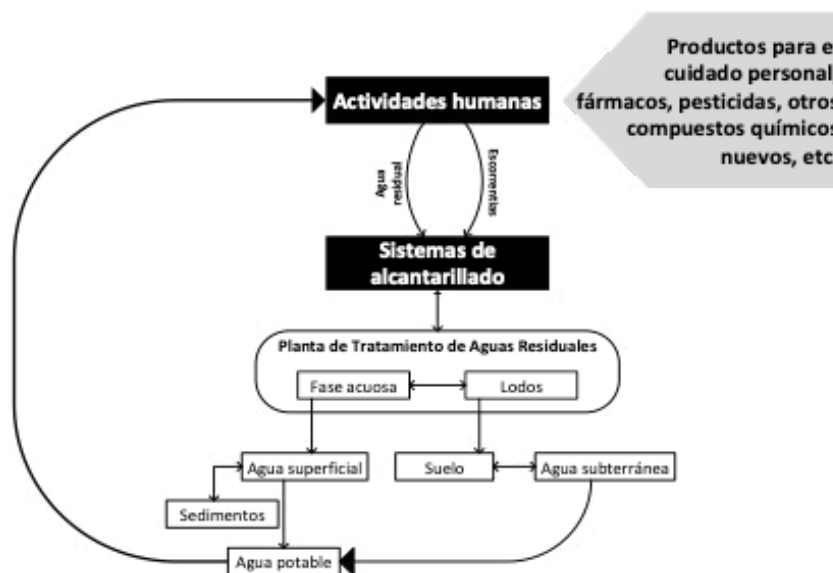


Figura 1. Distribución de los microcontaminantes en el ambiente

## Propiedades fisicoquímicas de los microcontaminantes en el ambiente

Los microcontaminantes tienen propiedades muy variadas, y su conocimiento es un factor fundamental para su tratamiento y eliminación. Éstos poseen características muy diferentes entre sí; por lo que, es necesario conocer los parámetros como el coeficiente de partición de octanol-agua ( $\log K_{ow}$ ), el coeficiente de partición líquido-sólido ( $K_d$ ) y la constante de disociación ácida ( $pK_a$ ), para determinar cómo podrían ser tratadas las diferentes matrices en las que se encuentran (Verlicchi y Zambello, 2015). En las PTAR, las condiciones de operación como la aireación, el pH y el tiempo de residencia hidráulico, pueden optimizarse mediante un claro conocimiento de estos parámetros, y así, mejorar la eficiencia de eliminación de los microcontaminantes (Shishir *et al.*, 2011).

## Sistemas híbridos de eliminación de microcontaminantes

Los sistemas híbridos presentan diferentes configuraciones en las que se acoplan tecnologías fisicoquímicas, electroquímicas y biológicas que en conjunto favorecen la eliminación de los microcontaminantes. Las tecnologías biológicas pueden incorporar procesos anaerobios/anóxicos/aerobios para incrementar la diversidad metabólica, también, pueden hacer uso de soportes para la inmovilización de biopelículas de

diversos microorganismos (bacterias, hongos y protozoos) en las que se genera un ambiente protegido contra agentes tóxicos e inhibitorios (Bassin y Dezotti, 2018). Estos sistemas se han aplicado exitosamente en el tratamiento de efluentes con presencia de fenoles, compuestos farmacéuticos y plaguicidas, incrementando su eliminación del agua residual hasta 90%. En contraste, los procesos aerobios y anaerobios convencionales son poco eficaces, ya que eliminan menos de 20% de los microcontaminantes presentes en los influentes (Alvariño *et al.*, 2016; Ahmed *et al.*, 2017). Por otro lado, las tecnologías fisicoquímicas y electroquímicas son una forma eficiente de remover microcontaminantes, sin embargo, el costo de su implementación es alto y algunos de ellos podrían producir intermediarios tóxicos. Con base en esto, los esfuerzos para remover microcontaminantes se centran en tecnologías híbridas.

En el grupo de investigación, conformado por académicos y estudiantes del Instituto de Ingeniería de la UNAM y del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), se ha estudiado a nivel laboratorio la eliminación de antibióticos presentes en agua residual porcina en condiciones anaerobias y por sorción con carbón activado granular (Nacimba, 2021). Mediante técnicas de biología molecular, se identificaron las poblaciones microbianas responsables de la biodegradación de los contaminantes, además, se desarrollaron modelos de predicción funcional del potencial de eliminación de macrocontaminantes y antibióticos (Gonzalez-Tineo *et al.*, 2020). Posteriormente,

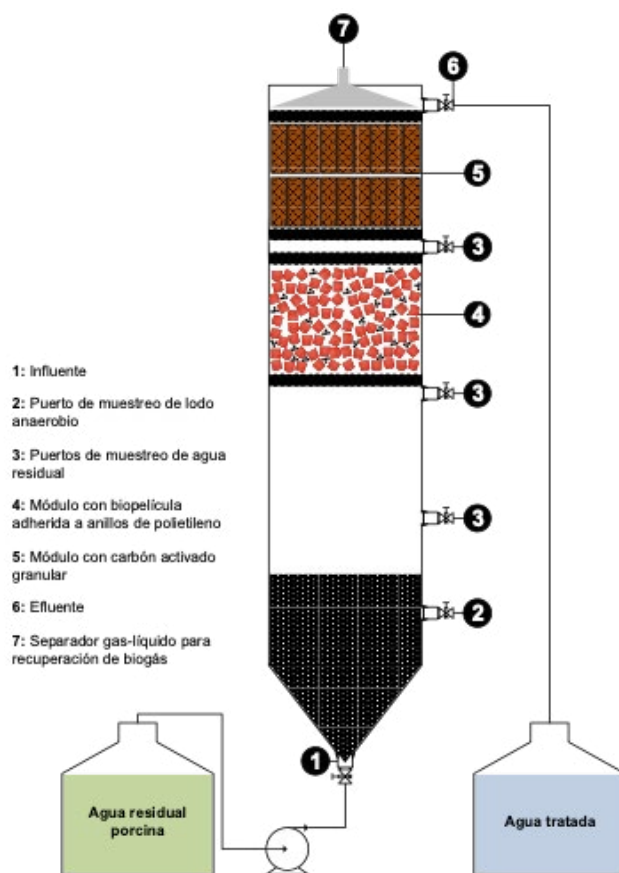


Figura 2. Diagrama esquemático del reactor anaerobio híbrido

los resultados obtenidos se utilizaron para el diseño y construcción de un sistema anaerobio híbrido a escala piloto para tratar agua residual porcina que contenía materia orgánica (500-5000 mg DQO/L), nutrientes (10-100 mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/L y 1-10 mg P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/L) y antibióticos (oxitetraciclina, tetraciclina y tilosina) en niveles traza (≤ 100 µg/L).

La figura 2 muestra la configuración del reactor híbrido anaerobio, que consistió en tres módulos: el primero funcionó como un reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) convencional, el segundo contenía una biopelícula anaerobia adherida a un lecho empacado de anillos de polietileno y, el tercero estaba empacado con carbón activado granular. El reactor operó bajo condiciones mesofílicas (30 °C), a un pH de 7 y alimentado con agua residual porcina a tres Cargas Orgánicas Volumétricas: 3.26, 4.02 y 10.14 kg DQO/m<sup>3</sup>·d.

En todas las cargas orgánicas probadas, el reactor híbrido logró reducir: materia orgánica (>95%) en el

módulo UASB, nutrientes (>90%) en el módulo de lecho empacado y se obtuvieron altas eficiencias de eliminación de los antibióticos (>99%), tanto por biodegradación en los dos primeros módulos como por sorción en el módulo de carbón activado.

### Conclusiones

Ante el descubrimiento de una gran cantidad de microcontaminantes en diferentes matrices ambientales, se ha demostrado que los sistemas de tratamiento convencionales no logran eliminar estos componentes, convirtiéndose en su principal medio de propagación en los ecosistemas. Las tecnologías híbridas son una opción viable para el tratamiento eficaz del agua residual, por lo que es necesario seguir estudiando y desarrollando estos sistemas para extender su aplicación a otros compuestos.

## Agradecimientos

Agradecemos el invaluable apoyo de la Dra. Susana Saval Bohórquez y la Mtra. Tonantzin Ramírez Pérez para la cuantificación de los antibióticos en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Esta investigación fue financiada por el proyecto APN2016-2737, del Fondo CONACyT para el desarrollo de proyectos de Desarrollo Científico para Atender Problemas Nacionales. |

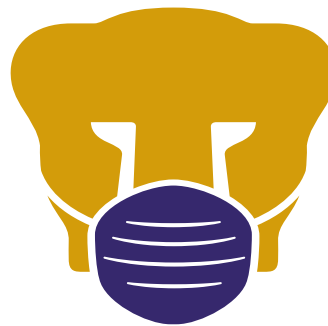
## Contacto

Ulises Durán Hinojosa, e-mail: UDuranH@iingen.unam.mx

## Referencias

- Ahmed, M. B.; Zhou, J. L.; Ngo, H. H.; Guo, W.; Thomaidis, N. S. y Xu, J. (2017). Progress in the biological and chemical treatment technologies for emerging contaminant removal from wastewater: a critical review. *Journal of hazardous materials*. 323: 274-298.
- Alvariño, T.; Komesli, O.; Suarez, S.; Lema, J. M. y Omil, F. (2016). The potential of the innovative SeMPAC process for enhancing the removal of recalcitrant organic micropollutants. *Journal of hazardous materials*. 308: 29-36.
- Balakrishna, K.; Rath, A.; Praveenkumarreddy Y.; Guruge, K. S. y Subedi, B. (2017). A review of the occurrence of pharmaceuticals and personal care products in Indian water bodies. *Ecotoxicology and environmental safety*. 137: 113-120.
- Bassin, J. P. y Dezotti, M. (2018). Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR). *In Advanced Biological Processes for Wastewater Treatment*. Springer, Cham: 37-74.
- Gonzalez-Tineo, P. A.; Durán-Hinojosa, U.; Delgadillo-Mirquez, L. R.; Meza-Escalante, E. R.; Gortáres-Moroyoqui, P.; Ulloa-Mercado, R. G. y Serrano-Palacios, D. (2020). Performance improvement of an integrated anaerobic-aerobic hybrid reactor for the treatment of swine wastewater. *Journal of Water Process Engineering*. 34, 101164.
- Lapworth, D. J.; N. Baran y Stuart, R.S. (2012). Ward, Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence. *Environmental Pollution*. 163: 287-303.
- Luo, Y.; Jiang, Q.; Ngo, H. H.; Nghiem, L. D.; Hai, F. I.; Price, W. E. y Guo, W. (2015). Evaluation of micropollutant removal and fouling reduction in a hybrid moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor system. *Bioresource technology*. 191: 355-359.
- Nacimba, N. E. (2021). Influencia de tres antibióticos de uso veterinario en la remoción de macro y micro contaminantes de agua residual porcícola. *Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Shishir, K. B.; Hyeong, W. K.; Jeong-Eun, O. C. y Hung-Suck, P. (2011). Occurrence and removal of antibiotics, hormones and several other pharmaceuticals in wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment*. 409 (2011):4351-4360.
- Verlicchi, P. y Zambello, E. (2015). Pharmaceuticals and personal care products in untreated and treated sewage sludge: occurrence and environmental risk in the case of application on soil-a critical review. *Science of the Total Environment*. 538:750-767.

PONTE  
PUNMA  
PONTE EL CUBREBOCAS



# RESILIENCIA DE LA COSTA NORTE DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN ANTE EL DESARROLLO DE PUERTOS PESQUEROS

GEMMA L. FRANKLIN, GABRIELA MEDELLÍN, CHRISTIAN M. APPENDINI, ALEC TORRES-FREYERMUTH, JUAN A. GÓMEZ Y JOSÉ LÓPEZ GONZÁLEZ

La costa del estado de Yucatán, localizada en el norte de la Península del mismo nombre, tiene una extensión de aproximadamente 360 km. A finales de los años sesenta inició la construcción de puertos pesqueros de pequeña escala en esta zona, con el objetivo de contribuir al desarrollo económico de la región. Actualmente, existen doce puertos para actividades de pesca y turismo en el estado de Yucatán. Estos puertos se desarrollaron en comunidades pesqueras ubicadas en islas de barrera, ofreciendo un acceso a zonas de protección y calma por medio de un par de escolleras que conectan el mar con una rada portuaria (Fig. 1). Sin embargo, el transporte litoral de arena, que es dominante de este a oeste, se ha visto interrumpido debido a la presencia de dichas escolleras. Esto ha generado un déficit de sedimento aguas abajo de los puertos (al poniente), resultando en erosión a lo largo de la costa norte de Yucatán. Este déficit de sedimento, en sinergia con algunos efectos del cambio climático, tales como el aumento en la frecuencia e intensidad de tormentas y huracanes, así como el

desarrollo de infraestructura costera mal planeada, afectan la resiliencia del sistema, es decir, su capacidad para recuperarse ante perturbaciones (Lake *et. al.*, 2013), como son los eventos extremos. En este trabajo se evalúa el impacto de los puertos en la línea de costa, a diferentes escalas temporales, utilizando diferentes técnicas de monitoreo costero.

## Materiales y Métodos

Este estudio emplea imágenes de satélite, vuelos de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) y perfiles de playa de alta resolución, para investigar los impactos de diferentes puertos de la costa norte del estado de Yucatán en la línea de costa a diferentes escalas de tiempo, desde periodos estacionales a multi-anales. En el caso de Sisal, se presenta un estudio a escala estacional mediante el monitoreo de alta resolución (Figura 2) con GPS diferencial y VANT llevado a cabo a lo largo de un año (05/2019-04/2020), mientras la comparación de los otros puertos (El Cuyo, San Felipe, Dzilam de Bravo, Chabihau, Telchac, Chuburna y Sisal) se realiza a escala de décadas por medio de imágenes de satélite (1980-2019).

Para estimar las tasas de erosión de la línea de costa asociadas a la construcción de los puertos, se analizaron imágenes de satélite a lo largo de la costa. La herramienta *CoastSat* (Vos *et. al.*, 2019) fue empleada para extraer la línea de costa en zonas aledañas a siete puertos seleccionados (Fig. 3). La variabilidad estacional se estudió a partir de un programa de monitoreo quincenal con GPS diferencial en tiempo real en las playas aledañas al puerto de Sisal (Fig. 2a), con un total de 40 perfiles de playa separados por 100 m, realizados entre mayo de 2019 y abril de 2020. Los perfiles fueron medidos partiendo de la duna, hasta una profundidad aproximada de 1.5 m. Para evaluar la evolución de la línea de costa a cada lado del puerto, la posición de la cota 0 fue extraída en cada perfil de playa. Los cambios en el volumen de la playa al este y oeste del puerto fueron estimados integrando desde el límite terrestre hasta la cota -0.5 m.

Durante el periodo de medición de perfiles de playa alrededor del puerto de Sisal, se llevaron a cabo algunas acciones para mitigar la erosión al oeste del Puerto por parte de particulares y la Administración Portuaria Integral. Específicamente, se instalaron tres rompeolas tipo ReefBalls™ (Fig. 2a y b) y se realizó un relleno de playa de 860 m<sup>3</sup> (Fig. 2c). Para evaluar el relleno de playa se realizaron vuelos con un VANT. El oleaje presentó mayor energía durante los meses de invierno y primavera, lo cual se debe al oleaje generado durante los *Nortes*, mientras que, en primavera, está asociado a las brisas

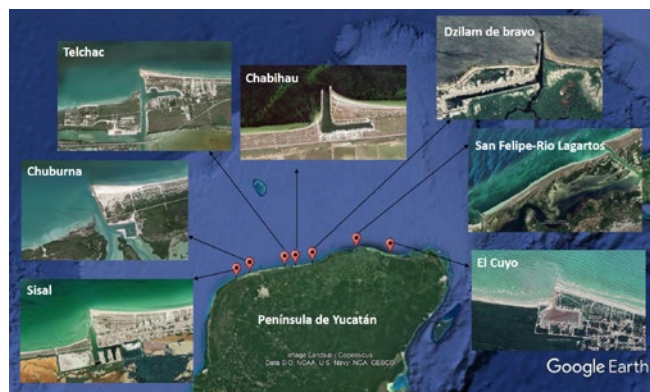


Figura 1. Área de estudio. Puertos de la costa norte de Yucatán estudiados en este trabajo. Imágenes de Google Earth





Figura 2. Posición de los perfiles de playa levantados en Sisal (amarillo), los polígonos de los vuelos (cuadros negros y puntos de control en rojo) y la ubicación de los Reefballs™ (líneas en azul claro). Modificada de Franklin *et. al.* (2021)

locales. El oleaje incidente con un ángulo alto fue más persistente durante los meses de primavera-verano, sin embargo, se presenta la mayor parte del año y es quien controla el transporte litoral en la zona.

## Resultados

Los resultados del análisis de las imágenes de satélite demuestran que los puertos han generado acreción en playas localizadas al este, cuyo avance se encuentra controlado por la extensión de las escolleras y la orientación local de la línea de costa. Una vez que la línea de costa alcanza el extremo de la estructura, se acelera el proceso de *bypass* natural de arena hacia el oeste de los puertos y resulta en el azolvamiento de los canales de acceso. El *bypass* natural de arena puede ayudar a mitigar la erosión al oeste de los

puertos, sin embargo, el azolvamiento de los canales muchas veces impide el acceso a los puertos, generando la necesidad de los dragados.

La Figura 3 muestra las imágenes de las líneas de costa antes y después de la construcción de los puertos. La excepción al patrón descrito anteriormente se presenta en el puerto de El Cuyo, el cual, tiene una orientación más parecida al ángulo de incidencia del oleaje, por tanto, las tasas de transporte son menores y el transporte litoral neto es menor. Los puertos de Chabihau, Dzilam de Bravo y San Felipe-Ría Lagartos, se ubican en un área donde se presentan ondas de arena submarinas que afectan la hidrodinámica de la zona. Los resultados muestran una tendencia clara de acumulación al este y erosión al oeste de los puertos (Tabla 1). Su efecto sobre la línea de costa varía de 920 a 1780 m al este de los puertos y de 1450 a 3000 m al oeste (Tabla 1).

Tabla 1. Estimaciones del efecto de los puertos en la línea de costa del norte de Yucatán. Modificada de Franklin *et. al.* (2021)

Ubicación (m)	El Cuyo	San Felipe	Dzilam de Bravo	Chabihau	Telchac	Chuburna	Sisal
Avance del lado este de la escollera	170	Avance y retroceso obvio, pero con morfología compleja	270	340	310	310	340
Avance del lado oeste de la escollera	-50		-90	-100	-240	-240	-150
Extensión del efecto al este	920		1000	2100	1500	1500	1780
Extensión del efecto al oeste	3000		1450	2730	2500	2500	2550

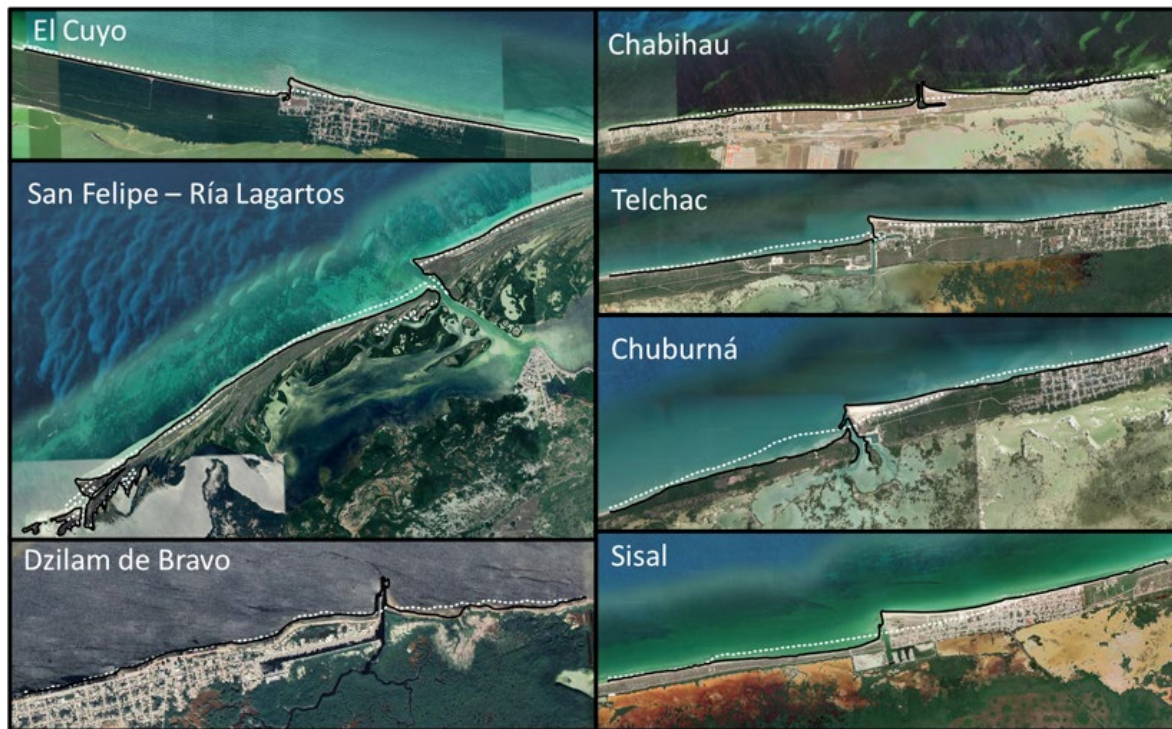


Figura 3. Cambios en la línea de costa en varios puertos en el norte del Yucatán, obtenidos con CoastSat. La línea de costa actual (línea negra) corresponde a 2020 y la línea de costa antes de la construcción del puerto (línea blanca punteada) corresponde a 1984 (San Felipe -Ría Lagartos and El Cuyo), 1985 (Sisal y Telchac), 1986 (Chuburna), y 1987 (Chabihau y Dzilam de Bravo) (Figura modificada de Franklin, *et. al.*, 2021)

En el caso del puerto de Sisal, a lo largo del año, el volumen al este del puerto muestra un comportamiento cíclico estacional con una ganancia de arena al final del periodo de estudio del orden de  $76.0 \text{ m}^3/\text{m}$  (Fig. 4a), mientras, el lado oeste presenta una variación neta de  $-60.4 \text{ m}^3/\text{m}$  (Fig. 4a). Lo anterior muestra el efecto que genera el puerto al interrumpir el transporte del sedimento a lo largo de la costa, afectando así, la resiliencia del sistema.

La posición de la línea de costa extraída de cada perfil para todas las campañas muestra cambios parecidos a aquellos observados en el volumen de la playa. La posición con respecto al muestreo inicial al este del puerto (Fig. 4b), muestra variabilidad significativa con un aumento neto en el ancho de la playa para la mayoría de los perfiles, con un promedio general de 3 m y un máximo de 8 m. La posición al oeste del puerto (Fig. 4b), también, muestra variabilidad significativa, con una disminución en el ancho de playa

en promedio de  $-1.5 \text{ m}$  y un máximo de  $-10.1 \text{ m}$  (P25). La excepción ocurre al frente de donde fue instalada la primera sección de ReefBalls™ (P27-P32), donde se muestra un incremento en el ancho de la playa promedio de 5.7 m y máximo de 10.7 m en P31 (Fig. 4b). La disminución-aumento en el ancho de la playa reduce-incrementa la resiliencia de la costa ante eventos extremos.

La línea de costa obtenida con los VANT fue comparada con la obtenida con los perfiles de playa para comparar los métodos. Los resultados muestran diferencias en promedio al este del puerto de 1-3.5 m, un valor máximo de  $3.6 \text{ m} \pm 1.9$  y un valor mínimo de  $1.12 \text{ m} \pm 0.4$ . Al oeste del puerto, la diferencia en promedio presentó un valor máximo de  $4.2 \text{ m} \pm 4.1$  m y un mínimo  $0.7 \pm 0.4$  m. Ambos métodos presentan tendencias muy parecidas, pero, las diferencias en algunos casos indican que aún se requiere estudiar con más detalle para identificar los factores que generan estas diferencias.

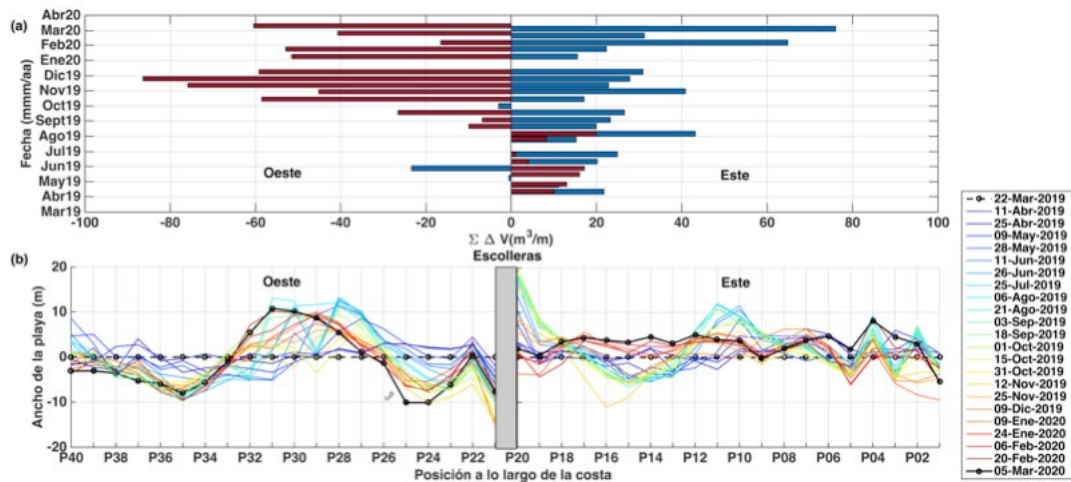


Figura 4. a) Cambio del volumen acumulado al este (azul) y al oeste (rojo) del puerto. b) Cambios en la posición de la línea de costa con respecto al muestreo al oeste y al este del puerto de Sisal. Modificados de Franklin *et. al.* (2021)

Con respecto al relleno de playa, se observó un aumento en el volumen de arena en febrero de 2020 (6 de febrero, 860 m<sup>3</sup>). Sin embargo, dos semanas después, el volumen registrado alcanzó el volumen estimado al inicio del muestreo en abril de 2019 (390 m<sup>3</sup>).

## Conclusiones

El uso de mediciones directas e imágenes de percepción remota, demuestra que los puertos de Yucatán generan una tendencia clara de acumulación de arena al este de ellos y erosión al oeste. En el orden de décadas, la erosión estimada hacia el oeste de los puertos por medio de imágenes de satélite fue entre 50 y 240 m. La longitud de las escolleras y la periodicidad de los dragados de la playa, juegan un papel importante en el efecto de los puertos sobre la línea de costa. Los cambios en la línea de costa en la zona alejada del puerto de Sisal son similares a los otros puertos, depositación al oriente y erosión aguas abajo, a pesar de que se presenten otras estructuras que modulen estas tendencias (como los ReefBalls™ y el muelle de Sisal). El déficit de sedimento corriente abajo debido a la presencia de los puertos afecta la resiliencia del sistema al disminuir su capacidad de recuperación ante eventos extremos. Estos estudios ayudan a entender mejor el efecto del desarrollo de puertos en

la costa y su resiliencia, además, proporciona información que ayude a mejorar los sistemas de manejo en la zona costera.

## Agradecimientos

Agradecemos el apoyo financiero del CONACYT a través de los proyectos Cátedras CONACYT-1146, INFR-2014-01-225561, CB-284819, LANRESC [299063], TAMU-CONACYT 19-20-013y de la DGAPA UNAM (PAPIIT IN101218 y PAPIIT IA100418) y a Camilo Rendón Valdez por su apoyo técnico en el campo y Gonzalo Martín Ruiz y Roger Pacheco Castro por su apoyo en cómputo. |

## Referencias

- Franklin, G. L.; Medellín, G.; Appendini, C. M.; Gómez, J. A.; Torres-Freyermuth, A.; González, J. L. y Ruiz-Salcines, P. (2021). Impact of port development on the northern Yucatan Peninsula coastline. *Regional Studies in Marine Science*, 101835.
- Lake, P. S. (2013). Resistance, resilience and restoration. *Ecological management & restoration*, 14(1), 20-24.
- Vos, K.; Harley, M. D.; Splinter, K. D.; Simmons, J. A. y Turner, I. L. (2019). Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Eng.* 150, 160-174.

# RETOS Y OPORTUNIDADES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL SECTOR METALÚRGICO

FRANCISCO J. GERVANTES,  
J. ERNESTO RAMÍREZ Y GERMÁN BUITRÓN

En la actualidad, en México uno de los sectores industriales más dinámicos es el del acero, en 2019 alcanzó una producción de casi 2,000 millones de toneladas de acero bruto, de las cuales, 8% se emplea para la producción de acero inoxidable (Worldsteel / Steel Data Viewer, 2020).

El acero inoxidable es un material estratégico que es ampliamente utilizado en los sectores de la construcción y manufactura de autopartes, también, es demandado por la industria química, petroquímica, alimentaria, entre muchas otras.

Durante la producción de acero inoxidable se generan grandes volúmenes de aguas residuales altamente contaminadas que ponen en riesgo la vida de los seres humanos y de las especies acuáticas. Por estos motivos, la Unidad Académica Juriquilla del IIUNAM desarrolló una tecnología novedosa y efectiva para tratar aguas residuales con estas características.

El acero inoxidable, en su proceso de fabricación, es expuesto continuamente a atmósferas oxidantes y a elevadas temperaturas, provocando la formación de distintas capas de óxido sobre la superficie del mismo. Estas capas superficiales están compuestas por óxido de hierro y una capa intermedia con bajas cantidades de cromo (Covino *et. al.*, 1986). Dentro de los principales óxidos que conforman estas capas se encuentran el óxido de cromo III ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), la wustita ( $\text{FeO}$ ), entre otros (Narváez *et. al.*, 2013). Estas capas de óxidos generan defectos en la superficie del metal, los cuales, son eliminados en el proceso de decapado. El decapado del acero inoxidable es una operación química mediante la cual se eliminan los óxidos de la superficie del metal mediante la inmersión en una solución ácida o mediante procesos electroquímicos. Esta operación promueve un enriquecimiento en cromo sobre la superficie pasiva; además, en el proceso de decapado se emplean dos baños ácidos principales (Noh *et. al.*, 2000):

- Una mezcla de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) con ácido fluorhídrico (HF).
- Una mezcla de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) con agua oxigenada ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ).

Si bien, este método es el más eficiente para la eliminación de los óxidos generados, también es un hecho que, como resultado de este proceso, se forma una capa pasiva protectora de óxido de cromo III ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) (Gümpel *et. al.*, 1996). Además, durante la pasivación, el estado activo del ácido nítrico en solución, genera un estado pasivado donde casi no se observa corrosión, formando una película de óxido de varios nanómetros de espesor en la superficie de los metales pasivados con lo que se evita la corrosión de las piezas de acero inoxidable y se logra un mejor acabado de las mismas (Sharma, 2011).

En el proceso de decapado, los baños ácidos son consumidos mientras se disuelven los metales. Estos baños son cambiados frecuentemente por nuevas soluciones ácidas, debido a que las anteriores dejan de ser efectivas (Frías y Pérez, 1998). Derivado de estos procesos químicos a los que son sometidas las piezas de acero inoxidable, se genera un gran volumen de aguas residuales, con altos niveles de contaminación, representando un reto para los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales. Estos efluentes descargados por el sector metalúrgico, además de tener un pH muy bajo (típicamente entre 2 y 3), contienen altas concentraciones de nitrato y de metales pesados. De hecho, las principales especies metálicas que se encuentran en estas aguas residuales son Fe (III), Ni (II) y Cr (III). La Tabla 1 muestra la composición típica de aguas residuales generadas por una empresa productora de piezas de acero inoxidable.

Para limpiar óxidos ligeros o escamas y liberar partículas de hierro de la superficie de acero inoxidable, se utiliza el ácido cítrico, cuya capacidad quelante ayuda a eliminar una variedad de iones metálicos que de otra manera afectarían adversamente la resistencia a la corrosión de la aleación. Los compuestos orgánicos combinan la actividad de la solución ácida con propiedades secuestrantes y amortiguadoras. Este tipo de tratamiento se utiliza como paso de limpieza final para la fabricación de piezas para las industrias alimentaria y química (Ramírez *et. al.*, 2020). El ácido cítrico es un ácido de uso común, económico y seguro en comparación con otros compuestos. La concentración utilizada en el proceso de decapado está entre 2 y 10% en peso, por lo que es factible su detección en efluentes generados de estos procesos.

Tabla 1 Caracterización de las aguas residuales generadas en la industria del acero inoxidable.

	mg/L	Elemento	mg/L	Elemento	mg/L	Elemento	mg/L
N-NO3-	6865 ± 100	Fe	12506 ± 110	K	48.3 ± 3	Pb	13.5 ± 2
N-NO2-	48.2 ± 5	Cr	2912 ± 111	B	45.6 ± 9	Cu	12.6 ± 1
N-NH4+	93.4 ± 6	Ni	2212 ± 54	Co	37.5 ± 0.7	V	12.5 ± 0.4
DQO	ND	Sn	836.5 ± 14	Na	33.7 ± 2	Mg	5.4 ± 0.1
		Mn	579.5 ± 32	P	28.6 ± 2		
pH, upH	3.3	Si	244 ± 5	Ca	26.5 ± 4		
ORP, mV	170	Mo	87 ± 4	Al	13.8 ± 0.6		

DQO, demanda química de oxígeno; ND, no detectada

### Propuesta tecnológica

El biorreactor desnitrificante de membranas con fluidización en remolino, es una tecnología novedosa y efectiva para tratar aguas residuales provenientes del proceso de decapado y pasivado durante la producción de piezas de acero inoxidable. Las características principales de este tipo de efluentes son: pH ácido (entre 2 y 3) y alto contenido de nitrato (5000-8000 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/L) y de metales pesados (principalmente Fe, Cr y Ni, Tabla 1). Los efectos al medio ambiente originados por la descarga de este tipo de efluentes en cuerpos de agua receptores son muy severos, ya que la alta concentración de nitrato propicia la eutrofización de estos ecosistemas, mientras que el pH extremadamente ácido y los metales pesados son tóxicos para las especies acuáticas (Cervantes 2009). Por tal motivo, es imperativo tratar estas aguas residuales antes de ser vertidas a cuerpos de agua receptores.

Es importante evitar que prevalezcan las condiciones inhibitorias en el proceso desnitrificante, ya que es posible que se acumulen intermediarios, como el nitrito y el N<sub>2</sub>O, los cuales son indeseables, ya que el primero es tóxico para los humanos y las especies acuáticas, mientras que el segundo es un gas de efecto invernadero, el cual es 300 veces más potente que el dióxido de carbono.

Estudios previos han indicado que la desnitrificación, reducción microbiana de nitrato a nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>), puede ser llevada a cabo en presencia de estos metales presentes en las aguas residuales del sector metalúrgico (Ramírez *et al.* 2018). La desnitrificación consta de cuatro etapas, las cuales son catalizadas por enzimas distintas en

microorganismos desnitrificantes: reducción de nitrato a nitrito, de nitrito a óxido nítrico (NO), de NO a óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), y, finalmente, de N<sub>2</sub>O a N<sub>2</sub> (Cervantes 2009).

El proceso de desnitrificación puede ser llevado a cabo en varias configuraciones de biorreactores, como el reactor de lecho fluidizado (FBR) y el reactor de membranas (MBR). Los reactores FBRs son muy eficientes en el tratamiento de efluentes ácidos debido a su gran resistencia a inhibidores y a su potencial de reciclar el agua amortiguadora de pH que produce. Los MBRs presentan ventajas sobre los procesos de tratamiento convencionales por los pocos requerimientos del reactor, la alta calidad del efluente, buena capacidad de desinfección, soporte de mayor carga volumétrica y menor producción de lodos (Muñoz-Sierra *et al.*, 2019). Unir estas características en un reactor dio forma al Biorreactor Anaerobio de Membranas con Fluidización (AFMBR), el cual es una alternativa que combina un reactor anaerobio de lecho fluidizado (AFBR) con la filtración de membranas sumergidas. En este tipo de reactores se utiliza frecuentemente carbón activado granular (GAC) como medio fluidizable, el cual sirve como soporte de la bio-película activa, además de controlar la obstrucción superficial de la membrana a través de la fricción que ejerce sobre la superficie de la misma (Aslam *et al.* 2014). Sin embargo, los reactores FBRs tienen problemas relacionados con la separación de medios y control de la bio-película, así como control de la altura del lecho, alta sensibilidad de la distribución del flujo en la entrada del reactor, e incertidumbre en el control de una fluidización estable. Por otro lado, en los reactores MBR se presenta la obstrucción de la membrana. Este tipo de taponamiento puede ser reversible,

por lo cual, se pueden tomar medidas para su disminución, como incrementar la intensidad de aeración por burbujeo y/o incrementar la duración o el flux del retro-lavado (Katsou *et al.* 2011). Sin embargo, varias de estas técnicas requieren altos costos de energía, lo que limita su aplicación (Yoo *et al.* 2012; Shin *et al.*, 2014), además de reducir el tiempo de vida de las membranas e incrementar los costos (Aslam *et al.*, 2014). Varios estudios han investigado formas innovadoras mediante las cuales la colmatación de la membrana puede ser controlada por el efecto de abrasión que provoca el carbón activado granular fluidizado sobre la superficie de la membrana. Sin embargo, la mayor cantidad de energía consumida en el proceso es para lograr la fluidización del GAC en el reactor con el fin de cubrir la mayor cantidad de membrana posible.

A diferencia de los métodos antes expuestos para realizar la desnitrificación, nuestro grupo de trabajo desarrolló un biorreactor anaerobio de membrana con fluidización en remolino (ASFMBR por sus siglas en inglés, Figura 1).

Se pensó en que el flujo que vamos a tratar requiere poca energía para funcionar como trayectoria de un medio fluidizable, por ello, recurrimos al hidrociclón. En éste, el flujo que tendría el medio fluidizable sería con una

circulación de forma rotacional. Esta circulación se logra con la entrada tangencial que provoca una separación del medio, manteniendo en la zona inferior partículas grandes y, en la zona superior, partículas pequeñas. Estas partículas pueden entrar en zonas de flujo bajo, como en el centro del hidrociclón y bajar nuevamente, lo que genera una circulación de partículas en distintas zonas del reactor. Un hidrociclón ofrece varias ventajas, como baja inversión, bajo mantenimiento y costos de operación, y tiene una capacidad flexible. Al conjuntar un hidrociclón con un biorreactor anaerobio de membranas, se tiene un reactor que, como consecuencia de la vorticalidad del flujo generado por éste, se ejercería un esfuerzo cortante sobre las paredes de las membranas. Ésta es la tecnología desarrollada en este proyecto .

El biorreactor fue combinado con una columna de precipitación que fue colocada antes de la entrada del biorreactor ASFMBR. El propósito de la columna de precipitación era recuperar los metales presentes en el agua residual metalúrgica. Para lograr esto, se mezcló el agua residual a tratar con el efluente generado en el ASFMBR, mediante una alta tasa de recirculación, con el fin de incrementar el pH del influente metalúrgico.

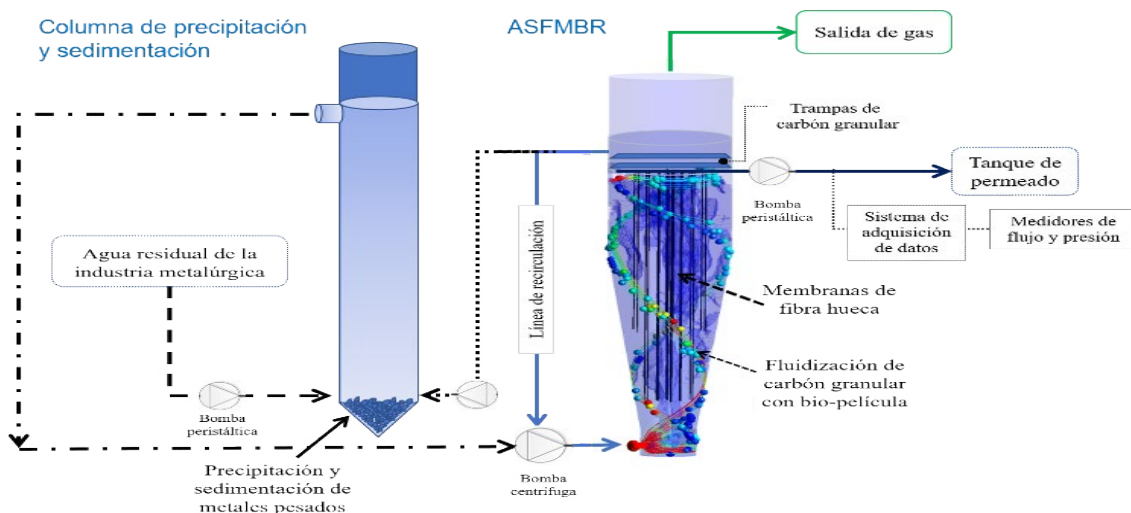


Figura 1. Sistema de tratamiento de aguas residuales desarrollado: Reactor ASFMBR combinado con tanque de precipitación para la recuperación de metales y la reducción de nitrato de aguas residuales del sector metalúrgico

## Desempeño de la propuesta tecnológica

La capacidad del biorreactor ASFMBR, en combinación con la columna de precipitación, fue probada para tratar aguas residuales descargadas por una industria metalúrgica ubicada en la ciudad de Querétaro, cuyas características se resumen en la Tabla 1. El ASFMBR (desarrollado en la Unidad Académica Juriquilla) logró reducir más de 94% del nitrato presente en este efluente industrial, sin acumulación de intermediarios indeseables, como nitrito y  $N_2O$ . Además, la alcalinidad generada durante el proceso desnitrificante permitió controlar el pH en el biorreactor, sin necesidad de agregar agentes neutralizantes externos. La alcalinidad producida en el sistema permitió aumentar el pH en la columna de precipitación, lo cual permitió que más de 40% de los metales presentes en el agua residual pudieran ser recuperados en forma de diversos minerales. Estos minerales recuperados en la columna de precipitación fueron caracterizados por difractogramas de rayos X y los principales detectados fueron Carbonato Ferroso

$FeCO_3$ , Carbonato de Niquel  $NiCO_3$ ,  $CrOOH$ , magnetita, ferrihidrita, entre otros (Figura 2). Otro aspecto favorable a resaltar es que el ASFMBR mostró estabilidad durante el periodo de operación (60 días), sin colmatación de las membranas. Por tanto, se concluye que esta tecnología es robusta y efectiva para tratar aguas residuales del sector metalúrgico, logrando altas eficiencias de reducción de nitrato y una gran cantidad de metales recuperados durante el tratamiento. Esta investigación es importante ya que México ocupa el 14° lugar como productor de acero bruto a nivel mundial.

Derivado de estas investigaciones, se ha presentado una solicitud de patente ante el Instituto Mexicano de Propiedad Industrial (IMPI).

## Agradecimiento

Este trabajo de investigación ha sido desarrollado gracias al apoyo recibido a través del proyecto TA100120 financiado por la DGAPA-UNAM. |

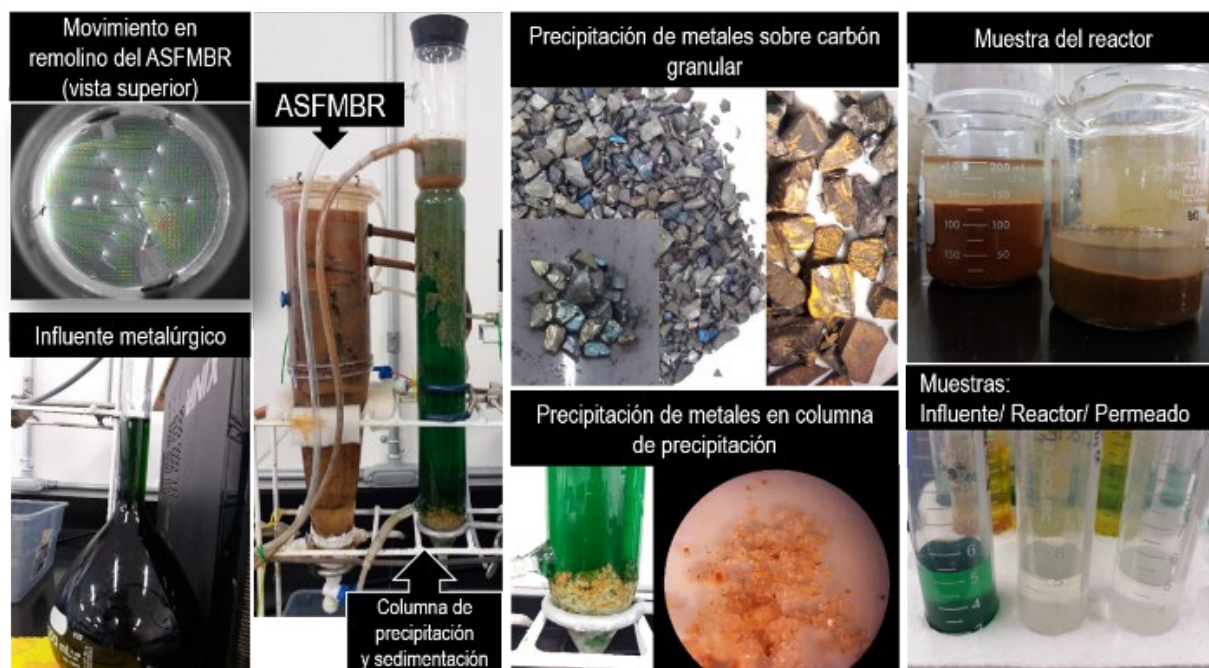


Figura 2. Colección fotográfica que muestra las aguas residuales del sector metalúrgico tratadas, el sistema de tratamiento desarrollado, los minerales recuperados durante el tratamiento, así como la calidad del efluente tratado

## Referencias

- Aslam, M.; McCarty, P. L.; Bae, J. y Kim, J. (2014). The effect of fluidized media characteristics on membrane fouling and energy consumption in anaerobic fluidized membrane bioreactors. *Sep Purif Technol* 132, 10–15.
- Cervantes, F. J. (2009). *Environmental Technologies to Treat Nitrogen Pollution: Principles and Engineering*. IWA Publishing, London.
- Covino, B. S.; Scalera, J. V. y Fabis P. M. (1986). Pickling of Stainless Steels--a Review. *Metall. Trans. A* 137-149.
- Frías, C. y Pérez, O. (1998). Recuperación de ácidos y metales en baños agotados del decapado de aceros inoxidables. *Revista de Metalurgia* 34, 427-431.
- Katsou, E.; Malamis, S.; y Loizidou, M. (2011). Performance of a membrane bioreactor used for the treatment of wastewater contaminated with heavy metals. *Bioresour. Technol.* 102, 4325–4332.
- Muñoz-Sierra, J. D.; Oosterkamp, M. J.; Wang, W.; Spanjers, H. y Van Lier, J. B. (2019). Comparative performance of upflow anaerobic sludge blanket reactor and anaerobic membrane bioreactor treating phenolic wastewater: overcoming high salinity. *Chem Eng J* 366, 480-490.
- Narváez, L.; Miranda, J. M. y Ronquillo, A. (2013). Decapado de un acero inoxidable austenítico mediante mezclas ecológicas basadas en H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - iones F<sup>-</sup>. *Revista de Metalurgia* 49, 145-154.
- Noh, J. S.; Laycock, N. J.; Gao, W. y Wells, D. B. (2000). Effects of nitric acid passivation on the pitting resistance of 316 stainless steel. *Corrosion Science* 42, 2069-2084.
- Ramírez, J. E.; Esquivel-González, S.; Rangel-Mendez, J. R.; Arriaga, S. L.; Gallegos-García, M.; Buitrón, G. y Cervantes, F. J. (2020). Biorecovery of Metals from a Stainless Steel Industrial Effluent through Denitrification Performed in a Novel Anaerobic Swirling Fluidized Membrane Bioreactor (ASFMBR). *Industrial & Engineering Chemistry Research* 59, 2725-2735.
- Ramírez, J. E.; Rangel-Méndez, J. R.; Limberger Lopes, C.; Damasceno Gomes, S.; Buitrón, G. y Cervantes, F. J. (2018). Denitrification of metallurgic wastewater: mechanisms of inhibition by Fe, Cr and Ni. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 93, 440-449.
- Sharma, S. K. (2011). *Green Corrosion Chemistry and Engineering*. Wiley Library, 1-32.
- Shin, C.; McCarty, P. L.; Kim, J. y Bae, J. (2014). Pilot-scale temperate-climate treatment of domestic wastewater with a staged anaerobic fluidized membrane bioreactor (SAF-MBR). *Bioresour Technol* 159, 95–103.
- worldsteel | Steel Data Viewer. (2020). Worldsteel Association. [https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-data-viewer/MCSP\\_crude\\_steel\\_monthly/CHN/IND/MEX](https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-data-viewer/MCSP_crude_steel_monthly/CHN/IND/MEX)
- Yoo, R.; Kim, J.; McCarty, P. L. y Bae, J. (2012). Anaerobic treatment of municipal wastewater with a staged anaerobic fluidized membrane bioreactor (SAF-MBR) system. *Bioresour Technol* 120,133–139.
- J. Ramírez-Cruz; G. Ascanio; M. Salinas-Vázquez; C. Palacios y J. P. Aguayo. Experimental and numerical analysis of the power consumption and the dispersive mixing in a double planetary mixer. *Chemical Engineering Science*, Enviado.

# NOTIINGEN

## ¿Conoces NOTIINGEN?

Es el noticiero del Instituto de Ingeniería presentado por Fernanda Cisneros, donde encontrarás la información más relevante del mundo de la ciencia y la tecnología que se desarrolla en la UNAM.

**Encuétralo cada viernes en nuestras redes sociales**



InstitutoIngenieriaUNAM



IIUNAM



IIUNAM



IIUNAM



IINGENUNAM



## MÓDULO DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA MUESTRAS BIOLÓGICAS EN AMBIENTES DE MICROGRAVEDAD

LAURO SANTIAGO CRUZ, SERGIO JAVIER BAUTISTA HERNÁNDEZ Y LUIS ÁNGEL HERNÁNDEZ PASCUAL

En este proyecto de investigación, se realizan estudios para conocer el incremento en la producción de células HEK293-Adenovirus, cuando éstas se encuentran sometidas en microgravedad con temperaturas muy por debajo de cero grados centígrados; para conocer el comportamiento de las células bajo estas dos condiciones, se desarrolló el sistema CubeSat, denominado XIPE-1.

Conocer el aumento o la reducción del número de células es crucial en este proyecto, donde se analiza también, a los interferones, que son proteínas encargadas de desencadenar las defensas protectoras del sistema inmune. Los interferones están encargados de la comunicación entre las células (figura 1) y nos ayudan a erradicar patógenos como: virus, bacterias, parásitos y células tumorales. Los interferones obtienen su nombre por su capacidad de “interferir” con la replicación viral al proteger a las células de infecciones virales.

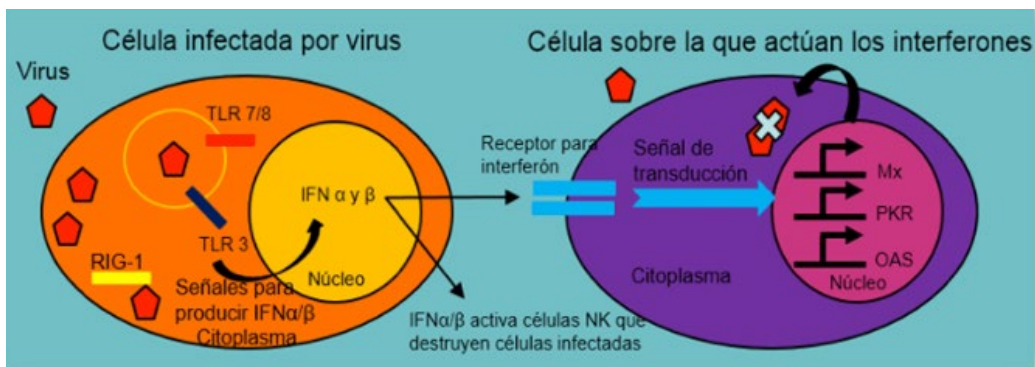
Los Interferones (IFN) también tienen otras funciones: activan células del sistema inmune, como las células asesinas naturales y los macrófagos, e incrementan las defensas del

hospedador al regular el incremento en la presentación del antígeno. Algunos de los síntomas de las infecciones, tales como la fiebre, el dolor muscular y otros síntomas similares a los de la gripe, también, son causados por la producción de IFN y otras citosinas.

En este estudio se utilizaron las células embrionarias de riñón humano 293, que son sencillas de cultivar y se transfectan fácilmente, por lo que se han usado ampliamente durante muchos años para la investigación en biología celular. Se utilizan también en la industria biotecnológica, para producir virus y proteínas para terapia genética. Las células del riñón conocidas como HEK293 son adenovirus (*Adenoviridae*), que pertenecen a la familia de virus, éstas, infectan tanto a humanos como a otros animales. Pueden provocar infecciones en las vías respiratorias, conjuntivitis, cistitis hemorrágica y gastroenteritis. Además, los adenovirus se utilizan para obtener ADN para la terapia genética.

Se ha observado que en condiciones de muy baja temperatura y de microgravedad, los adenovirus son capaces de incrementar su número, pero, para comprobar simultáneamente su comportamiento con estas dos condiciones, se utilizará el sistema XiPE-1, desarrollado por los Institutos de Ingeniería y el de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México; la Facultad de Farmacia, de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y el Centro de Desarrollo Aeroespacial del Instituto Politécnico Nacional. El módulo XiPE fue diseñado e integrado a partir de la sinergia de tres áreas principales: instrumentación electrónica, mecánica y óptica (Figura 2).

Las características principales del instrumento científico CubeSat XIPE-1, son: CubeSat de 6 unidades (10 x 10 x 60 cm);



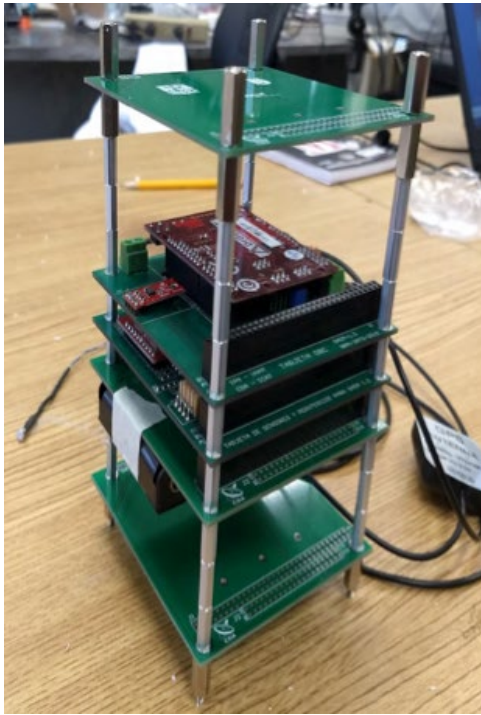


Figura 2. CubeSat XIPE-1

que incluye sistemas electrónicos y ópticos para la adquisición y almacenamiento de datos de cámaras y sensores ambientales; elementos que permiten la protección mecánica de las tarjetas electrónicas y del contenedor con muestras biológicas, objeto principal de estudio para el XIPE-1.

Un aspecto importante en el cultivo de las células es el control de la temperatura, por eso, el XIPE-1 tiene un módulo (MCT: Módulo de Control de Temperatura) encargado de conservar una temperatura estable al interior de la cámara, donde estará instalado el contenedor de las muestras biológicas. Teniendo como *set point* una temperatura de  $37^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Los elementos que constituyen al sistema de instrumentación electrónica MCT son: una tarjeta electrónica (basada en microcontrolador, memoria flash y RAM, con velocidad de operación de hasta 80 MHz, disponibilidad de 42 puertos de entrada/salida); una interfaz para la comunicación con la computadora principal (OBC, por sus siglas en inglés); una tarjeta de interfaz eléctrica-electrónica para los elementos de control de la temperatura; un pad térmico; una tarjeta para el registro de datos; seis sensores de temperatura instalados dentro de la cámara; un sensor de temperatura ambiente; las fuentes de alimentación de energía y el contenedor.

Además, el sistema MCT está formado por un *hardware* y un *software*. Como parte del desarrollo del *Hardware*, se caracterizó el comportamiento del pad térmico y los sensores de temperatura. Se probó la comunicación de datos con la OBC junto con la tarjeta de memoria  $\mu\text{SDCard}$  y se evaluó el consumo de energía del sistema en su conjunto. Esto último permitió definir los elementos de control eléctrico-electrónicos y el diseño de la fuente de alimentación de energía (Figura 3).

Para la operación adecuada del sistema se desarrolló el *software* correspondiente. Considerando la declaración de bibliotecas, la definición de parámetros de operación, la iniciación del reloj de tiempo real y de las interfaces, la adquisición y procesamiento de la información, el almacenamiento de datos y la operación continua del MCT, (Ver el diagrama de flujo de la figura 4).

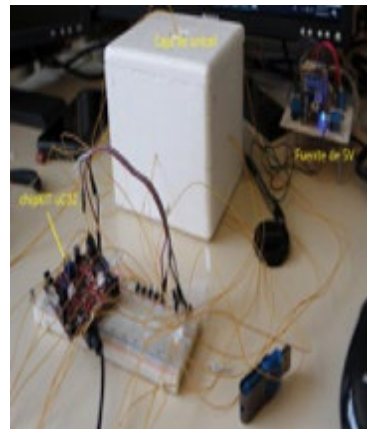
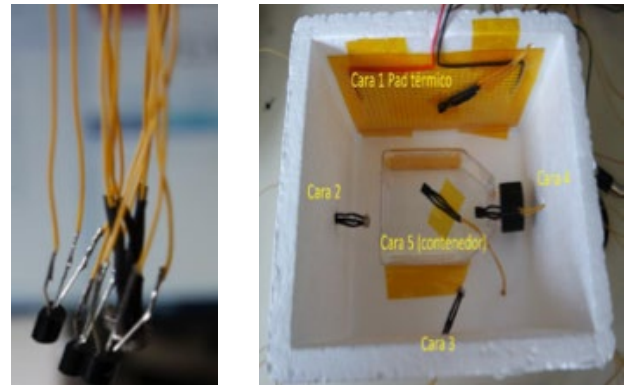


Figura 3. Elementos para el MCT

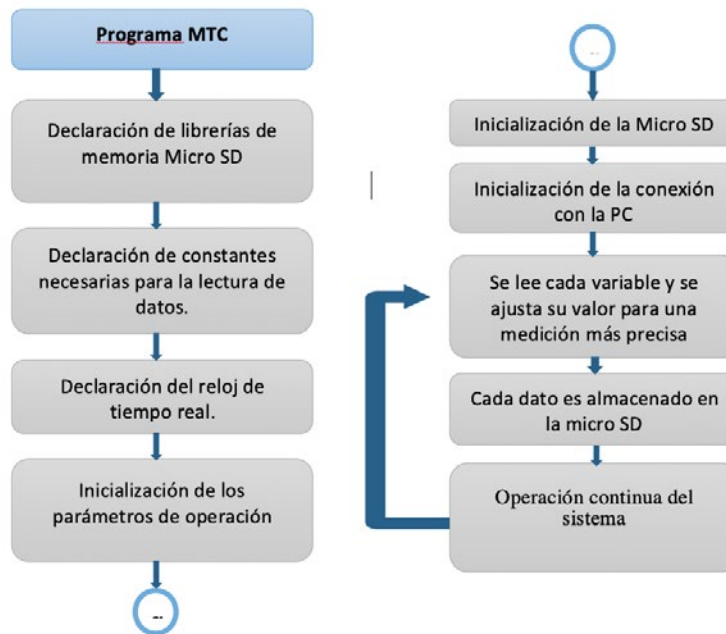


Figura 4. Diagrama de flujo de la operación del MCT

Después de realizar diversas pruebas modulares, diseñar y fabricar el circuito impreso correspondiente, y poner a punto la programación desarrollada, se integraron todos los elementos y se procedió a realizar pruebas de operación del sistema completo (Figura 5).

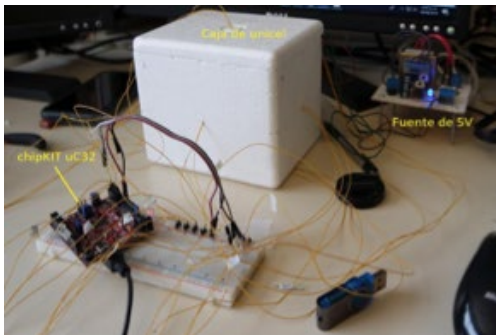


Figura 5. Pruebas al MCT

Con el fin de observar el comportamiento “natural” del sistema, se muestra en la figura 6, la manera en la que trabajan los sensores de temperatura sin considerar el control. Bajo estas condiciones en el interior de la cámara, la temperatura presenta un comportamiento homogéneo, en la tapa y en las caras 2 a 5, no así en la cara 1, que es donde está ubicado el *pad* térmico. Esto último resulta lógico, debido a que es el elemento calefactor. En esta prueba se comprobó que se requieren del orden de 15 minutos para tener una temperatura más o menos estable alrededor del contenedor de las muestras; lo que representa demasiado tiempo, ya que las muestras biológicas se pueden dañar.

Para optimizar el comportamiento del MCT se probaron diferentes esquemas de control de temperatura. El que nos dio los resultados deseados es el control proporcional, integral y derivativo (PID). En la figura 7 se muestra el sistema funcionando con los parámetros de control ya sintonizados. Con el PID observamos la estabilidad y rapidez de la respuesta del control, incluyendo la temperatura del *pad* térmico, con lo que se evita que las muestras biológicas se dañen.

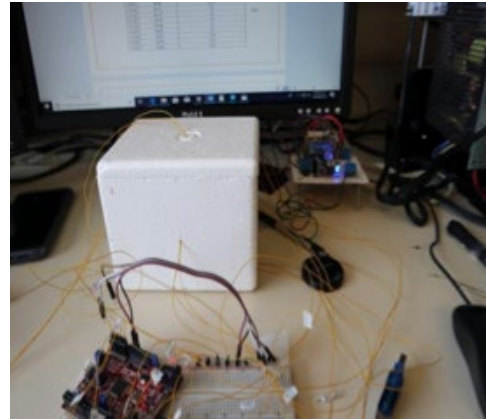


Figura 6. MTC sin el control

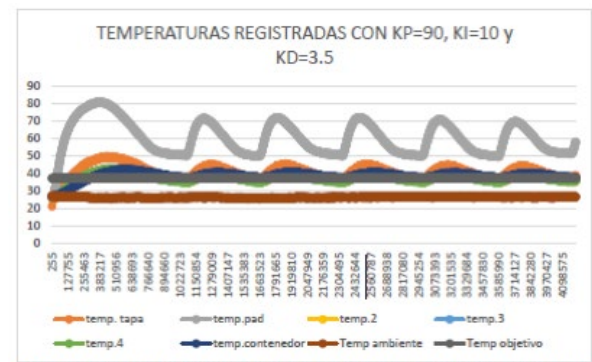
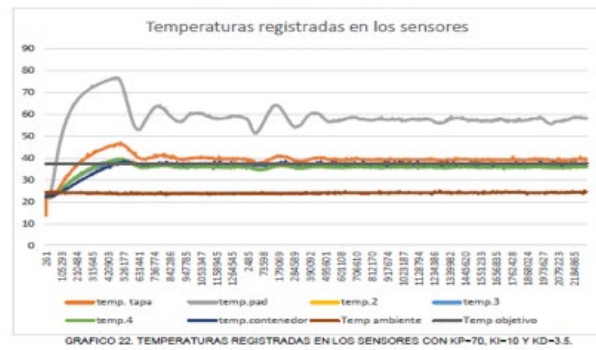


Figura 7. MTC con el control PID

## COORDINACIÓN DE ELECTRÓNICA

Finalmente, después de una serie de pruebas diarias y semanales, ajustando los parámetros de sintonía, se logró poner el sistema a punto. Las pruebas finales se llevaron a cabo seis horas diarias durante una semana, lo que representa el doble de tiempo que tiene un vuelo estratosférico, con lo que se comprueba que el sistema es más robusto.

### Resultados y conclusiones

- El equipo cumple con el objetivo solicitado: controlar la temperatura a  $37^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

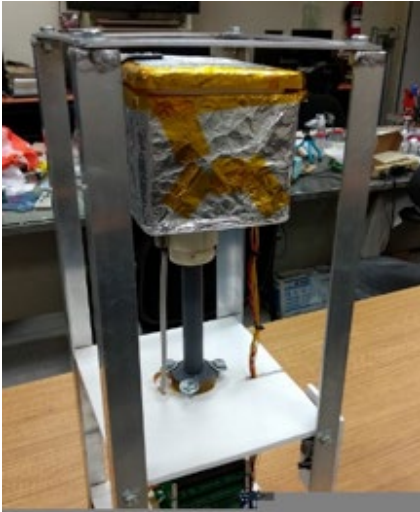


Figura 8. Plataforma de montaje del MTC

- Los resultados presentados se desarrollaron a temperatura ambiente en el laboratorio.
- Estamos en proceso de realizar las pruebas de termovacío, en ambientes de temperatura controlada (temperatura ambiente y hasta menos  $80^{\circ}\text{C}$ ) a una presión del orden de los milibares, condiciones similares a las del espacio.

Actualmente el sistema es completamente funcional y está integrado al CubeSat XIPE-1. Una vez que se desarrollen las pruebas necesarias al CubeSat XIPE-1, se procederá a realizar un vuelo estratosférico, para probar el sistema en condiciones reales de baja presión (microgravedad) y temperatura por debajo de los cero grados centígrados, ya que con estas condiciones se espera que haya mayor producción de células, lo que sería útil para continuar con la investigación.

En el desarrollo de este instrumento científico, para aplicaciones espaciales, colaboraron los Instituto de Ingeniería y el de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México; la Facultad de Farmacia, de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y el Centro de Desarrollo Aeroespacial del Instituto Politécnico Nacional. Este proyecto fue patrocinado por la Agencia Espacial Mexicana y el CONACYT, Proy: AEM-2015-1- 262872, denominado "Análisis de la expresión de interferón gamma humano, usando el sistema de células HEK293-Adenovirus, en ambientes de microgravedad".

### Agradecimientos

A la agencia Espacial Mexicana (AEM) y al CONACYT por el apoyo económico brindado a través del Fondo sectorial AEM-CONACYT. |



## MEDIDAS DE SEGURIDAD EN EL IUNAM

Recuerda utilizar los botes de basura para residuos de protección personal ubicados en sanitarios y en los Filtros de Seguridad Sanitaria.

# MESAS REDONDAS

## 65 ANIVERSARIO DEL IIUNAM

Dentro de los eventos que se están organizando con motivo del 65 aniversario del Instituto de Ingeniería se llevaron a cabo, el 28 de julio, la cuarta y quinta mesas redondas. La moderadora de las mesas fue la Dra- Juliana González, profesora emérita de la Facultad de Filosofía y Letras.

En la cuarta mesa redonda participaron como ponentes los doctores Sergio Alcocer y Adalberto Noyola, y en la quinta el Dr. Francisco Sánchez Sesma, todos ellos ex directores del IIUNAM.

La cuarta mesa llevó por título: Aspectos éticos de la investigación y el desarrollo en ingeniería para mejorar el desempeño de la comunidad académica del IIUNAM -empresa y consultoría-. Gaceta IIUNAM ha preparado la compilación de ambas mesas y se presentan a continuación.

Los doctores Sergio Alcocer y Adalberto Noyola expusieron la importancia de la ética y la integridad en el desempeño profesional de los ingenieros.

Sergio Alcocer mencionó que el quehacer de un ingeniero, ya sea en la práctica profesional o bien en la investigación, ha de darse dentro de normas de conducta claras que protejan la vida, la seguridad, la salud, el patrimonio, así como el medio ambiente. Para ello, diversas organizaciones de ingeniería han desarrollado códigos de ética y normas de integridad. En nuestro país, el código de ética más completo es el del CICM, aprobado el 7 de marzo de 2019, y contiene 13 postulados dirigidos a establecer un marco de referencia para el ingeniero civil con actividades profesionales. De estos 13 lineamientos, destacamos ocho aplicables a la investigación y desarrollo en ingeniería:

Proteger la vida, la seguridad, la salud, y el patrimonio, Cuidar que sus determinaciones profesionales se basen en información y datos objetivos, Comprometerse a aplicar buenas prácticas de ingeniería en todas las actividades y procesos en que participe, Profundizar en el conocimiento y comprensión de opciones tecnológicas disponibles, para seleccionar las más convenientes, Mantener y mejorar continuamente sus capacidades, Ofrecer la crítica honesta y constructiva de las cuestiones profesionales y reconocer los errores, Evitar conflictos de intereses, Tratar con respeto, justicia y equidad a todas

las personas, sin distinción de género, etnia, capacidad, posición social, ideología, edad, religión o nacionalidad.

Por otro lado, la UNAM cuenta con un Código de Ética, aprobado por el Consejo Universitario el 1º de julio de 2015 con 12 principios éticos que son postulados generales ya que abarcan las funciones sustantivas de la UNAM, así como las diferentes áreas del conocimiento y saber que se cultivan.

El principal patrimonio del Instituto es su prestigio y los proyectos en que, tradicionalmente, ha participado nuestra institución son:

- a. Proyectos de relevancia nacional para los que nadie puede desarrollarlos con la calidad y el alcance del Instituto.
- b. Proyectos que contribuyen a avanzar el conocimiento en las ciencias y en la práctica de la ingeniería.
- c. Proyectos en los que no compita el Instituto con sus egresados y con firmas de ingeniería del país.

### Consultoría

La labor de un investigador en ingeniería puede mejorar, en calidad, originalidad y pertinencia, si participa en consultoría privada, siempre que respete los compromisos contractuales y los programas de actividades aprobados por las autoridades universitarias.

### Empresas

Es deseable incentivar la participación de académicos y alumnos en la formación de empresas, a través de las cuales se transfieran las invenciones y avances al mercado en forma de innovaciones, bajo la supervisión de los consejos técnicos y/o consejos internos para evitar afectar a la UNAM.

### Publicar por publicar

La publicación de artículos científicos de alta calidad debe ser el resultado de una investigación original, pertinente, rigurosa y de alta calidad. El balance entre las publicaciones científicas y la aportación de soluciones a problemas reales constituye un reto particular para los investigadores del Instituto de Ingeniería.

Finalizamos proponiendo cuatro acciones:

- a. La difusión de los Lineamientos de la UNAM citados anteriormente.
- b. La celebración de jornadas de reflexión colectiva sobre los temas mencionados y otros relacionados, organizadas por autoridades del IIUNAM.
- c. El desarrollo de publicaciones, de manera colegiada, en los que se planteen éstos y otros dilemas éticos. Estos documentos servirían de referencia para el Instituto y para otras entidades con fines similares.
- d. A partir de las tres actividades anteriores, desarrollar Normas de Conducta de aplicación a los distintos grupos que integran nuestra comunidad.

Con criterios y reglas claras, bien comunicadas, el riesgo de incurrir en conductas que puedan ser calificadas como faltas de ética será reducido, y con ello, se acrecentará el prestigio institucional y del personal académico del IIUNAM.

## Quinta mesa redonda

Al tomar la palabra el Dr. Francisco José Sánchez Sesma para hablar sobre la equidad de género, inclusión y representatividad en educación e investigación subrayó la importancia de establecer derechos y obligaciones bajo el principio de no discriminación por género, origen étnico, preferencias sexuales y tomar medidas para la equidad, nivelación, inclusión con acciones afirmativas.

Nuestra sociedad es profundamente machista – afirmó Sánchez – Sesma- apenas en 1949 se les otorgó el voto a las mujeres. La cultura mexicana, padece atávicos usos de exclusión y sometimiento, con el festejo a las madres y el culto a la virgen de Guadalupe. Es un hecho que las mujeres en nuestro país y en muchas partes del mundo enfrentan inequidad y violencia endémicas. Por ello, debemos construir de manera explícita políticas que promuevan la igualdad y la equidad en serio. Las políticas afirmativas podrían ser la clave para ello. Urge visibilizar las diferencias, identificar y erradicar los micro machismos.

Desafortunadamente, en las universidades la inclusión de la mujer es una asignatura pendiente, aproximadamente una tercera parte son mujeres, fracción que se reduce a la cuarta parte en los niveles directivos.

El ingreso a estudios superiores es un poco mayor de 50 por ciento y llega a 55 por ciento de egresos, demostrando así que las mujeres son más eficientes.

Faltan políticas contra abusos en relaciones de poder y medidas preventivas.

Las medidas preventivas y las políticas para erradicar la violencia por razones de género deberán instrumentarse plenamente, sin llegar a excesos.

Sabemos que la maternidad representa serias dificultades para el trabajo académico por ello debemos de institucionalizar apoyos que permitan garantizar el bienestar las trabajadoras y sus hijos.

Si bien es cierto que en instancias no académicas se debaten diferentes formas de lograr la equidad de género, en las dependencias universitarias debemos fomentar este tipo de debates.

Al referirse a la equidad de género en el mundo –el Dr. Sánchez – Sesma- hizo referencia al caso de Islandia considerado uno de los mejores lugares para trabajar y vivir como mujer. Esto se basa en la participación económica y oportunidades, el logro educativo, la salud y supervivencia y el empoderamiento político de las mujeres. Esto ha sido el trabajo conjunto de hombres y mujeres convencidos en que sólo así se puede progresar.

En Islandia las mujeres tenían ciertas libertades y autoridad cultural y religiosa que se perdieron con la adopción del cristianismo en el año 1000. En 1914 se les concedió el derecho a ser sacerdotas protestantes, y los derechos a votar y postularse como candidatas políticas. En 1980 fue el primer país en el mundo que eligió una presidenta y en 1982 se fundó el partido político de la Alianza de Mujeres, lo que incrementó el número de mujeres en el parlamento. En 2018 se adoptó una medida legal para hacer cumplir legalmente la igualdad salarial y cualquier empleador que no esté pagando los mismos salarios por el mismo trabajo enfrentará severas multas.

La igualdad de género es clave para la sostenibilidad social de un país, por lo que es importante ver qué herramientas han ayudado a avanzar en esto en Islandia, para inspirar cambios en otros países –concluyó-. |



INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM



El Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México  
y la Red Iberoamericana de Geotermia Somera del CYTED

Invitan a investigadores, académicos, estudiantes y público en general a la semana de

# GEOTERMIA SOMERA DESDE MÉXICO:

la alternativa renovable para la climatización de edificios en Iberoamérica

**Del 30 de julio al 6 de agosto de 2021 | Entrada libre**

Siga la transmisión del evento vía  zoom

## PROGRAMA:

### SEMINARIO SOBRE GEOTERMIA SOMERA Y BIOCLIMA

30 de julio, 2021, 12 horas de México

**Conferencistas:** Pedro Francisco Soto Miranda, Jhojan Stiven Zea Fernández,  
Cesar Alonso del Toro Llamas, Brian Sneyder Aros Amaya y Cristian Alan Maldonado Romero

 **zoom** ID: 859 4697 7872 **Passcode:** 080916

### TALLER DE REQUERIMIENTOS DE CLIMATIZACIÓN DE EDIFICIOS EN IBEROAMÉRICA

3 al 6 de agosto, 2021, 10 a 12 horas de

**Instructores:** Cristian Alan Maldonado Romero, Jhojan Stiven Zea Fernández,  
Cesar Alonso del Toro Llamas, Brian Sneyder Aros Amaya y Pedro Francisco Soto Miranda

 **zoom** **REGISTRO:** <https://cuaed-unam.zoom.us/meeting/register/tZIsceqrqD4sE9Xaz2yWYn6f9Uou3VKh423k>

### PRESENTACIÓN DE LOS ATLAS DEL BIOCLIMA DE COLOMBIA Y MÉXICO:

Impactos por requerimientos de climatización, beneficios energéticos y ambientales  
por el aprovechamiento de la geotermia somera y arquitectura bioclimática

6 de agosto, 2021, 12 horas de México

**Comentaristas:** David Morillón y Mar Alcaraz

**Autores:** Cristian Alan Maldonado Romero, Jhojan Stiven Zea Fernández, Cesar Alonso del Toro Llamas,  
Brian Sneyder Aros Amaya, Pedro Francisco Soto Miranda y David Morillón

 **zoom** ID: 814556516 **Passcode:** 204917

Informes: [damg@pumas.ii.unam.mx](mailto:damg@pumas.ii.unam.mx)