

Investigaciones en energía, salud y medio ambiente en el contexto de los ODS, en Altamira, Tamaulipas, México

Research in energy, health and environment in the SDG context, in Altamira, Tamaulipas, Mexico

Felipe Caballero-Briones^{1*}, Erika Alarcón², Liliana E. Arvizu-Rodríguez², Gladis G. Suárez-Velázquez³, Sandra Edith Benito Santiago³, Yarazett Hernández Castillo⁴, Dulce Isaura Vallejo Rendón⁴, M.^a Luisa Montes Rojas⁵, Francisco López Huerta⁶, Fernando Ruiz-Pérez¹, Santos López-Estrada⁷, Ángeles Mantilla⁸, Francisco Bautista⁹, José Mustre de León¹⁰, Francisco Javier Espinosa-Faller¹¹

¹ Instituto Politécnico Nacional, Materiales y Tecnologías para Energía, Salud y Medio Ambiente (GESMAT), CICATA Altamira

² Tecnológico Nacional de México TecNM-Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

³ Departamento de Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Altamira

⁴ Universidad Tecnológica de Altamira

⁵ Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad Autónoma de Tamaulipas

⁶ Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Veracruzana

⁷ Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Secretaría de Marina

⁸ Instituto Politécnico Nacional, Laboratorio de Fotocatálisis, CICATA Legaria

⁹ Centro de Investigaciones en Geología Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México

¹⁰ Departamento de Física Aplicada, CINVESTAV Unidad Mérida

¹¹ Escuela de Ingeniería, Universidad Marista de Mérida

PALABRAS CLAVE:

Hidrógeno verde
Supercapacitores
Recuperación y reúso de elementos estratégicos
Atenuación de la radiación electromagnética
Calidad del ambiente y remediación

RESUMEN:

La evaluación del cumplimiento de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) está a cinco años de distancia, en un contexto en el que se está llegando al límite de 1.5°C en el calentamiento global. Este artículo revisa las investigaciones realizadas en el marco de los ODS respecto a energías limpias y almacenamiento de electricidad usando materiales abundantes y de menor impacto ambiental e incluso materiales generados a partir de residuos recuperados; materiales para temas de salud como la atenuación de radiación electromagnética y finalmente, el monitoreo de la calidad del ambiente en una zona urbana altamente industrializada, más algunas estrategias de remediación basadas en materiales avanzados. Estos trabajos se llevan a cabo por una red de investigación basada en Altamira, México entre instituciones consolidadas y de reciente creación.

KEYWORDS:

Green hydrogen
Supercapacitors
Recover and reuse of strategic elements
Attenuation of the electromagnetic radiation
Environmental quality and remediation

ABSTRACT:

The evaluation of compliance with the Sustainable Development Goals (SDG) is five years away, in a context in which the limit of 1.5°C in global warming is being reached. This article reviews the research carried out within the framework of the SDGs regarding clean energy and electricity storage using abundant materials with a lower environmental impact and even materials generated from recovered waste; materials for health issues such as the attenuation of electromagnetic radiation and finally, the monitoring of the quality of the environment in a highly industrialized urban area, plus some remediation strategies based on advanced materials. These works are carried out by a research network based in Altamira, Mexico between consolidated and recently created institutions.

CÓMO CITAR: F. Caballero, E. Alarcón, L. Arvizu, G. Suárez, S. Benito, Y. Hernández, D. Vallejo, M. L. Montes, F. López, F. Ruiz, S. Martín, Á. Mantilla, F. Bautista, J. Mustre, F.J. Espinosa. *An. Quím. RSEQ* 2025, 121, 153-164, https://doi.org/10.62534/rseq.aq.2068

* C-e: fcaballero@ipn.mx

Introducción

Cinco años antes de llegar a la fecha límite de la Agenda 2030 con sus 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), el panorama se antoja sombrío. El calentamiento global ha alcanzado el límite de 1.5°C por encima de la era preindustrial,^[1] la contaminación del suelo, aire y agua parece imparable y sus efectos sobre la salud humana parecen ir en aumento. El contexto geopolítico y económico no son alentadores tampoco, se está incrementando el gasto militar, se abandonan metas de reducción de emisiones privilegiando la extracción de recursos no renovables, se reduce gasto en temas como educación o salud, se recrudecen los conflictos comerciales y los flujos migratorios debidos a guerras y más recientemente, a los efectos del cambio climático se incrementan. Entonces ¿debemos caer en el pesimismo y dejarnos llevar por la ola catastrofista? Si bien la Organización de las Naciones Unidas (ONU) reporta que solamente un 18% de los ODS alcanzarán sus metas en 2030, que la mitad tiene solamente avances moderados o mínimos y los demás se encuentran estancados o en regresión, hay logros muy destacables como la reducción de la pobreza y del trabajo infantil, la reducción en mortalidad materno-infantil, el incremento en el área de la Tierra protegida y de niños escolarizados, el incremento en el acceso al agua potable, servicios básicos de higiene y sanitización, el incremento en el acceso a electricidad, y a mejores telecomunicaciones.^[1] Todo esto ha ocurrido gracias al impulso que la ONU ha generado para concientizar no solo a los gobiernos y la sociedad en general sino a la comunidad científica en particular.^[2] Desde el inicio en 2015 de las actividades de la Agenda 2030, la cantidad y diversidad de publicaciones científicas dedicadas a los ODS ha ido en aumento, y si bien no todos los temas ni todos los países están igualmente representados, se ha visto una diversificación en los países en los que se genera esta investigación, y aunque el acceso a recursos y equipos en los países menos industrializados es más limitado, las colaboraciones han logrado incrementar el impacto y trascendencia de estos trabajos en los países emergentes y en desarrollo.^[3,4]

En este contexto, Anales de Química está realizando un número donde se presentarán investigaciones que se realizan en México, por lo que este artículo presenta algunas investigaciones que se realizan sobre Energía, Salud y Medio Ambiente relacionadas con los ODS, en nuestro equipo de investigación ubicado en el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), Unidad Altamira, una entidad del Instituto Politécnico Nacional -la segunda institución de educación superior publica en México, con 89 años de antigüedad- en Altamira, México, una ciudad ubicada en la costa oeste del Golfo de México. Estos trabajos se han llevado a cabo en colaboración con varias instituciones consolidadas como el CINVESTAV Mérida o la Universidad Veracruzana y la Universidad Nacional Autónoma de México, pero también con Universidades con menos de 25 años de creación, e investigadores jóvenes que van construyendo su propia trayectoria en esta región.

Energía

Según las estimaciones de las Naciones Unidas, para 2030 casi 2000 millones de personas seguirán dependiendo de combustibles y tecnologías contaminantes para cocinar, aunque según el reporte 2025 de la ONU sobre los ODS, el uso de energías limpias en este rubro aumentó de un 64% en 2015 a un 74% en 2023.^[5] Por otro lado, pese a que el acceso a la electricidad aumentó de un 87% en 2015 a un 91% en 2023, aún hace falta seguir implementando energías renovables y limpias,^[5] teniendo en cuenta sin embargo, que un ingrediente indispensable para el incremento de la capacidad instalada en energías como la

fotovoltaica o la eólica es el almacenamiento.^[6] En este apartado se revisan trabajos que realizamos en hidrógeno verde, en semiconductores de banda intermedia y en almacenamiento de electricidad en supercapacitores. También se discute una propuesta reciente en nuestro Grupo que es el aprovechamiento de los elementos estratégicos o críticos como las tierras raras, el cobalto o el níquel, contenidos en baterías recargables gastadas, para ser reutilizados para generar hidrógeno o crear supercapacitores, así como los retos de investigación fundamental que esto implica.

Generación fotocatalítica de hidrógeno

El hidrógeno es un vector energético con potencial para contribuir a las metas de los ODS, ya que es por sí mismo un combustible y además permite obtener electricidad utilizando celdas de combustible, fabricar fertilizantes y servir de precursor para síntesis, entre otros usos.^[7] Aunque existen varios métodos para producir hidrógeno, las alternativas consideradas más sostenibles son la electrólisis y la generación fotocatalítica de hidrógeno.^[7] En la primera se inyecta electricidad que puede provenir de fuentes renovables para llevar a cabo la ruptura del agua, mientras que en la segunda se utiliza un fotocatalizador que reduce la energía de activación del proceso, que se lleva a cabo únicamente con luz.^[7] Ambos procesos se esquematizan en la Figura 1. Algunos factores que influyen en la electrólisis y la generación fotocatalítica de hidrógeno se describen en las Refs.^[7,8]

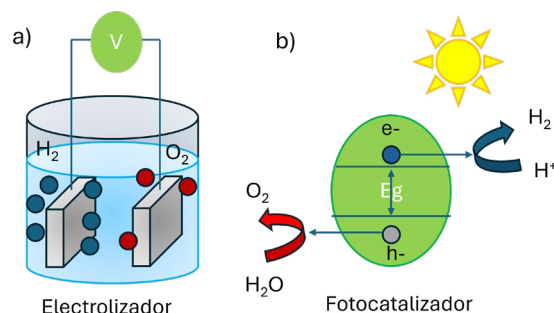


Figura 1. Generación de hidrógeno por a) electrólisis y b) fotocatalisis.

En cuanto a la generación fotocatalítica de hidrógeno, hay muchos materiales catalíticos que exploran diferentes estrategias para incrementar las eficiencias de operación, que incluyen materiales inorgánicos, orgánicos e híbridos, dopaje, generación de vacancias, construcción de homouniones y heterouniones, generación de campos eléctricos internos para reducir recombinación, uso de cocatalizadores y agentes de sacrificio.^[9,10] Por ejemplo, se ha propuesto que el grafeno puede servir de soporte a semiconductores de la familia II-VI como el $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$, que tiene un ancho de banda prohibida entre 1.7 a 2.4 eV cuando $0 < x < 1$, donde el grafeno puede crear una heterounión que favorezca la separación de cargas.^[10,11] En un estudio teórico, se analizó la interfase entre el semiconductor con diferentes composiciones y con diferentes orientaciones cristalinas con grafeno de diferentes grados de oxidación, también denominado óxido de grafeno reducido (rGO).^[12]

En la Figura 2 a) se presenta la estructura propuesta, las densidades electrónicas y el potencial planar promedio en la dirección z. Se observa en las densidades electrónicas color amarillo que la carga tiende a acumularse en el azufre mientras que en el grafeno la carga tiende a reducirse, creándose un potencial interno. En la Figura 2 b) se presentan el n-CdS y el p-rGO antes y después del contacto, indicándose los anchos de banda prohibida y las posiciones de los bordes de las bandas de valencia y conducción en las escalas electroquímica y de energía absoluta;

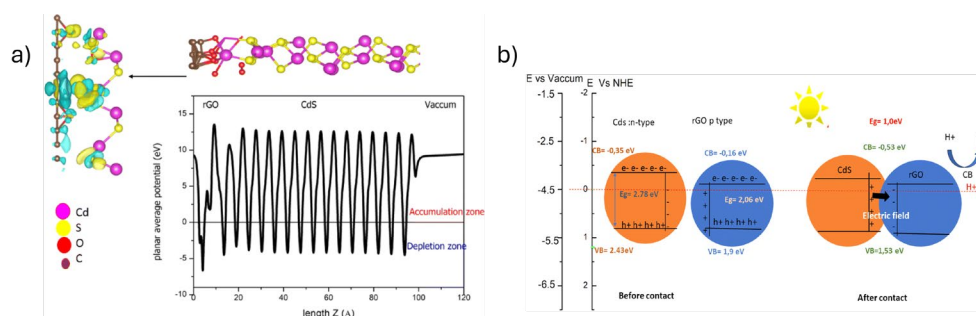


Figura 2. a) Densidad de carga (izq), densidad electrónica planar (der) para estructura CdS(001)/rGO; b) Estructura electrónica antes y después del contacto. Reproducido de Ref. [9].

se observa que al entrar en contacto, se crea un campo eléctrico que favorece la separación de portadores fotogenerados, así como la generación de hidrógeno del lado del rGO.

Por otro lado, se han sintetizado diversos materiales para la generación catalítica de hidrógeno. Por ejemplo, se preparó óxido de grafeno (GO) decorado con óxido de cesio por una ruta química sencilla, que consistió en titular una solución de GO (pH 3) con una solución de CsOH al 50% hasta alcanzar un pH~12. Se determinó que el material tiene un ancho de banda prohibida de 2.8 eV, lo que lo coloca en el rango visible del espectro electromagnético, y que está formado de nanopartículas de Cs₂O enlazadas con la base de GO por enlaces Cs-O-C. Un resultado interesante fue la estabilidad del material después de 3 ciclos.^[13] En otro estudio, se prepararon óxidos de grafeno dopados con nitrógeno (GN), boro (GB), nitrógeno-boro (GNB), y boro-nitrógeno (GBN) por la ruta hidrotérmica.^[14] El GO se sintetizó usando una modificación del método de Hummers que incluye la premezcla de grafito y nitrato de sodio en seco antes de la adición de H₂SO₄ y una adición lenta de la mezcla H₂O₂/H₂O para oxidar el Mn hasta MnO₂ y terminar la reacción sin reducir el GO formado.^[15] Para incorporar B se añadió NaBH₄ a una suspensión de GO a temperatura ambiente; para incorporar N se añadió N₂H₄ a la suspensión de GO y la mezcla se introdujo a un autoclave; las muestras GBN y GNB se prepararon cambiando el orden de adición de N y B. Al incorporarse B la resistencia aumenta de 10⁴ Ohm para el GO a 10⁵ Ohm. El dopaje con nitrógeno reduce la resistencia hasta ca. 100 kOhm, mientras que la muestra GNB tiene una resistencia mínima de 15 Ohm. En cuanto a la generación de H₂, la mejor muestra fue la dopada con B, que tiene la menor proporción de centros de recombinación como se observó en la fotoluminiscencia. Los efectos observados se atribuyen a las posiciones que los dopantes ocupan en la red del GO, lo que modifica los sitios activos creándose aglomerados descentralizados de reacción.^[14] En otro artículo se sintetizaron dos materiales compósitos: MoO₃-TiO₂-rGO (MTG) y CeO₂-Ce₂Ti₃O₈-TiO₂-rGO (CTG) por un método secuencial que consistió en darle un tratamiento con una solución 6M KOH a nanopartículas comerciales P25 de TiO₂ para formar titanato de potasio y posteriormente crear enlaces MoOS-Ti o intercalar Ce en la estructura del titanato como se esquematiza en la Figura 3.

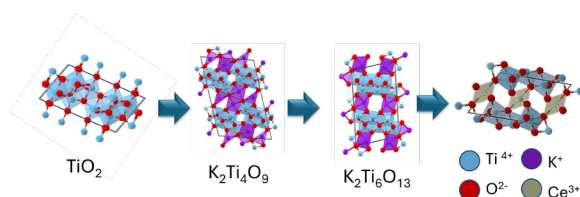


Figura 3. Evolución estructural desde TiO₂ hasta Ce₂Ti₃O_{8.7} por método hidrotérmico.

Los resultados de fotoluminiscencia indican una menor recombinación en el MTG. La generación de H₂ en CTG se atribuye a la pareja redox Ce⁴⁺/Ce³⁺, a la formación de una interfase graduada y a menor recombinación asistida por el rGO.^[16] La estrategia de formar titanatos de cerio con la modificación propuesta, tiene un mejor rendimiento que decorar el TiO₂ con Ce o con CeO₂,^[17] como se ilustra en la Tabla 1, debido a la formación de una interfase graduada en el CTG, lo mismo que en MTG en comparación con MoSx-rGO.^[10]

En la Tabla 1 se resumen los materiales estudiados comparados con resultados de otros materiales reportados.

Tabla 1. Materiales para generación fotocatalítica de hidrógeno.

Material estudiado	Iluminación	Eg (eV)	H ₂ (μmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	Ref.
Cs:GO	254 nm/ 4400 μWcm ⁻²	2.8	500	13
Cu ₂ O/rGO	Lámpara Xe/300 W	-	19.5 mmol·g ⁻¹	10
GB	254 nm/ 4400 μWcm ⁻²	-	400	14
Compósito CTG	254 nm/ 4400 μWcm ⁻²	3.3	356	16
Ce/TiO ₂	Luz blanca/ 100 mWcm ⁻²	2.7	3.3	17
CeO ₂ -TiO ₂	Luz blanca/ 100 mWcm ⁻²	3.2	1.6	17
TiO ₂	Luz blanca/ 100 mWcm ⁻²	3.3	1.2	17
Compósito MTG	254 nm/ 4400 μWcm ⁻²	3.4	364	16
MoS ₂ -TiO ₂ - rGO	3 lámparas, 365 nm/3W	-	206.6	10

Semiconductores de banda intermedia

Los semiconductores de banda intermedia (IBSC) tienen aplicaciones potenciales en celdas solares, fotocatalisis y electrocatalisis, así como en fotovoltaica y espintrónica.^[18-23] Entre los materiales interesantes para IBSC, recientemente se han estudiado películas de ZnS:Cr y ZnS:Co fuertemente dopadas preparadas por pulverización catódica por radiofrecuencia; los estudios por espectroscopia de rayos X cerca del borde y por espectroscopia de absorción óptica indican la presencia de bandas intermedias debidas a la hibridación de los orbitales d-d tanto en Cr como en Co.^[22,23] Se realizó un estudio fotoelectroquímico para interrogar la banda intermedia del ZnS:Co bajo onda constante e iluminación UV transitoria y se aplicó intermitentemente un campo magnético paralelo al sistema ZnS:Co para estudiar su respuesta de impedancia electroquímica; parte de los resultados se presentan en la Figura 4. En la Figura 4a) se presenta el análisis de Mott-Schottky con y sin luz para eva-

luar el tipo de portador en el ZnS:Cr, donde la pendiente de MS indica un comportamiento tipo n y los interceptos a $y=0$ se asocian al borde de la banda de conducción y a un estado intermedio a -0.37 V vs Pt relacionado con la hibridación del nivel d del Cr. En caso del ZnS:Co, en la Figura 4b) y 4c) se presentan voltamogramas cíclicos con y sin campo magnético aplicado, donde la corriente a potenciales positivos se reduce irreversiblemente con el campo acoplado, lo que se atribuye al llenado del nivel intermedio Co d-d.

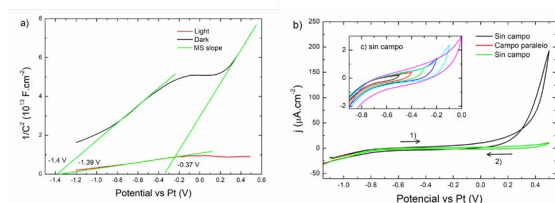


Figura 4. a) gráficos de Mott-Schottky de películas de ZnS:Cr con y sin iluminación; b) Voltamogramas cíclicos en película de ZnS:Co con y sin campo aplicado; c) inset: detalle de voltamograma de película ZnS:Co.

Supercapacitores

Se estudió el uso de titanatos de cerio embebidos en óxido de grafeno reducido en supercapacitores de ion sodio. Se ha encontrado que estos materiales tienen una estabilidad de más de 5000 ciclos de carga-descarga con pérdidas de eficiencia coulombica menores al 10%. Para estudiar los cambios en la estructura del material al intercalarse y desintercalarse el ion sodio, se realizaron experimentos con una sola carga, con una sola carga y una descarga y con cinco ciclos de carga-descarga, comparando con la muestra prístina. El polvo del material sintetizado se depositó sobre un sustrato conductor de vidrio recubierto con SnO_2/F (FTO) usando fluoruro de polivinilideno como *binder*, y N-metilpirrolidina para crear una tinta que se esparció con cuchilla sobre el FTO y se secó en plancha. Para realizar las cargas y descargas, el electrodo fabricado se introdujo en una celda electroquímica con un electrolito 0.1 M NaNO_3 , aplicando un potencial de 1 V vs Pt para intercalar los iones sodio y un potencial de $+0.5$ V vs Pt para desintercalarlo. La estructura de los materiales y el entorno químico se estudió por absorción de rayos X cerca del borde (XANES) *ex situ* en el Stanford Synchrotron Radiation Laboratory. En la Figura 5 se presentan los espectros XANES en bordes C-K (a), Ti-L_{2,3} (b), O-K (c), Ce-M_{4,5} (d), y Na-K (e). Se observa que con una carga (CTG-C), hay cambios en la forma de los espectros C-K (a) O-K (c) y Ce-M_{4,5} (d) que indica variaciones en la densidad electrónica para acomodar la carga del Na⁺. En el caso del Ce-M_{4,5}, se observa que los picos correspondientes a Ce⁴⁺ disminuyen con la carga pero recuperan su intensidad al descargar, lo que sugiere junto con el comportamiento de los bordes C-K y O-K, un incremento en la cantidad de vacancias de oxígeno; en el caso del Na, el pico aumenta su intensidad con la carga y se reduce su intensidad al nivel de la muestra prístina, indicando que el sodio se intercala y desintercala reversiblemente, lo que explica la estabilidad del material.

Reúso de elementos recuperados de baterías

La reducción de muertes y enfermedades producidas por productos químicos y la contaminación, la eliminación de vertido y emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reciclar y reutilizar, así como gestionar adecuadamente los desechos, a fin de minimizar efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente se encuentran estipulados en los ODS 3, 6, 11 y 12.^[1]

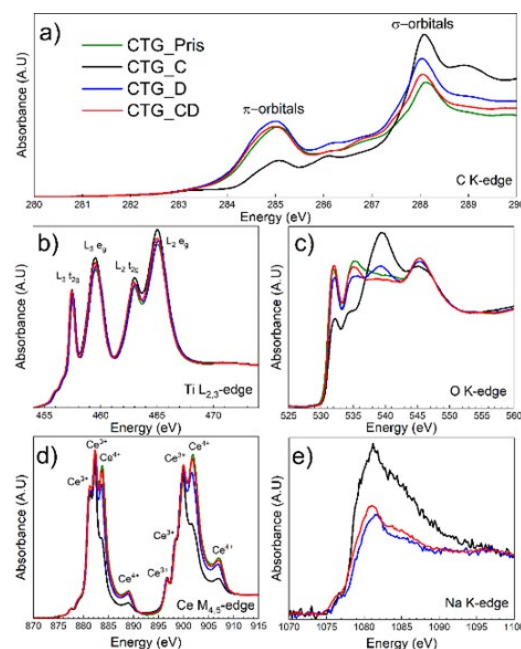


Figura 5. Espectros de absorción de rayos X cerca del borde (XANES) en los bordes C-K (a), Ti L_{2,3} (b), O-K (c), Ce-M_{4,5} (d) y Na-K (e) de muestras de CTG prístino, con una carga, una descarga y 5 ciclos de carga-descarga de Na.

En este marco, la Directiva Europea sobre baterías portátiles y acumuladores indica que estos residuos deben ser colectados y reciclados apropiadamente, si bien el porcentaje en Europa de reciclaje es de aproximadamente 46%.^[24,25] Por otro lado, el Acta de Materias Primas Críticas de la Unión Europea estipula que al menos el 25% del consumo anual de la Unión Europea para 2030, debe provenir del reciclaje. En la Figura 6 se esquematizan algunas de estas Materias Primas Críticas y sus usos en tecnologías estratégicas para la Unión Europea, donde se observa que las tierras raras (REE) y metales como Ni, Co, Zn y Mn se emplean en prácticamente todas las tecnologías indicadas.^[26]



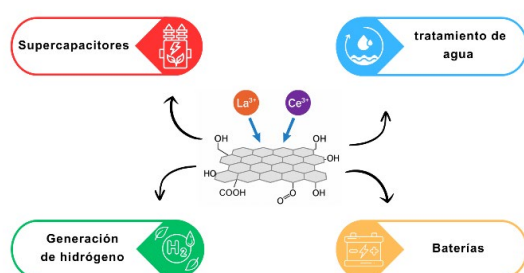
Figura 6. Usos de los elementos críticos en tecnologías estratégicas.

Un proyecto de nuestro Grupo es la recuperación de elementos críticos a partir de baterías de Ni-MH por métodos hidrotermales, que incluyen el lixiviado de los componentes en una solución de H_2SO_4 , y la posterior separación de los elementos por precipitación selectiva variando el pH para separar las tierras raras del níquel/cobalto. En la Tabla 2 se presenta la composición del ánodo de una batería de Ni-MH y de dos fracciones recuperadas del ánodo (cristales y precipitados) en donde se aprecia el enriquecimiento de los precipitados como sulfatos de La y Ce y la separación del Ni el Co en el mismo ánodo por cristalización.

Tabla 2. Composición del ánodo y de las fracciones recuperadas.

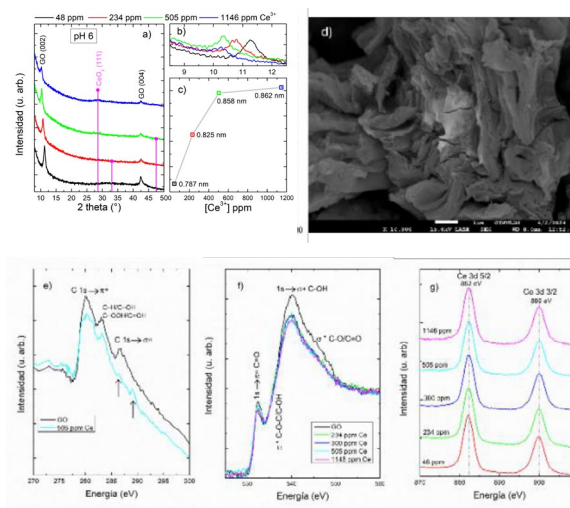
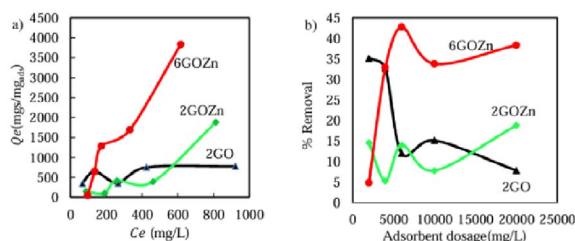
Elemento	Ánodo seco	Cristales ánodo	Ppt ánodo
Ni	55.6%	30.10%	2.50%
S	NA	ND	28.23%
Fe	0.46	0.35%	2.09%
La	24.1%	20.17%	46.63%
Ce	9.7%	8.6%	19.76%
Co	3.2%	5.69%	0%
Zn	5.4%	0.21%	0%
Mn	0.5%	2.78%	0%

Una vez separados los elementos, se preparan compósitos de REE con GO para estudiar su posterior aplicación en energía y medio ambiente como se esquematiza en la Figura 7. Las terminaciones del GO en carboxilos, carbonilos, hidroxilos y epoxis favorecen el enlace de las tierras raras a la estructura del GO.^[27]

**Figura 7.** Recuperación de tierras raras sobre GO para aplicaciones en energía y medio ambiente.

Para estudiar la capacidad del GO como adsorbente de REE y sus cambios estructurales, se varió la concentración inicial de Ce^{3+} en una solución acuosa que contenía 20 mg de GO a pH 2 y 6.^[27] Se estudió la estructura del material después de la adsorción por difracción de rayos X y por absorción de rayos X cerca del borde. En la Figura 8 a se presenta la evolución de la estructura por difracción de rayos X y la aparición de un pico de CeO_2 , que es la fase más estable de cerio, al aumentar $[\text{Ce}^{3+}]$; en la Figura 8 b del panel superior se aprecia el corrimiento del pico principal del GO hacia menores ángulos, y en la Figura 8 c, el incremento en la distancia interplanar, que indica que el cerio se intercala entre las hojas, lo que se confirma con la imagen SEM de electrones retrodispersados en la Figura 8 d, donde se observa en color blanco una zona blanca que corresponde al Ce intercalado en las hojas de GO a pH 6. También se presentan los espectros XANES en los bordes C-K (Fig. 8 e), O-K (Fig. 8 f) y Ce- $M_{4,5}$ (Fig. 8 g) donde se observan los cambios debidos a la incorporación de Ce^{3+} en los picos de C-K y O-K principalmente, indicando la probable formación de enlaces del Ce^{3+} con el GO. En el borde Ce- $M_{4,5}$ se observa solamente Ce^{3+} a este pH.^[28]

Un estudio similar para recuperar tierras raras y otros elementos críticos se ha realizado usando GO-ZnO.^[29] El GO-ZnO se preparó como se describe en la ref. [30]. En la Figura 9a se presentan las curvas de adsorción específica Q_e vs la concentración de Ce^{3+} en una solución con un contenido de 20 mg de GO-ZnO a pH 2 (2GOZn) y pH 6 (6GOZn) comparado con GO a pH 2 (2GO). Se observa que el GO alcanza la máxima Q_e a 400 mg/L Ce^{3+} mientras que el GO-ZnO a pH 6 tiene una Q_e que incrementa con la concentración de Ce^{3+} hasta ca. 4000 mg/L Ce^{3+} .

**Figura 8.** a) difractogramas de rayos X de compósitos de Ce-GO con diferente contenido de Ce^{3+} en solución; b) detalle del pico principal del GO; c) variación de la distancia interplanar del pico principal de GO; d) imagen SEM de GO:Ce (505 ppm); espectros XANES en el borde C-K (e), O-K (f) y Ce $M_{4,5}$ (g). Adaptado de Ref [28].**Figura 9.** a) Evolución de la capacidad máxima de adsorción y b) porcentaje de recuperación vs $[\text{Ce}^{3+}]$ usando como adsorbente GO y GO:Zn a pH 2 y 6. Reproducida de Ref. [29].

En la Figura 9b) se presentan los porcentajes de remoción máxima de Ce^{3+} para cada material. Se observa que el GO-ZnO a pH 6 tiene una remoción máxima de 43%. Los resultados indican que a pH 2 el mecanismo de adsorción del Ce^{3+} es por quimisorción seguida de intercambio entre Zn y Ce, mientras que a pH 6 hay una apertura del enlace C=C del esqueleto de grafeno.^[29]

Para validar una posible aplicación de los compósitos generados con los elementos recuperados y los adsorbentes, a partir de los cristales obtenidos del ánodo de las baterías de Ni-MH cuya composición se indicó en la Tabla 2, se preparó un compósito con GO. En la Figura 10 se presenta la respuesta voltamétrica del compósito en un electrolito de Na_2SO_4 variando la velocidad de barrido, encontrándose una capacitancia de hasta 30 F/g a 60 mV/s, lo que indica que los compósitos podrían tener aplicaciones en supercapacitores. La respuesta casi cuadrada de los voltamogramas es la forma típica de un supercapacitor de doble capa electroquímica.

Trabajos en proceso en nuestro Grupo incluyen la síntesis de titanatos de tierras raras a partir de los precipitados de los ánodos, ricos en La y Ce, para aplicarse en la generación de hidrógeno y de supercapacitores de ion sodio, lo que incluye comparar con estudios previos,^[11,22] y analizar el efecto de las impurezas de Ni, Co y Fe, y de primeros principios a partir de mediciones de absorción y de cálculos DFT.^[31,32]

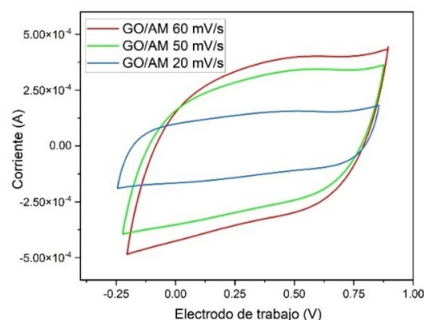


Figura 10. Voltametrías cíclicas en un electrodo fabricado con los cristales recuperados del ánodo de una batería gastada de Ni-MH.

Salud

La creciente exposición a campos electromagnéticos debida al uso cotidiano de dispositivos emisores, así como el incremento en generación y transmisión de electricidad, y el uso de dispositivos médicos está actualmente siendo revisada por los potenciales riesgos a la salud que la literatura ha ido documentando como se muestra en la Figura 11 para el caso de la salud reproductiva.^[33-35] La exposición a radiación electromagnética, particularmente en el rango de 10^9 Hz (GHz) se ha incrementado en 30 años en más de 9 órdenes de magnitud como se muestra en la Figura 12. Existen varios mecanismos para la atenuación como la disipación por efecto Joule, la dispersión en medios discontinuos (*scattering*), la pérdida dieléctrica por polarización de dipolos y la pérdida por polarización de dominios magnéticos.^[36] De este modo es posible sintonizar las propiedades de los materiales para controlar tanto la frecuencia como la magnitud de la atenuación, por lo que en nuestro Grupo se están desarrollando materiales basados en grafeno para la atenuación de la radiación electromagnética en el rango de 10^9 GHz.^[37-41]

El diseño de las propiedades tanto eléctricas como magnéticas, la topología de los materiales, y la dispersión de materiales activos en matrices dieléctricas permitiría ajustar tanto la frecuencia como la intensidad de la radiación atenuada.^[36-41] En particular, se ha estudiado un método para la reducción química de GO para alcanzar conductividades de hasta 96 Ohm/cuadro y movilidades de hasta 10^2 m²V⁻¹s⁻¹ que favorecen la atenuación tanto por *scattering* como por efecto Joule.^[37,38] También se hecho un estudio *in silico* en metamateriales

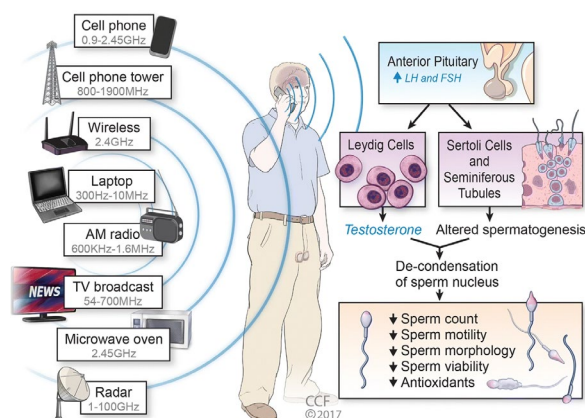


Figura 11. Representación esquemática de los efectos de la exposición a varias fuentes de RF-EMF sobre el cerebro y los testículos. Reproducido de Ref. [34].

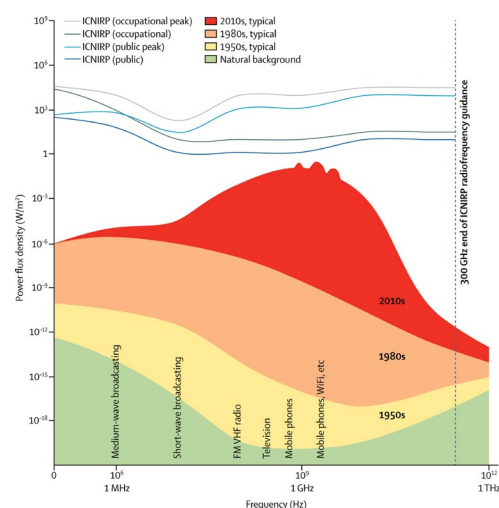


Figura 12. Exposición diaria máxima típica a la radiación electromagnética de radiofrecuencia de las densidades de flujo de energía naturales y artificiales en comparación con las pautas de seguridad de la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante. Reproducido de Ref. [33].

3D fabricados con resinas aislantes en los que se embebió grafeno magnético, para hacer uso tanto de las reflexiones múltiples que ocurren en el metamaterial, como en las hojas de grafeno, como en la atenuación magnética que ocurre en las nanopartículas de magnetita.^[39] En otros trabajos en colaboración se dispersaron hojas de rGO en compósitos de fibra de carbono/epoxi con un incremento en propiedades eléctricas y mecánicas,^[40] y de compósitos de GO:Fe₃O₄/PPy en poliuretano termoplástico, lográndose atenuar hasta el 66.72% de la radiación incidente.^[41]

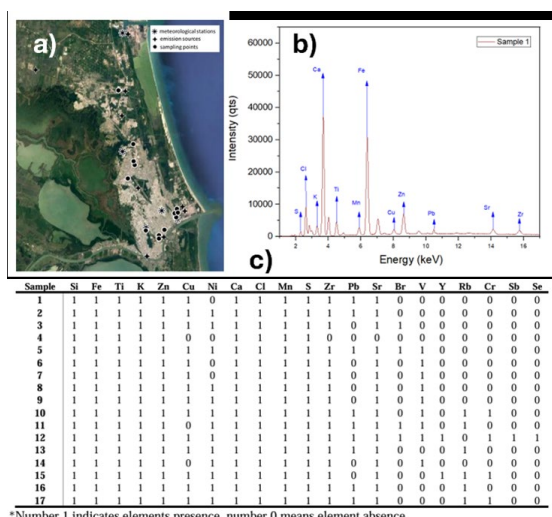
Medio Ambiente

La reducción de la contaminación del aire, del agua, del suelo así como de los efectos en la salud humana y de los ecosistemas acuáticos y terrestres que la contaminación implica, es parte de las metas plasmadas en los ODS 4,6,11,12,13,14 y 15.^[1] Sin embargo, para poder atender los problemas de la contaminación, es necesaria la medición continua de parámetros y la gestión de datos para sostener estudios de éstos. En el caso de la ciudad de Altamira-Tampico-Madero, una conurbación de alrededor de 700 mil habitantes, hasta 2023 no existía una red de monitoreo de calidad del aire con datos continuos. En octubre de 2023 se estableció la Red Ciudadana de Monitoreo de la Calidad del Aire (Red MoCaALTAMA) con cuatro estaciones automáticas que miden contaminantes criterio, i.e. CO, NO₂, O₃, SO₂, PM₁₀ y PM_{2.5} que están instaladas en domicilios particulares.^[42] A partir de los datos recabados cada minuto y procesados para asegurar su calidad estadística, se generó un repositorio para consulta pública que contiene los promedios diarios de cada contaminante.^[43] Adicionalmente, se creó otro repositorio con datos meteorológicos recabados de 10 estaciones ciudadanas instaladas en la zona conurbada.^[44]

Estos dos repositorios se añadieron a los insumos que el Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera utilizará para crear los indicadores para una Tarjeta de Registro de la costa de Tamaulipas.^[45] Con los datos de los contaminantes criterio y los datos meteorológicos se ha realizado un análisis de interpolación de la variación estacional de la distribución de partículas suspendidas en la zona metropolitana.^[46]

Análisis del polvo urbano: metales y microplásticos

El polvo urbano (PU) contiene sustancias provenientes del desgaste de infraestructuras, actividad industrial, emisiones de medios de transporte, entre otras, pudiendo contener sustancias nocivas como metales pesados y microplásticos. En la Figura 13a) se presenta el mapa de la zona conurbada Tampico-Madero-Altamira en el que se indican 17 puntos donde se tomaron muestras de polvo urbano, así como estaciones meteorológicas y la ubicación de las fuentes fijas de emisión más importantes en la zona. En el muestreo de los polvos y su análisis por fluorescencia de rayos X (Figura 13b), se detectó la presencia de los siguientes metales pesados: Ti, Cu, Ni, Mn, Pb, V, Cr, Y, Fe, Zn, y Se, como se muestra en la Figura 13c).^[47]



*Number 1 indicates elements presence, number 0 means element absence.

Figura 13. a) Zona conurbada Altamira-Tampico-Madero y puntos de muestreo; b) espectro de XRF; c) tabla de ausencia/presencia de elementos detectados. Reproducida de Ref. [47].

Actualmente se realiza un análisis cuantitativo de los metales detectados en polvos colectados en las estaciones seca y lluviosa en la zona conurbada, para establecer índices de contaminación y de riesgo a la salud incluyendo índice de carcinogenicidad,^[48] y posteriormente poder relacionar las concentraciones y su localización espacial con posibles fuentes de emisión.^[49]

En la zona conurbada se concentran empresas dedicadas a la fabricación de resinas diversas (polipropileno, polietileno, polietilentereftalato, policloruro de vinilo, entre otras), por lo que en las muestras recolectadas de polvo urbano se está analizando la presencia de microplásticos, tamizando el polvo y haciendo un procedimiento de flotación para recuperar los microplásticos, en una platina de vidrio para ser observados al microscopio. En la Figura 14 se muestra un mosaico de microfotografías de microplásticos encontrados en seis muestras de polvo urbano (puntos 1-6 en Figura 13), después de tamizado con malla 200. Se observan principalmente hojuelas y fibras.



Figura 14. Microplásticos observados al microscopio con 20X.

En trabajos futuros se plantea identificar los tipos de plástico por microespectroscopia Raman y hacer un análisis estadístico de las cantidades encontradas de microplásticos. El objetivo es ir construyendo en la región una línea de base que permita un diagnóstico de la región, incluyendo los patrones de generación y dispersión de los diferentes contaminantes, para sugerir medidas de reducción, mitigación y remediación de los efectos potenciales a la salud.

Fotocatalizadores soportados para degradación de colorantes

La fotocatalisis es un proceso que genera especies reactivas de oxígeno al iluminar un semiconductor con la luz de la energía adecuada.^[8] Estas especies reactivas pueden oxidar o reducir contaminantes que se encuentren en agua o aire y degradarlos. El tratamiento de agua por fotocatalisis usualmente se realiza suspendiendo el fotocatalizador en el medio donde se encuentran los contaminantes a degradar, lo que requiere que para recuperar el catalizador se deba filtrar la solución. Por otro lado, impregnando el material catalizador en un soporte poroso como la arcilla cocida, permite que el catalizador se mantenga activo más tiempo y no se requiera filtrar la solución una vez tratada, como se muestra en la Figura 15, donde los soportes de arcilla impregnados con una formulación que contiene TiO_2 como fotocatalizador (Figura 15 a) se introducen en el reactor donde la superficie del fotocatalizador impregnado se ilumina con una lámpara UV (Figura 15 b) durante un periodo determinado en el que se van tomando muestras del agua tratada. Finalmente, en la Figura 15 c) se comparan los porcentajes de degradación alcanzados por el fotocatalizador suspendido y el soportado de una solución de azul de metileno 6 ppm en agua. Se puede observar que el fotocatalizador soportado degrada menos colorante en el mismo tiempo, debido a que tiene menor área activa en contacto con la solución pero comparado con el fotocatalizador suspendido, el fotocatalizador soportado se puede activar nuevamente.^[50]

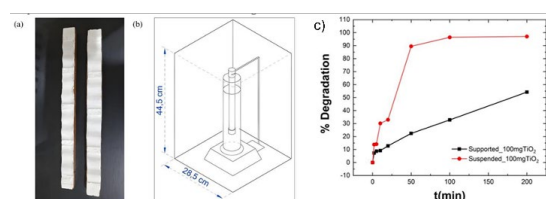


Figura 15. a) tiras de arcilla cocida recubiertas con formulación fotocatalítica; b) esquema del reactor fotocatalítico; c) respuesta de degradación de una solución 6 ppm de azul de metileno usando 100 mg de TiO_2 suspendido o 100 mg de TiO_2 soportado.

Conclusiones

En este trabajo presentamos las actividades de investigación del Grupo GESMAT: Materiales y Tecnologías para Energía, Salud y Medio Ambiente, que se realizan en el contexto de los ODS. En el área de Energía, presentamos resultados obtenidos en materiales para la generación fotocatalítica de hidrógeno, semiconductores de banda intermedia, y almacenamiento de electricidad en supercapacitores EDLC y de ion sodio y también describimos algunos resultados del reúso de elementos estratégicos recuperados de baterías de NiMH para futuras aplicaciones en energía. En el tema de Salud, presentamos resultados de composites y metamateriales aplicados para atenuación o aislamiento contra la radiación electromagnética.

ca. En Medio Ambiente, presentamos el uso de catalizadores soportados para degradación de contaminantes en agua, y la Red de Monitoreo de Calidad del Ambiente instalada por nuestro Grupo en la conurbación Altamira-Tampico-Madero donde no existían datos micro-meteorológicos, ni de calidad del aire, ni de presencia de metales o microplásticos en el polvo urbano.

Estos trabajos se realizan en colaboración con otras instituciones mexicanas, donde estamos fomentando la actividad investigadora en universidades de reciente creación, particularmente de investigadoras jóvenes que han podido acceder a equipamiento, codirigir alumnos y participar en proyectos para potenciar su desarrollo científico y profesional. La red de relaciones ha permitido que los estudiantes de doctorado, maestría, licenciatura e incluso de bachillerato, puedan realizar estancias y parte de sus trabajos experimentales en las instituciones con las que se colabora, lo que ha ampliado su perspectiva científica y laboral, ya que los egresados van ocupando posiciones de docencia en universidades locales, lo que contribuye a elevar el nivel científico del ecosistema regional. Finalmente, se ha dedicado un gran esfuerzo a la divulgación de la investigación hacia la sociedad por medio de cursos, talleres, artículos, eventos académicos, videos demostrativos, conferencias y seminarios en redes sociales, y a la evaluación del impacto que estas actividades tienen sobre el público.^[52] Estas acciones nos permiten incidir en los ODS 4, Educación de Calidad, 5, Igualdad de Género, y 17, Alianzas para Alcanzar los Objetivos.

Agradecemos a los Laboratorios Nacionales donde hemos realizado mediciones y experimentos (LANNBIO, LINAN, LNS, NANOTECH) a los técnicos de los equipos y a las agencias que han financiado estos trabajos en México: el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, ahora Secretaría de Ciencia, Humanidades Tecnología e Innovación, la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional, la Secretaría de Marina, así como a la Universidad Veracruzana, Universidad Marista de Mérida, Universidad Politécnica de Altamira, Universidad Tecnológica de Altamira, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero del Tecnológico Nacional de México, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados Unidad Mérida y el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DoE) que ha financiado el uso de los sincrotrones de Stanford (SSRL) y Berkeley (ALS).

Bibliografía

- [1] Organización de las Naciones Unidas "The Sustainable Development Goals Report 2025" disponible en <https://unstats.un.org/sdgs/report/2025/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2025.pdf>, **2025** (consultado: 23/07/2025).
- [2] International Institute for Sustainable Development "Why We Shouldn't Give Up on the SDGs" disponible en <https://www.iisd.org/articles/deep-dive/why-give-up-sdgs-summit-future-agenda-2030#:~:text=SDG%20Progress%20Beyond%20the%20Averages,are%20either%20stalled%20or%20regressing,> **2025** (consultado: 24/07/2025).
- [3] N. U. Yamaguchi, E.G. Bernardino, M.E.C. Ferreira, et al. *Environ Sci Pollut Res* **2023**, 30, 5502-5515, <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24379-6>.
- [4] G. Yumnam, Y. Gyanendra, C.I. Singh, *Sust. Futures*, **2024**, 7, 100192, <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2024.100192>.
- [5] ONU "Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna" disponible en <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>, **2025** (consultado: 24/07/2025).
- [6] World Economic Forum "Storage is the key to the renewable energy revolution" disponible en <https://www.weforum.org/stories/2023/08/storage-is-the-key-to-the-renewable-energy-revolution/>, **2025** (consultado: 24/07/2025).
- [7] Z. Wang, R.R. Roberts, G.F. Naterer, K.S. Gabriel, *Int. J. Hydrogen Energy*, **2012**, 37, 16287-16301, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.03.057>.
- [8] D. Vallejo-Rendón, N. Ramos-Domínguez, P. Nava-Diguero, F.J. Espinosa-Faller, F. Caballero-Briones, *Graphene-Based Photocatalysts for Hydrogen Production and Environmental Remediation. Advanced Structured Materials*, vol 219 (Eds.: M.N. Naseer, M. Ikram, A.A. Zaidi, Y. Abdul Wahab, M.R. Johan). Springer, Cham, Switzerland, **2024**, pp 161-180. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68464-7_7.
- [9] A. Gupta, B. Likozar, R. Jana, W. C. Chanu, M. K. Singh, *Int. J. Hydrogen Energy*, **2022**, 47, 33282-33307, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.210>.
- [10] M. Tahir, S. Tasleem, B. Tahir, *Int. J. Hydrogen Energy*, **2020**, 45, 15985-16038, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.071>.
- [11] R.A. Colina-Ruiz, R.V. Tolentino-Hernández, C. Guarneros-Aguilar, J. Mustre de León, F.J. Espinosa-Faller, F. Caballero-Briones, *J. Phys. Chem. C* **2019**, 123, 13918-13924. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b03328>.
- [12] C. Khaoula, H. Zaari, A. Benyoussef, A. El Kenz, M. Loulidi, H. Moatassim, M. Boujnah, F.J. Espinosa-Faller, F. Caballero-Briones, *RSC Adv.*, **2024**, 14, 39122-39130, <https://doi.org/10.1039/D4RA08172B>.
- [13] N. Gnanaseelan, L. Marasamy, A. Mantilla, S.K. Kamaraj, F.J. Espinosa-Faller, F. Caballero-Briones, *Mater. Lett.*, **2022**, 314, 131864, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131864>.
- [14] N. Gnanaseelan, L. Marasamy, A. Mantilla, S.K. Kamaraj, F.J. Espinosa-Faller, F. Caballero-Briones, *Int. J. Hydrogen Energy*, **2022**, 47, 40905-40919, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.234>.
- [15] J. Guerrero, F. Caballero-Briones, *Mat. Chem. Phys.*, **2022**, 47, 40905-40919, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.01.005>.
- [16] N. Gnanaseelan, M. Latha, A. Mantilla, K. Sathish-Kumar, F. Caballero-Briones, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **2020**, 118, 105185, <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105185>.
- [17] M.H. Tong, Y.X. Chen, T.M. Wang, S.W. Lin, G. Li, Q.Q. Zhou, R. Chen, X. Jiang, H.G. Liao, C.Z. Lu, *Molecules*, **2023**, 28, 2433. <https://doi.org/10.3390/molecules28062433>.
- [18] A. Luque, A. Martí, E. Antolín, and C. Tablero, *Phys. B*, **2006**, 320-327, <https://doi.org/10.1016/j.physb.2006.03.006>.
- [19] S. Suba Viveka, T. Logu, N. Ahsan, J. Karthikeyan, S. Kalainathan, Y. Okada, K. Sethuraman, *Mat. Sci. Eng. B*, **2025**, 313, 117950, <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117950>.
- [20] R. Balu, G. Devendrapandi, L. Gnanasekaran, P.C. Karthika, O.H. Abd-Elkader, W.K. Kim, V.R.M. Reddy, M. Kapoor, S. Singh, M. Lavanya, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2025**, 279 113226, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113226>.
- [21] R.R. Gatczka, *Encyclopedia of Modern Optics*, Editor Robert D. Guenther, Elsevier, **2005**, pp 352-357 <https://doi.org/10.1016/B0-12-369395-0/00640-0>.
- [22] F.J. Espinosa-Faller, J. Mustre de León, J.A. Hoy-Benítez, R.A. Colina-Ruiz, J.S. Lezama-Pacheco, F. Ruiz-Perez, F. Caballero-Briones, *Mater. Lett.*, **2024**, 376, 137310, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137310>.
- [23] A. Hoy-Benítez, R.A. Colina-Ruiz, J.S. Lezama-Pacheco, J. Mustre de León, F.J. Espinosa-Faller, *J. Phys. Chem. Solids*, **2020**, 136, 109154, <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2019.109154>.
- [24] EUR-Lex, "Directiva 2006/66/CE del Parlamento Europeo y del

- Consejo, de 6 de septiembre de 2006, relativa a las pilas y acumuladores y a los residuos de pilas y acumuladores" disponible en <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:02006L0066-20180704>, **2006**, consultado el 29/07/2025.
- [25] Eurostat, Waste statistics – recycling of batteries and accumulators", disponible en <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/66807.pdf>, **2024**, consultado el 29/07/2025.
- [26] European Comission, "Critical Raw Materials Act", disponible en https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en, **2024**, consultado el 29/07/2025.
- [27] Y. Yang, X. Weng, Z. Chen, *J. Colloid Interface Sci.*, **2023**, 638, 449-460, <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.02.004>.
- [28] Y. Hernández-Castillo, D.E. Rebollar-García, F. Ruiz-Pérez, A. González-Hernández, P. Nava-Diguero, R.A. Colina-Ruiz, J. Guo, F.J. Espinosa-Faller, F. Caballero-Briones, **2024**, *Proceedings de Recent advances in environmental science in the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions*, EMCEI 6th Edition. Aceptado.
- [29] Y. Hernández-Castillo, P. Nava Diguero, A. González Hernández, F. Caballero-Briones, *J. Phys.: Conf. Series*, **2024**, 2699, 012014, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2699/1/012014>.
- [30] R V Tolentino-Hernandez, E Jimenez-Melero, F J Espinosa-Faller, C Guarneros-Aguilar and F Caballero-Briones, *Mater. Res. Express* **2021**, 8 065010, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/ac0c9c>.
- [31] S. Das, R. Pashminehazar, S. Sharma, S. Weber, T.L. Shepard, *Chem. Ing. Tech.*, **2022**, 94, 1591-1610, <https://doi.org/10.1002/cite.202200082>.
- [32] D. Nicosia, I. Czekaj, O. Kröcher, *Appl. Catal., B*, **2008**, 77, 228-236, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2007.07.032>.
- [33] Organización Mundial de la Salud, "Marco para el Desarrollo de Estándares de CEM Basados en la Salud / Framework for Developing Health-Based EMF Standards" **2007**. <https://iris.who.int/handle/10665/43720>, consultado el 26/08/2025.
- [34] P. Bandara, D.O. Carpenter, *Lancet*, **2018**, 2, e512-e514, [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(18\)30221-3](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30221-3).
- [35] K.K. Kesari, A. Agarwal, R. Henkel, *Reprod. Biol. Endocrinol.*, **2018**, 16, 118, <https://doi.org/10.1186/s12958-018-0431-1>.
- [36] F. Ruiz-Perez, S.M. López-Estrada, R.V. Tolentino-Hernández, F. Caballero-Briones, *J. Sci.:Adv. Mater. Devices*, **2022**, 7, 100454, <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2022.100454>.
- [37] L.E. Arvizu-Rodriguez, U. Paramo-García, F. Caballero-Briones, *Mater. Lett.*, **2020**, 276, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128176>.
- [38] F. Caballero Briones, J. Guerrero-Contreras, S.E. Benito-Santiago, J.L. Sanchez Llamazares, F.J. Espinosa-Faller, *Mater. Lett.*, **2022**, 309, 131321, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131321>.
- [39] F. Ruiz-Perez, S.M. Lopez-Estrada, F. Caballero-Briones, *LEMCPA*, **2022**, 4, <http://dx.doi.org/10.1109/LEMCPA.2022.3141775>.
- [40] H. Kafelen-Odabaşı, A. Odabaşı, F. Caballero-Briones, L.E. Arvizu-Rodriguez, M. Özdemir, M. Baydoğan, *J. Reinf. Plast. Compos.*, **2022**, 42, 1039-1053. <https://doi.org/10.1177/07316844221145560>.
- [41] H. Kafelen-Odabaşı, F. Ruiz-Perez, A. Odabaşı, S. Helhel, S.M. López-Estrada, F. Caballero-Briones, *Eng. Sci. Technol. Int. J.*, **2024**, 55, 101753, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2024.101753>.
- [42] E. Alarcon-Ruiz, F. Caballero-Briones, M.A. Merino-Treviño, F. López-Huerta, D. Rivas-Camargo, *Ciencia, Ambiente y Clima*, **2023**, 6, 2636-2333, <https://doi.org/10.22206/cac.2023.v6i2.2915>.
- [43] M. Ovando Rocha, M.G. Lima-Castillo, E. Alarcon, F. López-Huerta, R.M. Woo Garcia, F. Caballero-Briones, **2025**, *Daily Average Concentrations of Criteria Air Pollutants measured by the MoCaALTAMA Network*, Mendeley Data, V1, <https://data.mendeley.com/datasets/6w686ffd2x/2>.
- [44] M. Ovando Rocha, M.G. Lima-Castillo, E. Alarcon, F. López-Huerta, R.M. Woo Garcia, F. Caballero-Briones, **2025**, *Daily Weather Data from 14 Stations across the Southern Tamaulipas Urban Zone: Supplementary to MoCaALTAMA Air Quality Monitoring*, Mendeley Data, V1, <https://data.mendeley.com/datasets/skps9txdkm/1>.
- [45] M.S. Ovando-Rocha, E. Alarcón-Ruiz, M.G. Lima-Castillo, A. Caballero-Coll, F. Caballero-Briones **2024** *Proceedings de Recent advances in environmental science in the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions*, EMCEI 6th Edition. Aceptado.
- [46] Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera, <https://www.lan-resc.mx/publicaciones/348/folleto-tarjetas-de-reporte/> consultado el 26/08/25.
- [47] M.G. Lima-Castillo, E. Alarcón-Ruiz, M.S. Ovando-Rocha, F. Caballero-Briones, *J. Phys.: Conf. Series*, **2024**, 2699, 012007, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2699/1/012007>.
- [48] Ihl, F. Bautista, F.R. Cejudo Ruiz, M.C. Delgado, P. Quintana-Owen, D. Aguilar, A. Goguitchaichvili, *RICIA*, **2015**, 31 47-62, https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992015000100004&lng=es&tlng=en.
- [49] R.K. Cross, S.I. Roberts, M.D. Jürgens, A.C. Johnson, C.E. Davins, T. Govin, *Micropl.&Nanopl.*, **2025**, 5, 5, <https://doi.org/10.1186/s43591-024-00109-2>.
- [50] N. Ramos-Domínguez, D. Vallejo-Rendón, *J. Phys.: Conf. Series*, **2024**, 2699, 012008 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2699/1/012008>.
- [51] Youtube "Canal de divulgación del grupo de trabajo @cigmmad", <https://www.youtube.com/@cigmmad>, consultado el 26/08/2025.



Felipe Caballero-Briones

Instituto Politécnico Nacional, GESMAT, CICATA Altamira

C-e: fcaballero@ipn.mx

ORCID: 0000-0003-4340-1050

Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias. Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales por la Universidad de Barcelona, Facultad de Química. Estancia posdoctoral en el Instituto de Bioingeniería de Cataluña. Líder del Grupo de Materiales y Tecnologías para Energía, Salud y Medio Ambiente (GESMAT) desde 2011. Experto en síntesis de materiales por rutas químicas y electroquímicas. Caracterización de materiales por métodos electroquímicos, espectroscopias ópticas, electrónicas, y vibracionales, microscopía de fuerza atómica, métodos de rayos X. Dirección de 5 tesis doctorales concluidas y 3 en proceso. Responsable del programa de Vocaciones Científicas en colaboración con la Universidad Tecnológica de Altamira.



Erika Alarcón

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

C-e: erika.ar@cdmadero.tecnm.mx

ORCID: 0000-0003-1375-3442

Líder del Cuerpo Académico de Prospectiva Ambiental del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero (TecNM-ITCM). Coordinadora de la Maestría en Economía Social y Solidaria en el TecNM-ITCM. Líneas de investigación principales, Informática Ambiental, Inteligencia Artificial, Big Data. Fundadora de la Red MoCaALTAMA en la zona conurbada Altamira-Tampico-Madero. Profesora Invitada al Posgrado en Tecnología Avanzada del CICATA Altamira, donde dirige una estudiante de doctorado y una de maestría.



Liliana E. Arvizu-Rodríguez

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

C-e: Liliana.ar@cdmadero.tecnm.mx

ORCID: 0000-0002-0527-150X

Ingeniero Mecánico por el TecNM-ITCM, maestra en Tecnología Avanzada por el Instituto Politécnico Nacional, CICATA Altamira y doctora por el TecNM-ITCM en Ciencia de Materiales. Estancia Posdoctoral en el Centro de Innovación y Tecnologías desarrollando baterías de Li-S con cátodos generados de carbón de agave, así como óxido de grafeno reducido y nanopartículas de plata para aplicaciones médicas. Actualmente docente en la carrera de Ingeniería en Semiconductores del TecNM-ITCM.



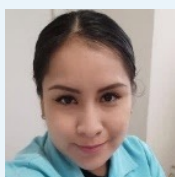
Gladis G. Suárez-Velázquez

Departamento de Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Altamira

C-e: gladis.suarez@upalt.edu.mx

ORCID: 0000-0002-9681-8987

Desarrollo proyectos que combinan innovación, sostenibilidad y tecnología enfocados en la transición energética. Cuento con más de 15 años de experiencia en investigación, docencia y gestión de proyectos en áreas como almacenamiento de energía, celdas solares y materiales funcionales, así como el aprovechamiento de residuos para estas aplicaciones.



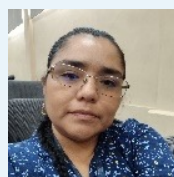
Sandra Edith Benito Santiago

Departamento en Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Altamira

C-e: edith.santiago@upalt.edu.mx

ORCID: 0000-0002-5326-0397

Cuento con experiencia en síntesis y caracterización de nanomateriales con aplicaciones en energía y biomateriales. Durante mi maestría realicé una estancia de investigación en el Instituto Jean Lamour (Francia), enfocándome en técnicas de caracterización estructural de óxido de grafeno/FeOx para aplicación en electrocatálisis. En el doctorado, desarrollé una estancia en el Centro de Investigaciones Biológicas-Margarita Salas (España), ampliando mi formación multidisciplinaria en recubrimientos para aplicaciones biomédicas. Cuento con artículos científicos, además, he colaborado en el desarrollo de software, resultando en la obtención de tres derechos de autor registrados ante el INDAUTOR y una patente otorgada por el IMPI.



Yarazett Hernández Castillo

Universidad Tecnológica de Altamira

C-e: ycastillo@utaltamira.edu.mx

ORCID: 0000-0003-4890-3228

Doctora en Tecnología Avanzada por el IPN CICATA U. Altamira; Maestra en Ciencias en Ingeniería Química e Ingeniería Química por del TNM (ITCM), Candidato SNII y secretaria del comité ambiental de la carrera de Ingeniería química industrial y nanotecnología en la Universidad Tecnológica de Altamira. Experiencia en el estudio de extrusión y modificación de propiedades mecánicas de nanocompuestos de polipropileno; así como de propiedades antioxidantes del óxidos de tierras raras y otros cerámicos obtenidos por sol-gel; Actualmente estudio de recuperación de tierras raras a partir de residuos de pilas gastadas (FTIR, Uv-Vis, XRD, FRX, XPS, DLS, Raman y MEB).



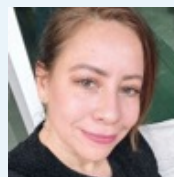
Dulce Isaura Vallejo Rendón

Universidad Tecnológica de Altamira

C-e: dvallejo@utaltamira.edu.mx

ORCID: 0000-0003-2104-3766

Ingeniero Químico. Maestra en Tecnologías Avanzada por el Instituto Politécnico Nacional, doctora en Ciencia de Materiales por el TecNM-ITCM. Docente de las carreras de Ingeniería en Nanotecnología y en Ingeniería Química en la Universidad Tecnológica de Altamira. Asesora de proyectos premiados en competencias de Creatividad. Ha impartido docencia y ha dirigido una tesis de maestría en el Posgrado en Tecnología Avanzada del CICATA Altamira y participa en el Programa de Vocaciones Científicas en colaboración con el CICATA. Líneas de investigación, fotodegradación de compuestos orgánicos e investigación docente.



M.ª Luisa Montes Rojas

*Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo,
Universidad Autónoma de Tamaulipas*

C-e: mlmontes@docentes.uat.edu.mx

ORCID: 0000-0002-9433-1307

Doctora en Comunicación por la Universidad Pompeu Fabra. Docente e investigadora en la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. Actualmente realiza una estancia posdoctoral en el CICATA Altamira relacionada con el análisis de las políticas institucionales de la comunicación social de la ciencia en México. Análisis de impacto de actividades de divulgación científica en la zona urbana y periurbana de Altamira, Tamaulipas. Diseño e implementación de la revista de divulgación *Científica, Curiosidad sin Límites*, en el CICATA Altamira.



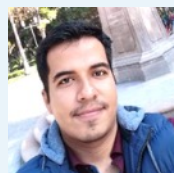
Francisco López Huerta

*Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica,
Universidad Veracruzana*

C-e: frlopez@uv.mx

ORCID: 0000-0003-3332-846X

Ingeniero en Electrónica (ITP, 2001), con maestría en Optoelectrónica (BUAP, 2005) y doctorado en Ciencias Física Aplicada (BUAP, 2011). Profesor titular C en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Veracruzana e investigador SNII Nivel II. Cuenta con una patente en microsensors MEMS. Editor asociado en múltiples revistas internacionales y director del Laboratorio de Circuitos Integrados y MEMS (LCI-MEMS) asociado al Laboratorio Nacional SECIHTI en Microtecnología y BioMEMS. Ha dirigido 9 tesis doctorales y 14 de maestría, contribuyendo significativamente a la formación de recursos humanos especializados en microsistemas y aplicaciones biomédicas.



Fernando Ruiz-Pérez

*Instituto Politécnico Nacional, GESMAT,
CICATA Altamira*

C-e: ruizfernando@hotmail.com

ORCID: 0000-0001-6867-0121

Fernando Ruiz Pérez, miembro del grupo GESMAT, doctor en Tecnología Avanzada egresado del CICATA-IPN Altamira. Su trabajo abarca electrónica, automatización, control automático y optimización de procesos, enfocándose actualmente en nanomateriales basados en grafeno para aplicaciones electromagnéticas de detección por radar y antenas. Ha publicado artículos científicos sobre nanomateriales de carbono para diversas aplicaciones, y colaborado en 5 capítulos de libro sobre síntesis de grafeno, caracterización de nanomateriales y materiales magnéticos nanoestructurados. Ha participado en más de 14 congresos nacionales e internacionales y dirigido tesis a nivel licenciatura.



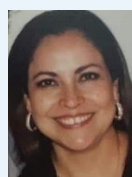
Santos López Estrada

*Unidad de Investigación y Desarrollo
Tecnológico (UNINDETEC), Subdirector de
sistemas de detección*

C-e: santosle@unindetec.edu.mx

ORCID: 0000-0003-0494-8264

Licenciatura en ingeniería mecánica eléctrica por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), maestría y doctorado en ciencias de la computación por el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE), trabajó como docente en la facultad de Ingeniería y en el Instituto de Ingeniería de la UNAM en los proyectos multiinstitucionales "Aeronave autónoma de percepción remota" y "Microsatélite experimental SATEX1". En la UNINDETEC ha sido responsable técnico de múltiples proyectos institucionales, actualmente desarrolla los proyectos "Radar de vigilancia Aérea de mediano alcance" y "Radar Institucional de Navegación". Realiza investigación en las líneas de Procesamiento de señales, sistemas embebidos y arquitecturas de alto desempeño.



Ángeles Mantilla

Instituto Politécnico Nacional, CICATA Legaria

C-e: mmantillar@ipn.mx

ORCID: 0000-0002-3273-3095

La Dra. Ángeles Mantilla es Ingeniera química, maestra en Administración Industrial y en Ingeniería y Ciencia de Materiales, y doctora en Tecnología Avanzada (2010). Inició como investigadora en el Instituto Mexicano del Petróleo, y desde 2011 fundó el Laboratorio de Fotocatálisis en CICATA Legaria, trabajando la fotocatálisis aplicada a la remediación de agua y aire, y generación de energía mediante procesos catalíticos y fotocatalíticos. Ha dirigido 9 tesis de maestría y 5 de doctorado, y es autora de 90 artículos con más de 1330 citas, $h=25$ ($h=23$ citas tipo A) así como 5 patentes y 2 registros de autor.



Francisco Bautista

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México

C-e: leptosol@ciga.unam.mx
ORCID: 0000-0001-9128-5803

Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias. Aportes en: a) Evaluación de tierras en ambientes kársticos; b) Diagnósticos de la contaminación ambiental con énfasis en metales pesados y magnetismo ambiental; c) Análisis espacial relacionado manejo sustentable de las tierras en ambientes urbanos y rurales; d) Etnopedología Maya y Purépecha; d) generación de tecnología (softwares y apps ambientales y agrícolas). Autor de 152 artículos, 19 libros, cinco traducidos al inglés y 52 capítulos. El Dr Bautista divulga sus conocimientos a través del blog <http://geoyambiente.blogspot.mx/> y el canal de Youtube "Suelos, ambiente y algo más" y una página de Facebook.



José Mustre de León

Departamento de Física Aplicada, CINVESTAV Mérida

C-e: mustre@cinvestav.mx
ORCID: 0000-0002-0513-2323

José Mustre (Mexico City, Mexico, 1960), Ph.D., University of Washington, Seattle, EUA (1989), M. C., Cinvestav, Ciudad de México City, México (1982). Investigador postdoctoral (1989-1992) en Los Alamos National Laboratory, EUA. Su campo de trabajo es la superconductividad de alta temperatura y la estructura atómica de sistemas de relevancia ambiental. Es investigador del Departamento de Física Aplicada de Cinvestav-Mérida y miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 1992. Ha publicado más de 100 artículos de investigación y editado 3 libros, con más de 5000 citas. Ha sido profesor visitante en laboratorios y universidades de Estados Unidos, Brasil y Francia.



Francisco Espinosa-Faller

Escuela de Ingeniería, Universidad Marista de Mérida

C-e: fjespino@marista.edu.mx
ORCID: 0000-0003-2324-6014

El Dr. Espinosa es actualmente Director General de Investigación en la Universidad Marista de Mérida. Tiene un doctorado en física aplicada por el Cinvestav IPN México y un posdoctorado en el grupo de Ciencia de Materiales y Tecnología en el Laboratorio Nacional de Los Alamos, NM, USA. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores y de la Academia Mexicana de Ciencias. Su interés en investigación se ha centrado en la caracterización de la estructura atómica local y extendida de materiales y en la síntesis por métodos físicos de materiales en forma de película delgada.