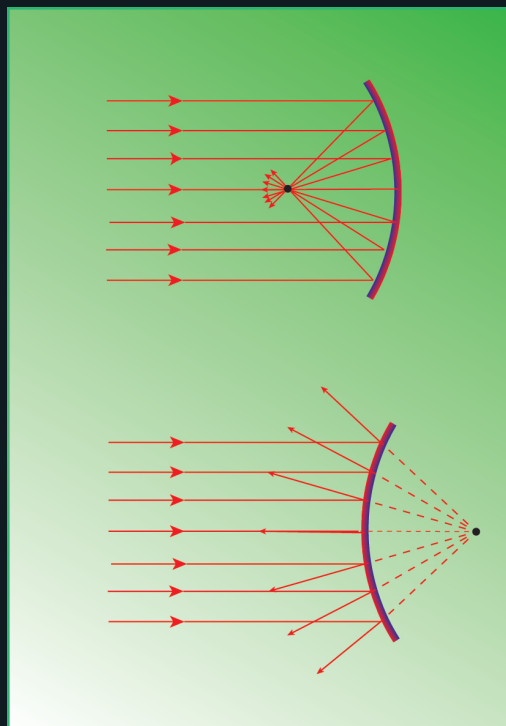




VOL. 29 NÚMERO 85 ENERO - ABRIL 2025 \$50.00

- Hidrogeles de quitosano para la adsorción de contaminantes del agua
- Aleaciones de alta entropía, la cúspide actual en la evolución de los materiales metálicos
- ¡Mira por donde caminas! Sistemas de locomoción humanoide basados en visión
- Estudio de la influencia de sombras en el Sistema Fotovoltaico de la Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec
- Cozumel, sustentabilidad postergada del turismo: Cronología de la fragmentación económico-territorial
- Fabricación de películas delgadas de SnO_2/WO_3 y su respuesta eléctrica ante acetona

● ENSAYOS ● NOTAS ● FRONTERAS DE LA CIENCIA ● VIDA ACADÉMICA EN LA UTM ● LIBROS

Temas de Ciencia y Tecnología

REVISTA DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA
ISSN 2007-0977

Nacional \$140.00 M.N.
Internacional \$50.00 USD

Para suscribirse, enviar cheque o giro postal por la cantidad correspondiente a: **Universidad Tecnológica de la Mixteca**. Av. Dr. Modesto Seara Vázquez No. 1, Acatlima, Huajuapán de León, Oax. C.P. 69000 Tels. y Fax. 01 953 53 20399 y 20214. Correo electrónico: temas@mixteco.utm.mx, Departamento de publicaciones.

HSBC cta. no. 400054041-9 Suc. Huajuapán clabe: 021614040005404191.

Temas de Ciencia y Tecnología

REVISTA DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA
ISSN 2007-0977

Orden de suscripción

Nacional \$140.00 M.N.
Internacional \$50.00 USD

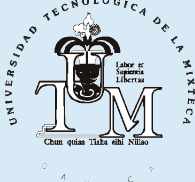
- ☐ Suscripción(es) anual(es) a la revista **Temas de Ciencia y Tecnología**
☐ Adjunto cheque certificado ☐ Giro postal
☐ HSBC cta. no. 400054041-9 Suc. Huajuapán clabe: 021614040005404191

Nombre/Name (Escribir los datos con letra de molde)		
Dirección/Address		Delegación
Colonia	C.P./Zip Code	Ciudad/City
Estado/State	País/Country	Tel./Phone Fax

Universidad Tecnológica de la Mixteca
Av. Dr. Modesto Seara Vázquez No. 1, Acatlima, 69000.
Huajuapán de León, Oax. Departamento de publicaciones.

Temas de Ciencia y Tecnología

REVISTA DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA
ISSN 2007-0977



Universidad Tecnológica de la Mixteca

Rector
Raúl Salas Coronado

Vice-Rector Académico
Silvia Reyes Mora

Vice-Rector de Administración
José Luis Ramos Espinoza

Vice-Rectora de Relaciones y Recursos
Miriam Guadalupe Carrasco Domínguez

**TEMAS DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA**
ISSN 2007-0977

Consejo Editorial

Director

Alberto Antonio García.

Liliana Eneida Sánchez Platas.
Secretaria del Consejo - Universidad Tecnológica de la
Mixteca

Senén Barro Ameneiro.
Universidad de Santiago de Compostela

Virginia Berrón Lara.
Universidad Tecnológica de la Mixteca

Enrique Guzmán Ramírez.
Universidad Tecnológica de la Mixteca

Mario Márquez Miranda.
Universidad Tecnológica de la Mixteca

Alfredo Blanco Andray.
Universidad Politécnica de Madrid

Demetrio F. García Nocetti.
Universidad Nacional Autónoma de México

Federico J. Kuhlman Rodríguez.
Instituto Tecnológico Autónomo de México

Manrique Mata Montero.
Memorial University of Newfoundland

Luis Javier Toledo Flores.
Instituto Tecnológico de Oaxaca

Gustavo A. Chapela Castañares.
Universidad Autónoma Metropolitana

Lourdes Bejarano Almada.
Centro de Investigación y Docencia en Humanidades del
Estado de Morelos.

Thomas J. Montville.
University of New Jersey

Revisión de estilo

Reina Ortiz Escamilla

Coordinación editorial

Consuelo Jaqueline Estrada Bautista

Asistente Editorial

Alberto Antonio García

Traductores

Amélie Nicole Dutoit
Celia Elisabeth Martyniak
Sandrine Laurence Miralles
Christopher Shackley

Sumario

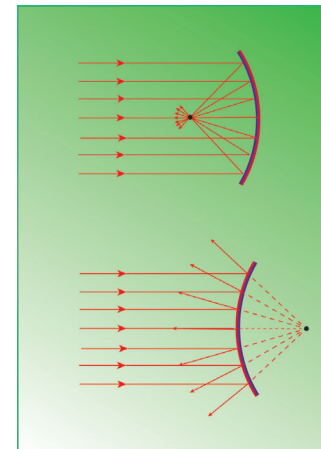
Ensayos

- 3 **Hidrogeles de quitosano para la adsorción de contaminantes del agua**
Billy Alberto Ávila Camacho, Norma Aurea Rangel Vázquez, Didilia Ileana Mendoza Castillo, Hilda Elizabeth Reynel Ávila
- 11 **Aleaciones de alta entropía, la cúspide actual en la evolución de los materiales metálicos**
Alfredo Martínez García, Carlos Gamaliel Garay Reyes, Erick Adrián Juárez Arellano, Roberto Martínez Sánchez
- 19 **¡Mira por donde caminas! Sistemas de locomoción humanoide basados en visión**
Noé G. Aldana Murillo, Jean Bernard Hayet, Héctor M. Becerra Fermin, Claudia Esteves
- 27 **Estudio de la influencia de sombras en el Sistema Fotovoltaico de la Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec**
Michel Vázquez Vázquez, Liliana Hechavarría Difur, Rafael Márquez Tirso, Hugo Jorge Cortina Marrero
- 37 **Cozumel, sustentabilidad postergada del turismo: Cronología de la fragmentación económico-territorial**
Carlos Alonso Estrella Carrillo, David Iglesias Piña
- 49 **Fabricación de películas delgadas de SnO_2/WO_3 y su respuesta eléctrica ante acetona**
Gabriela Martínez Proal, Leandro García González, Mónica Araceli Vidales Hurtado, Julian Hernández Torres



Fotografía 5. Carro eléctrico diseñado en las instalaciones de la UTM
Página 73

PORTADA:
Alberto Antonio García



TEMAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA, Año 29, No. 85 Enero - Abril 2025, es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad Tecnológica de la Mixteca. Av. Doctor Modesto Seara Vázquez No. 1 Acatlilma, Huajuapán de León, Oaxaca. C.P. 69000. Tel. 01(953) 53 203 99 ext. 782. www.utm.mx, temas@mixteco.utm.mx. Editor responsable: Alberto Antonio García. Certificado de Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2012-090312001800-102, ISSN: 2007-0977 ambos otorgados por el Instituto del Derecho de Autor. Impresa por la Universidad Tecnológica de la Mixteca. Av. Doctor Modesto Seara Vázquez No. 1 Acatlilma, Huajuapán de León, Oaxaca. C.P. 69000., éste número se terminó de imprimir el 14 de noviembre de 2025 con un tiraje de 1,000 ejemplares.

Notas

- 59 **Avances y desafíos en el tratamiento de la enfermedad de Parkinson: Un enfoque desde la medicina tradicional**

Luis Jesús Castillo Pérez
Ángel Josabad Alonso Castro

Vida académica

- 69 **Oferta Educativa de Estudios de Maestría**

Universidad Tecnológica de la Mixteca

Fronteras de la ciencia

- 65 •Un nuevo método para mapear en 3D la temperatura en tejidos biológicos •Un nuevo misterio en el cosmos: descubren una fuente de radio y rayos X que desconcierta a la ciencia •Adiós al bisturí: esta es la técnica que combate tumores sin cirugía •¿Qué papel juegan los telómeros en la longevidad? •Descubren que la piel de cebolla bloquea el 99.9 % de los rayos UV: el nuevo escudo vegetal que podría revolucionar las celdas solares •Descubren uno de los dinosaurios más antiguos de cuello largo: vivió hace 230 millones de años en los Andes •Cuando la física cuántica se parece a una red social: los fotones siguen al grupo

Reseña de Libro

- 75 **Mecánica Libro 1**

Consejo Editorial Revista TEMAS de Ciencia y Tecnología

Ensayo de Investigación

Hidrogeles de quitosano para la adsorción de contaminantes del agua

Chitosan hydrogels for the adsorption of water pollutants

Billy Alberto Ávila Camacho^{1*}, Norma Aurea Rangel Vázquez¹
Didilia Ileana Mendoza Castillo¹, Hilda Elizabeth Reynel Ávila¹

¹Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Aguascalientes

Autor de correspondencia:
*billyavila67@gmail.com

Recibido: 09-11-2023 Aceptado: 12-06-2025 (Artículo Arbitrado)

Resumen

En el presente trabajo se reporta la síntesis y caracterización de un hidrogel de quitosano para la adsorción de una mezcla de tres metales pesados (mercurio, níquel y cobre). Mediante la técnica de IR se apreciaron los grupos funcionales del hidrogel y de las adsorciones. Las isoterms de adsorción de un sistema ternario a 40 °C y un pH de 4, indicaron las capacidades de adsorción máximas de 0.560, 0.016 y 0.144 mmol/g para mercurio, níquel y cobre respectivamente. Se calcularon los parámetros de las isoterms de Langmuir y Freundlich y con base en el coeficiente de regresión lineal R² el modelo de Freundlich se adaptó mejor para el caso del mercurio y el níquel y el modelo de Langmuir fue mejor para el cobre.

Palabras clave: Adsorbente, agua, metales, remediación.

Abstract

In this work, the synthesis and characterization of a chitosan hydrogel for the adsorption of a mixture of three heavy metals (mercury, nickel, and copper) is reported. The functional groups of the hydrogel and adsorptions were observed using the IR technique. The adsorption isotherms of a ternary system at 40 °C and a pH of 4 indicated maximum adsorption capacities of 0.560, 0.016, and 0.144 mmol/g for mercury, nickel and copper, respectively. The Langmuir and Freundlich isotherm parameters were calculated, and based on the linear regression coefficient R², the Freundlich model was best suited for mercury and nickel, while the Langmuir model was more suitable for copper.

Keywords: Adsorbent, water, metals, remediation.

Introducción

La existencia de contaminantes como oligoelementos en el medio ambiente, principalmente en el agua, afectan de manera significativa la salud. Diversos estudios han demostrado que estos elementos, especialmente los metales pesados, pueden afectar la calidad del agua, así como la de diversos alimentos y, por lo tanto, la salud (Sadegh y Ali 2023). Los metales pesados son un grupo de elementos químicos densos (> 5 g/cm³) que se consideran tóxicos en bajas concentraciones. Estos elementos incluyen aluminio (Al), níquel (Ni), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), entre otros (Sharma, 2015). La contaminación del agua se

genera principalmente por actividades antropogénicas, como la minería, la fundición de metales y la descarga de aguas industriales y urbanas (Kapoor y Singh 2021).

Existen diferentes procesos para eliminar los metales pesados del agua, por ejemplo, intercambio iónico (Al-Enezi, Hamoda, Fawzi, 2004; Rengaraj y Yeon 2021), precipitación química (Matlock, Howerton, Atwood, 2002), nanofiltración (Al-Rashdi, Johnson, Hilal, 2013; Moradi, Zinadini, Derakhshan, 2020), floculación (Sun, Zhou, Pan, Zhu, Yu, Zheng. 2020) entre otros. Específicamente la adsorción se considera como un método eficaz y económico para dicho fin

(Duan, Ma, Wang, Zhou, 2020; Chakraborty, Asthana, Singh, Jain, Susan, 2022). La quitina es el segundo polímero natural más abundante en el mundo después de la celulosa. Después de la desacetilación de ésta, se produce quitosano, un polisacárido lineal basado en unidades de glucosamina.

El quitosano es un biopolímero adecuado para eliminar iones de metales pesados del agua (Li, Wang, Yuan, Sun, 2016; Wang, Xiaohong, Ganghu, Chen, Hao, Li, 2019, Hao y Liang 2020; Lin, Yang, Liang, Zeng, Zhang, 2021) debido a que sus grupos químicos como los grupos amino e hidroxilo, pueden actuar como sitios de quelación.

Se ha investigado ampliamente la adsorción de metales pesados utilizando adsorbentes a base de quitosano, debido a sus características y ventajas específicas, como biocompatibilidad, baja toxicidad, biodegradabilidad y alta capacidad de adsorción, lo hacen un material altamente eficiente (Vieira, Oliveira, Guibal, Rodríguez, Beppu. 2011; Suc y Ly 2013, Purnaratne, 2015; Zhang, Zhao, Cheng, Wang, Li, Han, Li, 2021; Chen, Yu, Kang, Sun, Zhang, Wang, 2022). Específicamente los hidrogeles se definen como redes tridimensionales compuestas de polímeros que tienen la capacidad de hincharse y absorber cierto volumen de agua en su estructura. Estos materiales, regularmente están conformados por diversas moléculas de polímeros con naturaleza hidrofílica, los cuales se pueden reticular mediante enlaces químicos, interacciones iónicas o enlaces de hidrógeno (Muya, Sunday, Baker, Iwuoha, 2016).

La capacidad de hinchamiento de los hidrogeles se debe principalmente a los grupos funcionales hidrofílicos que se encuentran dentro de la red polimérica que conforma al hidrogel, permitiéndole absorber y retener grandes cantidades de agua, hasta 400 veces su peso original (Hernández y Mijangos 2009; Ahmed, 2015). Esta capacidad permite la penetración de los adsorbatos en el interior del adsorbente, y, por lo tanto, una utilización más eficaz de los sitios activos del polímero (Muya et al., 2016).

El objetivo de este trabajo fue la síntesis y caracterización de hidrogeles de quitosano entrecruzados con glutaraldehído en forma de membranas para llevar a cabo la adsorción de los iones de metales pesados Hg^{2+} , Ni^{2+} y Cu^{2+} en soluciones acuosas en un sistema ternario, posteriormente, se llevó a cabo la

modelación de las isoterms de adsorción empleando el modelo de Langmuir y Freundlich y se caracterizó el material mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y difracción de rayos x (DRX).

Metodología

Materiales

El quitosano de bajo peso molecular (50,000-190,000 Da basado en su viscosidad) con un grado de desacetilación del 75-85 %, cloruro mercurico ($HgCl_2$), nitrato de cobre ($Cu(NO_3)_2 \cdot H_2O$), nitrato de níquel ($Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) y glutaraldehído (25 %) fueron suministrados por Sigma-Aldrich. El ácido acético (99.7 %) fue comprado de J. T. Baker y el agua desionizada fue suministrada por la marca MAPLA.

Síntesis de los hidrogeles de quitosano

Se disolvió 1.5 g de quitosano en una solución de ácido acético al 3 %. La solución de quitosano se puso en agitación magnética durante 3 horas a 50 °C con una agitación constante de 80 rpm. Posteriormente, se preparó una solución de glutaraldehído al 1 %, se agregó a la solución de quitosano lentamente y se agitó durante 2 horas extra. Se obtuvo una solución viscosa con un color amarillo pálido, ésta se centrifugó a 6000 rpm durante 5 minutos para sedimentar las partículas que quedaron suspendidas en la solución y finalmente se vertió en cajas de Petri para dejar secar a temperatura ambiente durante 72 horas y obtener las películas de quitosano entrecruzadas con glutaraldehído.

Caracterización del hidrogel

Se realizó la caracterización del adsorbente antes y después de los experimentos de adsorción de los iones de metales pesados empleando difracción de rayos x (DRX) y espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) para determinar la estructura cristalina y los grupos funcionales presentes en el hidrogel respectivamente.

FTIR

Para determinar los grupos funcionales del hidrogel se realizó un análisis mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) empleando un espectrofotómetro infrarrojo Nicolet iS10 de Thermo Scientific. Para el análisis se realizaron 32 barridos y se recolectaron los espectros en un rango de número de onda de 4000 – 600 cm^{-1} .

DRX

Para identificar la estructura cristalina del hidrogel se realizó un análisis mediante DRX empleando un difractómetro Emyrean de Malvern-Panalytical equipado con un detector PIXer ID. El equipo fue operado a 45 kV y 40 mA y se empleó una radiación de $\text{CuK}\alpha 1$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$).

Estudios de adsorción multicomponente de Hg^{2+} , Ni^{2+} y Cu^{2+}

Primeramente, se prepararon 500 ml de solución con 2 mmol L^{-1} de cada una de las sales (cloruro mercúrico, nitrato de cobre y nitrato de níquel) y se ajustó el pH de las soluciones a 4. La concentración de los adsorbatos se mantuvo fija mientras que la masa del adsorbente varió desde 0.01 hasta 0.07 g. Los experimentos fueron por lotes empleando un volumen de 10 ml a una temperatura constante de 40°C y una agitación de 120 rpm durante 24 horas.

A las 24 horas, se separó el adsorbente de las soluciones con los metales y se diluyeron para ser cuantificadas mediante espectroscopia de absorción atómica (espectrómetro iCE 3000 series). Todos los experimentos se hicieron por duplicado. Para la obtención de las capacidades de adsorción, se empleó la ecuación (1).

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \quad (1)$$

Donde, q_e es la capacidad de adsorción, C_o y C_e son las concentraciones iniciales y en equilibrio de las soluciones de metales pesados respectivamente, V es el volumen empleado y m es la masa del adsorbente.

Modelación de las isotermas de adsorción

Los resultados obtenidos de los modelos de isotermas de adsorción muestran información sobre la interacción adsorbato/adsorbente, al igual que la representación del equilibrio de estos. El equilibrio se alcanzó al momento en que la superficie del adsorbente quedó saturada del adsorbato contenido en una fase líquida, lo que permitió determinar la capacidad de adsorción en el equilibrio. Además, la forma de la isoterma proporciona información sobre los mecanismos generales de los procesos de adsorción (Raji, Karim, Karam, Khalloufi, 2023).

Se usaron diferentes modelos de adsorción para correlacionar la información experimental obtenida de la remoción de Hg^{2+} , Ni^{2+} y Cu^{2+} en un sistema ter-

nario. El modelo de Langmuir (ver ecuación 2), por ejemplo, es un modelo de dos parámetros e indica que la adsorción se da en una monocapa y es proporcional al tamaño de la superficie del adsorbente, en donde hay un número finito de sitios que se encuentran distribuidos de manera homogénea y poseen la misma afinidad (Ayawei, Ebelegi, Wankasi, 2017).

$$q_e = \frac{q_L K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$

Donde, q_e es la capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g), C_e es la concentración del soluto en equilibrio (mg/L), q_L es la capacidad de adsorción máxima predicha por el modelo de Langmuir (mg/g) y K_L es la constante de Langmuir (L/mg). El modelo de Freundlich (ecuación 3) representa un proceso en el cual es posible la adsorción multicapa. De acuerdo con este modelo, durante el proceso de adsorción los sitios de unión más fuertes serán ocupados primeramente por los adsorbatos (Ayawei et al., 2017).

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

Siendo, K_F la constante de Freundlich [(mg/g) (mg/L) $^{1/n}$] y $1/n$ (adimensional) el factor de heterogeneidad.

Resultados y discusión

Caracterización del hidrogel

En la Figura 1a se muestra la membrana de quitosano puro y en la Figura 1b el quitosano entrecruzado con glutaraldehído en donde, se observó un cambio de color en la estructura del hidrogel reticulado hacia un amarillo-naranja intenso, indicativo de una adición aldólica catalizada por aminas (Webster, Halling, Grant, 2007).

En la Figura 2a se aprecia el espectro de FTIR del quitosano puro y reticulado, la banda en la región de 3343 y 3258 cm^{-1} fue atribuida al estiramiento de OH y NH respectivamente, así como los enlaces de hidrógeno. La vibración a 2919 y 2867 cm^{-1} correspondió al estiramiento simétrico y asimétrico del CH, entre 1631 y 1316 cm^{-1} las vibraciones fueron atribuidas a la presencia de grupos acetilo residual, específicamente al estiramiento de C=O y C-N, respectivamente. El balanceo de las aminas primarias NH_2 fue confirmado por la presencia de la banda en el número de onda 1547 cm^{-1} .

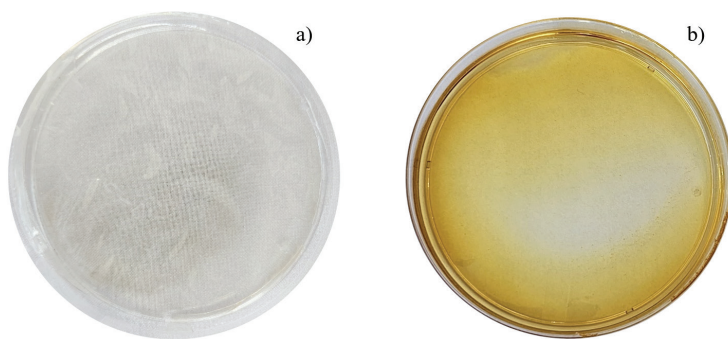


Figura 1. Membrana de a) quitosano puro y b) quitosano reticulado con glutaraldehído.

Fuente: Elaboración propia.

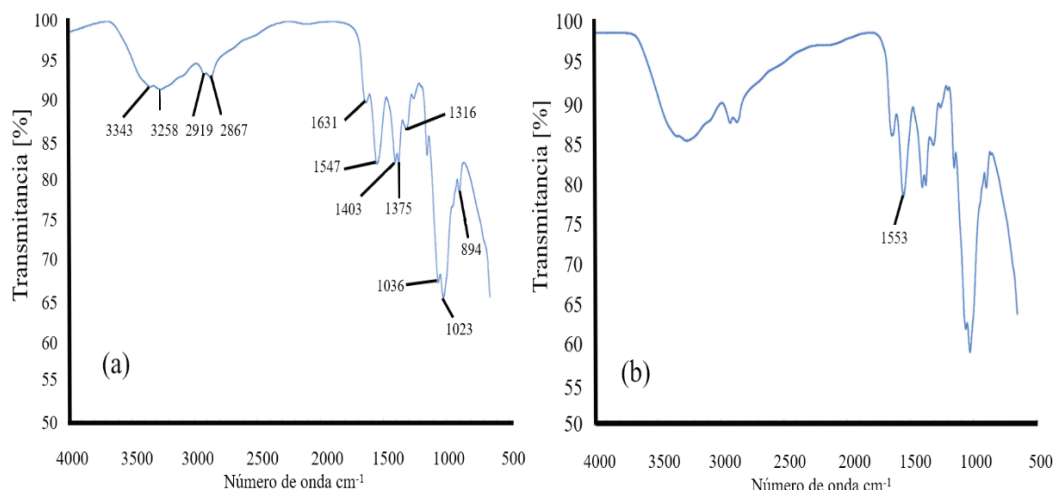


Figura 2. Espectro IR del (a) quitosano puro y (b) reticulado con glutaraldehído.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, las 2 pequeñas bandas a 1403 y 1375 cm^{-1} fueron asignadas al balanceo o flexión simétricos de CH_2 y CH_3 . El estiramiento de los enlaces $\text{C}-\text{O}$ fue confirmado por el pico de mayor intensidad en la región 1036 y 1023 cm^{-1} , finalmente el pequeño pico a 894 cm^{-1} se atribuyó al balanceo fuera de plano de los enlaces $\text{C}-\text{H}$ pertenecientes a los anillos de monosacárido que conforman al polímero (Queiroz, Teodosio, Sabry, Sassaki, Rocha, 2014; Knidri, Belaabed, Khalfauy, Laajeb, Addaou, Lahsini, 2017).

La Figura 2b muestra el espectro de FTIR del quitosano reticulado con glutaraldehído, a diferencia del quitosano puro se observó un cambio en la intensidad de los picos, principalmente los que corresponden al balanceo de los enlaces $\text{O}-\text{H}$ y $\text{N}-\text{H}$, así como el balanceo de las aminas primarias, lo cual indicó un aumento en la cantidad de grupos funcionales por unidad de volumen, debido a la unión de 2 o más cadenas de quitosano en el entrecruzamiento con el glutaraldehído (Jones, Ramsay Keir, Dobriner, 1952).

La Figura 3a presenta el difractograma de rayos X

del quitosano puro. Este mostró 3 picos de difracción característicos en la escala 2θ a 10° , 13° y 20° , indicando una estructura altamente cristalina debido a la estructura ordenada del quitosano (Kumar, Koh, 2012; Je, Li, Xing, Liu, Hu. Li, 2016; Morsy, Mostafa, Aryn, El-Ebissy, Salah, Youssef, 2019). Por otro lado, en la Figura 3b se observa el quitosano reticulado, donde el pico a 13° desapareció y el de 10° disminuyó su intensidad, es decir, se generó una estructura amorfa.

Este cambio fue atribuido a la deformación de los enlaces de hidrogeno del quitosano debido a la sustitución de grupos amino por los grupos imina, lo cual modifica la regularidad de empaquetamiento de las cadenas de quitosano (Li, Shan, Zhou, Fang, Wang, Xu, Sun, 2014).

Isotermas de adsorción experimentales en soluciones multicomponente

En la Figura 4 se observan las isotermas experimentales obtenidas de la adsorción ternaria de Hg^{2+} , Ni^{2+} y Cu^{2+} en hidrogeles de quitosano. En la Figura 4a se apreció que, en la isoterma del Hg^{2+} , la capacidad

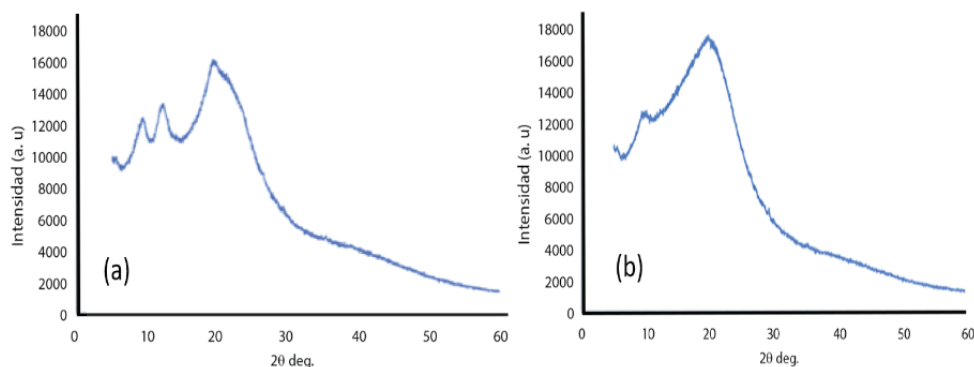


Figura 3. Difractograma del (a) quitosano puro y (b) reticulado con glutaraldehído.
Fuente: Elaboración propia.

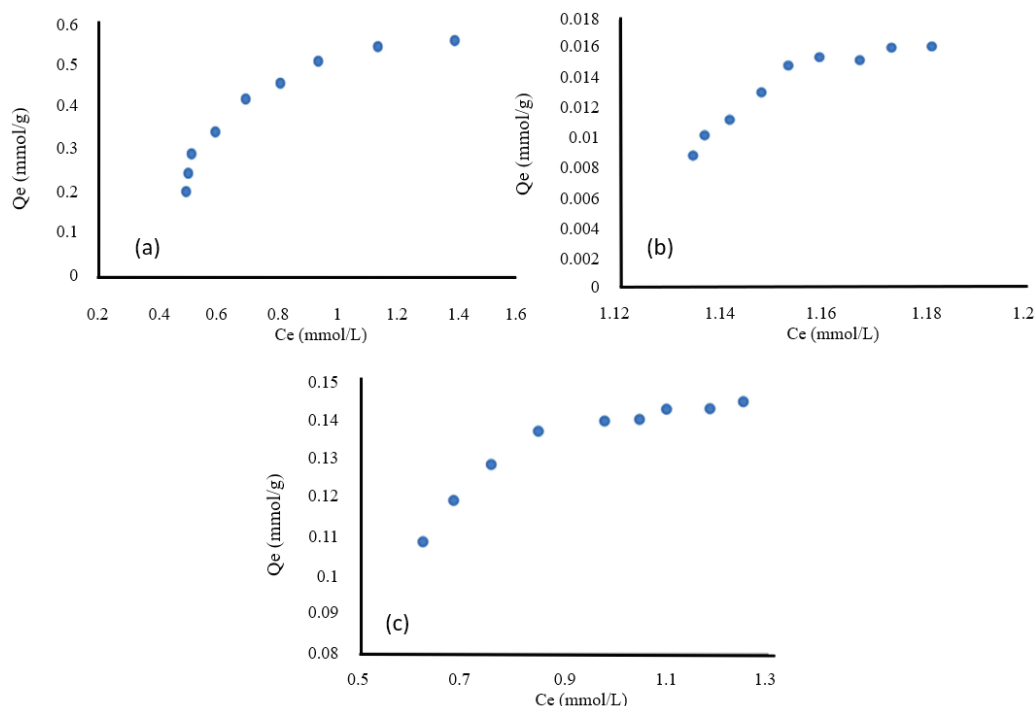


Figura 4. Isothermas de adsorción ternarias de a) Hg^{2+} , b) Ni^{2+} y c) Cu^{2+} .
Fuente: Elaboración propia.

de adsorción máxima fue de 0.560 mmol/g, para el Ni^{2+} (ver Figura 4b) fue de 0.016 mmol/g y para el Cu^{2+} (ver Figura 4c) la capacidad de adsorción fue 0.144 mmol/g. La capacidad de adsorción del níquel y cobre fueron bajas, debido a la competencia entre estos iones por los sitios activos del adsorbente (Sellaoui, Mendoza, Reynel, Ávila, Díaz, Ghalla, Lamine, 2019).

Por otro lado, el mercurio fue el adsorbato que se removió en mayor cantidad, lo cual fue atribuido a la diferencia de electronegatividades de los 3 iones, lo cual contribuye a una mayor estabilidad en los complejos formados por el mercurio y los grupos funcio-

nales reactivos del adsorbente (Sellaoui et al., 2019; Neris, Luzardo, da Silva, Velasco, 2019).

En la Tabla 1 se observan los parámetros de las isothermas de Langmuir y Freundlich. Para el caso del mercurio y el níquel, la isoterma de Freundlich fue la que mejor se adaptó debido a que el coeficiente de regresión lineal R^2 de 0.8420 y 0.8088 respectivamente, mientras que para el caso del cobre fue la isoterma de Langmuir, ya que el valor del coeficiente R^2 fue de 0.9015.

El parámetro $1/n$ es menor a 1 en el caso del Hg, indicando que el fenómeno de adsorción es favora-

Tabla 1. Parámetros isotérmicos para la eliminación de Hg^{2+} , Ni^{2+} y Cu^{2+} .

Isoterma	Parámetro	Hg	Ni	Cu
Langmuir	K_L	0.0682	0.8063	1.8026
	R_L	0.8820	0.5087	0.2840
	R^2	0.8247	0.7689	0.9015
Freundlich	K_f	0.4928	0.0018	0.1377
	$1/n$	0.904	13.864	0.3668
	R^2	0.8420	0.8088	0.8672

Fuente: Elaboración propia.

ble, sin embargo, el mismo parámetro para el Ni tiene un valor de 13.864, es decir, el fenómeno de adsorción no es favorable para este caso, por otro lado, el parámetro R_L de Langmuir para el caso del Cu fue de 0.2840 lo que determinó un proceso favorable (Ayub, Raza, Majeed, Tariq, Irfan. 2020).

Conclusiones

Utilizando hidrogeles obtenidos del quitosano fue posible efectuar la adsorción de diversos tipos de contaminantes del agua como, mercurio, níquel y cobre con la finalidad de mejorar la calidad del agua para riego y consumo. Con base en los resultados obtenidos, el orden de adsorción fue $Hg > Cu > Ni$. Mientras que, los modelos isotérmicos, determinaron que es probable una adsorción multicapa para el caso del Hg debido a la elevada capacidad de adsorción que se calculó.

Referencias

Ahmed, E. M. (2015). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of advanced research*, 6(2), 105-121. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>.

Al-Rashdi, B. A. M., Johnson, D. J., & Hilal, N. 2013. Removal of heavy metal ions by nanofiltration. *Desalination*, 315, 2-17. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.05.022>.

Ayawei, N., Ebelegi, A. N., & Wankasi, D. (2017). Modelling and interpretation of adsorption isotherms. *Journal of chemistry*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3039817>.

Ayub, A., Raza, Z. A., Majeed, M. I., Tariq, M. R., & Irfan, A. (2020). Development of sustainable magnetic chitosan biosorbent beads for kinetic remediation of arsenic contaminated water. *International journal of biological macromolecules*, 163, 603-617. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.287>.

Chakraborty, R., Asthana, A., Singh, A. K., Jain, B., & Susan, A. B. H. 2022. Adsorption of heavy metal ions by various low-cost adsorbents: a review. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(2), 342-379. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1722811>.

Chen, M., Yu, M., Kang, R., Sun, H., Zhang, W., Wang, S., ... & Wang, J. (2022). Removal of Pb (II) and V (V) from aqueous solution by glutaraldehyde crosslinked chitosan and nanocomposites. *Chemosphere*, 297, 134084. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134084>.

Duan, C., Ma, T., Wang, J., & Zhou, Y. 2020. Removal of heavy metals from aqueous solution using carbon-based adsorbents: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 37, 101339. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101339>.

G. Al-Enezi, M. Hamoda, N. Fawzi. 2004. Ion exchange extraction of heavy metals from wastewater sludges, *J. Environ. Sci.* 39, 455-464. <https://doi.org/10.1081/ESE-120027536>.

Hao, D., & Liang, Y. (2020). Adsorption of Cu^{2+} , Cd^{2+} , and Pb^{2+} in wastewater by modified chitosan hydrogel. *Environmental Technology*, 43(6), 876-884.

He, X., Li, K., Xing, R., Liu, S., Hu, L., & Li, P. (2016). The production of fully deacetylated chitosan by compression method. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 42(1), 75-81. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2015.09.003>.

Hernández, R., & Mijangos, C. (2009). In situ Synthesis of Magnetic Iron Oxide Nanoparticles in Thermally Responsive Alginate-Poly (N-isopropylacrylamide) Semi-Interpenetrating Polymer Networks. *Macromolecular rapid communications*, 30(3), 176-181. <https://doi.org/10.1002/marc.200800602>.

Jones, R. N., Ramsay, D. A., Keir, D. S., & Dobriner, K. (1952). The intensities of carbonyl bands in the infrared spectra of Steroids I. *Journal of the American Chemical Society*, 74(1), 80-88. <https://doi.org/10.1021/ja01121a019>.

Kapoor, D., & Singh, M. P. (2021). Heavy metal contamination in water and its possible sources. *Heavy metals in the environment* (pp. 179-189). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821656-9.00010-9>.

Khraisheh, M. A., Al-degs, Y. S., & Mcminn, W. A. (2004). Remediation of wastewater containing heavy metals using raw and modified diatomite. *Chemical Engineering Journal*, 99(2), 177-184. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2003.11.029>.

Knidri, H., Belaabed, R., Khalfaouy, R., Laajeb, A., Addaou, A., Lahsini, A. (2017). Physicochemical Characterization of Chitin and Chitosan Produced from Parapenaeus Longirostris Shrimp Shell Wastes. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 8(10): 3648-3653.

Kumar, S., & Koh, J. (2012). Physiochemical, optical and biological activity of chitosan-chromone derivative for biomedical applications. *International journal of molecular sciences*, 13(5), 6102-6116. <https://doi.org/10.3390/ijms13056102>.

Li, B., Shan, C. L., Zhou, Q., Fang, Y., Wang, Y. L., Xu, F., ... & Sun, G. C. (2013). Synthesis, characterization, and antibacterial activity of cross-linked chitosan-glutaraldehyde. *Marine drugs*, 11(5), 1534-1552. <https://doi.org/10.3390/md11051534>.

- Li, F., Wang, X., Yuan, T., & Sun, R. (2016). A lignosulfonate-modified graphene hydrogel with ultrahigh adsorption capacity for Pb (II) removal. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(30), 11888-11896. <https://doi.org/10.1039/C6TA03779H>.
- Lin, Z., Yang, Y., Liang, Z., Zeng, L., & Zhang, A. (2021). Preparation of chitosan/calcium alginate/bentonite composite hydrogel and its heavy metal ions adsorption properties. *Polymers*, 13(11), 1891. <https://doi.org/10.3390/polym13111891>.
- M.M. Matlock, B.S. Howerton, D.A. Atwood. 2002. Chemical precipitation of heavy metals from acid mine drainage, *Water Res.* 36, 4757-4764. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00149-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00149-5).
- Moradi, G., Zinadini, S., Rajabi, L., & Derakhshan, A. A. 2020. Removal of heavy metal ions using a new high performance nanofiltration membrane modified with curcumin boehmite nanoparticles. *Chem. Eng. J.*, 390, 124546. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124546>.
- Morsy, M., Mostafa, K., Ameen, H., El-Ebissy, A. A. H., Salah, A. M., & Youssef, M. A. (2019). Synthesis and characterization of freeze dryer chitosan nano particles as multi functional eco-friendly finish for fabricating easy care and antibacterial cotton textiles. *Egyptian Journal of Chemistry*, 62(7), 1277-1293. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2019.6995.1583>.
- Muya, F. N., Sunday, C. E., Baker, P., & Iwuoha, E. (2016). Environmental remediation of heavy metal ions from aqueous solution through hydrogel adsorption: a critical review. *Water Science and Technology*, 73(5), 983-992. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.567>.
- Neris, J. B., Luzardo, F. H. M., da Silva, E. G. P., & Velasco, F. G. (2019). Evaluation of adsorption processes of metal ions in multi-element aqueous systems by lignocellulosic adsorbents applying different isotherms: A critical review. *Chemical Engineering Journal*, 357, 404-420. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.125>.
- Purnaratne, A. (2015). Comparative adsorption of Fe (III) and Cd (II) ions on glutaraldehyde crosslinked chitosan-coated cristobalite. *Oriental Journal of Chemistry*, 31(4), 2071. <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/310427>.
- Queiroz, M. F., Teodosio Melo, K. R., Sabry, D. A., Sasaki, G. L., & Rocha, H. A. O. (2014). Does the use of chitosan contribute to oxalate kidney stone formation? *Marine drugs*, 13(1), 141-158. <https://doi.org/10.3390/md13010141>.
- Raji, Z., Karim, A., Karam, A., & Khalloufi, S. (2023). Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms, Kinetics, and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation—A Review. *Waste*, 1(3), 775-805. <https://doi.org/10.3390/waste1030046>.
- S. Rengaraj, K.-H. Yeon, S.-H. Moon, Removal of chromium from water and wastewater by ion exchange resins, *J. Hazard. Mater.* 87, 273-287. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00291-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00291-6).
- Sadee, BA y Ali, RJ (2023). Determination of heavy metals in edible vegetables and a human health risk assessment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 19, 100761. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100761>.
- Sellaoui, L., Mendoza-Castillo, D. I., Reynel-Ávila, H. E., Ávila-Camacho, B. A., Díaz-Muñoz, L. L., Ghalla, & Lamine, A. B. (2019). Understanding the adsorption of Pb²⁺, Hg²⁺ and Zn²⁺ from aqueous solution on a lignocellulosic biomass char using advanced statistical physics models and density functional theory simulations. *Chemical Engineering Journal*, 365, 305-316. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.052>.
- Sharma, S. K. (Ed.). (2014). *Heavy metals in water: presence, removal, and safety*. Royal Society of Chemistry. ISBN: 9781849738859.
- Suc, N. V., & Ly, H. T. Y. (2013). Lead (II) removal from aqueous solution by chitosan flake modified with citric acid via crosslinking with glutaraldehyde. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 88(9), 1641-1649. <https://doi.org/10.1002/jctb.4013>.
- Sun, Y., Zhou, S., Pan, S. Y., Zhu, S., Yu, Y., & Zheng, H. 2020. Performance evaluation and optimization of flocculation process for removing heavy metal. *Chemical Engineering Journal*, 385, 123911. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123911>.
- Vieira, R. S., Oliveira, M. L. M., Guibal, E., Rodríguez-Castellón, E., & Beppu, M. M. (2011). Copper, mercury, and chromium adsorption on natural and crosslinked chitosan films: An XPS investigation of mechanism. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 374(1-3), 108-114. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.11.022>.
- Wang, Xiaohong & Wang, Ganghu & Chen, Hao & Li, Xin & Li, Tihai. (2019). Adsorption performance of a polysaccharide composite hydrogel based on crosslinked glucan/chitosan for heavy metal ions. *Composites Part B: Engineering*. Vol. 169, 45-54 pp. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.082>.
- Webster, A., Halling, M. D., & Grant, D. M. (2007). Metal complexation of chitosan and its glutaraldehyde cross-linked derivative. *Carbohydrate Research*, 342(9), 1189-1201. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2007.03.008>.
- Zhang, Y., Zhao, M., Cheng, Q., Wang, C., Li, H., Han, X., & Li, Z. 2021. Research progress of adsorption and removal of heavy metals by chitosan and its derivatives: A review. *Chemosphere*, 279, 130927. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130927>.

Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM)



Infraestructura

104 Ha. de dimensión

118 Edificios

55 Laboratorios

9 Talleres

Parque Tecnológico

Parque Solar Fotovoltaico

Planta de Tratamiento de Agua

Planta Potabilizadora de Agua

Agavetum



9 Institutos de Investigación

Centro de Modelación Matemática,
Vinculación y Consultoría

Instituto de Agroindustrias

Instituto de Ciencias Sociales y Humanidades

Instituto de Computación

Instituto de Diseño

Instituto de Física y Matemáticas

Instituto de Electrónica y Mecatrónica

Instituto de Ingeniería Industrial y Automotriz

Instituto de Hidrología

Instituto de Minería

División de Estudios de Posgrado

Oferta Educativa



Licenciaturas

Ingeniería Civil

Ingeniería Industrial

Ingeniería en Diseño

Ingeniería en Alimentos

Ingeniería en Electrónica

Ingeniería en Mecatrónica

Ingeniería en Computación

Ingeniería en Física Aplicada

Ingeniería en Mecánica Automotriz

Ingeniería Química en Procesos Sostenibles

Licenciatura en Ciencias Empresariales

Licenciatura en Matemáticas Aplicadas

Licenciatura en Estudios Mexicanos

(modalidad virtual)



INFORMES

Consulta las bases y requisitos en
www.utm.mx

Posgrado

Maestría en Robótica

Maestría en Ciencia de Datos

Maestría en Diseño de Muebles

Maestría en Medios Interactivos

Maestría en Inteligencia Artificial

Maestría en Ciencia de Materiales

Maestría en Ingeniería de Software

Maestría en Modelación Matemática

Maestría en Administración de Negocios

Maestría en Tecnología Avanzada de Manufactura

Maestría en Ciencias: Productos Naturales y Alimentos

Maestría en Electrónica, opción: Sistemas Inteligentes Aplicados

Doctorado en Robótica

Doctorado en Inteligencia Artificial

Doctorado en Modelación matemática

Doctorado en Ciencias: Productos Naturales y Alimentos

Doctorado en Electrónica, opción sistemas Inteligentes Aplicados



Ensayo expositivo

Aleaciones de alta entropía, la cúspide actual en la evolución de los materiales metálicos

High entropy alloys, the current pinnacle in the evolution of metallic materials

Alfredo Martínez García^{1*}, Carlos Gamaliel Garay Reyes¹
Erick Adrián Juárez Arellano², Roberto Martínez Sánchez¹

¹Departamento de Metalurgia e Integridad Estructural
Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados (CIMAV)

²Instituto de Química Aplicada
Universidad del Papaloapan

Autor de correspondencia:
alfredo.martinez@cimav.edu.mx

Recibido:10-05-2023 Aceptado: 25-08-2025 (Artículo Arbitrado)

Resumen

A lo largo de la historia, la humanidad ha modificado diversos elementos metálicos de su entorno para satisfacer sus necesidades. Esto genera un punto de inflexión que impulsa el desarrollo tecnológico de la sociedad al fabricar dispositivos y herramientas a partir de los materiales disponibles. En este caso, los metales tienen una importancia notable al dividir las eras según el tipo de materiales metálicos utilizados, conocidas como eras de los metales. Hoy en día, estas se pueden dividir en 6: la era del cobre, del bronce, del hierro, del acero, de las superaleaciones y de las aleaciones de alta entropía. Así, en este artículo se describen brevemente las principales características de cada uno de estos materiales metálicos y su papel en el desarrollo y evolución de la humanidad en cada era.

Palabras clave: Metales y aleaciones, historia de la humanidad, aleaciones de alta entropía, diseños de aleaciones.

Abstract

Throughout history, humanity has modified various metallic elements from its environment to meet your needs. This generates a turning point that drives the technological development of society by manufacturing devices and tools from available materials. In this case, metals have a notable importance in dividing eras according to the type of metallic materials used, known as metal ages. Today, these can be divided into 6: the age of copper, bronze, iron, steel, superalloys and high entropy alloys. So, this article briefly describes the main characteristics of each of these metallic materials and their role in the development and evolution of humanity in each age.

Keywords: Metals and alloys, history of humanity, high entropy alloys, alloy designs.

Introducción

El tiempo en la historia de la humanidad previo al uso de metales se le conoce como la edad de piedra debido a que el principal material empleado para la elaboración de utensilios fueron rocas de diferente tipo. Sin embargo, el manejo de los metales inicia con las primeras evidencias de fundiciones, las cuales se remonta a los 6000 años a. C. aproximadamente, y termina con la invención de la escritura alrededor de 100 años a. C. Los historiadores han subdividido este periodo (6000-100 a. C.) en tres edades conocidas como: la edad del cobre, la edad del bronce y la edad

del hierro. Aunque la edad de los metales terminó con la invención de la escritura, tuvieron que pasar más de 2000 años hasta llegar a la edad contemporánea para que los metales dieran otro salto tecnológico, pasando de la edad del hierro al desarrollo acero (siglo XIX) y posteriormente al desarrollo de aleaciones y superaleaciones de alto rendimiento (siglo XX). Sin embargo, el inicio del siglo XXI ha dado origen a nuevos materiales conocidos como aleaciones de alta entropía (ver la Figura 1). Actualmente estos nuevos materiales han tomado una gran importancia

debido a la mejora en sus propiedades mecánicas, estabilidad química, térmicas, eléctricas, electroquímicas, etc. y su potencial aplicación en la industria energética, aeroespacial, médica entre otras.

Prehistoria

Edad de Cobre

El inicio del uso de los metales varía dependiendo de la región geográfica del planeta, pero la mayoría coincide que el primer metal en ser usado fue el cobre en Oriente Medio. El cobre es un metal que pertenece a un pequeño grupo de metales que se pueden encontrar en forma nativa en el planeta, así que su disponibilidad dependía de los agregados de cobre encontrados. Los primeros objetos de cobre en ser encontrado datan de 9000 años a.C., los cuales se especula fueron utensilios forjados en frío por martillado. Posteriormente, se descubrió que por fundición de rocas minerales como cuprita, malaquita y calcopirita se podía extraer el cobre. Sin embargo, fue hasta 6000 a.C. que se obtuvo evidencia de los primeros

materiales de cobre obtenidos por fundición. El uso que se le dio al cobre inicialmente fue en la fabricación de utensilios y artículos ornamentales debido a su baja dureza, por lo que su uso en la fabricación de armas no fue de gran importancia. Con el paso del tiempo, el cobre paso de formar parte de adornos y decoraciones a la fabricación de herramientas especializadas para la agricultura, ganadería y transporte. Este evento potencio el aumento en la generación de riqueza y la especialización de trabajos en la sociedad.

Sin embargo, el agotamiento de la materia prima fue evidente hacia los 3000 años a.C. y los humanos idearon nuevos procedimientos (horneado) que les permitiera tener un mejor manejo del cobre. Por lo que, se marcó el inicio del descubrimiento de las aleaciones. La primera aleación conocida del mundo antiguo es el bronce, el cual es considerado la innovación tecnológica que le pondría fin a la edad de cobre alrededor de los 3000 años a. C.

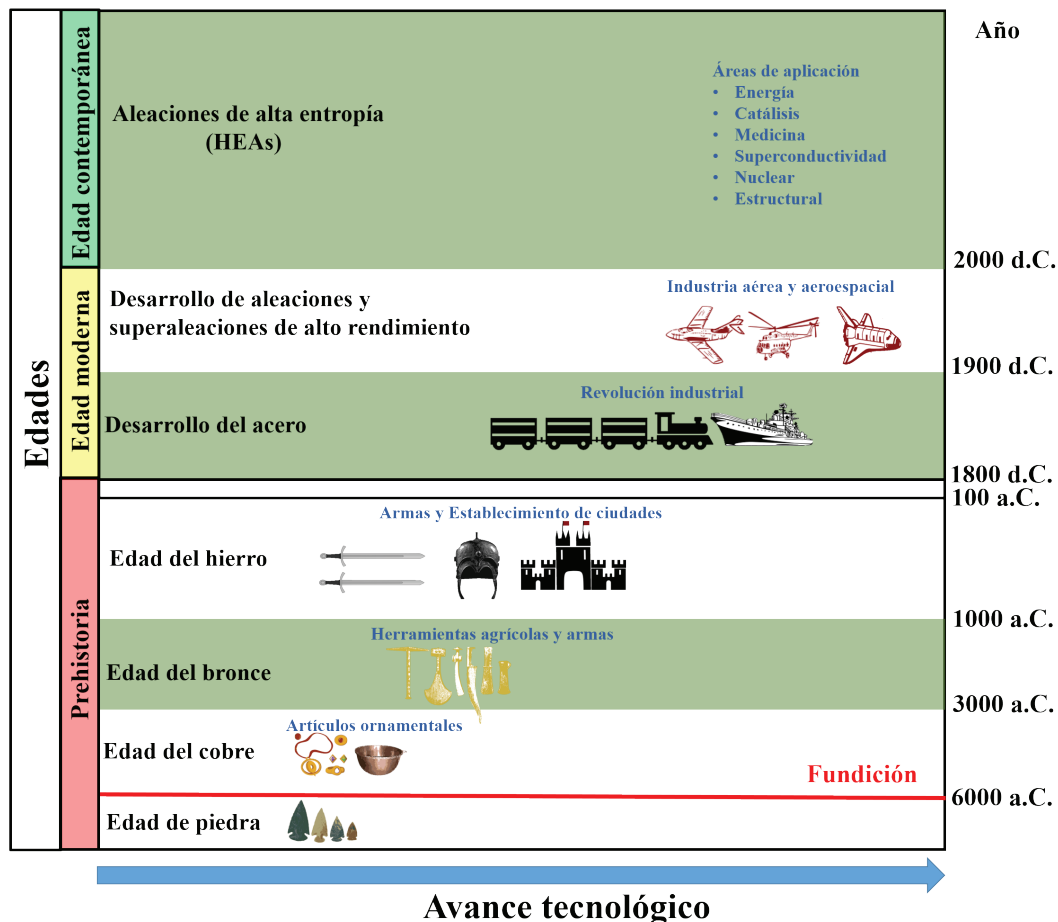


Figura 1. Metales y aleaciones que han marcado una época en el desarrollo de la humanidad.

Fuente: Elaboración propia.

Edad de Bronce

Los historiadores han marcado este periodo de tiempo con ciertas diferencias temporales que van de los 3000-1000 años a.C. Al igual que el cobre, los primeros artículos de bronce fueron encontrados en Oriente Medio alrededor del año 3000 a.C. en lo que fue la antigua Sumeria, considerada la primera civilización del mundo. El bronce fue la primera aleación conocida en el mundo que consiste en la unión de cobre y una fracción de estaño que podría alcanzar hasta un 10 % en peso. Las herramientas fabricadas con esta aleación son más resistentes a la corrosión y con mayor dureza que las elaboradas con su predecesor el cobre. Otra de las grandes ventajas del bronce, que depende de su composición, es su menor punto de fusión (890-920 °C) comparado con el cobre (1085 °C), lo que permitió un mejor manejo y una considerable reducción en los costos y dificultades de producción. Además, el reducido número y localización de los yacimientos de los minerales de estaño requerido para la fabricación de bronce, generó un importante despliegue comercial entre los diferentes pueblos. De alguna manera, esto fue uno de los factores detonantes para la formación de las primeras ciudades-estado (Mesopotamia, Egipto, Micenas), así como la consolidación de la agricultura y el comercio entre diferentes culturas.

El bronce no sólo potenció el crecimiento de las civilizaciones, sino que también generó conflictos bélicos por el control de los recursos entre los diferentes pueblos. Los conflictos alcanzaron situaciones extremas hasta el punto de la erradicación de imperios, destrucción y desaparición de ciudades. El colapso de estas civilizaciones (Mesopotamia, y Micenas) marcaría el final de la era de bronce.

Edad de Hierro

El hierro es uno de los 4 elementos más abundante en el planeta y se encuentra disponible en la naturaleza en forma de yacimientos minerales como: hematita, limonita, magnetita y siderita. Sin embargo, el principal factor que retardo el uso de este metal por los pueblos de la prehistoria fue la falta de tecnología, debido a la gran dureza del metal y a la alta temperatura requerida para su forja (1200 °C). Aunque, hay evidencia que la humanidad tenía conocimientos del hierro desde 3000 años a.C. fue hasta 1000 años a.C. que tomó un lugar importante en la historia.

Los conflictos bélicos y migraciones que desestabilizaron el Oriente Medio entre los 2000-1000 años a.C. resultaron en la escasez de bronce para la elaboración de armas. Por otro lado, para la expansión de los imperios en este periodo fue fundamental la construcción de armas nuevas y la generación de tecnología bélica que permitiera una superioridad militar, el hierro cumplió con esta misión. Por lo tanto, el remplazo del bronce por el hierro para fabricación de armas y herramientas fue inminente. Los artículos hechos con hierro presentaron mayor dureza y resistencia que los elaborados con otro material conocido hasta entonces. Así, el uso de este metal se popularizó y extendió en diferentes civilizaciones dando lugar al inicio de la edad de hierro (1000-100 a.C.).

Los conocimientos para la forja de artículos de hierro implicaron un salto tecnológico en la agricultura, comercio y la guerra. La mejora en estos sectores influyó directamente en el ámbito económico, cultural y social de los asentamientos humanos. Sin embargo, el final de esta etapa de la humanidad fue marcado por la aparición de los sistemas de escritura en diferentes culturas, no obstante, el dominio del hierro se extendió por otros dos milenios más.

Edad Moderna

Desarrollo del Acero

Al final de la edad de hierro (100 años a.C.) no sólo se conocían el cobre, estaño y hierro, también se tuvo conocimiento de otros metales como oro, plata, mercurio que no fueron utilizados en la formación de aleaciones. Aunque tenían importancia comercial, su manejo no consideró un cambio significativo en la sociedad debido a que son muy blandos para la fabricación de herramientas y armas. Después de la edad del hierro (100 a.C.), este metal siguió dominando en la fabricación armas y herramientas. Sin embargo, con el avance del tiempo se exploraron técnicas para mejorar el endurecimiento de las armas, lo que dio lugar a la segunda aleación más importante hasta entonces descubierta. Esta aleación fue conocida como acero, la cual consiste en una mezcla de hierro y una fracción de carbono (0.008-2.11 % peso).

Los primeros indicios que demuestran la importancia del acero datan del siglo XVIII con la mecanización de la producción textil a partir del algodón, a este periodo se le conoció como la primera revolución industrial. Sin embargo, el impacto no fue signifi-

cativo debido que no se contaba con los conocimientos y tecnologías necesarias para manejar un control adecuado del contenido de carbono en la aleación. Por lo que la aleación tenía un alto contenido de carbono que lo hacía más duro pero frágil. No obstante, fue a mediados del siglo XIX que la introducción del método propuesto por Henry Bessemer para la fabricación de acero marco un cambio sustancial en el desarrollo y fabricación de estas aleaciones. La técnica consistía en retirar las impurezas y el exceso de carbono del hierro mediante la oxidación producida por la inyección de aire dentro del hierro fundido. Este proceso permitió fabricar grandes cantidades de acero, de forma rápida y económica. Dando como resultado un acelerado crecimiento industrial que fue conocido como la segunda revolución industrial (He, K., & Wang, L. 2017). Este acontecimiento marco el desarrollo del acero y durante este tiempo fueron creadas obras de ingeniería y desarrollos tecnológicos que en épocas pasadas no era posible imaginar (ferrocarril, puentes, barcos, etc.).

Desarrollo de aleaciones y superaleaciones de alto rendimiento

Los desarrollos tecnológicos del siglo XIX aceleraron las transformaciones económicas, sociales y políticas del siglo XX, dando lugar también a los dos conflictos bélicos más grandes conocidos por la humanidad (La primera y segunda guerra mundial). Las guerras, durante el siglo XX, impulsaron un enorme salto tecnológico dando lugar a la aparición de reactores nucleares, motores de combustión interna, turbinas de turbocompresores, aviones cohetes, barcos, centrales eléctricas, intercambiadores de calor, y diferentes dispositivos que posteriormente revolucionaron la industria química y petrolera. Así, las innovaciones tecnológicas demandaron nuevos materiales con propiedades mecánicas capaces de resistir condiciones extremas de alta temperatura, alta presión, corrosión, oxidación y ataques del medio ambiente de trabajo. A estos nuevos materiales se les conoció como aleaciones y superaleaciones de alto rendimiento (Hart, G. L., 2021).

Una gran cantidad de aleaciones y superaleaciones fueron fabricadas durante este periodo de tiempo, las cuales se pueden clasificar en aleaciones ferrosas y no ferrosas. Las aleaciones ferrosas tienen como metal mayoritario al hierro, y minoritario a

otros metales (manganeso, níquel, vanadio, cromo, cobalto) y no metales (carbono, fósforo, silicio, azufre). Por otro lado, las aleaciones no ferrosas tienen como elemento mayoritario a metales como: aluminio, cobre, níquel, cobalto y titanio.

No todas las aleaciones son consideradas superaleaciones, solo se denominan así aquellas aleaciones con propiedades mecánicas que resisten condiciones extremas de operación a elevada temperatura ($> 540^{\circ}\text{C}$). Las aleaciones base níquel, cobalto, hierro y titanio en combinación con cantidades pequeñas de tungsteno, molibdeno, tantalio, niobio, cromo y aluminio, pertenecen a este grupo. Algunas de las familias de superaleaciones comerciales con aplicación directa son: Hastelloy, Inconel, Waspaloy o René. Hastelloy (cobalto, cromo, níquel) se utiliza actualmente en la fabricación de motores de aviones. Inconel (níquel, cromo, hierro) es empleado para motores de cohetes. Waspaloy (cobalto, cromo, níquel) es usado en turbinas de gas. René (base níquel) es usada en la fabricación de misiles.

A pesar de las excelentes propiedades de las superaleaciones, el avance del desarrollo tecnológico de siglo XXI se ha visto limitado debido a que se requieren nuevos materiales con características y propiedades que superen a las superaleaciones. Por lo tanto, una nueva generación de aleaciones ha comenzado a tomar interés y podría darle fin a la era de las superaleaciones, las cuales son conocidas como aleaciones de alta entropía (HEAs por sus siglas en inglés, High Entropy Alloys).

Edad Contemporánea

Como se ha descrito anteriormente, en la antigüedad tuvieron que pasar milenios para que los metales marcaran un cambio en la forma de vida de las civilizaciones. Sin embargo, desde el siglo XIX el impacto tecnológico de los metales en la sociedad se ha acortado a cada 100 años. Durante el siglo XIX fueron los aceros, en el siglo XX fueron las superaleaciones y a inicios del siglo XXI ha surgido un nuevo grupo de aleaciones conocidas como aleaciones de alta entropía. Estas aleaciones están en su fase de investigación, pero han mostrado características y propiedades que superan por mucho a los materiales conocidos hasta ahora.

Origen de las Aleaciones de alta entropía (HEAs)

Desde la prehistoria hasta el siglo XIX la selección y producción de aleaciones se ha basado en el concepto de dos elementos, un metal mayoritario y otro elemento (metal, no metal) en menor cantidad. Bajo este concepto se generaron múltiples aleaciones que fueron responsables de grandes cambios en el desarrollo de la sociedad. Sin embargo, en el siglo XX se abrió un nuevo panorama con la llegada de las superaleaciones, donde más de dos elementos principales fueron usados para su fabricación. Sin embargo, aún en las superaleaciones existe una limitante en el número de elementos principales, dando como resultado que el desarrollo de la microestructuras, propiedades y aplicaciones presenten limitaciones. Es así, que un nuevo grupo de aleaciones conocidas como HEAs comenzó a tomar interés debido a que son aleaciones que contienen 5 o más elementos principales.

Hay evidencia de que las primeras investigaciones de estas aleaciones se remontan desde 1778 por el científico alemán Franz Karl Achard, el cual estudió aleaciones de cinco a siete elementos con la misma concentración en masa de cada elemento. Sin embargo, tuvieron que pasar 200 años para que se retomara el estudio de estas aleaciones. En la última década del siglo XX, tres grupos de investigación completamente independientes liderados por Brian Cantor (Inglaterra), Jien-Wei Yeh (Taiwan) y Srinivasa Ranganathan (India) comenzaron a estudiar estas aleaciones. Aunque en un inicio estas aleaciones fueron conocidas como aleaciones de elementos principales (Cantor, B. et al. 2004), fue en el 2004 que el término HEAs fue acuñado por Jien-Wei Yeh y colaboradores (Yeh, J. W. et al. 2004).

Diseño de aleaciones de alta entropía (HEAs)

La definición inicial de HEAs solo considera la composición de las aleaciones, cada una con una concentración atómica entre el 5-35 %. Esta definición implica la estricta formación de una solución sólida desordenada. Sin embargo, en la práctica, se pueden formar más de una estructura en la solución sólida además de compuestos intermetálicos y fases amorfas que no presentan una estructura ordenada, dependiendo de la composición de la aleación. Por lo tanto, con el objeto de predecir la formación de las diferentes fases se consideró usar parámetros fisicoquímicos como: entropía, radio atómico y energía libre de Gibbs, (ver la Figura 2). (Murty, B. S. et al. 2019).

Entropía: El término entropía incluye las contribuciones configuracionales, vibratorias, electrónicas y magnéticas de los elementos. Para reducir las variables de cálculo sólo se considera la entropía configuracional de la mezcla de los metales en estado puro. Por lo tanto, considerando la ecuación de Boltzman, la entropía (ΔS_{conf}) para la mezcla de metales aleatorios de n componentes de composición en fracción atómica (x_i), está dada por la ecuación (1).

Donde R es la constante ideal de los gases, i es el número de elementos de 1 hasta n y x_i es la fracción atómica. Las HEAs que forman soluciones sólidas tienen valores de entropía configuracional mayor que $1.5R$, sin importar si son monofásicos o multifásicos.

$$\Delta S_{conf} = -R \sum_{i=1}^n x_i \ln x_i \quad (1)$$

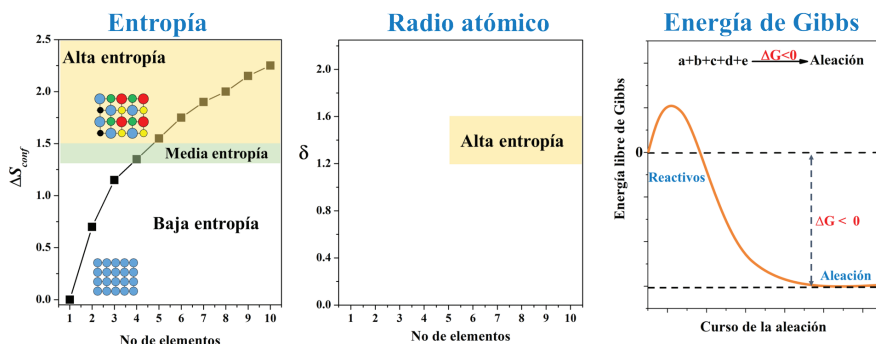


Figura 2. Parámetros fisicoquímicos que se deben cumplir para favorecer la formación de aleaciones de alta entropía (HEAs), donde ΔS_{conf} y δ representan la entropía configuracional y la diferencia de radio atómico del sistema, respectivamente. **Fuente:** Adaptado de Murty, B. S. et al. (2019).

Radio atómico: La diferencia de radio atómico en las HEAs es uno de los factores que afecta la formación de la solución sólida debido a la distorsión de la red cristalina. La diferencia de radio atómico en las HEAs permite a los átomos de los diferentes elementos tener la misma probabilidad de ocupar los sitios en la red de la solución sólida. Por lo tanto, el ordenamiento de la red es distinto a la del metal puro y de las aleaciones comunes. Este hecho motivó a adoptar un nuevo parámetro (δ) que describe el efecto de la diferencia de tamaño atómico en la HEAs, y está descrito por la ecuación (2).

Donde i es el número de elementos de 1 hasta n y x_i es la fracción atómica y r_i es el radio atómico de cada elemento. Este parámetro ha permitido identificar que una diferencia entre los radios atómicos de aproximadamente 1.1-1.6 adimensional en los componentes de la HEAs aumenta la posibilidad de formar soluciones sólidas.

Energía libre de Gibbs: La formación de fases está termodinámicamente controlada por la energía libre de Gibbs (ΔG), que depende de la competencia entre la entalpía (ΔH) y la entropía (ΔS), dada por la ecuación (3).

La formación de fases presenta tres posibles escenarios: fases elementales, intermetálicos y soluciones sólidas (amorfa o cristalina). Las fases elementales dependen de la estructura de los metales puros.

Las fases intermetálicas (compuestos intermetálicos) se forman de aleaciones de dos o más elementos de la mezcla y son estequiométricas. Por otro lado, la solución sólida está constituida por todos los elementos de la mezcla y puede presentar estructura amorfa o cristalina con diferente empaquetamiento o estructura cristalina, cúbica centrada en el cuerpo (BCC), cúbica centrada en las caras (FCC) o hexagonal compacto (HCP). La estructura final de la HEAs será aquella que alcance el equilibrio a menor energía libre de Gibbs de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica.

Procesos de síntesis

Los procesos para la síntesis o fabricación de HEAs dependen en gran medida de la aplicación que se le pretende asignar: por ejemplo, como piezas, películas o polvos. Por lo tanto, las rutas de síntesis se dividen en tres grupos, líquida, sólida y gaseosa, como se ve en Figura 3 (Zhang, C. et al. 2016).

La ruta líquida consiste en fabricar aleaciones al pasar los metales del estado sólido al líquido. A este proceso se le conoce comúnmente como fusión es la técnica más antigua conocida para el procesamiento

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i \left(1 - \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n x_i r_i} \right)^2} \quad (2)$$

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T \Delta S_{mix} \quad (3)$$

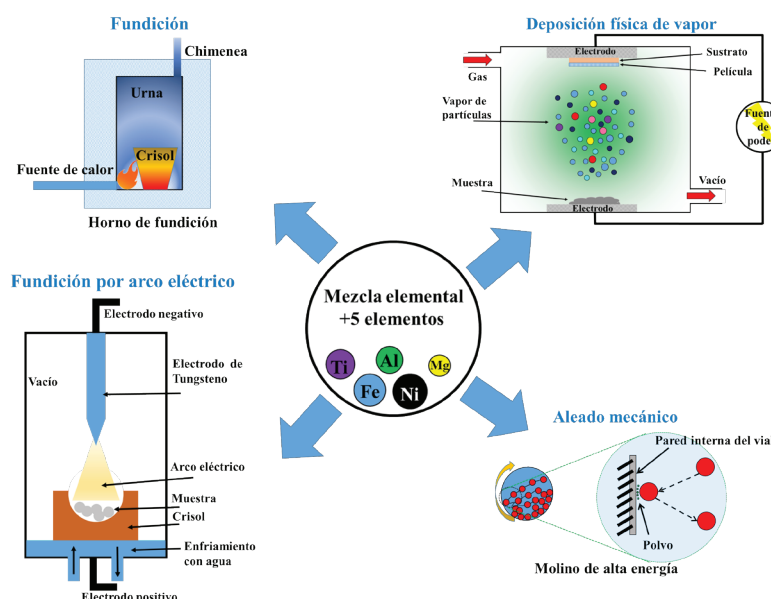


Figura 3. Métodos de síntesis más comunes para la fabricación de aleaciones de alta entropía (HEAs).
Fuente: Elaboración propia.

de metales y es la más usada en la síntesis de HEAs. Básicamente la técnica consiste en elevar la temperatura por encima del punto de fusión de los componentes. Sin embargo, aunque el proceso es muy simple, existe una gran variedad de métodos entre los que se incluyen, fundición de solidificación de Bridgman, fusión por arco-eléctrico, fusión por inducción, fusión por láser etc. Mediante estos métodos se pueden alcanzar temperaturas cercanas a los 3000 °C, lo cual es suficiente para fundir la mayoría de los metales utilizados para fabricar HEA. Sin embargo, uno de los inconvenientes de estas técnicas es la diferencia en los puntos de fusión de los componentes, por lo que el control de la composición en la aleación se dificulta. Otro inconveniente es la lenta velocidad de solidificación que favorece el desarrollo de mecanismos de segregación en la microestructura de la aleación. La microestructura típica de las HEAs obtenidas por esta vía es de naturaleza dendrítica con segregación interdendrítica.

La segunda ruta de síntesis se lleva a cabo en estado sólido y el producto resultante son polvos aleados que posteriormente son consolidados por sinterizado. El principio de esta técnica consiste en la difusión de los átomos entre los componentes de una mezcla de polvos elementales mediante energía mecánica hasta obtener una aleación. Este proceso se conoce comúnmente como aleado mecánico e involucra la deformación continua, fractura y soldadura de partículas que usualmente conducen a la formación de una solución sólida cristalina o amorfa. El aleado mecánico se puede llevar a cabo en diferentes tipos de molinos de bolas de alta energía que pueden ser planetarios o vibratorio. Las ventajas del uso del aleado mecánico como método de síntesis de HEAs incluyen el fácil manejo de operación, excelente homogeneidad en la composición de la aleación se lleva a cabo a temperatura ambiente, elimina la segregación y se pueden manejar mezclas de materiales con diferentes puntos de fusión.

Por último, la síntesis de HEAs en estado gaseoso se lleva a cabo al mezclar los componentes por medio de la deposición física de sus vapores elementales. Esta ruta de síntesis se usa principalmente para la obtención de películas y modificación de superficies. La deposición física de vapor de los componentes de las HEAs se lleva a cabo por diferentes métodos, al-

gunos de estos son deposición por arco catódico, haz de electrones, evaporación, láser pulsado y pulverización catódica. Hasta ahora el método más usado para fabricar películas de HEAs es la deposición por pulverización catódica. La técnica consiste en la vaporización de los átomos de un material sólido mediante el bombardeo por iones. Estos átomos se depositan aleatoriamente sobre un sustrato para formar la HEAs. Sin embargo, la nucleación y el crecimiento de aleación están limitados por parámetros como la presión y el voltaje de polarización del sustrato, o la temperatura y composición de la atmósfera.

Propiedades y aplicaciones futuras

Es importante señalar que el impacto de las aleaciones en la sociedad depende de la capacidad de estas para mejorar las condiciones de vida de los seres vivos. Aunque las HEAs están en fase de investigación su aplicación está determinada por las características y propiedades que puedan alcanzar. La mayoría de las investigaciones sobre HEAs están enfocadas en sus propiedades mecánicas, no obstante, también han mostrado potencial como barreras de difusión, materiales eléctricos, térmicos, magnéticos, catalíticos, resistencia a la corrosión, almacenamiento de hidrógeno y resistencia a la irradiación, lo que los hace materiales tecnológicamente importantes. Estas propiedades son alentadoras y prometedoras para diferentes aplicaciones funcionales tales como: componentes para máquinas resistentes a condiciones extremas de alta temperatura, componentes para centrales nucleares, revestimientos duros para moldes, materiales y herramientas de corte y desgaste, biomateriales (prótesis), estructuras marinas resistentes al agua de mar, materiales para comunicación de alta frecuencia, superconductores, termoelectrónicos, eléctricos, magnéticos, catálisis, memoria de forma, almacenadores de hidrógeno y aleaciones de interconexión para celdas de combustible (ver la Figura 4) (Wang, X. et al. 2021).

A continuación, se mencionan algunos ejemplos de HEAs que han superado las características y propiedades de las superaleaciones conocidas. La aleación $\text{Co}_{1.5}\text{CrFeNi}_{1.5}\text{Ti}_{0.5}$ forma una solución sólida con estructura cristalina cúbica centrada en las caras. Sus propiedades y características superan a algunas de las que presentan hasta ahora las superaleaciones comerciales. Por ejemplo, presenta una dureza Vic-

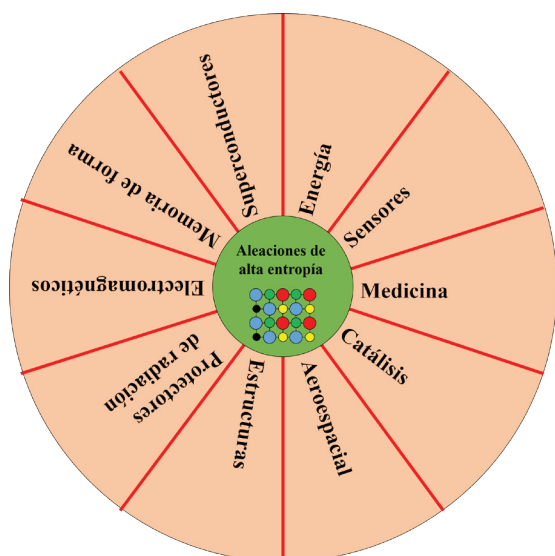


Figura 4. Áreas de oportunidad donde las aleaciones de alta entropía (HEAs) tendrán potencial aplicación en el futuro.

Fuente: Elaboración propia.

kers (HV por sus siglas en inglés, Hardness Vickers) máxima de 513 HV a baja temperatura, lo cual es muy superior a lo mostrado en la superaleación INCONEL 718 (450 HV). Además, tiene un alto desempeño a altas temperaturas (1000°C) con una dureza de 280 HV, que es aproximadamente tres veces más alta que la alcanzada por la superaleación INCONEL 718 a la misma temperatura (100 HV). Además, esta HEAs también ha superado propiedades como: resistencia al desgaste, corrosión y oxidación a altas temperaturas, en superaleación tipo Stellite 6. Por lo tanto, estas HEAs tiene potencial para sustituir fácilmente algunas superaleaciones comerciales que tienen aplicación en condiciones extremas de alta temperatura. Otra HEAs con gran potencial es la $\text{Al}_{0.5}\text{CrCoCuFeNi}$, que puede ser usada como aglutinante en carburos cementados para mejorar sus propiedades. Por ejemplo, la incorporación de un 20 % de $\text{Al}_{0.5}\text{CrCoCuFeNi}$ como aglutinante de WC muestra una dureza semejante a 700 HV que es superior al compuesto WC/Co (aproximadamente 500 HV), ambos en condiciones de alta temperatura (700°C). Por otro lado, la HEAs $\text{Al}_5\text{Cr}_{12}\text{Fe}_{35}\text{Mn}_{28}\text{Ni}_{20}$ tiene excelentes propiedades de laminación que superan al acero inoxidable 304, por lo que puede ser usado como sustrato flexible para pantallas y celdas solares. Existen otros HEAs como $\text{Al}_{0.3}\text{CrFe}_{1.5}\text{MnNi}_{0.5}$, TiTaCrZrAlRu y CoCuCrFeNi que tiene futuro como recubrimientos de superficies para endurecimiento y barreras de difusión en aplicacio-

nes nucleares. Por lo tanto, no cabe duda de que eventualmente las HEAs serán aplicadas en múltiples áreas, permitiendo un enorme avance tecnológico en beneficio y bienestar de los seres vivos.

Conclusiones

Las aleaciones han sido usadas durante mucho tiempo para mejorar propiedades deseables a los materiales. Las aleaciones de alta entropía (HEAs) tienen un largo camino por recorrer, sin embargo, es evidente que su aplicación en el desarrollo tecnológico marcará un cambio importante en la civilización del siglo XXI. Aunque las HEAs están en fase de investigación y presentan márgenes de mejora ilimitado, se requiere investigación sistemática y profunda que permita desarrollar al máximo sus propiedades y características. Para que de esta forma la implementación de las HEAs en diversas áreas pueda cubrir las necesidades tecnológicas de la sociedad. Sin embargo, ya se ha reportado que las HEAs poseen propiedades excepcionales, superiores a las de las aleaciones convencionales, y es probable que en el futuro se descubran otras aleaciones sobresalientes.

Referencias

- Cantor, B., Chang, I. T. H., Knight, P., Vincent, A. J. B. (2004). Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 375, 213-218.
- Hart, G. L., Mueller, T., Toher, C., Curtarolo, S. (2021). Machine learning for alloys. *Nature Reviews Materials*, 6(8), 730-755.
- He, K., Wang, L. (2017). A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1022-1039.
- Murty, B. S., Yeh, J. W., Ranganathan, S., Bhattacharjee, P. P. (2019). *High-entropy alloys*. Elsevier.
- Wang, X., Guo, W., Fu, Y. (2021). High-entropy alloys: emerging materials for advanced functional applications. *Journal of Materials Chemistry: A*, 9(2), 663-701.
- Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., Chang, S. Y. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced engineering materials*, 6(5), 299-303.
- Zhang, C., Gao, M. C., Yeh, J. W., Liaw, P. K., Zhang, Y. (2016). *High-Entropy alloys: fundamentals and applications*. DOI: 10.1007/978-3-319-27013-5.

Ensayo expositivo

¡Mira por donde caminas! Sistemas de locomoción humanoide basados en visión

Watch your step! Vision-based humanoid locomotion systems

Noé G. Aldana Murillo¹, Jean Bernard Hayet², Héctor M. Becerra^{2*}, Claudia Esteves³

¹Departamento de Ingenierías
Universidad Iberoamericana León

²Departamento de Ciencias de la Computación
Centro de Investigación en Matemáticas, A. C.

³Departamento de Matemáticas
Universidad de Guanajuato

Autor de correspondencia:
*hector.becerra@cimat.mx

Recibido: 27-09-2024 Aceptado: 04-09-2025 (Artículo Arbitrado)

Resumen

Los robots humanoides son mecanismos complejos, con muchas articulaciones, que requieren el desarrollo de estrategias de control sofisticadas. El movimiento de las articulaciones debe sincronizarse generando trayectorias adecuadas para que el robot logre realizar el movimiento esperado de caminata (locomoción) que le permita desplazarse de un lugar a otro. En este artículo, se describe una de las principales estrategias de control de locomoción de robots humanoides y su extensión para considerar información visual proporcionada por una cámara a bordo del robot en el lazo de control. Se describen dos planteamientos con los que la información visual se ha integrado en los esquemas de control de humanoides: el enfoque *desacoplado*, en el que las velocidades generadas por un controlador visual se usan como entrada de referencia a un generador de marcha previamente diseñado, y el enfoque *acoplado*, en el que la información visual se integra en el generador de marcha mismo. Esta breve revisión de los trabajos más importantes en control visual de humanoides permite visualizar retos para que estos robots logren una mayor autonomía.

Palabras clave: Control visual, locomoción, robots humanoides, visión robótica.

Abstract

Humanoid robots are complex mechanisms with many articulations and as such require the development of elaborate control strategies. The motion of these joints should be synchronized and generate adequate trajectories so that the resulting overall motion of the robot is the walking pattern (bipedal locomotion). This way, a humanoid robot becomes capable of moving from one place to the other. In this article, we describe one of the main humanoid robot locomotion control strategies and its extension to consider visual information provided by an on-board camera in the control loop. We describe two frameworks in which visual information can be integrated within humanoid locomotion control schemes: a *decoupled* framework, where the velocities generated by a “standard” visual controller are used as a reference input for a previously designed walking pattern generator; a *coupled* framework, where the visual information is tightly integrated in the optimization problem within the walking pattern generator. With this short review of the most important approaches in visual control for humanoid locomotion, we aim at visualizing some of the challenges in the development of autonomous humanoid robots

Keywords: Humanoid robots, locomotion, robot vision, visual control.

Introducción

Hacer mover a un robot de ruedas sobre un suelo plano es relativamente simple, por lo menos conceptualmente: en el caso más común, un motor controla a la rueda izquierda, mientras otro motor controla a la derecha. Usando la *diferencia* entre los controles aplicados a cada motor, podemos hacer que el robot avance hacia adelante, o que gire sobre su mis-

ma posición. Con un poco de geometría del plano, le podemos hacer alcanzar *cualquier punto objetivo* en nuestro entorno. Este tipo de sistema se conoce como de *manejo diferencial*. Ahora, pensemos en cómo resolver una tarea similar para un robot *humanoide*. Las cosas son más complicadas porque, en este caso, *no tenemos* manera *directa* de usar contro-

les para generar movimientos del robot en el plano. Lo que sí podemos controlar son motores asociados a las *articulaciones* del robot (codos, rodillas, caderas, etc.) y es el movimiento coordinado de ellas que produce, si lo hacemos bien, la marcha bípeda. Eso trae varias complicaciones: primero, el número de motores a controlar simultáneamente es grande (del orden de 20); segundo, entre los posibles valores que podemos asignar a las articulaciones de un humanoide, muchos son tal que, si se aplicaran, resultarían en una caída del robot.

Para simplificar esta tarea, la marcha de los robots humanoides suele dividirse en dos sub-problemas: Primero, determinar trayectorias *factibles* (es decir, que no provocarán la caída del robot) para puntos particularmente importantes para la caminata del robot, como son: las posiciones de sus pies y de su Centro de Masa (CoM, por sus siglas en inglés). Segundo, una vez calculadas las trayectorias de esos puntos particulares, determinar valores para *todas* las articulaciones del robot para que su centro de masa y sus pies sigan las trayectorias determinadas en el primer subproblema. Este segundo subproblema es clásico en robótica y se denomina *cinemática inversa* (Murray et al., 1994). No lo detallaremos más, ya que esta exposición se enfoca más en los aspectos de la *caminata o locomoción* humanoide; además existen soluciones eficientes para encontrar los valores articulares necesarios para generar un movimiento dado

(Kanoun et al., 2011). A continuación, veremos soluciones al primer subproblema, en particular soluciones que se apoyan en la *visión* del robot, es decir consideraremos que el robot cuenta con una cámara que puede estar a bordo del mismo para guiar su caminata.

Modelo de locomoción humanoide

Para determinar una trayectoria factible del centro de masa y de los pies que dirija al robot a una ubicación objetivo, es común usar el llamado Control Predictivo Basado en Modelo (MPC, por sus siglas en inglés), el cual predice la evolución de las variables de interés a partir de un modelo matemático que representa una aproximación burda de nuestro sistema en función de los controles candidatos probables a ser aplicados. Esta aproximación representa la física simplificada que se genera en el movimiento del humanoide al dar un paso y un planteamiento usado comúnmente se conoce como el modelo del carro sobre la mesa, ilustrado en la Figura 1. En esta figura, se presenta el movimiento sólo en el plano sagital del robot (coordenada x), pero también se usa un modelo similar para el movimiento en el plano frontal (coordenada y).

En este modelo, toda la masa del robot se concentra en un punto de coordenada x (el centro de masa) que se desplaza en un plano horizontal de altura fija z_c (la “mesa”) y se aplica por cada coordenada del plano (en x y en y), por separado. En la Figura 1, se observa que la base de la mesa (que modela el pie del robot) es de tamaño limitado; debido al movimiento de la masa m se genera un momento de fuerza que haría girar la base y podría voltear la mesa. Ahora, si el carro tomara una aceleración adecuada, podría mantener el equilibrio, al generarse un momento en sentido opuesto al anterior. Con este modelo, evitar la caída implica restringir la posición de un punto especial, denominado punto de momento nulo (ZMP, por sus siglas en inglés), que es el punto en el cual la suma de los momentos con respecto a este punto es igual a cero. Mantener el equilibrio equivale a conservar el punto de momento nulo en el área en contacto con el suelo (es decir, en la Figura 1, el “pie de la mesa”).

Para mantener el punto de momento nulo en el rango deseado que genera el equilibrio, se formula un problema de control para el sistema dinámico del carro sobre la mesa representado en ecuaciones di-

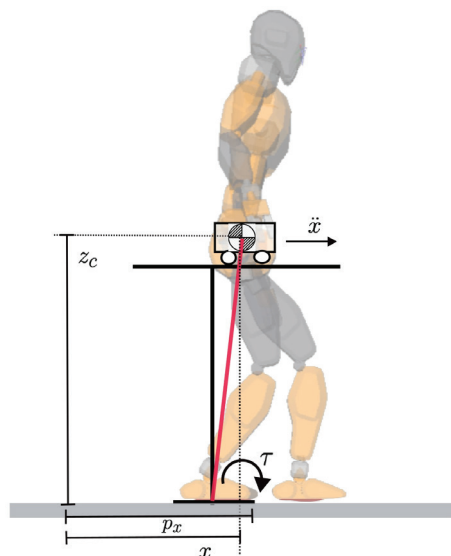


Figura 1. Modelo del carro sobre la mesa propuesto por Kajita et al. (2003) para representar la locomoción humanoide.

Fuente: Elaboración propia.

ferenciales. La posición del punto de momento nulo, $p_x(t)$, se puede deducir de la del centro de masa, $x(t)$, y de sus derivadas en el tiempo; la idea es resolver el problema de control a través de optimizar la posición $x(t)$ y a la vez asegurar que el punto de momento nulo de una configuración de equilibrio. El criterio a usar en la optimización nos lo indica la naturaleza de la tarea por realizar, por ejemplo: llegar lo más rápidamente posible a un objetivo o tener una velocidad la más cercana posible a una velocidad de referencia.

El modelo descrito arriba fue propuesto en Kajita et al. (2003), donde se optimiza la trayectoria de la posición $x(t)$ del centro de masa mediante una técnica de control óptimo llamada Regulador Cuadrático Lineal (LQR, por sus siglas en inglés), a partir de una trayectoria de referencia para el punto de momento nulo *definida previamente*, considerando que se conoce la posición de las huellas en las cuales va a caminar el robot. En las técnicas de control basadas en optimización, es necesario definir un criterio a optimizar. Para la locomoción humanoide, el criterio incluye un término que favorece posiciones del punto de momento nulo cercanas al centro de las huellas, y dos términos que favorecen que la solución encuentre trayectorias que no tengan cambios abruptos en posición, velocidad y aceleración. Para representar esas trayectorias, se les expresa como *cúbicas a trozos*, y la variable optimizada es la secuencia de valores que toma la tercera derivada del centro de masa $x(t)$ (llamada el *jerk*) en cada intervalo, donde éste se supone constante. La formulación LQR da una solución *analítica* al problema de optimización que permite conocer la entrada de control para cualquier posición del centro de masa y sus derivadas. Sin embargo, el Regulador Cuadrático Lineal no da garantía de que el sistema permanezca en configuraciones de equilibrio.

En Herdt et al. (2010), se mejoró la propuesta de Kajita et al. (2003) al optimizar la tercera derivada de la trayectoria del centro de masa en una ventana de tiempo finita utilizando Control Predictivo basado en Modelo y proporcionando una velocidad de referencia para el centro de masa (p. ej., “avanzar hacia adelante a 1 m/s”). El Control Predictivo basado en Modelo usa información predicha de las variables de interés del sistema en la optimización de los controles. La Figura 2 ilustra este planteamiento, con los valores de los controles (*jerks*) optimizados (en azul) en la ventana de tiempo; una elección de controles induce, a través del sistema dinámico del carro sobre mesa, una trayectoria $x(t)$ del centro de masa, una trayectoria del punto de momento nulo $p_x(t)$ (en línea continua verde) y una evaluación del criterio de optimización (*función de costo*), la cual mide la lejanía entre $p_x(t)$ y su valor de referencia (en línea punteada verde).

Una gran aportación de Herdt et al. (2010) es que las posiciones de las huellas se generan automáticamente mediante el mismo proceso de optimización de controles, en contraste con el enfoque anterior en el que las huellas deben definirse previamente. En la Figura 3, presentamos un ejemplo de resultado de tal optimización, donde las huellas resultantes se dibujan en color negro. La *función de costo* a optimizar usa tres términos: uno para minimizar las entradas de control (*jerks*) y suavizar la trayectoria del centro de masa (CoM - línea roja en la Figura 3); otro para minimizar la distancia entre la velocidad del centro de masa y la velocidad de referencia; un último para favorecer estados en los cuales el punto de momento nulo (ZMP) quede cercano al centro de la huella.

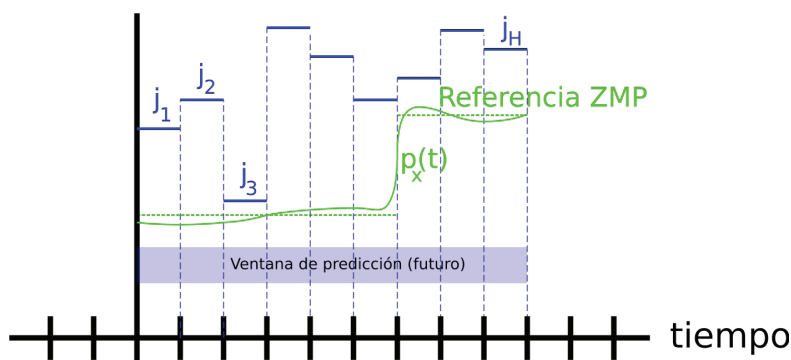


Figura 2. Principio del Control Predictivo basado en Modelo (MPC) para optimizar la secuencia de entradas de control (*jerks*) en una ventana de predicción.

Fuente: Elaboración propia.

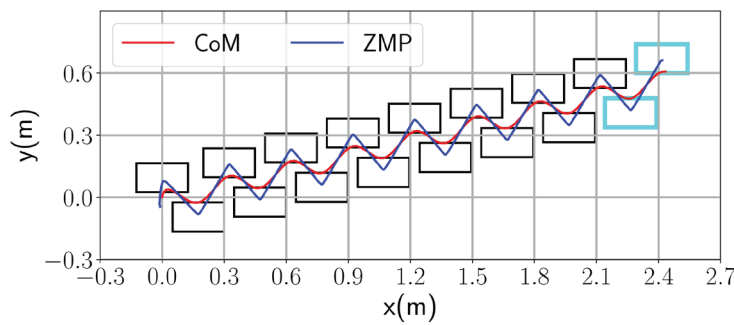


Figura 3. Ejemplo de caminata de un robot humanoide obtenido por una implementación del algoritmo de Herdt et al., (2010). Se muestra la evolución del centro de masa (CoM) y del punto de momento nulo (ZMP) para una secuencia de pasos.

Fuente: Elaboración propia.

Después del trabajo de Herdt et al. (2010), usar la técnica de Control Predictivo basado en Modelo, como lo resumimos en la Figura 4, ha sido una solución típica para la locomoción humanoide. Lo que se conoce como generador de marcha humanoide está resaltado en la Figura 4 en línea punteada azul y consta de dos elementos principales, el modelo de predicción dado por la dinámica del carro sobre la mesa y un optimizador que proporciona las entradas de control (*jerks*) y las posiciones de los pies del robot.

El Control Predictivo basado en Modelo tiene la ventaja de que permite incluir restricciones explícitas para buscar una solución óptima de las entradas de control y garantizar que el punto de momento nulo (línea azul en la Figura 3) no salga del área de las huellas que están en contacto con el suelo.

A diferencia de la formulación del Regulador Cuadrático Lineal, el Control Predictivo basado en Modelo no provee una solución analítica, pero existen técnicas potentes de programación cuadrática para acercarse numéricamente a una solución óptima. En lo que sigue, veremos cómo, dentro de este esquema, se ha propuesto usar información visual en lugar de velocidades de referencia, para guiar la caminata de robots humanoides.

Control visual

Una tarea de *control visual* (Chaumette y Hutchinson, 2006) consiste en dirigir a un robot a una ubicación deseada usando retroalimentación de información visual dada por una cámara que puede estar a bordo de él. Para eso, se extrae y compara información entre la imagen observada actualmente y una imagen capturada previamente desde la ubicación deseada; el objetivo es determinar velocidades (controles) para que, conforme el robot se desplaza, la diferencia de la información visual entre ambas imágenes se reduzca hasta que el robot llegue a observar la misma imagen en la ubicación deseada. El control visual tiene diferentes enfoques dependiendo del tipo de información proporcionada al controlador de caminata; el control basado en posición, también llamado control visual 3D, usa información tridimensional estimada a partir de las imágenes y el control basado en imagen, o control visual 2D, emplea información extraída directamente de las imágenes.

Un controlador visual calcula las velocidades de la cámara para producir convergencia a cero del error visual, es decir, la diferencia entre la información de la imagen actual y la de la imagen meta. Para robots con ruedas, como se mencionó antes, es relativamente directo “traducir” estas velocidades en

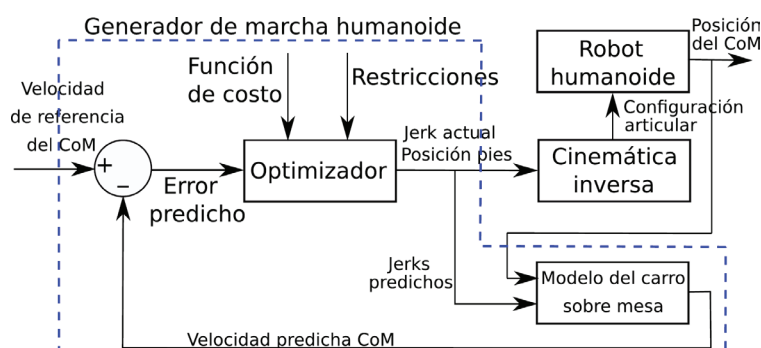


Figura 4. Diagrama de bloques de la locomoción humanoide basada en Control Predictivo basado en Modelo con el enfoque propuesto por Herdt et al., (2010).

Fuente: Elaboración propia.

comandos de movimiento para el robot. Para robots humanoides, es más complicado, ya que hacerlo requiere integrar el control visual con la generación de marcha. Una ilustración de esta tarea se presenta en la Figura 5: Deseamos que el robot *camine* de tal manera que la imagen observada actualmente (la segunda) se parezca a una imagen meta (la tercera), y queremos que lo que guíe esa caminata sean solamente elementos de esas imágenes. A continuación, describiremos dos familias de métodos usados para lograr esta integración: los enfoques desacoplados y acoplados.

Enfoque desacoplado

Las velocidades de la cámara generadas por un esquema de control visual se pueden usar como valor de referencia para la velocidad del centro de masa del robot humanoide en el esquema de control propuesto por Herdt et al., (2010).

Como una cámara con movimiento libre genera 6 velocidades (3 de traslación y 3 de rotación), de ellas se deben tomar sólo las 2 (de traslación) y la de rotación respecto al eje vertical requeridas por el sistema de locomoción. Además, las velocidades de

la cámara se deben expresar en el marco de referencia del centro de masa. A este enfoque se le conoce como *desacoplado*. La Figura 6 resume este enfoque con un diagrama de bloques. Noten que el generador de marcha de la Figura 4 se utiliza como una caja negra en el sistema de lazo cerrado. Si se usa un error de retroalimentación visual directamente dentro del modelo de locomoción, entonces se dice que es un enfoque *acoplado*, el cual se detallará en la siguiente sección.

En Dune et al. (2010), se utiliza control visual para calcular las velocidades de la cámara montada sobre un robot humanoide para un enfoque desacoplado. En ese trabajo, los autores tratan de cancelar la velocidad de la cámara provocada por el movimiento de balanceo (*sway motion*), es decir el movimiento lateral oscilatorio que se genera durante la caminata del robot (¡que tenemos también en la caminata humana!). Una vez que obtienen la velocidad de la cámara, la usan en los términos correspondientes a la velocidad de referencia *en el proceso de optimización* que controla el centro de masa y genera posiciones de los pies.

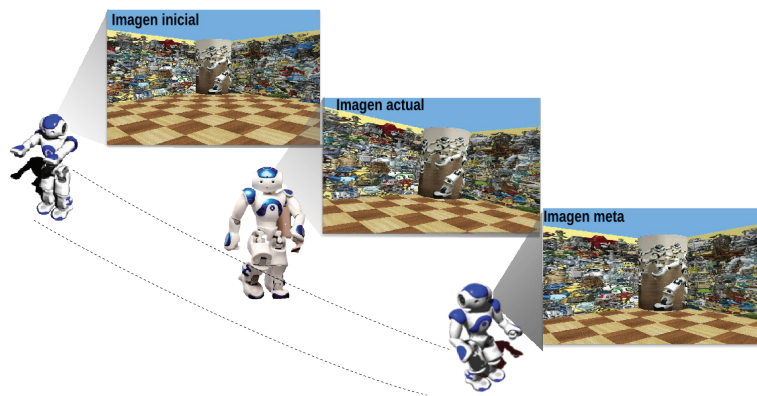


Figura 5. Control visual para un humanoide que debe alcanzar una ubicación deseada comparando una imagen meta con la imagen actual observada.

Fuente: Elaboración propia.

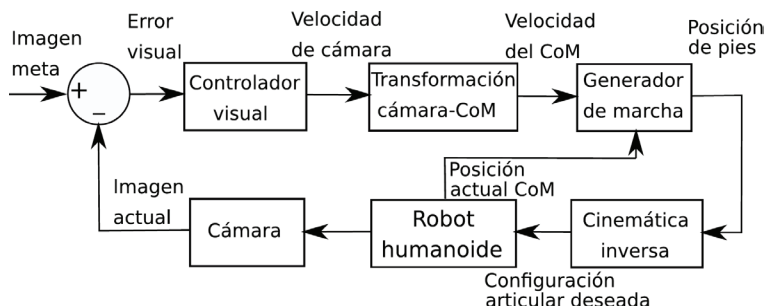


Figura 6. Diagrama de bloques del enfoque de control visual desacoplado.

Fuente: Elaboración propia.

Otro esquema de control desacoplado se ha propuesto para conducir a un robot humanoide a una ubicación de referencia en un tiempo deseado (Delfin et al., 2016). La Figura 7 presenta uno de los resultados experimentales de ese trabajo. Se visualiza el movimiento del centro de masa desde una vista superior para la caminata de un robot humanoide real (robot Nao) que alcanza la misma configuración deseada, en un tiempo predefinido, desde tres configuraciones iniciales distintas.

Los esquemas de control visual desacoplados tienen la desventaja de que la información visual no está directamente acoplada con la decisión de cómo el robot genera su caminata. El esquema de control general confía en que el sistema de locomoción, actuando como caja negra, logra seguir la velocidad de referencia dada por el control visual de forma más o menos precisa.

Enfoque acoplado

El enfoque desacoplado implica resolver dos tareas: (1) calcular la velocidad de referencia que tiene que seguir la cámara del humanoide, a partir de los errores medidos entre la percepción actual y la deseada, y (2) optimizar la trayectoria del centro de masa del robot para seguir esas velocidades de refe-

rencia, como se describió en la segunda sección de este documento. La idea del enfoque *acoplado* es no separar esas tareas sino realizarlas en *un solo proceso de optimización*, usando la última información visual disponible, como se ilustra en la Figura 8. El bloque denominado generador de marcha es similar al representado en la Figura 4 pero introduce la información visual para resolver el control, por eso se denomina Control Visual Predictivo (VPC, por sus siglas en inglés).

Un primer trabajo en el que se propone un enfoque acoplado se ha presentado en García et al. (2015). Los autores proponen usar un error de retroalimentación visual dentro del modelo de locomoción de Herdt et al. (2010) al predecir, en la ventana de tiempo correspondiente a la optimización, la posición de unos puntos característicos rastreados en las imágenes tomadas por la cámara del robot. En este esquema, también conocido como Control Visual Predictivo (Allibert et al., 2010), se modifica el término de la función a optimizar, que originalmente corresponde a las velocidades de referencia, por un término que favorece la reducción de los errores en las características visuales.

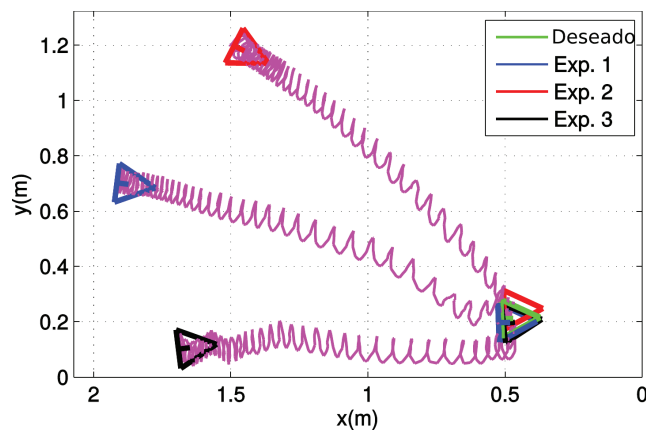


Figura 7. Resultado de tres experimentos para alcanzar una ubicación en un tiempo predefinido. Se representa la ubicación inicial y final mediante triángulos y la trayectoria realizada por el centro de masa del robot que presenta el balanceo típico de la caminata humanoide.

Fuente: Elaboración propia basada en los resultados de Delfin et al. (2016).

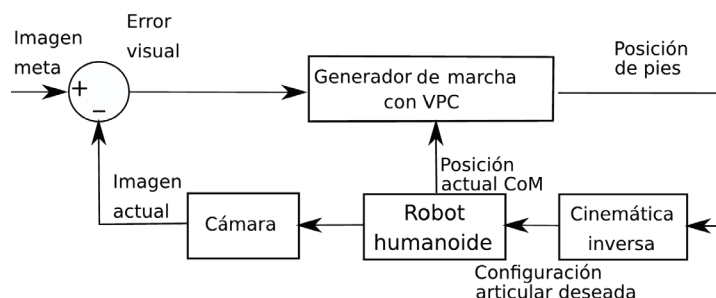


Figura 8. Diagrama de bloques del enfoque de control visual acoplado.

Fuente: Elaboración propia.

En Aldana et al. (2020), este enfoque acoplado es generalizado al no evaluar el error visual en términos de puntos específicos que eventualmente podemos perder de vista, sino en términos de un objeto geométrico que expresa la relación global entre nuestra imagen actual y la imagen de referencia. La naturaleza de estos objetos depende de la escena: si es plana, se llama homografía, y si no lo es, se llama matriz esencial. En ambos casos, la idea es usar estos objetos estimados a partir de las imágenes para deducir un error visual con que alimentar el Control Visual Predictivo, como se indica en la Figura 8.

La Figura 9 ilustra uno de los experimentos de caminata realizados bajo este esquema usando un simulador dinámico; aparecen las posiciones sucesivas del robot, las trayectorias de sus pies (verde para el pie izquierdo y rojo para el pie derecho), la del punto de momento nulo (azul), así como dos vistas de la cámara del robot, la vista inicial y la que nos sirve de referencia para calcular el objeto geométrico que requiere el controlador, en este caso una homografía. Las cruces magenta indican qué puntos de cada vista se usaron para estimar la homografía.

Conclusiones

Los humanoides son el tipo de robot más complejo que existe debido a su alto número de articulaciones; el movimiento de éstas se debe sincronizar adecuadamente para lograr caminar y desplazarse. Si bien esto es fácil y natural en los humanos, en los robots humanoides implica resolver un problema de

optimización relativamente complicado, en el cual algunas variables no pueden tomar cualquier valor, sino que están restringidas. En este trabajo se han descrito enfoques en los que la información visual proporcionada por una cámara a bordo del robot se utiliza para generar el movimiento de caminata. Mientras el enfoque desacoplado permite el uso de diferentes esquemas de control visual, el enfoque acoplado es una solución integral que no depende de un generador de marcha previamente diseñado. En los últimos años se ha visto una tendencia hacia el desarrollo de esquemas basados en aprendizaje profundo (Lobos-Tsunekawa et al., 2018), sin embargo, una ventaja de los enfoques presentados aquí es la formalidad de su teoría y la garantía de estabilidad del control en lazo cerrado. Algunas técnicas de aprendizaje que recientemente han mostrado un desempeño sobresaliente en aplicaciones de visión por computadora se podrían aprovechar en un sistema de locomoción humanoide, por ejemplo, en la detección y rastreo de información visual para generar los errores de retroalimentación. Además, un aspecto importante para dotar a los robots humanoides de autonomía en entornos desconocidos es que el esquema de control visual incluya capacidad de evadir obstáculos, los cuales también se podrían detectar mediante técnicas de aprendizaje profundo.

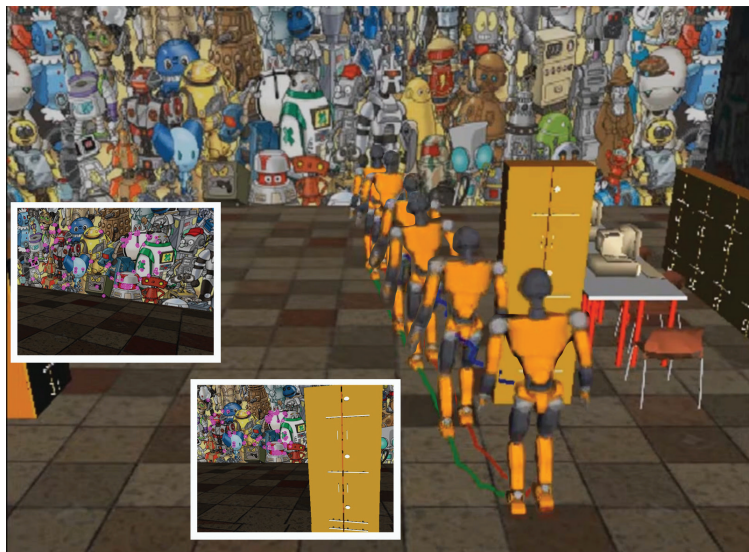


Figura 9. Resultados de simulación de la caminata generada por un enfoque de control visual acoplado. Se muestra la imagen inicial y la imagen meta, así como una secuencia de poses del robot a lo largo de su camino hacia la ubicación meta. **Fuente:** Elaboración propia basada en los resultados de Aldana et al. (2020).

Referencias

- Aldana-Murillo, N. G., Sandoval, L., Hayet, J. B., Esteves, C. y Becerra, H. M. (2020) "Coupling humanoid walking pattern generation and visual constraint feedback for pose- regulation and visual path-following". *Robotics and Autonomous Systems*, 128.
- Allibert, G., Courtial, E. y Chaumette, F. (2010) "Visual Servoing via Nonlinear Predictive Control". En: *Visual Servoing via Advanced Numerical Methods, Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 401, 375-393.
- Chaumette, F. y Hutchinson, S. (2006) "Visual servo control I. Basic approaches". *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 13(4), 82-90.
- Delfin, J., Becerra, H. M. y Arechavaleta, G. (2016) "Visual servo walking control for humanoids with finite-time convergence and smooth robot velocities". *Int. Journal of Control*, 89(7), 1342-1358.
- Dune, C., Herdt, A., Stasse, O., Wieber, P. B., Yoshida, E. y Yokoi, K. (2010) "Cancelling the sway motion of dynamic walking in visual servoing". En: *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3175-3180.
- García, M., Stasse, O., Hayet, J. B., Dune, C., Esteves, C., y Laumond, J. P. (2015) "Vision-guided motion primitives for humanoid reactive walking: Decoupled versus coupled approaches". *The Int. Journal of Robotics Research*, 34(4-5), 402-419.
- Herd, A., Holger, D., Wieber, P. B., Dimitrov, D., Mombaur, K. y Moritz D. (2010) "Online walking motion generation with automatic foot step placement". *Advanced Robotics*, 24(5-6), 719-737.
- Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K. y Yokoi, K. (2003) "Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point". En: *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1620-1626.
- Kanoun, O., Lamiraux, F. y Wieber, P. B. (2011) "Kinematic control of redundant manipulators: Generalizing the task-priority framework to inequality task". *IEEE Transactions on Robotics*, 27(4), 785-792.
- Lobos-Tsunekawa, K., Leiva, F. y Ruiz-del-Solar, J. (2018) "Visual navigation for biped humanoid robots using deep reinforcement learning". *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(4), 3247-3254.
- Murray, R. M., Sastry, S. S. y Zexiang, L. (1994) "A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation" CRC Press, Inc.

Ensayo de Investigación

Estudio de la influencia de sombras en el Sistema Fotovoltaico de la Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec

Study the influence of shadows in the Photovoltaic System of the Universidad del Istmo, Tehuantepec Campus

Michel Vázquez Vázquez¹, Liliana Hechavarría Difur^{1*}
Rafael Márquez Tirso¹, Hugo Jorge Cortina Marrero¹

¹Universidad del Istmo Campus Tehuantepec

Autor de correspondencia:
*lihed@live.com

Recibido:29-05-2024 Aceptado: 10-09-2025 (Artículo Arbitrado)

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio sobre la influencia del sombreado parcial, causado por la presencia de árboles, en la producción de energía del sistema fotovoltaico ubicado en la Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec. La altura de los árboles se determinó mediante topografía y, utilizando un modelo a escala del sistema fotovoltaico y su entorno, se realizaron simulaciones de la trayectoria del Sol en un diagrama solar 3D para identificar los momentos del día en que el sistema recibió sombra de los árboles circundantes. Finalmente, se analizó la producción de energía del sistema fotovoltaico durante el año 2023. Se concluyó que los árboles alrededor del sistema proyectan sombras que afectan la producción energética. Los arreglos fotovoltaicos situados en ambos lados (oriente y poniente) del sistema fueron los que reportaron mayores pérdidas de energía. El porcentaje de pérdidas observadas en la mayoría de los arreglos afectados por sombreado no supera el 3 %, lo cual coincide con lo planteado en la literatura, donde se afirma que las pérdidas por sombreado parcial no exceden el 4 % cuando el sombreado ocurre durante las horas del amanecer y atardecer.

Palabras clave: Diagrama solar, producción de energía, sombras parciales, topografía.

Abstract

This paper presents a study on the influence of partial shading caused by the presence of trees on the energy production of the photovoltaic system located at the Universidad del Istmo, Tehuantepec Campus. The height of the trees was determined through surveying, and using a scale model of the photovoltaic system and its surroundings, simulations of the Sun's path were performed in a 3D solar diagram to identify the times of day when the system was shaded by the surrounding trees. Finally, the energy production of the photovoltaic system was analyzed throughout the year 2023. The conclusion reached was that the trees around the system cast shadows that affect energy production. The photovoltaic arrays located on both sides (east and west) of the system reported the greatest energy losses. The percentage of losses observed in most of the arrays affected by shading did not exceed 3 %, which aligns with the literature stating that losses due to partial shading do not exceed 4 % when shading occurs during sunrise and sunset hours.

Keywords: Solar diagram, energy production, partial shading, surveying.

Introducción

La demanda de energía en un mundo en continuo desarrollo tecnológico e industrial, y la contaminación ambiental que se produce por el uso de combustibles convencionales (petróleo, carbón y gas natural) para la producción de energía, son las dos razones fundamentales por las cuales las fuentes renovables de energía han tenido un necesario retorno en

la era actual. Sin embargo, ahora el aprovechamiento de las fuentes renovables (ejemplo: solar, eólica, hidráulica, etc.) se hace de forma más eficiente, empleando nuevas tecnologías.

Mediante la tecnología fotovoltaica es posible producir directamente electricidad a partir de la radiación solar. Esta tecnología ha tenido un desarrollo

importante en los últimos años por ofrecer innumerables ventajas sobre otras fuentes de energías tanto convencionales como renovables. La tendencia que se observa a nivel mundial es la del continuo crecimiento de la capacidad o potencia fotovoltaica instalada, de hecho, la energía solar fotovoltaica ha sido la que más ha adicionado capacidad neta de generación de energía desde el 2016, incrementándose de 303 GW a 1185 GW, a finales de 2022 (GSR, 2023). Durante las dos últimas décadas, la generación de energía solar fotovoltaica ha aumentado gradualmente para convertirse en una parte significativa de la matriz eléctrica mundial, cuyo porcentaje de incidencia varió de 0.01 % en el año 2000 a 4.5 % en el 2022 (GER, 2023).

Un sistema fotovoltaico puede definirse como el conjunto de elementos conexiados entre sí, capaces de suministrar energía eléctrica a partir de la transformación directa de la radiación solar. Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica se caracterizan por estar diseñados para producir la mayor cantidad de energía posible, por lo que las limitaciones en su dimensionado se deben fundamentalmente a cuestiones de área y costo del sistema. Están integrados fundamentalmente por un generador fotovoltaico, descrito como un panel o conjunto de paneles fotovoltaicos conectados en serie y/o paralelo para incrementar la potencia; un inversor o inversores, y un bloque de protecciones eléctricas. Las limitaciones en su desempeño dependen de varios factores, la mayoría están directamente relacionados con el generador fotovoltaico; entre ellos pueden mencionarse la irradiancia o potencia de la radiación incidente, la temperatura, la suciedad y las sombras en la superficie del generador. Los bajos niveles de irradiancia o radiación incidente afectan principalmente la generación de corriente, las altas temperaturas alcanzadas en los paneles solares fotovoltaicos afectan fundamentalmente la generación de voltaje, la suciedad y las sombras afectan la capacidad de absorber radiación, por tanto, la generación de energía final en el sistema (Wenham, Green, Watt, Corkish, 2007).

Las pérdidas de energía en un sistema fotovoltaico pueden ser debidas a varios factores. En general se pueden clasificar en pérdidas de captura y pérdidas del resto del sistema. Las pérdidas de captura son aquellas pérdidas debidas a la no captación de

energía por parte del generador fotovoltaico, y éstas se pueden clasificar en pérdidas de captura causadas por la temperatura de la celda, cuando ésta es superior a 25 °C, y las pérdidas de capturas misceláneas o no dependientes de la temperatura, entre las cuales pueden encontrarse aquellas causadas por cableado, diodos de *string*, baja irradiancia, sombreado parcial o total, suciedad, acumulación de nieve, no homogeneidad de la irradiancia, *mismatch*, entre otras. También aquellas causadas por no seguimiento del punto de máxima potencia, reducción de la potencia del arreglo causado por fallas en el inversor, errores en las mediciones de irradiancia, pérdidas espectrales y por reflexión en vidrios, etc. Las pérdidas del resto del sistema se determinan como las pérdidas del inversor en la conversión de corriente directa CD en corriente alterna CA (Häberlin, 2012).

La proyección de sombras en los sistemas fotovoltaicos es una situación no deseada que normalmente se evita dado que se tiene en cuenta al momento de realizar el diseño y dimensionado del sistema; sin embargo, puede darse con relativa frecuencia, sobre todo en aquellos sistemas fotovoltaicos diseñados y ubicados en zonas urbanas donde puede, de repente, construirse un edificio o crecer un árbol que inicialmente no estaba cuando se concibió el sistema. Los efectos del sombreado en el sistema varían en dependencia del tipo de sombreado, estos pueden ser de tipo parcial o de tipo total. Un panel solar con un sombreado total de una o varias celdas solares, además de no generar electricidad, no permitirá que la corriente del resto de las celdas fluya a través de este, por lo que se comportará como un circuito abierto y el panel entero dejará de funcionar; además, la celda sombreada actuará como una resistencia en paralelo, que consumirá la energía y puede llegar a quemarse o a producir lo que se conoce como puntos calientes o *Hot Spot* (Smets, Jäger, Isabella, Van Swaaij, Zeman, 2015). En el caso de un panel solar con un sombreado parcial, la energía total extraída por el sistema sería aquella proporcionada por la celda o conjunto de celdas sombreadas, de modo que, si el sombreado es del 50 %, la potencia producida sería un 50 % menos de la que podría obtenerse en el sistema (McEvoy, Markvart y Catañer, 2012). Es, por tanto, muy importante analizar la influencia de las sombras en los sistemas fotovoltaicos. En este trabajo se pre-

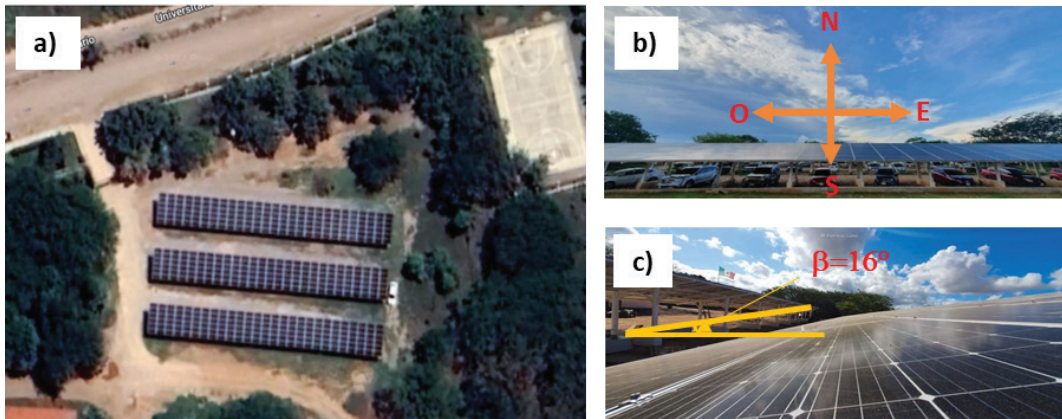


Figura 1. Sistema fotovoltaico de 163.2 kWp, instalado en la Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec. a) Imagen de Google Maps. Latitud: 16.289° y Longitud: -95.240°. b) y c) Imagen fotográfica del sistema fotovoltaico indicando orientación ($\alpha=0$), e inclinación ($\beta=16^\circ$).

Fuente: Elaboración propia.

senta un estudio de la influencia del sombreado parcial, debido a la presencia de árboles, en la producción de energía de un sistema fotovoltaico de 163.2 kWp ubicado en la Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca.

Metodología

Ubicación y características del sistema fotovoltaico de estudio

El sistema fotovoltaico de estudio se encuentra ubicado en la Universidad del Istmo, en la Latitud: 16.289° y Longitud: -95.240°. Se encuentra orientado completamente al sur, por lo que su azimut es igual a cero ($\alpha=0$) y con ángulo de inclinación igual a la latitud ($\beta=16^\circ$), tal como se muestra en la Figura 1.

La potencia instalada es de 163.2 kWp, distribuida en 10 arreglos de 16.32 kWp cada uno. Cada arreglo está conectado a un inversor de 15 kW de la marca Fronius Symo. Se emplearon módulos solares fotovoltaicos de la marca ECO GREEN ENERGY: EGE-340 M-72. Cada arreglo consta de 48 paneles con 4 cadenas en paralelo de 12 paneles en serie cada una. El voltaje y la corriente en el punto de máxima potencia que puede obtenerse por arreglo es de $V_{mp}=457.8\text{ V}$ y $I_{mp}=35.64\text{ A}$.

En los alrededores del sistema fotovoltaico hay árboles, algunos de ellos tienen suficiente altura y frondosidad para obstaculizar la radiación solar que llega al sistema, sobre todo en las tardes por el lado oeste. La Figura 2 muestra fotografías tomadas del sistema fotovoltaico, donde se pueden observar los árboles que se encuentran a su alrededor y la sombra que los mismos proyectan.

Determinación de sombras en el sistema fotovoltaico

La proyección de sombras sobre objetos puede determinarse empleando los conocidos diagramas solares, los cuales son gráficos que sitúan la posición del Sol en el cielo mediante dos coordenadas angulares: la altura solar y azimut solar. La altura solar (α_s), puede definirse como el ángulo formado entre la horizontal y la línea de proyección Sol-Tierra. El azimut solar (γ_s), puede definirse como el desplazamiento angular, desde el eje sur 0° , de la proyección de un haz de radiación solar en el plano horizontal. Mide la posición angular este-oeste del Sol desde el sur. Vale 0° si coincide con la orientación sur, es positivo hacia el oeste y negativo hacia el este. Si coincide con el este su valor es -90° y si coincide con el oeste su valor es $+90^\circ$ (Duffie y Beckman, 1982). Los objetos que



Figura 2. Imágenes de la proyección de sombras sobre el Sistema FV-UNISTMO.

Fuente: Elaboración propia.

obstruyen el paso de la radiación solar a un punto de referencia en cuestión también se ubican en los diagramas solares. Los perfiles de sombreado se observan cuando el objeto se encuentra en el mismo punto de coordenadas que el Sol.

Determinación de la altura de los árboles

Para determinar las sombras proyectadas por los árboles se requiere conocer la altura de los mismos, y la distancia de éstos a un punto de referencia en el sistema. Estos parámetros fueron determinados empleando un equipo de topografía. Se determinó la altura de nueve árboles, tres de ellos situados en el lado este (oriente) y seis en el lado oeste (poniente) del sistema fotovoltaico. En la figura 3 (a) se muestra una fotografía aérea del sistema fotovoltaico donde se puede apreciar la existencia de árboles en sus alrededores. La Figura 3 (b) es una imagen del equipo de medición de topografía empleado, un teodolito electrónico Geosurv ET-05L de plomada óptica y un segundo de precisión angular.

Con ayuda del *Google Maps* se determinaron las coordenadas geográficas de 2 puntos de observación, tomando como referencia las esquinas sur de la

Cubierta solar 1 (Cs-1), a partir de los cuáles se definieron los vértices V1 y V2. Ver Figura 4 (a y b).

Las coordenadas obtenidas de *Google Maps* están dadas en grados decimales, se requiere convertirlas a coordenadas UTM (cartesianas) para hacer los cálculos de distancias, ángulos, rumbos, etc., para ello se utilizó una calculadora de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Con el empleo de una plomada de punta de 12 onzas, se procedió a fijar la proyección de las 2 esquinas de la Cs-1 seleccionados al nivel del terreno, observando que desde esos puntos se podía cubrir la zona de árboles que pueden generar sombra (Figura 4 (b)).

Para tener certeza de la validez de esas coordenadas, con una cinta de acero graduada marca Lufkin de 30 m se midió de manera directa la distancia horizontal entre los vértices V1 y V2, luego aplicando la fórmula de distancia entre dos puntos, (ver la fórmula (1)), se obtuvo la medida de forma indirecta, al comparar ambas se pudo constatar una diferencia de 15 cm, por lo que las coordenadas UTM de V1 y V2 fueron aceptadas como válidas.

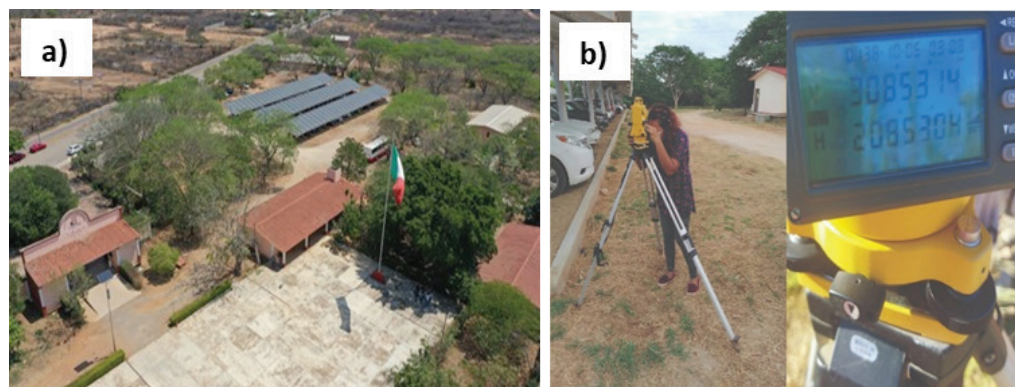


Figura 3. (a). Foto área del Sistema fotovoltaico UNISTMO. b) Imágenes de las mediciones topográficas.
Fuente: Elaboración propia.

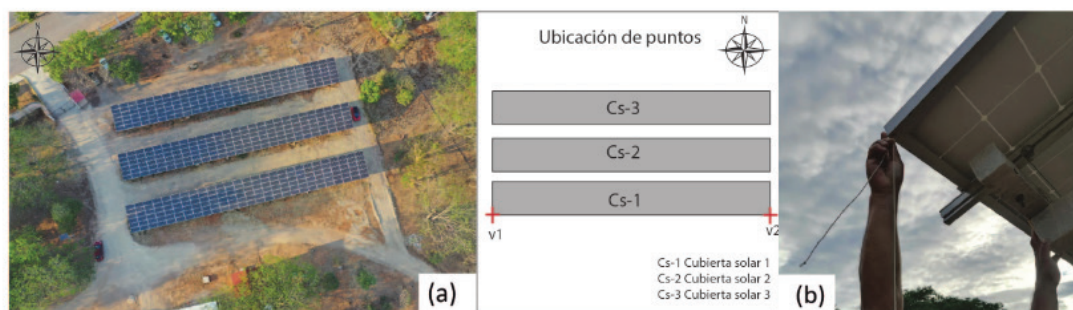


Figura 4. Ubicación de vértices: a) Cubiertas solares en fotografía y dibujo. b) Bajada de puntos a nivel de suelo de Cs-1.
Fuente: Elaboración propia.

Para ubicar con precisión cada árbol y determinar su altura, se empleó la técnica de levantamiento topográfico denominada estadía (Montes de Oca, 1989).

En la Figura 5 se muestra un dibujo que hace una representación gráfica del proceso de medición, para la determinación de las variables topográficas. El ángulo horizontal se mide a partir de centrar y nivelar el teodolito en un vértice, visar el vértice libre, poner el instrumento en $0^{\circ} 00' 00''$, y luego visar el árbol, posteriormente con la distancia h , que mide la altura del aparato desde el nivel del suelo a su eje de alturas, se localiza la misma medida h en el estadal con el hilo medio (HM), luego se toman las lecturas del hilo superior (HS) y del hilo inferior (HI), se toma el ángulo vertical α (medido con respecto a la horizontal, positivo si está por encima, negativo si está por debajo), y finalmente el ángulo vertical θ , que ubica la copa del árbol a partir de la horizontal.

Las distancias horizontales, y desniveles se determinaron mediante las ecuaciones (2) y (3) respectivamente (dándole a V1 una cota arbitraria, y a partir de ella se calculan las cotas del resto de los puntos).

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1)$$

$$DH = CA \cos^2 \alpha \quad (2)$$

$$H = \frac{1}{2} CA \sin(2\alpha) \quad (3)$$

Donde:

DH = Distancia Horizontal.

C = Constante grande del teodolito, equivalente a 100.

A = resultado de la diferencia $HS-HI$.

α = ángulo vertical de la horizontal al HI .

H = es la cota (altura nivel de terreno).

Para calcular la altura del árbol, se emplea la nivelación trigonométrica, se toma como base la cota del terreno al pie del árbol, la altura h del instrumento, y la resultante de la nivelación trigonométrica (cota del terreno), la fórmula es deducida a partir ecuación (4).

$$H2 = h + DH \tan(\theta) \quad (4)$$

Donde:

$H2$ = Constante grande del teodolito, equivalente a 100.

h = es la altura del instrumento al momento de centrarlo y nivelarlo.

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los cálculos de las alturas de los árboles, y de la distancia de los mismos al vértice correspondiente. La nomenclatura de los árboles se puede observar en la Figura 6.

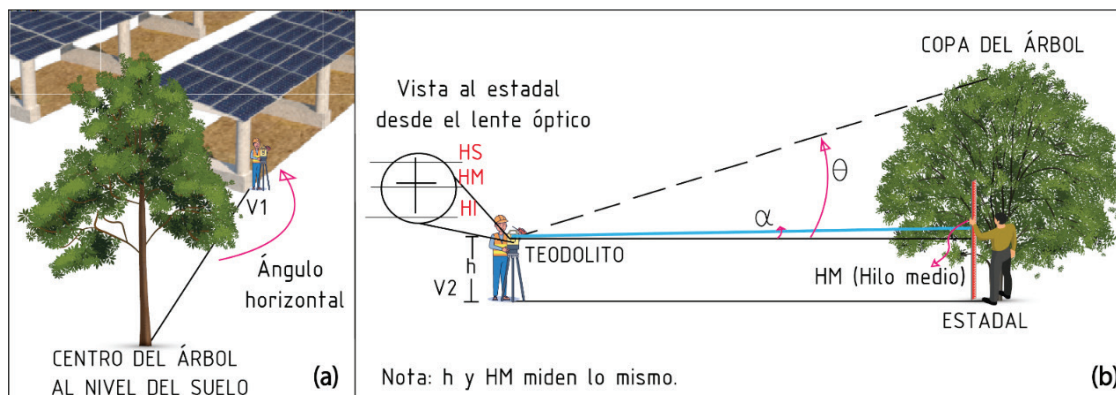


Figura 5. Representación gráfica de las mediciones de las variables topográficas. (a) Vista de medición del ángulo horizontal. (b) Vista de medición de los ángulos verticales α y θ .

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Valores de las alturas de los árboles y las distancias al vértice correspondiente obtenidas con el levantamiento estadimétrico.

Vértice	Árbol	Altura H_2 (m)	Distancia horizontal DH (m)
V1	A	10.129	17.7
	B	13.764	16.3
	C	7.77	17.892
	D	11.5	20.99
	E	12.668	22.59
	F	13.5	29.49
V2	G	14.55	16.99
	H	7.24	12.99
	I	8.816	27.2

Fuente: Elaboración propia.

Simulación de la trayectoria del Sol con diagrama solar en 3D

Se elaboró un modelo 3D del sistema fotovoltaico y su entorno empleando las dimensiones reales de todo el sistema y se ubicaron los árboles con las alturas y distancias al sistema determinadas mediante el estudio topográfico, tal como se muestra en la Figura 6.

Se realizó una simulación de la trayectoria del Sol empleando software libre (PD: 3D Sun- Path) el cual se encuentra en internet (Marsh, n.d.). Se cargó, en este simulador, el modelo del sistema fotovoltaico y sus alrededores diseñado anteriormente, en la ubicación Latitud: 16.289° y Longitud: -95.240°. La ubicación de los árboles en un diagrama solar, permite determinar cuándo éstos constituyen obstáculos en la trayectoria del Sol. Las simulaciones se realizaron para cada día 22 de cada mes y las imágenes que se presentan son capturas de pantallas realizadas en horas específicas del día, las 9 de la mañana y las 4 de la tarde.

Resultados

Tal como se muestra en las Figuras 2 y 3 (a), el sistema fotovoltaico de la UNISTMO se encuentra ubicado en una zona rodeada de árboles, algunos de ellos con suficiente altura y frondosidad para proyec-

tar sombra. En términos generales, se observa que los árboles proyectan sombras parciales en ambos lados del sistema: en el oriente (este) a primera hora de la mañana, y en el poniente (oeste) en la tarde, en el horario alrededor de las 16:00 horas. Los arreglos fotovoltaicos que pueden ser afectados son, fundamentalmente, el arreglo 10 por el oeste, y los arreglos 1, 4 y 7 por el este.

Dado que el movimiento aparente del Sol cambia a lo largo del año, es de esperar una variación en las horas en que se proyectan las sombras y en el área sombreada. Las simulaciones realizadas de la trayectoria del Sol mostraron que, en el lado este (oriente), después del equinoccio de primavera, durante los meses de abril a agosto, no se proyectan sombras (ver Figuras 7 y 8).

Las sombras comienzan a proyectarse ligeramente a partir del mes de septiembre. Después del equinoccio de otoño, en el periodo de octubre a marzo, la sombra se proyecta desde que amanece, se va desplazando hacia el este y desaparece alrededor de las 10:00 de la mañana (ver Figuras 9 y 10).

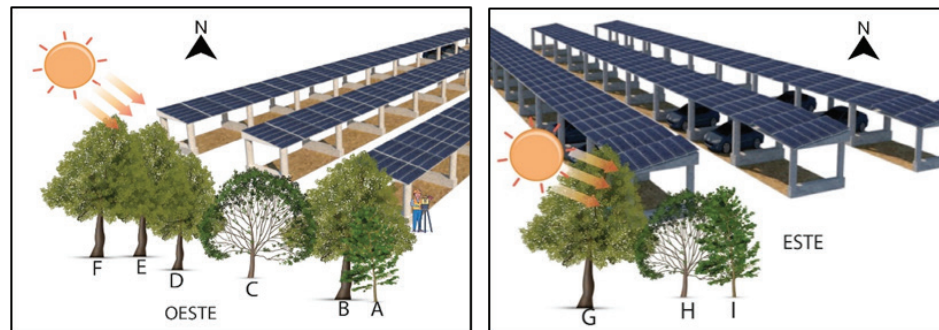


Figura 6. Ubicación de los árboles en el lado oeste y lado este del Sistema Fotovoltaico

Fuente: Elaboración propia.

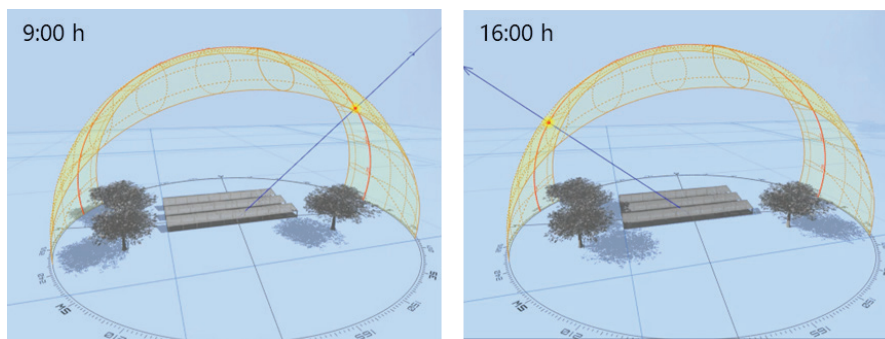


Figura 7. Simulación de la proyección de sombras parciales en ambos lados del sistema fotovoltaico, en el día 22 de abril a las 9:00 y a las 16:00 horas.

Fuente: Elaboración propia a partir del simulador PD: 3D Sun- Path. <https://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html>.

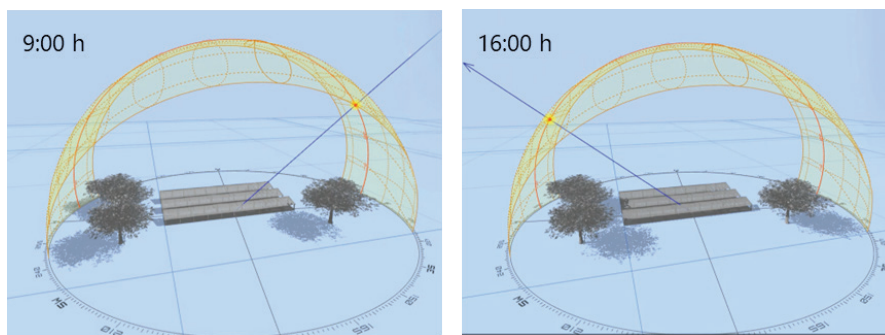


Figura 8. Simulación de la proyección de sombras parciales en ambos lados del sistema fotovoltaico, en el día 22 de agosto a las 9:00 y a las 16:00 horas.

Fuente: Elaboración propia a partir del simulador PD: 3D Sun- Path. <https://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html>.

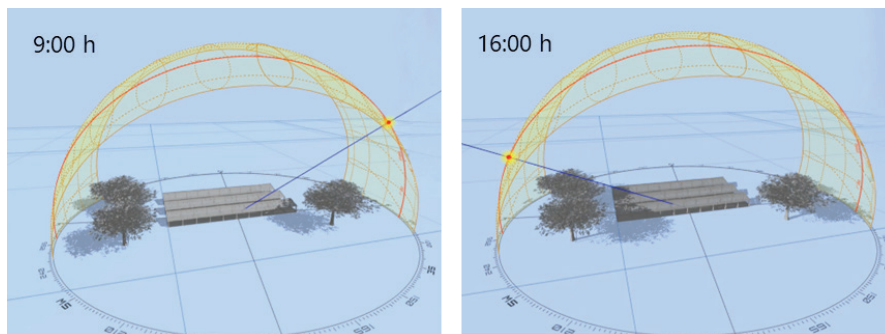


Figura 9. Simulación de la proyección de sombras parciales en ambos lados del sistema fotovoltaico, en el día 22 de octubre a las 9:00 y a las 16:00 horas

Fuente: Elaboración propia a partir del simulador PD: 3D Sun- Path. <https://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html>.

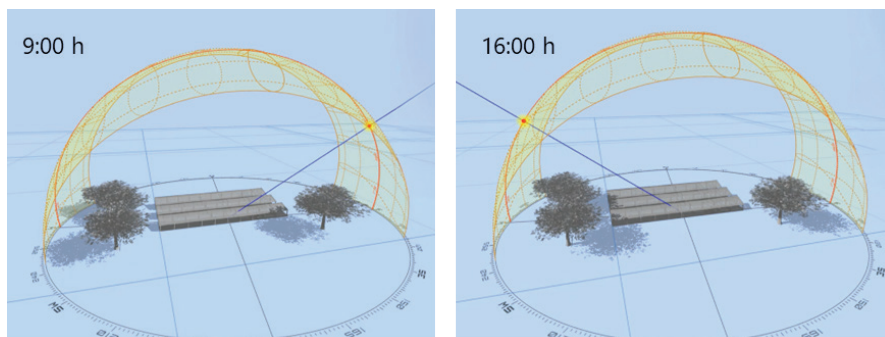


Figura 10. Simulación de la proyección de sombras parciales en ambos lados del sistema fotovoltaico, en el día 22 de marzo a las 9:00 y a las 16:00 horas.

Fuente: Elaboración propia a partir del simulador PD: 3D Sun- Path. <https://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html>.

En los meses de diciembre y enero, el intervalo de tiempo de sombreado se amplía una hora más, hasta aproximadamente las 11:00 h.

Por su parte, en el lado oeste (poniente) del sistema fotovoltaico, los árboles situados proyectan sombras durante todo el año. En los meses de abril a agosto, las sombras comienzan a proyectarse a partir de las 16:00 h, aproximadamente (ver Figuras 7 y 8). En los meses de octubre a marzo, el intervalo de tiempo de sombreado se amplía, comenzando alrededor de las 15:00 en los meses de diciembre y enero (ver Figura 11). Los meses en los cuales la proyección de sombras es mayor, son noviembre, diciembre y enero, en los cuales el Sol hace su recorrido de este a oeste por el sur, a menores alturas.

Las afectaciones por sombreado parcial de los arreglos ocurren en un horario donde la radiación por lo general no es muy alta, excepto en los meses de diciembre y enero, en los que la sombra en las mañanas desaparece totalmente alrededor de las 11:00 h. Aunque los valores de irradiancia en los horarios de sombreado parcial no son significativos, se generaron pérdidas energéticas, también no muy significativas,

que se reflejan en los valores de energía producida por cada uno de los arreglos.

En las mañanas, por el lado este del sistema fotovoltaico, son afectados los arreglos A-1, A-4 y A-7. En las tardes, por el lado oeste, el arreglo más afectado es el arreglo A-10, el cual está distribuido en las 3 hileras de arreglos que componen el sistema fotovoltaico; de las 4 cadenas que forman al arreglo A-10, se tiene una cadena completa (12 paneles) y media cadena (6 paneles) en las hileras sur y centro, y solo una cadena completa (12 paneles) en la hilera norte. También se afectan los arreglos A-3, A-6 y A-9 (ver Figura 12).

En la Tabla 2 se muestra los valores de energía producida por los arreglos fotovoltaicos de manera individual durante el año 2023. Estos datos fueron obtenidos de Fronius Solar Web, en la cual se monitorean online las variables eléctricas que dan cuenta del desempeño del sistema fotovoltaico de estudio. La tabla también contiene las pérdidas de energía obtenidas y el porcentaje que representan, considerando el arreglo A-5 como arreglo de referencia, el cual produjo la mayor cantidad de energía en el año de estudio.

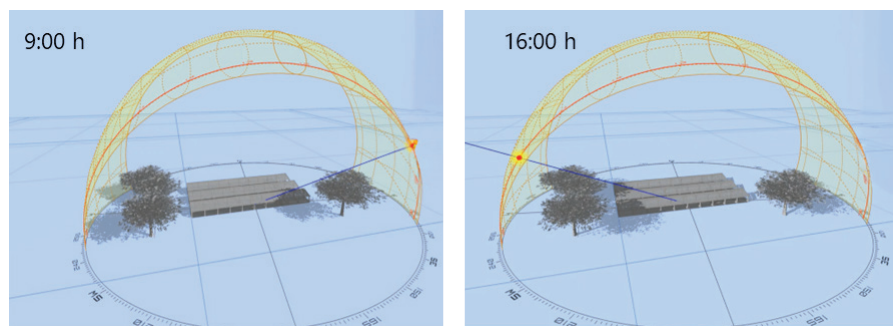


Figura 11. Simulación de la proyección de sombras parciales en ambos lados del sistema fotovoltaico, en el día 22 de enero a las 9:00 y a las 16:00 horas.

Fuente: Elaboración propia a partir del simulador PD: 3D Sun- Path. <https://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html>



Figura 12. Ubicación de los arreglos en el sistema fotovoltaico UNISTMO.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Datos de producción de energía de los arreglos año 2023.

Arreglo FV	Producción de Energía (MWh)	Pérdida de Energía (MWh) Referencia A-5	Pérdida de Energía (%) Referencia A-5
Referencia A-5	28.25	0.54	1.87
A-2	28.77	0.02	0.07
A-3	26.18	2.61	9
A-4	28.30	0.49	1.7
A-5	28.79	0	0
A-6	28.11	0.68	2.36
A-7	28.26	0.53	1.84
A-8	28.73	0.06	0.2
A-9	28.53	0.26	0.9
A-10	27.97	0.82	2.84

Fuente: Fronius Solar Web. Pérdidas de energía de los arreglos tomando como referencia al arreglo A-5.

Como ya se mencionó, las pérdidas de energía en los sistemas fotovoltaicos pueden deberse a varias razones, y las condiciones climatológicas y ambientales juegan un papel importante. Los arreglos fotovoltaicos de estudio se encuentran en las mismas condiciones climatológicas y ambientales (temperatura ambiente, irradiancia, velocidad del viento, exposición al polvo, lavado por lluvia, etc.), por lo que las pérdidas debidas al incremento de la temperatura del panel, a la variación de la irradiancia y la suciedad deberían ser relativamente igual en todos los arreglos. Por otro lado, no se han reportado fallas en los inversores y se ha observado que funcionan con una eficiencia de alrededor del 96.5 %, por lo que las pérdidas debidas a la conversión de energía de corriente directa CD en corriente alterna CA, son relativamente igual para todos los arreglos, oscilando alrededor de 3.5 %. Por último, no ha ocurrido la activación de los diodos de *string* o de derivación debido a sombras totales. Estas consideraciones permiten concluir que la variación en la producción de energía de los diferentes arreglos, y

pérdidas energéticas observadas pudieran deberse, por un lado, al cableado y a la diferencia en la potencia entre las celdas solares (pérdidas reportadas como no significativas, y menores del 1(%) de las pérdidas totales (McEvoy et al., 2012); y, por otro lado, al no seguimiento del punto de máxima potencia y al sombreado parcial.

En el esquema de la Figura 13, podemos observar la distribución de los arreglos en el sistema fotovoltaico de estudio, y su respectivo porcentaje de las pérdidas de energía determinadas tomando como referencia el arreglo A-5. Se puede observar que justo los arreglos ubicados en ambos lados (oriente y poniente) del sistema fotovoltaico, donde se dan los sombreados parciales, son los que tienen relativamente mayor porcentaje de pérdidas. Por otro lado, los arreglos ubicados en el centro del sistema, los cuales son los que no reciben sombreado en ningún momento, son los que arrojan los menores porcentajes de pérdidas energéticas, todo con referencia al arreglo A-5.

Los porcentajes de las pérdidas relativas de energía en los arreglos del lado este del sistema fotovoltaico (arreglos A-1, A-4 y A-7), son menores que los observados en los arreglos del lado oeste (arreglos A-10, A-3, A-6 y A-9), lo cual es consistente con lo obtenido de los diagramas solares, en donde se observó que durante 5 meses (de abril a agosto) no se proyectan sombras en las mañanas, es decir del lado este del sistema. En cambio, las sombras se observan en las tardes, del lado oeste, durante todo el año.

Las mayores pérdidas totales se observan para el arreglo A-3. Dado que este arreglo no recibe mayor sombreado que los arreglos A-10 y A-6, se considera de manera preliminar que el arreglo A-3 presenta fa-

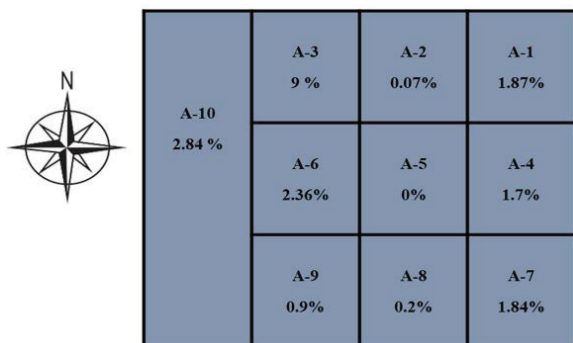


Figura 13. Distribución de arreglos en el sistema FV de la UNISTMO y porcentaje de pérdidas en la producción de energía asignado a cada arreglo. Referencia el arreglo A-5.

Fuente: Elaboración propia.

llas en el funcionamiento, probablemente debido al no seguimiento del punto de máxima potencia. Luego del A-3, las mayores pérdidas se observan en los arreglos A-10 (con un porcentaje de pérdida de 2.84 %) y A-6 (con un porcentaje de 2.36 %). Se considera que el sombreado contribuye significativamente (aunque no exclusivamente) a estas pérdidas.

Es conveniente señalar que, en el presente trabajo, se determinó que existe sombreado parcial por los árboles, y que hay pérdidas debido al sombreado. Aunque se cuantificaron las pérdidas, no se determinó qué porcentaje corresponde exclusivamente a efectos de sombreado; sin embargo, de la literatura se conoce que las pérdidas por sombreado no son mayores del 4 %, cuando el sombreado parcial ocurre en las horas correspondientes al amanecer y atardecer (McEvoy et al., 2012). Esto está en correspondencia con lo observado en el presente estudio.

Conclusiones

El análisis de las simulaciones de la trayectoria del Sol, obtenidos mediante diagramas solares en 3D, permitió determinar que los árboles ubicados en los lados este y oeste del sistema fotovoltaico de la Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, proyectan sombras que afectan la producción de energía del mismo. Se observó que, justo los arreglos ubicados en ambos lados (este y oeste) del sistema fotovoltaico son los que mayor pérdida de energía reportaron, tomando como referencia al arreglo A-5, lo cual está en correspondencia con el hecho de que son los arreglos fotovoltaicos que reciben las sombras de los árboles. Los arreglos fotovoltaicos que mostraron las mayores pérdidas de energía son los arreglos A-10, A-3, A-6, los cuales se ubican en el lado oeste y reciben sombras durante todo el año. A excepción del arreglo A-3, el porcentaje de pérdidas observadas en los diferentes arreglos no son mayores del 3 %, lo cual está en correspondencia con lo planteado en la literatura, donde se afirma que las pérdidas por sombreado parcial no son mayores del 4 % cuando el sombreado ocurre en las horas correspondientes al amanecer y atardecer. El arreglo A-3 reportó el mayor porcentaje de pérdida de energía total con referencia al arreglo A-5; sin embargo, no recibe mayor sombreado que el arreglo A-10 y el A-6, por lo que se concluye de manera preliminar que el arreglo 3 presenta fallas en el funcionamiento, probablemente debido a no seguimiento del punto de máxima

potencia. Aunque los valores en el porcentaje de pérdidas energéticas no son muy altos, es recomendable la poda de los árboles. Estudios como el presente son importantes ya que permiten, por un lado, detectar fallas en arreglos (no atribuibles a factores externos) y, por otro, conocer la afectación que la presencia de obstáculos (edificaciones, árboles, etc.) provocan en la producción de energía en sistemas fotovoltaicos y, en consecuencia, elaborar fundamentadas propuestas para minimizar dicha afectación.

Agradecimientos

Hacemos reconocimiento y agradecemos al Dr. Andrew Marsh, autor de la herramienta de software utilizada para realizar las simulaciones de la trayectoria del Sol, el software PD: 3D Sun-Path.

Se le agradece a la M. D. Patricia Luna González, por las fotografías b y c en la Figura 1.

Referencias

- Ahmad M. K., Indradip, M., Werner, W., Volker, S. (2016). Performance ratio – Crucial parameter for grid connected PV plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 65 (2016) 1139–1158.
- Charfi, W., Chaabane, M., Mhiri, H., Bournot, P. (2018). Performance evaluation of a solar photovoltaic system. *Energy Reports*. 4 (2018) 400–406.
- Duffie, J.A., and Beckman, W.A (1982). *Solar engineering of thermal processes*. Cuarta Edición. Wiley.
- Global Electricity Review, (2023). EMBER. <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/>.
- Global Status Report, REN 21, (2023). <https://www.ren21.net/gsr-2023/>.
- Häberlin, H. (2012). *Photovoltaics system design and practice*. 2012, John Wiley & Sons, Ltd.
- Khatib, T., Sopian, K., Kazem, H.A. (2013). Actual performance and characteristic of a grid connected photovoltaic power system in the tropics: A short term evaluation. *Energy Conversion and Management*. 71 (2013) 115–119.
- Marsh, A. (n.d.). Sunpath 3D. <https://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html>.
- McEvoy, A., Markvart, T. y Catañer, L. (2012) *Practical Handbook of Photovoltaics*. Fundamentals and applications. Second edition. Elsevier.
- Montes de Oca, M. (1989). “*Topografía*”, Cuarta Edición Revisada. México. Alfaomega.
- Smets, A., Jäger, K., Isabella, O., Van Swaaij, R., Zeman, M. (2015) *Solar Energy, the physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems*. UIT CAMBRIDGE, ENGLAND
- Wenham, S.R., Green, M.A., Watt, M.E., and Corkish, R (2007). *Applied Photovoltaics*. Second Edition. Science Publisher.

Ensayo de Investigación

Cozumel, sustentabilidad postergada del turismo: Cronología de la fragmentación económico-territorial

Cozumel, Postponed Sustainability of Tourism: Chronology of Economic-Territorial Fragmentation

Carlos Alonso Estrella Carrillo^{1*}, David Iglesias Piña¹

¹ Universidad Autónoma del Estado de México

Autor de correspondencia:

*caes13@gmail.com

Recibido: 04-06-2024 Aceptado: 12-09-2025 (Artículo Arbitrado)

Resumen

La cronología de fragmentación económico-territorial en Cozumel, refiere a la evolución del turismo de buceo en los años cincuenta hasta los retos de sustentabilidad en el 2020. Para ello, se apoyó de fuentes históricas, cuya metodología consideró el rastreo de eventos, políticas y cambios en la industria turística, basado en el análisis de datos históricos y medios documentales, que permitió identificar etapas clave, como el surgimiento del turismo de buceo, el auge de la industria hotelera, la incorporación de Cozumel en la ruta de cruceros, y las implicaciones económicas y territoriales. Los hallazgos revelan una intrincada interacción entre el crecimiento poblacional, las políticas turísticas, las transformaciones en la industria hotelera y la afluencia de cruceros, evidenciando la postergación de la sustentabilidad en medio de avances económicos y desafíos geográficos. Se concluye que es imperativo abordar de manera integral la compleja relación entre el entorno, la sociedad y la economía para asegurar un futuro sustentable en Cozumel.

Palabras clave: Cozumel, Sustentabilidad, Turismo, Territorio.

Abstract

The chronology of economic-territorial fragmentation in Cozumel traces the evolution of diving tourism in the 1950s through to the sustainability challenges of the 2020s. This study draws on historical sources, employing a methodology based on the tracking of events, policies, and shifts in the tourism industry through the analysis of historical data and documentary records. This approach allowed the identification of key stages, such as the emergence of diving tourism, the boom of the hotel industry, Cozumel's incorporation into cruise routes, and their economic and territorial implications. The findings reveal a complex interplay between population growth, tourism policies, transformations in the hotel industry, and the influx of cruise ships, highlighting the postponement of sustainability amidst economic growth and geographic challenges. The study concludes that it is imperative to address, in an integrated manner, the intricate relationship between environment, society, and economy to ensure a sustainable future for Cozumel.

Keywords: Cozumel, Sustainability, Tourism, Territory.

Introducción

El sector turístico se destaca como uno de los más dinámicos y versátiles de la economía, ya que genera un impacto significativo en el comercio internacional y contribuye al crecimiento económico de los países en desarrollo. Como señala la Organización Mundial del Turismo (OMT, 2008), ha destacado como uno de los sectores económicos con mayor crecimiento a nivel mundial, convirtiéndose en un motor clave para el progreso socioeconómico.

Aunque tradicionalmente se ha enfocado en sus beneficios económicos (Benavides, 2020), la relación entre turismo y desarrollo puede no ser debatida o discutida si se observa de forma lineal porque adquiere una perspectiva más compleja al considerarse como una industria con impactos directos e indirectos en el ambiente. Este enfoque requiere analizar todos los elementos, procesos e interacciones, abarcando aspectos sociales, económicos y políticos, para comprender el turismo como un sistema complejo (García, 2006).

De esta manera, la sustentabilidad surge como una solución a la necesidad de redirigir el modelo civilizatorio, estableciendo límites y cuestionando el crecimiento económico y su base teórica (Leff, 2000). Más allá de ser simplemente un paradigma en constante debate, debe considerarse como un objetivo alcanzable a lo largo del tiempo a través de diversas escalas territoriales (Iglesias, 2021). Estas cuestiones son relevantes para comprender la compleja transformación económica-territorial de Cozumel y enfatizar la importancia de abordar la fragilidad de la sustentabilidad en la Isla.

Este artículo se enfoca a Cozumel, una isla del Caribe Mexicano que ha favorecido el desarrollo turístico y experimentado una evolución histórica notable desde 1970 hasta 2020. Cuenta con una extensión de 488 kilómetros cuadrados y una población de 88,626 habitantes, misma que ha experimentado un aumento de la población económicamente activa (PEA) de 11.4 % a 67.9 % en el lapso de 2010-2020 (INEGI, 2021). La Isla ha sido reconocida como un importante reservorio de especies marinas en riesgo (CONANP, 1998), las cuales han permitido fortalecer su posición como destino turístico, impulsando modelos turísticos diversos (buceo, sol y playa, cruceros, segundas residencias). A pesar de este aparente progreso, se ocultan contradicciones y afectaciones territoriales que han quedado relegadas en el discurso de “aprovechamiento sustentable”.

En este recorrido, la isla ha presenciado cambios significativos en la disponibilidad de hoteles y habitaciones, así como en la infraestructura turística y la llegada de cruceros. Aunque esta industria floreció, la crónica revela contradicciones y omisiones que merecen atención. Como señala Santander (2009), la década de los setenta marcó un giro hacia el turismo masivo con la llegada de cadenas hoteleras. Sin embargo, el relato adolece de explorar las afectaciones territoriales y la fragilidad de la sustentabilidad, cuestiones fundamentales para comprender la compleja transformación económica-territorial de Cozumel, desde sus primeras incursiones como destino emergente en los años cincuenta y sesenta hasta convertirse en un importante polo turístico en la actualidad.

Metodología

La recopilación de información se llevó a cabo a partir de fuentes secundarias, como documentos

gubernamentales, informes turísticos, y estudios académicos, incluyendo libros y artículos especializados sobre el desarrollo turístico de Cozumel.

El enfoque metodológico se centró en la revisión y síntesis de datos cuantitativos, como la disponibilidad de hoteles y habitaciones a lo largo de las décadas, así como en la contextualización histórica de eventos clave relacionados con la industria turística y la infraestructura en la isla. La identificación de contradicciones se basó en un análisis crítico de la evolución temporal de estos aspectos, destacando las tensiones entre el crecimiento turístico y la preservación ambiental.

Cronología de la fragmentación económico-territorial

A lo largo de los años, diversos huracanes han impactado la isla: Janet, Beula y Gilberto, generando cambios significativos en las condiciones económicas y sociales que han transformado el sistema de producción de cada periodo (Vivas, 2008).

El presente análisis describe las etapas de la fragmentación económico-territorial en Cozumel a partir de la información proporcionada. Se identifican tres periodos principales: los orígenes, el turismo incipiente, crecimiento del turismo de sol y playa, y consolidación del turismo masivo. Para cada uno de ellos se detallan las características principales, así como los hechos y sucesos asociados al fenómeno de estudio.

Orígenes del turismo en Cozumel

El desarrollo del turismo en Cozumel tiene sus raíces en una serie de transformaciones territoriales y económicas a lo largo de la historia. Comenzando con el repoblamiento de la isla como refugio durante la guerra de castas en 1847 (Dumond, 2005), surgieron disputas por la ocupación del territorio. En 1902, Quintana Roo se convirtió en territorio federal y en 1904, la isla de Cozumel se incorporó a través de la Ley de Organización Territorial, lo que permitió la cesión del control económico a través de contratos para la explotación de recursos naturales (Keyes, 2016).

Lo anterior llevó a la industrialización y exportación de productos como la caoba, el palo de tinte y el chicle, marcando un hito económico en las décadas de 1920 y 1930, con la llegada de inversiones estadounidenses y el desarrollo de infraestructura (Ramos y Santander, 2011; Chías, 1981), generando un cambio

en la vida comercial que propició el surgimiento de familias y personalidades con influencia económica y política. Ante ello, la importación y exportación floreció debido a la relevancia de la aduana en la Isla.

Esto generó la necesidad de contar con hoteles que pudieran albergar a los comerciantes estadounidenses y a los funcionarios de gobierno. Como resultado, en 1928 se fundó el "Gran Hotel Louvre", el cual fue construido con fondos oficiales y administrado por un particular. Posteriormente se inauguró el "Hotel Yuri" (Vivas, 2008). Sin embargo, durante la década de los treinta surgieron diversas problemáticas relacionadas con la explotación, comercialización y transporte del chicle, así como conflictos entre los grupos mayas y las compañías chicleras. Estos factores contribuyeron a una disminución en las visitas a Cozumel, lo que llevó al cierre de ambos hoteles.

En las décadas de los veinte y treinta, el aeropuerto de Cozumel, utilizado como escala por Pan American Air Ways, desempeñó un papel crucial en el progreso aeronáutico en México, el Caribe y Latinoamérica, gracias a las conexiones políticas y económicas de la aerolínea con la aviación militar (Chías, 1981). Estos cambios económicos surgieron en respuesta a la Gran Depresión de los años treinta, marcando un nuevo ciclo en la configuración económica de Cozumel (Ramos y Santander, 2011). Tras la posguerra, la aparición de la aviación comercial y el comienzo de la conectividad aérea permitieron acceder a destinos insulares del Caribe, entre ellos Cozumel.

En la década de los cuarenta, los cambios en la dotación de tierras (DOF, 1993) sientan las bases para la industria turística en Cozumel. Sin embargo, esta asignación al poblado "Villa de Cozumel", se desvía hacia el turismo, evidenciando que la entidad cozumeleña tenía más potencial como centro turístico que agrícola (Ramos, 1999). El error en los cálculos de la superficie de la isla permitió excluir a los ejidatarios de la costa, favoreciendo el desarrollo turístico (Ramos, 1999), así como la expansión del capitalismo a través de la llamada acumulación originaria, fundamento del inicio del desarrollo turístico.

La reconfiguración territorial experimentó diversos cambios que incluyeron la repoblación a través de indígenas Mayas desplazados, generando transformación productiva y conflictos por la ocupación del territorio. Además, se dio la cesión del control econó-

mico mediante contratos de explotación de recursos naturales, la industrialización y exportación de productos, así como la llegada de la aviación comercial y el desarrollo de la infraestructura aeroportuaria. Estos cambios sentaron las bases para la industria turística en Cozumel, desviando la asignación de tierras hacia el turismo y excluyendo a los ejidatarios costeros en el proceso.

Etapas 1. Turismo con infraestructura incipiente: transición de actividades primarias a terciarias

Durante el gobierno presidencial de 1946-1952, centrado en el desarrollo turístico, se promulgó la primera Ley de Turismo, respaldada por financiamiento gubernamental (Guerrero, 2015). La institucionalización del turismo se concretó en 1956 con la creación del Fondo de Garantía y Fomento de Turismo (FOGATUR), (Guerrero, 2015; DOF 1956). Además, en las décadas de los cincuenta y sesenta, México diversificó sus destinos turísticos hacia el sureste del país, destacando la infraestructura turística en Cozumel para actividades como pernocta, pesca deportiva, *snorkel* y buceo (SECTUR, 2005).

Al mismo tiempo, durante la década de los cincuenta, se desarrolló una significativa producción de copra en la zona costera, la cual declinó tras el huracán Janet en 1955, afectando el entorno y forzando a la sociedad a reorganizarse. En ese mismo periodo se observó un desarrollo gradual en las cooperativas especializadas en la producción y conservación de langosta, caracol y camarón (Ramos y Santander, 2011). No obstante, fue la demanda turística la que impulsó significativamente esta actividad, ya que el buceo se asociaba con la pesca deportiva mediante el uso de arpón.

Existen ciertos fenómenos climáticos que pueden alterar la estructura de un sistema (García, 2006). La alteración del medio físico por un huracán generó modificaciones en el entorno productivo insular, lo que a su vez condujo a una orientación socioeconómica centrada en el turismo, rompiendo con ello las particularidades históricas y culturales que caracterizaban el estilo de vida insular.

La incipiente industria turística en Cozumel tomaba forma con la construcción de infraestructura marítima y aeroportuaria. En este contexto, la asignación efectiva de tierras ejidales en la zona se retrasó casi una década (DOF, 1993). Sin embargo, para ese mo-

mento, los empresarios hoteleros ya habían adquirido espacios, anticipándose la asignación de estos (Ramos, 1999). Esto favoreció la edificación de los primeros hoteles mediante la apropiación de terrenos y el desplazamiento de los ejidatarios, sentando así los fundamentos del capital mediante la acumulación por desposesión (Harvey, 2004).

Esta fase de acumulación por desposesión implicó la apropiación de medios de subsistencia en tierras y franjas costeras utilizadas para la pesca y resguardo de embarcaciones, conocida como “caleta”. A pesar de los esfuerzos de la comunidad por preservar este espacio, la fuerza de la nueva industria turística se impuso (Ramos, 1999). De esta manera, se puede observar inicialmente el desplazamiento de la población mediante la apropiación de tierras con el fin de continuar con las actividades económicas, a través de la eliminación de una forma de producción doméstica dentro de la economía pesquera y ejidataria que había permitido su autosuficiencia. En este sentido, la industria turística emerge con la apropiación del uso y transformación del entorno natural, social y cultural.

La caleta, un espacio vital para la comunidad pesquera, experimentó gradualmente una transformación en un centro turístico, lo cual puso de manifiesto el proceso de acumulación originaria (Marx, 2002). El desplazamiento de los pescadores y ejidatarios marcó la consolidación en el territorio de la nueva industria turística en Cozumel (Ramos, 1999). Esta transformación implicó la incorporación de los pescadores como trabajadores dentro de una relación salarial, así como la apropiación de sus tierras, donde sus conocimientos, saberes y habilidades generaban un valor adicional para el turismo a través de *tours* enfocados

en el modelo de Sol y Playa, conocidos como Robinson Crusoe.

Durante este periodo se impulsó el auge turístico mediante políticas de desarrollo en América Latina y el Caribe, promoviendo las playas de México ante la creciente demanda (Cárdenas, 1996). Ante ello, la necesidad de alojamiento incentivó la edificación de hoteles en la zona norte de la isla, sobre tierras ejidales.

En este contexto, resulta factible examinar (ver la Tabla 1) la manera en la que el territorio comenzó a ser configurado, edificado y modificado para alterar la composición tradicional, a través de la apropiación del espacio que contribuyó a la construcción de una infraestructura hotelera de capital local y regional. Con esto, se inicia un proceso de fragmentación económica, mediante la transición de actividades primarias a terciarias.

Etapa 2. Crecimiento del turismo de sol y playa

En el transcurso de las décadas comprendidas entre los años 1930 y 1960, se pudo observar un notable crecimiento en la industria turística. Durante este período, se registró un significativo aumento en el número de visitantes extranjeros que llegaron a México, pasando de 24 mil a más de 960 mil. En 1930, la cifra de turistas rondaba los 24 mil, pero para 1940 ya había alcanzado los 126 mil. En 1950, este número se había incrementado en 385 mil, y finalmente, en 1960, se cerró con un poco más de 960 mil turistas extranjeros (Mateos, 2006), lo que constituyó un hito importante para la década de los cincuenta, en la cual el crecimiento representó el 249 %. Este aumento tuvo un impacto sustancial en la perspectiva del turismo como impulsor del desarrollo del país, generando políticas enfocadas en la industria turística.

Tabla 1. Evolución de la infraestructura hotelera en Cozumel 1928-1965.

Año	Hotel	Habitaciones	Ubicación	Tipo de inversión
1928	Gran Louvre	N/D	Centro	Local
1932	Yuri	N/D	Centro	Local
1938	Playa	N/D	Centro	Local
1955	Isleño	27	Centro	Regional
1957	Mayalum	6	Centro	Extranjero
1964	Cozumel Caribe	57	Norte	Regional
1962	Cabañas del Caribe	N/D	Norte	Local
1965	Cantarell	N/D	Norte	Regional
1965	Hotel Playa Azul	N/D	Norte	Local

Fuente: Elaboración propia con base en Ramos (1999); Ramos & Santander (2011); Vivas (2008).

Dichas políticas presentaron dos características principales: esporádico y desarticulado (Hiernaux y Torres, 2008). El primero se refiere a la falta de seguimiento en la implementación y sin una planificación en el largo plazo, a su vez la ausencia de articulación entre los distintos niveles de gobierno, las instituciones públicas y privadas, y la comunidad local, impide la creación de un marco normativo coherente y unificado, impactando tanto en la efectividad como continuidad.

Las transformaciones observadas en el sureste del país, como la devastación de la copra por el huracán Janet en 1955 y el cambio del uso de la tierra agrícola a uno de tipo turístico, permitieron la apertura de la zona costera para el desarrollo de alojamientos por temporada, principalmente en invierno y verano. A estos sucesos se sumaron los pequeños barcos que transitaban de la pesca ribereña a la captura deportiva y el buceo, abriendo un segmento de sol y playa demandado principalmente por el turista norteamericano. Esta transformación territorial se llevó a cabo para satisfacer la demanda de las necesidades de ocio y recreación.

Por otro lado, en el caso específico de Cozumel, la transición al modelo de sol y playa, derivado de la difusión internacional que se le dio a la isla, propició la atracción de una mayor cantidad de visitantes. Dicha transición se vio impulsada por eventos como la producción de “Le Monde de Silence” (Cousteau y Frederic, 1953), que contribuyó a asociar los arrecifes de Cozumel con Jacques-Yves Cousteau e impulsar el buceo en la isla, además, la película “Un nuevo mundo” (1957) de Cardona y Torres, filmada en el mar de Cozumel, fomentó el buceo en el mercado estadounidense (Hajovsky, 2016). El artículo de los Humphrey en “Holiday” en 1956 (Vivas, 2008) contribuyó al conocimiento de la oferta turística basada principalmente en los recursos naturales (sol, playa y arrecifes).

Los inicios en la oferta turística se fundamentan principalmente en los recursos naturales como el sol, la playa y los arrecifes, y han tenido un impacto significativo en la fragmentación territorial y en la demanda de las necesidades de ocio y recreación. Esta evolución del turismo, centrada en la naturaleza, no solo fomenta la fragmentación territorial resultante de la transformación de diversas áreas para satisfacer un

mercado turístico bajo una visión sustentable. El cual tiene un impacto en el territorio concebido como base de las actividades socioeconómicas y ambientales de la humanidad (Carreño, 2014).

Etapas 3. Crecimiento del turismo de buceo

En esta etapa también se sientan las bases del turismo de buceo y de la pesca tradicional de bajo impacto. En 1958 se fundó el Club de Exploraciones y Deportes Acuáticos de México (CEDAM). Esta organización capacitó a los pescadores de Cozumel, quienes posteriormente se convirtieron en guías y proveedores de turismo de buceo. Su trabajo se centró principalmente en el modelo de sol y playa (Santander, 2009).

Estos pescadores presentaban una oferta turística local basada en sus prácticas y conocimientos con el entorno natural y su forma de subsistir conocido como “Viaje Robinson Crusoe” referenciado al libro del mismo nombre publicado en 1719 en el que, un naufrago inglés pasa 28 años en una remota isla tropical y logra sobrevivir.

Esta actividad se desarrollaba en pequeñas embarcaciones a motor importadas de Belice y decoradas con vistosas tonalidades caribeñas, de unos 24 pies de longitud (8 metros) con capacidad máxima de seis personas, contando a la tripulación. Dichos medios eran navegados por hábiles capitanes y marineros, que tiempo después formaron la extinta Unión de Boteros de Cozumel, que navegaban a velocidades moderadas, no excediendo los siete nudos, haciendo paradas en los arrecifes para realizar inmersiones y pesca con arpones, obteniendo ejemplares de escama, langosta, cangrejo rey y caracol. Después, utilizaban la leña para cocinar los productos y los servían en la arena a los turistas, empleando hojas de palma de coco trenzadas como manteles. Para el postre, ofrecían la deliciosa piña autóctona y, para acompañar, refrescantes tragos de ron, servidos con agua de coco fresca extraída de los cocotales de la costa, ahora extintos.

Desde esta perspectiva, es posible apreciar como la actividad turística, a través de su dinámica de expansión y reproducción, inició un proceso de fragmentación y diversificación al incluir nuevos espacios y actividades que buscaban brindar al turista experiencias innovadoras. Esto se lograba mediante la mercantilización de lo “auténtico y verdadero”,

donde los espacios y bienes tradicionales para la comunidad de Cozumel, que anteriormente tenían un valor de uso, gradualmente se transformaron a un valor de cambio, formando parte de la oferta de la industria turística.

Es a través de este proceso, que se iniciaba el despojo de las distintas interacciones socioambientales, como la identidad y cotidianidad con el entorno. Con el creciente turismo, se generó una mayor oferta laboral y, consecuentemente, una migración de otras regiones del sureste mexicano hacia Cozumel. Atraídos por el desarrollo de la industria turística y los servicios de buceo ofrecidos por los hoteles, lo que llevó a la popularización de los *Diving Resorts* (Santander, 2009).

Etapas 4. Bases del turismo masivo: desarrollo hotelero

El turismo de masas es considerado aquel que desplaza un gran número de personas hacia destinos principalmente de sol y playa, en el que distintos autores plantean que ese término se popularizó durante las décadas de 1950 a 1970, principalmente en Europa (Gordon, 2002; Manera, 2017; Moreno, 2012; Vasallo, 1983). El desarrollo de la transportación aérea regularizó sus servicios de vuelos después de 1955, aunado a los aviones modelo Jumbo de los años sesenta, que contribuyeron al incremento del transporte masivo en su gran mayoría impulsado por el ocio y la recreación. El crecimiento de la industria turística buscó cerrar la temporalidad invierno-verano, por lo que la oferta de lugares con climas más homogéneos permitió poner en el mapa al Caribe Mexicano.

En la década de los sesenta, se creó un nuevo territorio social y geográfico, como consecuencia de una marcada acción del desarrollo a través de una industria turística, consolidándose principalmente en pequeños Estados Insulares del Caribe (González, 2022), como Nassau, San Juan, Montego Bay y Puerto Príncipe, o algunas zonas de México a las que Ash y Turner (1991) denominan “periferias de placer”. Esta nueva periferia norteamericana se caracterizó por su infraestructura hotelera y aeroportuaria, lo que determinó en gran medida su alcance.

En esa etapa, México utilizó su ubicación geográfica y costas para promover destinos turísticos de playa, siendo Acapulco un ejemplo consolidado gracias a su infraestructura hotelera, aeroportuaria y vial, mejo-

rada significativamente por la construcción de autopistas (Valenzuela, 2010), impulsando la seguridad y reducción del tiempo de viaje, atrayendo tanto al turismo interno como a visitantes del sur y costa oeste de Estados Unidos, aunque el Caribe se convirtió en una opción más adecuada para la Costa Este.

En la segunda mitad del siglo XX, el Gobierno Federal y el Banco de México reconocieron las ventajas competitivas del país y crearon el Fondo de Promoción e Infraestructura turística (INFRATUR) en 1969, seguido por la Ley Federal de Fomento al Turismo y la creación de la Secretaría de Turismo y el Fondo Nacional del Turismo (FONATUR) en 1974, y este último tenía como objetivo establecer polos de desarrollo a través de los Centros Integralmente Planeados. Cozumel se incorporó a la oferta turística sin ser parte de estos, dando paso a la construcción de 11 hoteles con 405 habitaciones, impulsando de esta manera su infraestructura hotelera (Ramos y Santander, 2011).

La elección de la cantidad de hoteles presentados se basó en diversas fuentes, aunque se señalan discrepancias entre ellas. Se sostiene que el proceso de desarrollo de la industria turística empezó a tomar forma a finales de la década de los sesenta, ya con 15 hoteles. De estos, 13 eran de capital local, uno regional y el restante, de capital nacional (Hotel Presidente) (Vivas, 2008).

Se puede observar que, durante la década de los cincuenta, la infraestructura hotelera en Cozumel se encontraba distribuida principalmente en tres áreas geográficas (ver la Tabla 2): Centro, Norte y Sur. Este patrón de distribución sugiere una fragmentación de las zonas turísticas de la isla en función del tipo de capital invertido, ya sea local, regional o nacional.

Tabla 2. Configuración territorial de la infraestructura hotelera en Cozumel durante la década de los cincuenta.

Centro de la Isla	Norte de la Isla	Sur de la Isla
Yoli	Cozumel Caribe	Hotel Presidente
López	Cabañas del Caribe	
Aguilar	Cantarell	
Linda Mar	Hotel Playa Azul	
Baracuda		
Flores		
Mesón San Miguel		
Pirata		
Pepita		
Maya Cozumel		

Fuente: Elaboración propia con base en Vivas (2008).

Tabla 3. Oferta hotelera y configuración territorial en Cozumel, décadas de los 60´s y 70´s

Centro de la Isla	Norte de la Isla	Sur de la Isla
60s		
Hotel Martín	Hotel Cantarell	Hotel presidente
Hotel López	Sol Cabañas del Caribe	
Hotel Marlín	Hotel Cozumel Caribe	
Hotel Aguilar	Hotel Playa Azul	
Hotel Coldwell		
Hotel Dorado		
Hotel Yoly		
Hotel Candela		
70s		
Hotel Malibú	Hotel Mara	Hotel Villa Blanca
Hotel Flores	Hotel El Cozumeleño	Galápagos Inn
Hotel Pirata	Hotel Mayan Plaza	
Hotel Barracuda		
Posada Cozumel		
Punta Morena		
Posada Lety		
Hotel Antillano		
Hotel Vista del Mar		
Hotel Bahía		
Hotel Maya Cozumel		

Fuente: Elaboración propia con base en Palafox y Zizumbo (2009).

Durante las décadas de 1960 y 1970, la oferta hotelera se expandió y diversificó, incorporando establecimientos de mayor tamaño y con distintos enfoques turísticos. (ver la Tabla 3) muestra la configuración territorial de la infraestructura hotelera en ese periodo, evidenciando el tránsito hacia un modelo más complejo de segmentación turística.

En 1969, el Hotel Presidente, inicialmente conocido como Nacional Hotelera, fue el primero en establecerse en la Zona Sur de Cozumel. La historia de este inmueble ha pasado por dos etapas: un crecimiento respaldado por el Estado y una expansión con inversionistas extranjeros (Sánchez y Montejo, 2022). Actualmente, enfrenta un litigio de más de 50 millones de dólares con el municipio de Cozumel debido al incumplimiento de un convenio de concesión de espacio en 2011 (REPORTUR, 2023).

La distribución de hoteles en la costa de Cozumel ha variado históricamente, con pequeños establecimientos en la región central, enfocado a turistas nacionales y delegados federales derivados de la aduana que se encontraba establecida en la Isla. Esto contrasta con la zona norte, centrada en el turismo

de buceo con los llamados *Dive resorts*. En el sur, el Hotel Presidente, de cinco estrellas y 91 habitaciones, propiedad de inversores nacionales, está enfocado al turismo masivo, superando en tamaño a los espacios más pequeños del centro y norte. Este hotel está situado en el área con mayores atractivos como playas y arrecifes.

En términos de planificación territorial, el desarrollo de la industria turística en Quintana Roo, convertido en Estado Libre y Soberano en 1974, se impulsó con el Plan Maestro de Cancún (1972) financiado por el Banco Mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo, generando enclaves turísticos (Martínez, 2008).

En las décadas de los setenta y ochenta, la mayoría de los hoteles se encontraban en la zona central de la isla, siendo mayormente pequeños establecimientos operados por familias locales. En la zona norte, empresarios locales y regionales se beneficiaron de un error de medición en el ejido para apropiarse de terrenos y construir hoteles. Mientras tanto, en la zona sur, se inauguró el primer hotel de capital nacional.

Durante los años setenta, los hoteles familiares locales experimentaron una disminución en sus negocios, debido a la construcción de establecimientos de hospedaje de cadenas nacionales como el Sol Caribe y El Presidente, centrados en la oferta de alojamiento basada en sol y playa. Aunque hubo una disminución en su cantidad entre 1980 y 1985, las habitaciones experimentaron un notable incremento de 269 % (ver la Tabla 4), lo cual sugiere un cambio hacia un perfil de turismo masivo y planteaba la posibilidad de alcanzar un nivel de saturación en un destino insular.

Tabla 4. Disponibilidad de hoteles y habitaciones en Cozumel, 1970-2020

Año	Hoteles	Habitaciones
1970-1980	33	1091
1980	40	712
1985	32	1919
1990	68	2245
1992	49	2952
2000	60	3956
2006	51	3723
2010	49	4169
2015	45	4098
2020	66	4701

Fuente: Elaboración propia con base en Santander (2009); SECTUR (2018); SEDETUR, (2020); Vivas (2008).

En los años noventa, los hoteles de cinco estrellas representaban el 56.7 % de la oferta de establecimientos de hospedaje en la isla. Esta proporción aumentó al 57.9% en la década del 2000, atribuible al surgimiento de un mercado turístico basado en el concepto de “todo incluido”, siguiendo la tendencia observada en Cancún y la Riviera Maya en esa época (Santander, 2009).

Etapas 5. Consolidación de un turismo masivo en el ámbito de los cruceros

De acuerdo con Chan (2006), la ruta de cruceros no incluía a Cozumel a pesar de que este ya era un importante destino turístico para México, sin embargo, a partir de 1968 empezaron a llegar los primeros cruceros, sobresaliendo Ariadne y la Hamburg-America Line, el cual ya contaba con rutas fijas desde dos décadas atrás. Fue para 1974, cuando el crucero Bolero de bandera Noruega con capacidad para 900 personas que incluyó a Cozumel en sus rutas fijas por el Caribe (Santander, 2009).

En 1980, de acuerdo con la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), se decretó la designación de la costa occidental de Cozumel como Zona de Refugio para la Protección de la Flora y Fauna Marinas (CONANP, 1998). Esta medida sentó las bases para la planificación territorial de la isla, para promover la construcción de infraestructuras que beneficiaran principalmente al sector privado, brindando espacios para el desarrollo de la industria turística de cruceros y fomentando la fragmentación económico-territorial.

La mencionado anteriormente permitió la construcción de tres muelles para cruceros en los años 1980, 1996 y 1998, cada uno de ellos con un mínimo de dos posiciones de atraque (Santander y Ramos,

2011). En el año 1997 como consecuencia del inicio de las operaciones del muelle de Puerta Maya de Carnival Cruises, se pudo observar por primera vez en la historia de Cozumel la llegada de más de un millón de cruceristas (ver la Figura 1). Cinco años después, en 1993, esta cifra se incrementó a 2,708,913 pasajeros, a partir del 2017 hasta la pandemia se superaron los 4 millones de pasajeros anuales, generando un proceso de masificación turística. El cual se encuentra asociado con la destrucción del ambiente físico, económico y socio-cultural (Jurado et al., 2013).

Un estudio de la Florida-Caribbean Cruise Association en 2018 en los 36 destinos ubicados en las aguas de Florida, el Caribe y América Latina, reveló que el turismo de cruceros ha generado una derrama económica de 3,400 millones de dólares y ha creado 79,000 empleos. En dicho estudio, Cozumel ha destacado como líder en cuanto al gasto total del turismo de cruceros y en la creación de empleos de todos los destinos (FCCA, 2018).

No obstante, lo anteriormente mencionado contrasta con los datos proporcionados por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). En el año 2010, la tasa de pobreza en Cozumel era del 30.6 %; en 2015, esta cifra aumentó a 31.3 %, y para el año 2020, se incrementó aún más, llegando a ser de un 39.6 %. Un comportamiento similar se observó en la población con ingresos inferiores a la línea de pobreza extrema, con un porcentaje del 37.1 % en 2010, del 41.8 % en 2015 y del 51.2 % en 2020, según los datos proporcionados por el CONEVAL en su informe de 2020. A su vez el Centro de Estudios de las Finanzas Públicas de la Cámara de Diputados (CEFP), posicionaba a Cozumel en el 2017 como el municipio con la deuda per cápita más elevada del país/ingresos totales.



Figura 1. Evolución de la llegada de cruceros y pasajeros a Cozumel, 1992-2020.

Fuente: Elaboración propia con base en DATATUR (2022).

Fragmentación Económico-Territorial y ¿Sustentabilidad en Cozumel?: una perspectiva histórica de la industria turística

La exploración cronológica de la fragmentación económico-territorial se revela esencial para comprender la evolución de la industria turística de Cozumel. Siguiendo la idea de García (2006) sobre la importancia de analizar la historia en diversas escalas temporales, se destaca el concepto de Marx (1975) que las relaciones entre objetos materiales son manifestaciones de relaciones sociales entre individuos. En este contexto, la sociedad actual, modelada por construcciones históricas (Berger y Luckmann, 1966), moldea el desarrollo turístico de Cozumel. Este análisis a lo largo del tiempo sienta las bases para disentñar las causas y contradicciones inherentes.

Durante la etapa de los orígenes, se destaca la génesis histórica del capital y su acumulación originaria en Cozumel, la cual se fundamentó en la expansión del capitalismo, destacando la expropiación de tierras como un factor crucial (Roux, 2019). Este desarrollo, bajo la lógica neoclásica, generó contradicciones estructurales en el sistema capitalista (Harvey, 2014). Con estas bases, en sus inicios, la infraestructura turística en Cozumel se concentraba en la zona norte, marcando un cambio en la historia de la Isla (García, 2006), atribuible a la asignación tardía de tierras ejidales que contrasta con la anticipación de hoteleros que adquirieron terrenos (Ramos, 1999).

El modelo de sol y playa, con alta dependencia ambiental, enfrentó conflictos derivados de la estacionalidad y la masificación (Santos-Lacueva & Saladié-Borraz, 2013). Cozumel transitó de una economía basada en subsistencia a un turismo incipiente, afectando la tierra agrícola y generando migración (Marx, 2002), por lo que este modelo se percibe como un sistema complejo con interdependencias significativas (García, 2006).

A pesar de la importancia económica se plantean contradicciones y desafíos, especialmente en términos de uso del territorio y sustentabilidad. La construcción de espacios mercantilizados y la apropiación de litorales presentan desafíos ambientales. El turismo de sol y playa se percibe como un sistema complejo con procesos interrelacionados, donde las actividades como el buceo, la pesca, hoteles, restaurantes, muelles y aeropuertos interactúan de manera

interdependiente (Fernández & Ramos, 2010; Mendiavelso & Rivas, 2013; Santos-Lacueva et al., 2017).

Finalmente, el desarrollo masivo del turismo de cruceros en Cozumel se vincula al surgimiento de enclaves turísticos gestionados por empresas transnacionales, basados en las “3S” (sol, mar y arena) (Arias y Lina, 2018). La dicotomía entre progreso y atraso se observa en estos enclaves, evidenciando el impacto del turismo masivo en la estructura social y territorial de la isla (Barboza, 2017).

Conclusiones

En la cronología presentada, se evidencia la expansión de la actividad turística en Cozumel, pero también la necesidad de abordar las contradicciones y desafíos para garantizar la sustentabilidad y el respeto por el entorno natural. La evolución desde los primeros *Diving Resorts* hasta los grandes hoteles todo incluido y la apertura en las rutas de cruceros señalan una transformación compleja, influida por factores económicos, políticos y sociales, que es fundamental entender para planificar el futuro turístico de Cozumel.

La trayectoria histórica del turismo en Cozumel, desde el auge del buceo en los años cincuenta hasta el crecimiento de los cruceros sugieren una sustentabilidad postergada, en el que la industria turística mediante la visión economicista y utilitarista a impactado no solo a escala territorial sino también en lo ambiental y social revelando una evolución marcada por fragmentaciones económico-territoriales. Aunque el turismo de buceo catapultó a la isla a la escena internacional, la rápida expansión turística no estuvo exenta de contradicciones y tensiones.

En las décadas de los setenta y ochenta, la llegada de grandes cadenas hoteleras marcó un cambio hacia el turismo masivo, desplazando a los pequeños establecimientos familiares. Este fenómeno, aparentemente benéfico para la economía, generó fragmentación económica y territorial, afectando negativamente a comunidades locales. La concentración de hoteles de cinco estrellas en los años noventa y 2000, evidenció la creciente influencia de modelos “todo incluido”, imitando el éxito de destinos cercanos.

El surgimiento de Cozumel como destino de cruceros en la década de 1970 y su desarrollo en los ochenta ilustra cómo las decisiones de infraestructura moldearon patrones turísticos. A pesar de que este ha genera-

do una derrama económica y la creación de empleos. Aunque esto ha resultado en un aumento en la economía local y la creación de empleos. Sin embargo, la situación contrasta con la falta de sustentabilidad observada, evidenciando impactos significativos en el entorno social, ambiental y territorial. Estos impactos se han asociado con la fragmentación económico-territorial, lo que compromete la integridad y cohesión del territorio, generando divisiones y desequilibrios en la distribución de beneficios y costos, estos últimos cargados a la comunidad anfitriona.

En este sentido, se presentan retos evidentes en términos de sustentabilidad. Aunque la isla ha experimentado un incremento en el número de hoteles y habitaciones, la falta de enfoque en prácticas turísticas responsables pone en peligro la belleza natural que inicialmente atrajo a los visitantes. En este contexto, la investigación destaca la importancia de abordar estas contradicciones, repensar la industria turística y fortalecer la infraestructura con un compromiso firme hacia la sustentabilidad. Solo de esta manera se podrá asegurar un futuro equilibrado y próspero para Cozumel.

Referencias

- Arias, C. y Manjarrez, L. (2018). Apropiación Práctico-utilitaria del Paisaje en Enclaves Turísticos Mexicanos. *El Periplo sustentable*, 35, 268-296.
- Ash, J., & Turner, L. (1991). *La Horda Dorada. El turismo internacional y la periferia del placer*. Endymion.
- Barboza, E. (2017). El enclave turístico y la imagen del “buen salvaje” americano Un abordaje iconográfico. *Estudios y perspectivas en turismo*, 26(4). http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-17322017000400001
- Berger, P. L., & Luckmann, T. (1966). *The Social Construction of Reality*. Penguin Books.
- Cárdenas, E. (1996). *La política económica en México, 1950-1994*. Fondo de Cultura Económica.
- Carreño, M. F. (2014). Contribución a la crítica del paradigma contradictorio de la sustentabilidad urbano-regional en México. En *Sustentabilidad Urbana: Visiones y contradicciones*. (p. 200).
- Cardona, R., y Torres, A. (Directores). (1957). *Un mundo nuevo*. <https://www.filmaffinity.com/mx/film302607.html>
- Chan, V. G. (2006). *Historia del turismo de cruceros en Cozumel*. Universidad de Quintana Roo.
- Chías, J. (1981). Desarrollo Histórico de la Aviación Mexicana. *Investigaciones Geográficas*, 1(11). <https://doi.org/10.14350/riig.58944>
- CONANP. (1998). *Programa de Manejo Parque Marino Nacional Arrecifes de Cozumel, Quintana Roo*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. <https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/anp/AN23.pdf>
- Cousteau, J.-Y., & Frederic, D. (1953). *Le monde du silence*. Editions de Paris.
- DATATUR. (2022). *Compendio Estadístico del Sector Turismo*. Secretaría de Turismo. <https://www.datatur.sectur.gob.mx/SitePages/Actividades%20en%20Crucero.aspx>
- DOF. (1993). *DECRETO por el que se expropia por causa de utilidad pública una superficie de 2,713-46-57.66 hectáreas de agostadero de uso común, de terrenos ejidales del poblado Villa Cozumel, Municipio del Cozumel, Q. Roo.* (Reg.- 2092). https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4716302&fecha=09/02/1993#gsc.tab=0
- DOF. (1956). *DECRETO que crea el fondo de garantía y fomento al turismo*. <https://sidof.segob.gob.mx/notas/4625736>
- Dumond, D. E. (2005). *El machete y la cruz: La sublevación de campesinos en Yucatán*. UNAM.
- Escobar, A. (2007). *La invención del Tercer Mundo Construcción y deconstrucción del desarrollo*. Fundación Editorial el perro y la rana.
- FCCA. (2018). *Economic contribution of cruise tourism to the destination economies*. Florida-Caribbean Cruise Asociación.
- Fernández, G., & Ramos, A. G. (2010). El patrimonio cultural como oferta complementaria al turismo de sol y playa. El caso del sudeste bonaerense. Argentina. *PASOS. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 8(1), 139-149.
- García, R. (2006). *Sistemas Complejos*. Gedisa.
- González, G. (2022). *Turismo en el Caribe: Pasado, presente y futuro*. Akelarre.
- Goodrich, C. (1874). *Cozumel Island, the New Tropical Paradise*. Powell and Maynard, Printers.
- Gordon, B. M. (2002). El Turismo De Masas: Un Concepto Problemático En La Historia Del Siglo XX. *Historia contemporánea*, 25, 121-156.
- Guerrero, R. (2015). La construcción de una identidad cultural y el desarrollo del turismo en México. *PASOS. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 13(5), 1019-1036.
- Hajovsky, R. (2016). *Historia Verdadera de Cozumel*. Pan American Publishing.
- Harvey, D. (2004). El “nuevo” imperialismo: Acumulación por desposesión. *Socialist register*, 40, 99-129.
- Harvey, D. (2014). *Diecisiete contradicciones y el fin del capitalismo* (1a ed). IAEN-Instituto de Altos Estudios Nacionales del Ecuador; Traficantes de Sueños.
- Hiernaux, D., & Torres, R. (2008). *Desarrollo territorial en México: Un balance general*. SEDESOL y UNAM.
- Iglesias, D. (2021). Ampliación discursiva del desarrollo sustentable: Una aportación desde la ciencia económica. *Regiones y Desarrollo Sustentable*, 22(43).
- INEGI. (2021). *Panorama sociodemográfico de México, 2020*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197711.pdf
- Keyes, M. R. (2016). Cultura forestal en Quintana Roo, México; observaciones y perspectivas. *Madera y Bosques*, 4(1), 3-13. <https://doi.org/10.21829/myb.1998.411363>
- Leff, E. (2000). *Saber ambiental: Sustentabilidad, racionalidad, complejidad, poder* / E. Leff.

- Manera, C. (2017). El turismo de masas como sistema de producción. *Enmarcando el turismo en la Historia Económica*, 6(9). <https://www.aehe.es/wp-content/uploads/2016/01/Carles-Manera.pdf>
- Martínez, C. (2008). Configuración territorial del turismo en las costas de la isla de Cozumel. *Teoría y Praxis*, 4(5), 343–357. <https://doi.org/10.22403/UQROOMX/TYP05/23>
- Marx, K. (1975). *Prólogo de Marx a la primera edición*. <http://biblio3.url.edu.gt/Libros/CAPTOM1.pdf>
- Marx, K. (2002). *La llamada acumulación originaria*. En *El Capital*: Vol. XXIV. Marxists. https://www.flacsoandes.edu.ec/sites/default/files/agora/files/1310675433.lflacso_1867_02_marx.pdf
- Mateos, J. (2006). El Turismo En México: La Ruta Institucional (1921–2006). *Cuadernos - Patrimonio Cultural y Turismo*, 34–43.
- Mendivelso, J. C., & Rivas, D. S. (2013). El Turismo internacional rural y el de sol y playa: la zona cafetera del Quindío y Cartagena De Indias. *Mercator - Revista de Geografía da UFC*, 12(28), 113–124.
- Moreno, G. (2012). Historia Del Turismo: Una Investigación Necesaria. En *Turismo y sostenibilidad: V jornadas de investigación en turismo*, 105–126.
- OMT (Ed.). (2008). *Recomendaciones internacionales para estadísticas de turismo 2008*. Organización Mundial del Turismo (OMT). <https://doi.org/10.18111/9789213612385>
- Palafox, A. & Zizumbo, L. (2009). Distribución territorial y turismo en Cozumel, Estado de Quintana Roo, México. *Gestión Turística*, 11, 69–88.
- Ramos, M. (1999). *COZUMEL Vida porteña*, 1920. Universidad de Quintana Roo.
- Ramos, M. & Santander. (2011). El nacimiento de un destino turístico en el Caribe Mexicano. Cozumel, de isla abandonada a puerto de cruceros. *El Periplo Sustentable*, 21, 5–30.
- REPORTUR. (2023). *Batalla en Q Roo: Una cadena hotelera demanda a Cozumel*. Noticias de turismo REPORTUR. <https://www.reportur.com/hoteles/2023/03/25/batalla-en-qroo-una-cadena-hotelera-demanda-a-cozumel/>
- Roux, R. (2019). *Despojo. Conceptos y fenómenos fundamentales de nuestro tiempo*. https://conceptos.sociales.unam.mx/conceptos_final/659trabajo.pdf
- Sánchez, B. P., y Montejó, R. C. (2022). Estrategias de la cadena hotelera: Grupo presidente. *Journal of Tourism and Heritage Research*, 5(4), Article 4.
- Santander, L. C. (2009). *Impacto ambiental del turismo de buceo en los arrecifes coralinos de Cozumel, México* [Universidad Nacional Autónoma de México]. http://132.248.9.195/ptd2010/enero/0652775/0652775_A1.pdf
- Santos-Lacueva, R., Clavé, S. A., & Saladié, Ò. (2017). Discontinuidades y limitaciones de los últimos planes turísticos de España en relación a la sostenibilidad ambiental del turismo de sol y playa. *Cuadernos de Turismo*, 40, 599–626.
- Santos-Lacueva, R., & Saladié-Borraz, O. (2013). La política ambiental y el sector turístico del litoral mediterráneo español: Una coordinación necesaria. IV Congreso Internacional en Gobierno, Administración y Políticas Públicas, Madrid. <https://www.gigapp.org/index.php/comunidad-gigapp/publication/show/916>
- SECTUR. (2005). *Turismo en México: Treinta años de la Secretaría de Turismo*; 1975–2005 (M. Á. Echegaray, Ed.).
- SECTUR. (2018). *Agendas de competitividad de los destinos turísticos de México 2013–2018*. Secretaría de Turismo.
- SEDETUR. (2020). *Indicadores Turísticos. Secretaría de Quintana Roo*. <https://sedeturqroo.gob.mx/ARCHIVOS/COMO%20VAMOS%20FEBRERO%202021%20.pdf>
- Valenzuela, E. (2010). La construcción y evolución del espacio turístico de Acapulco (México). *Anales de Geografía*, 30(1), 163–190.
- Vasallo, I. (1983). El turismo de masas en España. *Estudios turísticos*, 80.
- Vivas, V. (2008). *Travesía por la historia de COZUMEL* (Presidencia Municipal de Cozumel). Verás. http://187.157.177.119/pruebas/_biblioteca/wp-content/uploads/2022/05/TRAVESIA-POR-LA-HISTORIA-DE-COZUMEL.pdf

Red de Universidades Estatales para la Transformación (UNIRT)

**7 Universidades
y 12 Campus**

**Universidad Tecnológica
de la Mixteca
(UTM)**
Huajuapán

**Universidad del Mar
(UMAR)**
Campus Puerto Escondido,
Puerto Ángel, Huatulco
y Oaxaca

**Universidad del Istmo
(UNISTMO)**
Campus Tehuantepec,
Ixtepec y Juchitán

**Universidad del
Papaloapan
(UNPA)**
Campus Loma Bonita
y Tuxtepec

**Universidad de la
Sierra Sur
(UNSI)**
Miahuatlán

**Universidad de la Sierra
Juárez (UNSIJ)**
Ixtlán de Juárez

**Universidad de la
Cañada
(UNCA)**
Teotitlán de Flores Magón

**257
edificios**

**31 Institutos
de
Investigación**



**202 Laboratorios
24 Talleres**

Universidades ecológicas:
Los campus universitarios
son bosques con
la flora y fauna endémicas

82 carreras,
de las cuales la mayoría
son **de áreas STEM**

46 posgrados:
**12 Doctorados
y 34 Maestrías**



**Más de
11,000 alumnos
Más de
1,000 profesores
de tiempo completo**

Ensayo de Investigación

Fabricación de películas delgadas de SnO_2/WO_3 y su respuesta eléctrica ante acetona

Fabrication of SnO_2/WO_3 thin films and their electrical response to acetone

Gabriela Martínez Proal¹, Leandro García González¹
Mónica Araceli Viales Hurtado², Julián Hernández Torres^{1*}

¹ Universidad Veracruzana, Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología.

² Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada.

Autor de correspondencia:
*julihernandez@uv.mx

Recibido: 29-11-2023 Aceptado: 29-09-2025 (Artículo Arbitrado)

Resumen

En este trabajo se sintetizaron y caracterizaron recubrimientos bicapa conformados por una película de óxido de estaño sobre una película de óxido de tungsteno (SnO_2/WO_3), previamente depositada sobre un sustrato de vidrio Corning, utilizando la técnica de sol-gel por inmersión. La síntesis se realizó a partir de soluciones de cloruro de tungsteno (WCl_6) y cloruro de estaño (SnCl_2), diluidas en ambos casos en etanol y polietilenglicol con una concentración de 0.125 %; la velocidad de remoción del sustrato para las películas de WO_3 se varió de 1, 2.5 y 5 mm/s; mientras que para las de SnO_2 fue de 0.5 mm/s. Finalmente, para cada caso se les dio tratamiento térmico a las películas a 300, 350, 400, 450 y 500 °C durante 1 h. Los recubrimientos fueron caracterizados utilizando las técnicas de FE-SEM, EDS, XRD y XPS. Para evaluar la respuesta eléctrica de las películas de SnO_2/WO_3 ante acetona, se realizaron mediciones con la técnica de las cuatro puntas, comparando los resultados obtenidos de las películas de WO_3 y los de SnO_2/WO_3 , encontrando que estas últimas presentan una mejor respuesta, concluyendo que la combinación de óxidos metálicos favorece la capacidad de censado del material frente a acetona.

Palabras clave: COV, SEM, Sol-Gel, XPS, XRD.

Abstract

In this work, bilayer coatings consisting of a tin oxide film on a tungsten oxide film (SnO_2/WO_3), previously deposited on a Corning glass substrate, were synthesized and characterized using the sol-gel immersion technique. The synthesis was carried out from solutions of tungsten chloride (WCl_6) and tin chloride (SnCl_2), dissolved in both cases in ethanol and polyethylene glycol at a concentration of 0.125 %; the substrate withdrawal speed for the WO_3 films was varied at 1, 2.5 and 5 mm/s; while for the SnO_2 films it was 0.5 mm/s. Finally, for each case the coatings were heat treatment at 300, 350, 400, 450 and 500 °C for 1 h. The coatings were characterized using the techniques of FE-SEM, EDS, XRD and XPS. To evaluate the electrical response of the SnO_2/WO_3 films to acetone, measurements were carried out with the four-point technique, comparing the results obtained from the WO_3 films and those of the SnO_2/WO_3 films, finding that the latter present a better response, concluding that the combination of metal oxides favors the sensing capacity of the material against acetone.

Keywords: COV, SEM, Sol-Gel, XPS, XRD.

Introducción

El estudio de los óxidos metálicos semiconductores como CuO , ZnO , SnO_2 , NiO , WO_3 , I_2O_3 , Fe_2O_3 , Co_3O_4 , Cr_2O_3 , entre muchos otros, ha sido de gran interés a lo largo de los últimos años debido a sus múltiples aplicaciones en diversas áreas, siendo una de ellas el censado de diferentes gases, debido a la relación que estos tienen con la presencia de ciertas enfermedades en el organismo (Bulemo et al. 2017;

Chung 2014; Hanh et al. 2020; Kim and Lee 2014; Lin et al. 2017; Vajhadin, Mazloun-Ardakani, and Amini 2021; Wang and Sahay 2009; Zhang et al. 2015).

El SnO_2 , es un semiconductor tipo n, que presenta vacancias de oxígeno que actúan como donantes de electrones, fue uno de los primeros óxidos metálicos semiconductores estudiados debido a que presenta baja resistencia eléctrica, amplia banda prohibida,

elevada transparencia en el rango visible del espectro electromagnético, bajo costo, bajo nivel de toxicidad y alta estabilidad química y térmica. Puede ser depositado como película sobre diversos sustratos como metales, cerámicos como el vidrio y otros óxidos; (Garnica et al. 2013), lo que lo hace uno de los materiales más utilizados en el desarrollo de sistemas para censado de gases. Su respuesta sensitiva se ha estudiado frente a diversos gases como amoníaco (NH_3), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO), propano (C_3H_8), metano (CH_4) y etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) (Gong et al. 2004; Hwang et al. 2010; Toan et al. 2017). A su vez, el WO_3 es el segundo material para detección de gases más reportado, después del SnO_2 (Epifani 2022; Staerz, Weimar, and Barsan 2016); se han estudiado las diversas estructuras que presenta y la manera en que la temperatura influye en sus cambios de fase (Howard, Luca, and Knight 2002). Variando su morfología se ha mejorado su capacidad de censado, así como su nivel de selectividad y respuesta. Se ha aplicado en sensores de gas debido a su estabilidad química y la alta respuesta sensitiva que ha mostrado a gases como amoníaco (NH_3), acetona ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$), dióxido de nitrógeno (NO_2), ácido sulfhídrico (H_2S), etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), etc. (Drmosh et al. 2020; Ishibashi et al. 2011; Shendage et al. 2020; Shi et al. 2016; Wen-Cheun Au et al. 2020; Wen-Cheun Au, Chan, and Knipp 2019; You et al. 2012). Otras ventajas que presenta son su bajo costo y que es amigable con el medio ambiente.

Por otro lado, se ha reportado que la combinación multicapa de óxidos metálicos muestran una mejora en la detección de ciertos gases nocivos para la salud, conocidos como COV's (Compuestos Orgánicos Volátiles), respecto a películas fabricadas con un solo óxido metálico. Por esto, es de interés obtener una combinación óptima de óxidos metálicos que permitan el desarrollo de un material con un alto rendimiento sensitivo y selectivo ante diferentes COV's, con el objetivo de aplicarlo en el área médica para diagnóstico no invasivo de enfermedades (Broza et al. 2018).

La combinación de óxidos metálicos de WO_3 con SnO_2 , ha sido estudiada en el desarrollo de nuevos materiales, se ha visto que presentan buena respuesta sensitiva ante formaldehído (HCHO), acetona (CH_3COCH_3), tolueno ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$), amoníaco (NH_3), y

sulfuro de hidrógeno (H_2S) (Lee et al. 2021; Lu et al. 2021; Nayak 2015; Toan et al. 2017; Yuan et al. 2020). Las técnicas para fabricar los materiales son diversas e incluyen evaporación por haz de electrones, sol-gel, hidrotermal, deposición atómica y pulverización catódica. El método sol-gel presenta ventajas sobre otras técnicas para la síntesis de películas, ya que no requiere infraestructura compleja, el depósito se lleva a cabo en condiciones ambientales, se puede controlar el volumen de reactivos utilizados y las temperaturas del procesamiento para obtener óxido son relativamente bajas.

En el presente trabajo se muestran resultados de las características fisicoquímicas de recubrimientos bicapa (SnO_2/WO_3) obtenidas por sol-gel y su capacidad de censado, utilizando la acetona como molécula de prueba.

Parte Experimental

Síntesis de las películas de SnO_2/WO_3

Las películas fueron obtenidas por el método sol-gel, por un proceso de inmersión, utilizando sustratos de vidrio Corning. La solución química precursora, para la obtención de WO_3 , se preparó disolviendo 1 g de WCl_6 (Cloruro de Tungsteno, Sigma Aldrich 99.9 %) en 25 ml de $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (Alcohol etílico absoluto 99.9 %) posteriormente, se agregó polietilenglicol (Sigma Aldrich) a una concentración de 0.125 %, con el objetivo de mejorar la adherencia a los sustratos. Después de sumergir los sustratos en la solución, éstos fueron retirados a velocidades de 1, 2.5 y 5 mm/s y puestos en un horno a 300, 350, 400, 450 y 500 °C durante 1 h, obteniendo películas de WO_3 . Estas películas fueron utilizadas para depositar sobre ellas una capa de SnO_2 , siguiendo el siguiente procedimiento: se preparó una solución química a partir de una mezcla de $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Cloruro de Estaño dihidratado, Sigma Aldrich 98 %) en agua a una concentración de 0.1 M, después se agregó polietilenglicol a 0.125 %. Los sustratos de vidrio con el WO_3 (previamente depositado) fueron inmersos en esta solución y luego retirados a una velocidad de 0.5 mm/s. Finalmente, se dio un tratamiento térmico a 300, 350, 400, 450 y 500 °C durante 1 h. De esta manera se obtuvieron recubrimientos SnO_2/WO_3 sobre vidrio.

Caracterización

Se realizaron mediciones de DRX con un equipo Bruker D-8 Advance usando un tubo de emisión de rayos X con una fuente $\text{CuK}\alpha 1$, con un tiempo de paso de 0.5 s, un tamaño de paso de 0.02 grados, a una potencia de 40 kV y una corriente de 30 mA. Para la caracterización de SEM y EDS se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido de Emisión de Campo, marca JEOL modelo JSM-7600F. Para el caso de las mediciones de XPS, se ocupó un equipo K-Alpha Surface Analysis de la marca Thermo Fisher Scientific, el cual cuenta con un analizador hemisférico 180° de doble enfoque y detector de 128 canales con una presión base de 2×10^{-9} mbar. El cañón de Rayos X utiliza la línea K-Alpha monocromada de aluminio (1486.6 eV) a 12 kV y 40 watts de potencia en un área ovalada de 400 μm de diámetro e incide a la muestra con un ángulo relativo de 30° . En la erosión, se usa un haz de iones de argón acelerados a 3 kV, con una potencia de 30 watts que incide en un área de 1×2 mm concéntrico al haz de Rayos X, para el ajuste de los datos obtenidos de XPS se utilizó el software Spectral Data Processor. Para estimar el espesor de las películas delgadas de SnO_2/WO_3 , se realizó un perfil de profundidad de XPS de la muestra tratada térmicamente a una temperatura de 500°C , a una velocidad de erosión de 0.27 nm/s. Finalmente, para medir la respuesta eléctrica de las películas sintetizadas, se utilizó un arreglo experimental de cuatro puntas, el cual constaba de puntas de cobre recubiertas con estaño, con un espaciamiento de 1

cm entre cada una de ellas; y la lectura se llevó a cabo con un multímetro digital Keithley (2110), el cual proporcionó el valor de la resistencia del material a través del software LabVIEW.

Resultados y Discusión

Difracción de Rayos X (DRX)

En la Figura 1 se muestran los resultados de difracción de rayos X de las muestras fabricadas de SnO_2/WO_3 y tratadas térmicamente a diferentes temperaturas. En los difractogramas no se logra observar alguna señal relacionada con alguna fase cristalina, y dado que las mediciones se realizaron a haz rasante, se podría relacionar con un espesor delgado.

Espectroscopia de fotoelectrones por Rayos X (XPS)

Para confirmar la composición química de la superficie de las películas delgadas de SnO_2/WO_3 se realizó el análisis de los datos obtenidos con XPS, utilizando el software Spectral Data Processor, para ajustar los datos de las muestras SnO_2/WO_3 tratadas a 500°C (ver la Figura 2). En la Fig. 2a) se observa el espectro para el nivel W4f, con dos picos localizados en una energía de enlace de 35.97 y 38.09 eV, relacionados con las líneas espectrales $\text{W}4f_{7/2}$ y $\text{W}4f_{5/2}$, respectivamente, asociadas con W^{6+} . Otros autores han reportado valores en 35.68 y 37.74 eV para ambas líneas en películas de WO_3 , con corrimientos a valores de 35.98 y 38.34 eV para compuestos hidratados de WO_3 ($\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (Parthibavarman 2019; Yuan et al. 2020), por lo que, las posiciones de los picos

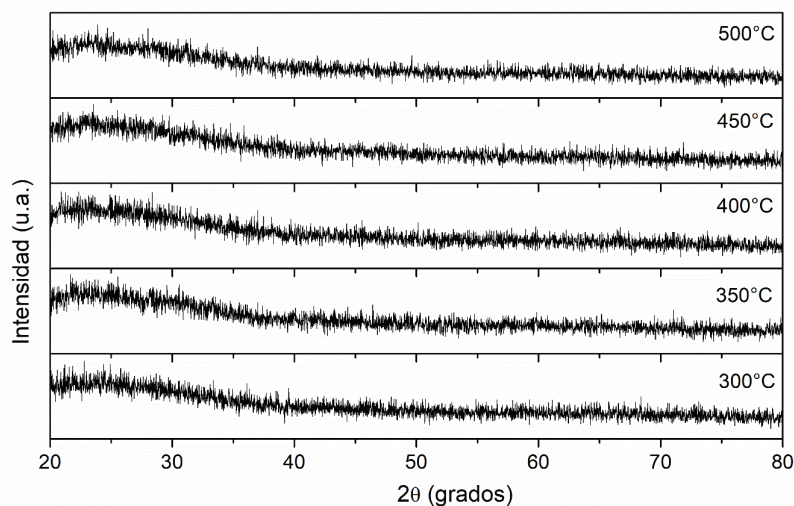


Figura 1. Difractogramas de rayos X de recubrimientos bicapa, SnO_2/WO_3 , con tratamientos térmicos a 300, 350, 400, 450 y 500°C .

Fuente: Elaboración propia.

mostrados en la Fig. 2a) dan indicios de la presencia de $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Parthibavarman, Karthik, and Prabhakaran 2019). Este compuesto muestra también una señal en 34.37 eV (Parthibavarman, Karthik, and Prabhakaran 2019). En la Fig. 2b) se observan dos picos característicos de SnO_2 , localizados en 495.47 y 487.05 eV, relacionados con $\text{Sn}3d_{3/2}$ y $\text{Sn}3d_{5/2}$, respectivamente. (Yuan et al. 2020). También se observan las señales debidas a los estados de oxidación del estaño Sn^0 y Sn^{+2} , que han sido reportados por otros autores (Kwoka et al. 2005), donde indican que el Sn transita por sus tres estados de oxidación, hasta lograr su estabilidad en Sn^{+4} en el compuesto SnO_2 . Por último, para analizar la presencia de oxígeno (O_2) en las muestras, en la Fig. 2c) se observa una señal característica ubicada en 530.9 eV, que se relaciona con la presencia de WO_3 , reportado por Parthibavarman (2019), así como una señal localizada en 530.26 eV, asociada con SnO_2 (Kwoka et al. 2005). Estas señales también muestran un corrimiento ligero, lo cual de acuerdo a Parthibavarman (2019) se asocian con la presencia de oxígeno en diferentes

ambientes, debido a los diferentes estados de oxidación del tungsteno. La banda localizada en 531.52 eV se asocia al $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Para estimar el espesor de las películas delgadas que conforman el recubrimiento bicapa SnO_2/WO_3 se realizó un perfil de profundidad de XPS a la muestra tratada a 500 °C, utilizando una velocidad de erosión de 0.27 nm/s. En la Fig. 2d) se muestra la relación entre el porcentaje de la composición atómica de Sn, W, O y Si en función de los espesores encontrados, se observa que la concentración de Sn disminuye a la mitad de su valor máximo (Narayanan et al. 2012); así la distancia entre el punto de inicio y su valor máximo se relaciona con la capa de SnO_2 , con un estimado de 10 nm; el punto máximo, marca la interfaz con la capa de WO_3 . El decaimiento en la concentración de estaño indica una difusión hacia el interior. Por otra parte, el tungsteno se encuentra diseminado por todo el recubrimiento, es decir, el tungsteno migra hacia la superficie, manteniendo un perfil de concentración creciente de dentro hacia afuera. Se puede considerar que se formó un compuesto con la mezcla de

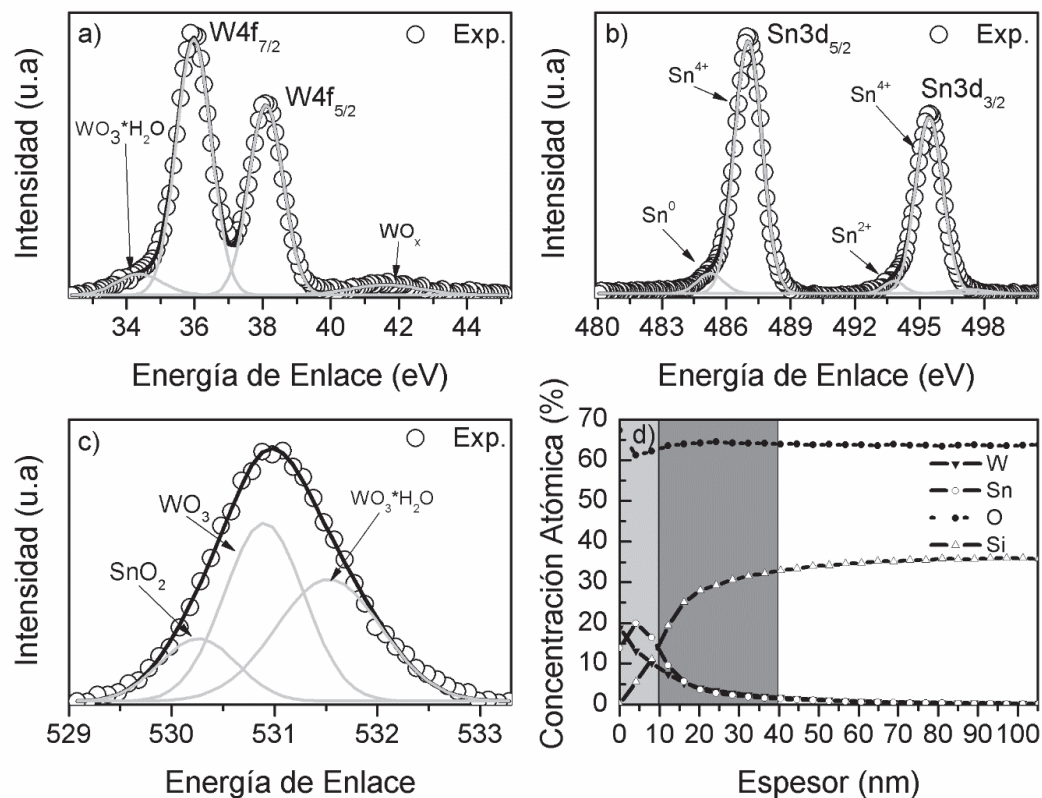


Figura 2. Gráficas XPS ajustadas para identificar la composición química presente en las películas obtenidas de SnO_2/WO_3 , a) picos característicos de Tungsteno (W), b) picos característicos de Estaño (Sn), c) picos característicos de Oxígeno (O_2) y d) Perfil de profundidad de las películas de SnO_2/WO_3 a 500°C.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Valores obtenidos para las energías de enlace para el tungsteno (W), estaño (Sn) y Oxígeno (O₂).

Temperatura	Energías de Enlace (eV)										
	WO ₃				SnO ₂				O ₂		
		W4f _{7/2}	W4f _{5/2}			Sn3d _{3/2}	Sn3d _{5/2}			O1s	
500°C	34.37	35.97	38.09	41.62	494.13	495.47	487.05	485.66	531.52	530.90	530.26
450°C	34.32	35.85	38.10	40.87	493.75	495.41	487.01	485.55	532.74	531.02	529.09
400°C	34.29	35.93	38.07	41.31	494.13	495.59	487.15	485.66	532.84	531.09	529.11
350°C	33.98	35.94	38.13	41.62	493.82	495.48	487.02	485.30	532.40	531.00	529.61

Fuente: Elaboración propia.

óxidos. El espesor total del recubrimiento es de aproximadamente 40 nm, por lo que se considera que la capa de WO₃ es de 30 nm. A partir de 60 nm el contenido de Si es constante. El espesor total calculado es congruente con los resultados de EDS, donde se observa la presencia del Si, y con los resultados de DRX en los cuales no se observa ninguna señal, aun cuando se realizaron mediciones por haz rasante. La Tabla 1, muestra las señales obtenidas de las de los recubrimientos a los diferentes tratamientos térmicos, desde 350 hasta 500°C, donde se aprecia que en cada uno de ellos existe la presencia de los óxidos metálicos.

Microscopía Electrónica de Barrido de Emisión de Campo (FE-SEM)

En las micrografías de SEM de los recubrimientos bicapa SnO₂/WO₃ obtenidos con un tratamiento térmico de 300 °C, Fig. 3a), se observa la formación

de estructuras similares a lo reportado en Jamali & Shariatmadar Tehrani (2020), Toan (2017) y Zheng (2011), este comportamiento se repite en las películas con tratamientos térmico a temperaturas de 350 y 400 °C en donde las películas presentan homogeneidad en su depósito, como se observa en las Figuras 3b) y 3c). En las películas con tratamiento térmico a 450 °C, las estructuras comienzan a agruparse, originando la formación de estructuras tipo islas, siendo estas mucho más notables en las películas con tratamiento térmico a 500 °C, tal como se muestra en las Figuras 3d) y 3e), tal como se observa en los resultados reportados por Siokou (2001) utilizando como técnica de depósito un evaporador de haz de electrones, o lo reportado por Toan (2017) sintetizando las películas por pulverización catódica o Sputtering. Por lo anterior, se puede observar la influencia de la temperatura en las estructuras obtenidas en las películas de SnO₂/WO₃.

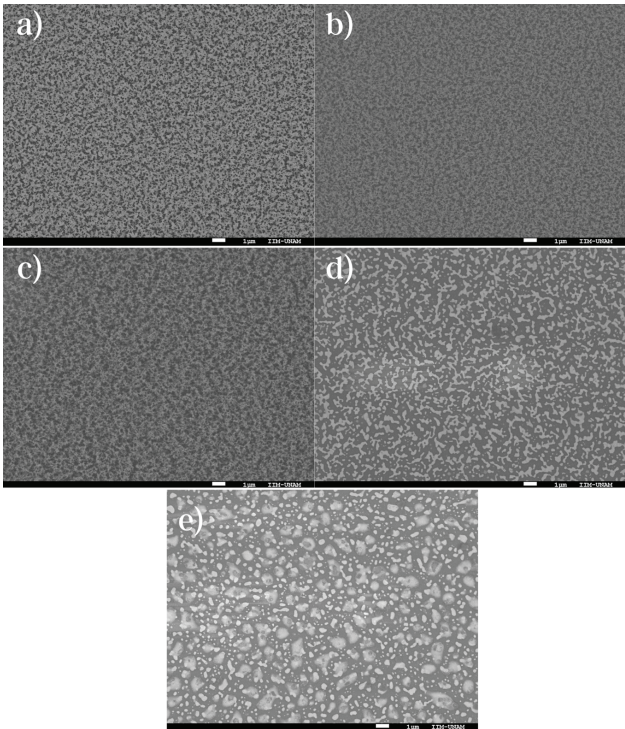


Figura 3. Micrografías de FE- SEM de los recubrimientos bicapa SnO₂/WO₃, a) 300 °C, b) 350 °C, c) 400 °C, d) 450 °C y e) 500 °C. Fuente: Elaboración propia.

Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS)

Para obtener los porcentajes atómicos de los elementos químicos presentes en las muestras de los recubrimientos bicapa SnO_2/WO_3 a los diferentes tratamientos térmicos, desde 300 hasta 500 °C, se realizó un análisis por EDS. La Figura 4, muestra la imagen de los porcentajes atómicos de tungsteno (W), estaño (Sn), oxígeno (O) y silicio (Si) presentes en la muestra de 500 °C, y las gráficas del comparativo de los resultados obtenidos para los porcentajes atómicos a los diferentes tratamientos térmicos. Se observa que el porcentaje de oxígeno excede lo esperado para la relación atómica de los óxidos de tungsteno y estaño, debido a la aportación del sustrato, lo que no permite diferenciarlo de aquel unido a los dos metales para formar los óxidos. Al incrementar la temperatura, existe una tendencia de decremento del porcentaje de oxígeno y un incremento en el porcentaje de tungsteno mientras que, el estaño se mantiene constante a temperaturas entre 300 y 400

°C y a temperaturas mayores se eleva ligeramente. Se asocia la reducción de oxígeno con la pérdida de compuestos orgánicos y agua presentes en las películas, provenientes de la solución precursora. Además, una mayor temperatura provoca la formación de estructuras más compactas debido a la consolidación de la red inorgánica de los óxidos, lo cual provoca un incremento en la concentración de tungsteno y estaño tal como se observa en las imágenes de SEM.

Para el caso de las películas con un tratamiento térmico de 300 y 500 °C se observa que los porcentajes atómicos de tungsteno son de 0.81 % y 1.65 % respectivamente, lo cual coincide en proporción con lo reportado por Nayak (2015) y Toan (2017). Para cada una de las muestras analizadas a los diferentes tratamientos térmicos, se observa un mayor porcentaje atómico de tungsteno que, de estaño, lo cual es congruente con los resultados de XPS, donde se aprecia una mayor concentración de tungsteno en la superficie, confirmando el proceso de difusión de este ele-

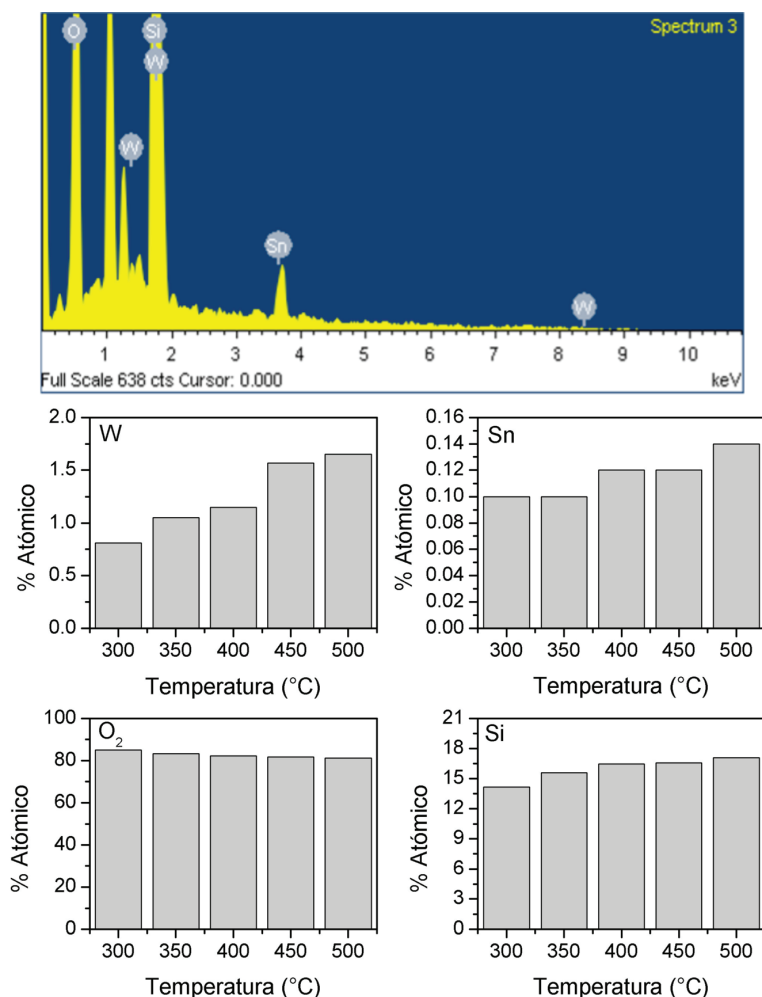


Figura 4. Resultados de las mediciones de EDS realizadas a las películas de SnO_2/WO_3 con un tratamiento térmico de 500 °C y el comparativo para cada uno de los elementos presentes en los recubrimientos con tratamientos térmicos de 300, 350, 400, 450 y 500 °C.

Fuente: Elaboración propia.

mento y la formación de un compuesto. Los mejores resultados obtenidos en cuanto a los porcentajes atómicos más altos para el W y Sn, fueron aquellos para los recubrimientos con tratamiento térmico de 450 y 500 °C, pero debido a la naturaleza del sustrato de vidrio Corning sobre del cual se depositaron las películas, en donde a 500 °C el vidrio se encuentra cerca de su punto de fusión, se consideran como referencia aquellas películas obtenidas a un tratamiento térmico de 450 °C.

Respuesta Eléctrica

El comparativo del comportamiento de la capacidad de respuesta que presentaron las películas delgadas de WO_3 respecto al recubrimiento bicapa SnO_2/WO_3 , frente a acetona, a partir de mediciones de cambio de resistencia eléctrica, se muestra en la Figura 5. Se muestra un ciclo completo, es decir, las muestras fueron expuestas durante aproximadamente una hora a la acetona, posteriormente se retiró la acetona y se continuó con el censado. De manera general, para ambos casos, la capacidad de respuesta es elevada durante los primeros 900 segundos de exposición y conforme pasa el tiempo la respuesta decrece muy lentamente, hasta mantenerse casi constante. El valor que alcanza la película de WO_3 es menor que el valor alcanzado por el recubrimiento

SnO_2/WO_3 . Una vez que la acetona se retira el valor de la resistencia eléctrica se incrementa abruptamente, con un cambio más pronunciado en el recubrimiento bicapa, pero en ninguna de las muestras se recuperan los valores iniciales, para el tiempo de censado, por lo que el recubrimiento bicapa tiene una mayor capacidad de recuperación.

Conclusiones

Se obtuvieron películas delgadas de SnO_2/WO_3 con buena adherencia al sustrato y un espesor estimado de 40 nm con tratamientos térmicos entre 300-500 °C; la ausencia de señales de difracción rayos X puede ser atribuida al espesor del recubrimiento. Los análisis de XPS dan evidencia de un proceso de difusión de tungsteno hacia la capa de SnO_2 y del silicio hacia la capa de WO_3 , mostrando que la interfaz SnO_2/WO_3 y $\text{WO}_3/\text{vidrio}$ no está bien definida. Se observa que los recubrimientos con una mayor temperatura de tratamiento muestran cambios significativos en la morfología pasando de estructuras homogéneas a formaciones de tipo isla. Las películas delgadas fabricadas a partir de la combinación de SnO_2/WO_3 muestran una mejor respuesta eléctrica ante el gas de acetona en relación con aquellas películas que solo cuentan con el depósito de WO_3 .

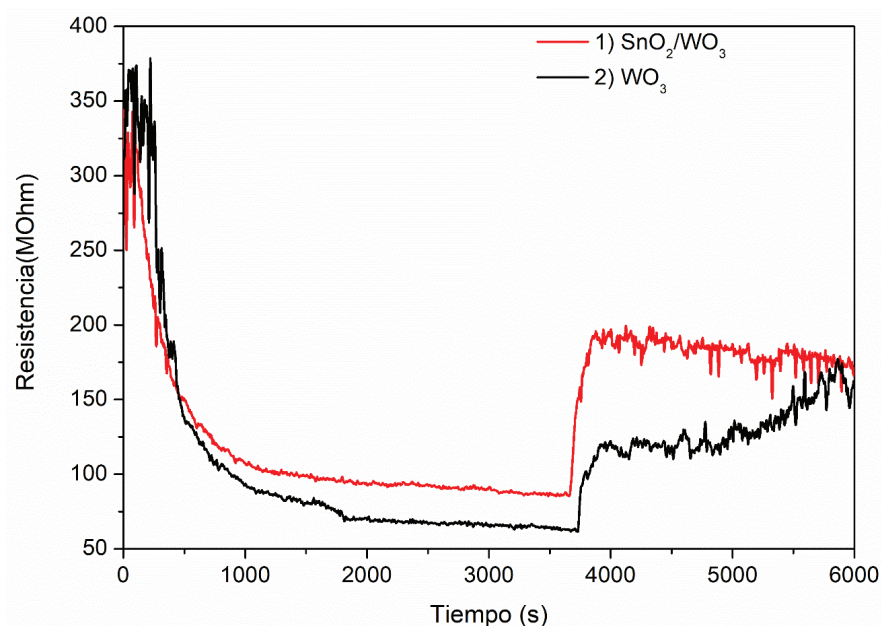


Figura 5. Medición de la resistencia eléctrica respecto al tiempo de una película de WO_3 y el recubrimiento bicapa SnO_2/WO_3 en presencia de acetona.

Fuente: Elaboración propia.

Referencias

- Broza, Y. Y., Vishinkin, R., Barash, O., Nakhleh, M. K., & Haick, H. (2018). Synergy between nanomaterials and volatile organic compounds for non-invasive medical evaluation. In *Chemical Society Reviews* (Vol. 47, Issue 13). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c8cs00317c>
- Bulemo, P. M., Cho, H. J., Kim, N. H., & Kim, I. D. (2017). Mesoporous SnO₂ Nanotubes via Electrospinning-Etching Route: Highly Sensitive and Selective Detection of H₂S Molecule. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(31), 26304–26313. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b05241>
- Chung, K. F. (2014). Hydrogen sulfide as a potential biomarker of asthma. *Expert Review of Respiratory Medicine*, 8(1), 5–13. <https://doi.org/10.1586/17476348.2014.856267>
- Drmosh, Q. A., Wajih, Y. A. Al, Al-Rammah, R., Qamar, M., & Yamani, Z. H. (2020). Surface-engineered WO₃ thin films for efficient NO₂ sensing. *Applied Surface Science*, 517(February). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146235>
- Epifani, M. (2022). Mechanistic Insights into WO₃ Sensing and Related Perspectives. *Sensors*, 22(6). <https://doi.org/10.3390/s22062247>
- Garnica, I., Pérez Santiago, A. D., Gochi-Ponce, Y., & Paraguay-Delgado, F. (2013). Caracterización de películas delgadas de SnO₂ obtenidas sobre vidrio por aspersión pirolítica intermitente para celdas solares tipo Grätzel. *Superficies y Vacío*, 26(2), 36–41.
- Gong, J., Chen, Q., Fei, W., & Seal, S. (2004). Micromachined nanocrystalline SnO₂ chemical gas sensors for electronic nose. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 102(1), 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.02.055>
- Hanh, N. H., Van Duy, L., Hung, C. M., Van Duy, N., Heo, Y. W., Van Hieu, N., & Hoa, N. D. (2020). VOC gas sensor based on hollow cubic assembled nanocrystal Zn₂SnO₄ for breath analysis. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 302, 111834. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111834>
- Howard, C. J., Luca, V., & Knight, K. S. (2002). High-temperature phase transitions in tungsten trioxide-the last word? *Journal of Physics Condensed Matter*, 14(3), 377–387. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/14/3/308>
- Hwang, I. S., Kim, S. J., Choi, J. K., Choi, J., Ji, H., Kim, G. T., Cao, G., & Lee, J. H. (2010). Synthesis and gas sensing characteristics of highly crystalline ZnO-SnO₂ core-shell nanowires. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 148(2), 595–600. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.05.052>
- Ishibashi, C., Hyodo, T., Shimizu, Y., & Egashira, M. (2011). H₂S sensing properties of macroporous In₂O₃-based sensors. *Sensor Letters*, 9(1), 369–373. <https://doi.org/10.1166/sl.2011.1482>
- Jamali, M., & Shariatmadar Tehrani, F. (2020). Effect of synthesis route on the structural and morphological properties of WO₃ nanostructures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 107(July 2019), 104829. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.104829>
- Kim, H. J., & Lee, J. H. (2014). Highly sensitive and selective gas sensors using p-type oxide semiconductors: Overview. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 192, 607–627. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.11.005>
- Kwoka, M., Ottaviano, L., Passacantando, M., Santucci, S., Czempik, G., & Szuber, J. (2005). XPS study of the surface chemistry of L-CVD SnO₂ thin films after oxidation. *Thin Solid Films*, 490(1), 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.04.014>
- Lee, J., Jung, Y., Sung, S. H., Lee, G., Kim, J., Seong, J., Shim, Y. S., Jun, S. C., & Jeon, S. (2021). High-performance gas sensor array for indoor air quality monitoring: The role of Au nanoparticles on WO₃, SnO₂, and NiO-based gas sensors. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(2), 1159–1167. <https://doi.org/10.1039/d0ta08743b>
- Lin, T., Lv, X., Li, S., & Wang, Q. (2017). The morphologies of the semiconductor oxides and their gas-sensing properties. *Sensors (Switzerland)*, 17(12), 1–30. <https://doi.org/10.3390/s17122779>
- Lu, Q., Huang, L., Hao, X., Li, W., Wang, B., Wang, T., Liang, X., Liu, F., Wang, C., & Lu, G. (2021). Mixed potential type NH₃ sensor based on YSZ solid electrolyte and metal oxides (NiO, SnO₂, WO₃) modified FeVO₄ sensing electrodes. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 343(April). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130043>
- Narayanan, V., de Buysser, K., Bruneel, E., & Driessche, I. van. (2012). X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) Depth Profiling for Evaluation of La₂Zr₂O₇ Buffer Layer Capacity. *Materials*, 5(12), 364–376. <https://doi.org/10.3390/ma5030364>
- Nayak, Broza, Yoav Y., Rotem Vishinkin, Orna Barash, Morad K. Nakhleh, and Hossam Haick. 2018. 47 Chemical Society Reviews *Synergy between Nanomaterials and Volatile Organic Compounds for Non-Invasive Medical Evaluation*. Royal Society of Chemistry. doi:10.1039/c8cs00317c.
- Bulemo, Peresi Majura, Hee Jin Cho, Nam Hoon Kim, and Il Doo Kim. 2017. “Mesoporous SnO₂ Nanotubes via Electrospinning-Etching Route: Highly Sensitive and Selective Detection of H₂S Molecule.” *ACS Applied Materials and Interfaces* 9(31): 26304–13. doi:10.1021/acsami.7b05241.
- Chung, Kian F. 2014. “Hydrogen Sulfide as a Potential Biomarker of Asthma.” *Expert Review of Respiratory Medicine* 8(1): 5–13. doi:10.1586/17476348.2014.856267.
- Drmosh, Q. A., Yousif Ahmed Al Wajih, Reema Al-Rammah, Mohammad Qamar, and Z. H. Yamani. 2020. “Surface-Engineered WO₃ Thin Films for Efficient NO₂ Sensing.” *Applied Surface Science* 517(February). doi:10.1016/j.apsusc.2020.146235.
- Epifani, Mauro. 2022. “Mechanistic Insights into WO₃ Sensing and Related Perspectives.” *Sensors* 22(6). doi:10.3390/s22062247.
- Garnica, I., A. D. Pérez Santiago, Y. Gochi-Ponce, and F. Paraguay-Delgado. 2013. “Caracterización de Películas Delgadas de SnO₂ Obtenidas Sobre Vidrio Por Aspersión Pirolítica Intermitente Para Celdas Solares Tipo Grätzel.” *Superficies y Vacío* 26(2): 36–41.
- Gong, Jianwei, Quanfang Chen, Weifeng Fei, and Sudipta Seal. 2004. “Micromachined Nanocrystalline SnO₂ Chemical Gas Sensors for Electronic Nose.” *Sensors and Actuators, B: Chemical* 102(1): 117–25. doi:10.1016/j.snb.2004.02.055.
- Hanh, Nguyen Hong, Lai Van Duy, Chu Manh Hung, Nguyen Van Duy, Young Woo Heo, Nguyen Van Hieu, and Nguyen Duc Hoa. 2020. “VOC Gas Sensor Based on Hollow Cubic Assembled Nanocrystal Zn₂SnO₄ for Breath Analysis.” *Sensors and Actuators, A: Physical* 302: 111834. doi:10.1016/j.sna.2020.111834.

- Howard, Christopher J., Vittorio Luca, and Kevin S. Knight. 2002. "High-Temperature Phase Transitions in Tungsten Trioxide-the Last Word?" *Journal of Physics Condensed Matter* 14(3): 377–87. doi:10.1088/0953-8984/14/3/308.
- Hwang, In Sung, Sun Jung Kim, Joong Ki Choi, Jaewan Choi, Hyun-jin Ji, Gyu Tae Kim, Guozhong Cao, and Jong Heun Lee. 2010. "Synthesis and Gas Sensing Characteristics of Highly Crystalline ZnO-SnO₂ Core-Shell Nanowires." *Sensors and Actuators, B: Chemical* 148(2): 595–600. doi:10.1016/j.snb.2010.05.052.
- Ishibashi, C., T. Hyodo, Y. Shimizu, and M. Egashira. 2011. "H₂S Sensing Properties of Macroporous Ln₂O₃-Based Sensors." *Sensor Letters* 9(1): 369–73. doi:10.1166/sl.2011.1482.
- Kim, Hyo Joong, and Jong Heun Lee. 2014. "Highly Sensitive and Selective Gas Sensors Using P-Type Oxide Semiconductors: Overview." *Sensors and Actuators, B: Chemical* 192: 607–27. doi:10.1016/j.snb.2013.11.005.
- Kwoka, M., L. Ottaviano, M. Passacantando, S. Santucci, G. Czepiuk, and J. Szuber. 2005. "XPS Study of the Surface Chemistry of L-CVD SnO₂ Thin Films after Oxidation." *Thin Solid Films* 490(1): 36–42. doi:10.1016/j.tsf.2005.04.014.
- Lee, Jinho, Youngmo Jung, Seung Hyun Sung, Gilho Lee, Jungmo Kim, Jin Seong, Young Seok Shim, Seong Chan Jun, and Seokwoo Jeon. 2021. "High-Performance Gas Sensor Array for Indoor Air Quality Monitoring: The Role of Au Nanoparticles on WO₃, SnO₂, and NiO-Based Gas Sensors." *Journal of Materials Chemistry A* 9(2): 1159–67. doi:10.1039/d0ta08743b.
- Lin, Tingting, Xin Lv, Shuang Li, and Qingji Wang. 2017. "The Morphologies of the Semiconductor Oxides and Their Gas-Sensing Properties." *Sensors (Switzerland)* 17(12): 1–30. doi:10.3390/s17122779.
- Lu, Qi, Lingchu Huang, Xidong Hao, Weijia Li, Bin Wang, Tong Wang, Xishuang Liang, et al. 2021. "Mixed Potential Type NH₃ Sensor Based on YSZ Solid Electrolyte and Metal Oxides (NiO, SnO₂, WO₃) Modified FeVO₄ Sensing Electrodes." *Sensors and Actuators, B: Chemical* 343(April). doi:10.1016/j.snb.2021.130043.
- Narayanan, Vyshnavi, Klaartje de Buysser, Els Bruneel, and Isabel van Driessche. 2012. "X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) Depth Profiling for Evaluation of La₂Zr₂O₇ Buffer Layer Capacity." *Materials* 5(12): 364–76. doi:10.3390/ma5030364.
- Nayak, Arpan Kumar. 2015. "Hierarchical Nanostructured WO₃-SnO₂ for Selective Sensing of Volatile Organic Compounds Arpan."
- Parthibavarman, M., M. Karthik, and S. Prabhakaran. 2019. "Role of Microwave on Structural, Morphological, Optical and Visible Light Photocatalytic Performance of WO₃ Nanostructures." *Journal of Cluster Science* 30(2): 495–506. doi:10.1007/s10876-019-01512-z.
- Parthibavarman, M. 2019. "Role of Microwave on Structural, Morphological, Optical and Visible Light Photocatalytic Performance of WO₃ Nanostructures." *Journal of Cluster Science* 0123456789. doi:10.1007/s10876-019-01512-z.
- Shendage, Sambhaji S., Vithoba L. Patil, Sharadrao A. Vanalakar, Sarita P. Patil, Jalindar L. Bhosale, Jin H. Kim, and Pramod S. Patil. 2020. "Characterization and Gas Sensing Properties of Spin Coated WO₃ Thin Films." *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 234(11–12): 1819–34. doi:10.1515/zpch-2018-1293.
- Shi, Jinjin, Zhixuan Cheng, Liping Gao, Yuan Zhang, Jiaqiang Xu, and Hongbin Zhao. 2016. "Facile Synthesis of Reduced Graphene Oxide/Hexagonal WO₃ Nanosheets Composites with Enhanced H₂S Sensing Properties." *Sensors and Actuators, B: Chemical* 230: 736–45. doi:10.1016/j.snb.2016.02.134.
- Staerz, Anna, Udo Weimar, and Nicolae Barsan. 2016. "Understanding the Potential of WO₃ Based Sensors for Breath Analysis." *Sensors (Switzerland)* 16(11). doi:10.3390/s16111815.
- Toan, Nguyen Van, Chu Manh Hung, Nguyen Van Duy, Nguyen Duc Hoa, Dang Thi Thanh Le, and Nguyen Van Hieu. 2017. "Bilayer SnO₂-WO₃ Nanofilms for Enhanced NH₃ Gas Sensing Performance." *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology* 224(July): 163–70. doi:10.1016/j.mseb.2017.08.004.
- Vajhadin, Fereshteh, Mohammad Mazloum-Ardakani, and Abbas Amini. 2021. "Metal Oxide-based Gas Sensors for the Detection of Exhaled Breath Markers." *Medical Devices & Sensors* 4(1): 1–11. doi:10.1002/mds3.10161.
- Wang, Chuji, and Peeyush Sahay. 2009. "Breath Analysis Using Laser Spectroscopic Techniques: Breath Biomarkers, Spectral Fingerprints, and Detection Limits." *Sensors* 9(10): 8230–62. doi:10.3390/s91008230.
- Wen-Cheun Au, Benedict, Kah Yoong Chan, and Dietmar Knipp. 2019. "Effect of Film Thickness on Electrochromic Performance of Sol-Gel Deposited Tungsten Oxide (WO₃)." *Optical Materials* 94(May): 387–92. doi:10.1016/j.optmat.2019.05.051.
- Wen-Cheun Au, Benedict, Asman Tamang, Dietmar Knipp, and Kah Yoong Chan. 2020. "Post-Annealing Effect on the Electrochromic Properties of WO₃ Films." *Optical Materials* 108(July): 110426. doi:10.1016/j.optmat.2020.110426.
- You, L., X. He, D. Wang, P. Sun, Y. F. Sun, X. S. Liang, Y. Du, and G. Y. Lu. 2012. "Ultrasensitive and Low Operating Temperature NO₂ Gas Sensor Using Nanosheets Assembled Hierarchical WO₃ Hollow Microspheres." *Sensors and Actuators, B: Chemical* 173(2): 426–32. doi:10.1016/j.snb.2012.07.029.
- Yuan, Kai Ping, Li Yuan Zhu, Jia He Yang, Cheng Zhou Hang, Jia Jia Tao, Hong Ping Ma, An Quan Jiang, David Wei Zhang, and Hong Liang Lu. 2020. "Precise Preparation of WO₃@SnO₂ Core Shell Nanosheets for Efficient NH₃ Gas Sensing." *Journal of Colloid and Interface Science* 568: 81–88. doi:10.1016/j.jcis.2020.02.042.
- Zhang, Jing, Xinmao Wang, Yahong Chen, and Wanzhen Yao. 2015. "Exhaled Hydrogen Sulfide Predicts Airway Inflammation Phenotype in COPD." *Respiratory Care* 60(2): 251–58. doi:10.4187/respcare.03519.
- A. K. (n.d.). *Hierarchical Nanostructured WO₃-SnO₂ for Selective Sensing of Volatile Organic Compounds Arpan*.
- Parthibavarman, M. (2019). Role of Microwave on Structural, Morphological, Optical and Visible Light Photocatalytic Performance of WO₃ Nanostructures. *Journal of Cluster Science*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s10876-019-01512-z>
- Parthibavarman, M., Karthik, M., & Prabhakaran, S. (2019). Role of Microwave on Structural, Morphological, Optical and Visible Light Photocatalytic Performance of WO₃ Nanostructures. *Journal of Cluster Science*, 30(2), 495–506. <https://doi.org/10.1007/s10876-019-01512-z>

- Shendage, S. S., Patil, V. L., Vanalakkar, S. A., Patil, S. P., Bhosale, J. L., Kim, J. H., & Patil, P. S. (2020). Characterization and Gas Sensing Properties of Spin Coated WO₃ Thin Films. *Zeitschrift Fur Physikalische Chemie*, 234(11–12), 1819–1834. <https://doi.org/10.1515/zpch-2018-1293>
- Shi, J., Cheng, Z., Gao, L., Zhang, Y., Xu, J., & Zhao, H. (2016). Facile synthesis of reduced graphene oxide/hexagonal WO₃ nanosheets composites with enhanced H₂S sensing properties. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 230, 736–745. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.02.134>
- Siokou, A., Leftheriotis, G., Papaefthimiou, S., & Yianoulis, P. (2001). Effect of the tungsten and molybdenum oxidation states on the thermal coloration of amorphous WO₃ and MoO₃ films. *Surface Science*, 482–485(PART 1), 294–299. [https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(01\)00714-2](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(01)00714-2)
- Staerz, A., Weimar, U., & Barsan, N. (2016). Understanding the potential of WO₃ based sensors for breath analysis. *Sensors (Switzerland)*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/s16111815>
- Toan, N. Van, Hung, C. M., Duy, N. Van, Hoa, N. D., Le, D. T. T., & Hieu, N. Van. (2017). Bilayer SnO₂–WO₃ nanofilms for enhanced NH₃ gas sensing performance. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 224(July), 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.08.004>
- Vajhadin, F., Mazloun-Ardakani, M., & Amini, A. (2021). Metal oxide-based gas sensors for the detection of exhaled breath markers. *Medical Devices & Sensors*, 4(1), 1–11. <https://doi.org/10.1002/mds3.10161>
- Wang, C., & Sahay, P. (2009). Breath analysis using laser spectroscopic techniques: Breath biomarkers, spectral fingerprints, and detection limits. *Sensors*, 9(10), 8230–8262. <https://doi.org/10.3390/s91008230>
- Wen-Cheun Au, B., Chan, K. Y., & Knipp, D. (2019). Effect of film thickness on electrochromic performance of sol-gel deposited tungsten oxide (WO₃). *Optical Materials*, 94(May), 387–392. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.05.051>
- Wen-Cheun Au, B., Tamang, A., Knipp, D., & Chan, K. Y. (2020). Post-annealing effect on the electrochromic properties of WO₃ films. *Optical Materials*, 108(July), 110426. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110426>
- You, L., He, X., Wang, D., Sun, P., Sun, Y. F., Liang, X. S., Du, Y., & Lu, G. Y. (2012). Ultrasensitive and low operating temperature NO₂ gas sensor using nanosheets assembled hierarchical WO₃ hollow microspheres. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 173(2), 426–432. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.07.029>
- Yuan, K. P., Zhu, L. Y., Yang, J. H., Hang, C. Z., Tao, J. J., Ma, H. P., Jiang, A. Q., Zhang, D. W., & Lu, H. L. (2020). Precise preparation of WO₃@SnO₂ core shell nanosheets for efficient NH₃ gas sensing. *Journal of Colloid and Interface Science*, 568, 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.02.042>
- Zhang, J., Wang, X., Chen, Y., & Yao, W. (2015). Exhaled hydrogen sulfide predicts airway inflammation phenotype in COPD. *Respiratory Care*, 60(2), 251–258. <https://doi.org/10.4187/respcare.03519>
- Zheng, H., Ou, J. Z., Strano, M. S., Kaner, R. B., Mitchell, A., & Kalantar-Zadeh, K. (2011). Nanostructured tungsten oxide - Properties, synthesis, and applications. *Advanced Functional Materials*, 21(12), 2175–2196. <https://doi.org/10.1002/adfm.201002477>

Avances y desafíos en el tratamiento de la enfermedad de Parkinson: Un enfoque desde la medicina tradicional

Advances and challenges in the treatment of Parkinson's disease: A traditional medicine approach

Luis Jesús Castillo Pérez¹, Ángel Josabad Alonso Castro²

¹Facultad de Estudios Profesionales Zona Huasteca
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

²División de Ciencias Naturales y Exactas
Universidad de Guanajuato

Autor de correspondencia:
*angeljosabad@ugto.mx

Recibido: 20-08-2024 Aceptado: 10-10-2025 (Artículo Arbitrado)

Resumen

La enfermedad de Parkinson es un trastorno neurodegenerativo y progresivo que afecta al sistema nervioso. Se manifiesta principalmente por la presencia de temblores en alguna de las dos manos, los síntomas aparecen lentamente, hasta que se desarrolla una rigidez muscular o una disminución del movimiento corporal. Esta enfermedad se debe a la pérdida de neuronas que producen dopamina, un neuroquímico que ayuda en la transmisión de señales en el cerebro. Hasta el momento se desconoce exactamente cuál es la causa de esta enfermedad. Esta enfermedad no tiene cura, solo existen tratamientos que ayudan a contrarrestar ciertos síntomas. Este artículo explora diversos aspectos relacionados con los antecedentes y el uso de plantas medicinales para el tratamiento de la enfermedad Parkinson, tales como *Mucuna pruriens*, *Ginkgo biloba*, *Curcuma longa*, *Bacopa monnieri*, y *Withania somnifera*, reconocidos por sus propiedades neuroprotectoras y terapéuticas. El uso de plantas medicinales y sus metabolitos secundarios podrían proteger al ser humano para que desarrolle la enfermedad del Parkinson. Sin embargo, se requiere estudios preclínicos y clínicos para garantizar el uso seguro de plantas medicinales.

Palabras clave: Neurodegeneración, herbolario, medicamento, metabolitos secundarios, terapia.

Abstract

Parkinson's disease is a progressive neurodegenerative disorder that affects the nervous system. It manifests primarily as tremors in one of the hands. Symptoms appear slowly, eventually leading to muscle rigidity or decreased body movement. This disease is due to the loss of neurons that produce dopamine, a neurochemical that aids in the transmission of signals in the brain. The exact cause of this disease is currently unknown. This disease has no cure; there are treatments to counteract certain symptoms. This article explores various aspects related to the background and use of medicinal plants for the treatment of Parkinson's disease, such as *Mucuna pruriens*, *Ginkgo biloba*, *Curcuma longa*, *Bacopa monnieri*, and *Withania somnifera*, recognized for their neuroprotective and therapeutic properties. The use of medicinal plants and their secondary metabolites could protect humans from developing Parkinson's disease. However, preclinical and clinical studies are required to ensure the safe use of medicinal plants.

Keywords: Neurodegeneration, herbology, medication, secondary metabolites, therapy.

Introducción

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, las enfermedades neurodegenerativas son la séptima causa de muerte a nivel mundial y están presentes en 50 millones de personas, lo cual representa, aproximadamente, un 5 % de la población de adultos mayores. Además, se estima que para el año 2050 habrá 152 millones de personas con alguna

enfermedad neurodegenerativa en el mundo (OMS, 2018). En el 2019 hubo 8.5 millones de personas con la enfermedad de Parkinson y causó 329 000 muertes en el mundo. La prevalencia de esta enfermedad se ha duplicado en los últimos 25 años (OMS, 2018). En México se estima que hay 50 nuevos por cada 100 mil habitantes cada año (INAPAM, 2019).

El Parkinson es una enfermedad neurodegenerativa crónica que afecta principalmente el movimiento y es causada por la pérdida de células nerviosas en una parte del cerebro llamada sustancia negra. Como se muestra en la Figura 1, este trastorno progresivo se manifiesta a través de síntomas como temblores, rigidez muscular, lentitud de movimientos (bradicinesia), dificultad para caminar y problemas de equilibrio (Bloem et al., 2021).

La enfermedad de Parkinson se dio a conocer en 1817 por James Parkinson. Sin embargo, los primeros registros de síntomas similares al Parkinson se pueden encontrar en la Biblia” (libros de Job y Eclesiastés), donde se menciona en dos ocasiones a temblores en las manos de los ancianos (Poewe, 2006). Existen también referencias más amplias en los textos médicos ayurvédicos, que recogen las doctrinas medicas del periodo posterior al siglo VII A.C, así como descripciones en la medicina del antiguo Egipto y en documentos mesopotámicos, los cuales describen condiciones caracterizadas por temblores y dificultades motoras (Poewe et al., 2017; Raudino, 2012).

A lo largo del siglo XX se realizaron importantes descubrimientos en la fisiopatología del Parkinson, identificándose la pérdida de neuronas productoras de dopamina en la sustancia negra del cerebro como una de las principales causas de este trastorno. Dicho hallazgo condujo al desarrollo de tratamientos farmacológicos, como la levodopa, que revolucionaron la gestión de la enfermedad al mejorar significativa-

mente los síntomas motores (Cilia et al., 2020). Paralelamente, las prácticas de la medicina tradicional en diversas culturas han incluido tratamientos herbarales, técnicas de acupuntura y ejercicios terapéuticos como el Tai Chi y el Qi Gong, utilizados durante siglos para mitigar los síntomas de enfermedades similares al Parkinson (Borja-Cabrera et al., 2023). Estos métodos antiguos están siendo redescubiertos y evaluados en la actualidad, ofreciendo enfoques complementarios valiosos en el manejo de esta compleja enfermedad.

Medicinal tradicional relacionada con el Parkinson

A lo largo de la historia, diversas culturas han utilizado plantas medicinales para tratar los síntomas del Parkinson y otras enfermedades neurodegenerativas, las cuales provocan una pérdida funcional (ataxia) o disfunción sensorial (demencia). Estas plantas, aprovechadas por sus propiedades neuroprotectoras y terapéuticas, han sido una parte integral de la medicina tradicional en distintas partes del mundo (Srivastav et al., 2017; Lozano et al., 2022).

Entre las plantas más utilizadas se encuentran *Mucuna pruriens*, una planta originaria de la India, la cual ha sido utilizada en la medicina ayurvédica durante siglos. Los granos de esta planta contienen altas concentraciones de levodopa natural, un precursor de la dopamina, que es el mismo compuesto utilizado en los tratamientos farmacológicos modernos para la enfermedad de Parkinson. El uso de esta planta ha demostrado mejorar los síntomas motores



Figura 1. Infografía de la enfermedad de Parkinson
Fuente: Elaboración propia.

en los pacientes con este tipo de enfermedades (Rai et al., 2020). Otra de las plantas conocidas por sus propiedades neuroprotectoras y que tienen antecedentes para mejorar la circulación sanguínea en el cerebro, además de reducir el daño oxidativo, es el *Ginkgo biloba*, el cual ha sido utilizado para ralentizar la progresión de enfermedades neurodegenerativas como el Parkinson (Yu et al., 2021).

La cúrcuma (*Curcuma longa*), ampliamente utilizada en la medicina ayurvédica y en la cocina india, contiene curcumina, un potente antiinflamatorio y antioxidante. La curcumina ha mostrado efectos neuroprotectores en estudios preclínicos, sugiriendo su potencial para proteger las neuronas dopaminérgicas afectadas por el Parkinson (Srivastav et al., 2017; Nebrisi, 2021). Otras dos plantas utilizadas en la medicina ayurvédica para el tratamiento de enfermedades neurodegenerativas son *Bacopa monnieri* y *Withania somnifera*. La primera es conocida por sus efectos potenciadores de la memoria y sus propiedades neuroprotectoras. Investigaciones sugieren que puede ayudar a reducir el estrés oxidativo y mejorar la función cognitiva, lo que podría ser beneficioso para los pacientes con la enfermedad de Parkinson. En el caso de *W. somnifera* se reconoce por sus propiedades adaptogénicas y neuroprotectoras. Los estudios sugieren que puede ayudar a proteger las neuronas y mejorar la función motora en estos pacientes (Srivastav et al., 2017; Dar y Ahmad, 2020).

En México, la riqueza de la biodiversidad ha permitido el uso de una amplia variedad de plantas medicinales en el tratamiento de enfermedades neurodegenerativas. Sin embargo, hasta el momento no existe un reporte que agrupe todas las plantas mexicanas utilizadas como potencial tratamiento contra esta enfermedad y no se sabe cuántas tienen registros que comprueben de forma científica este potencial medicinal. Algunas plantas, a pesar de que no son nativas de México, son ampliamente utilizadas por la población mexicana, como el caso de la valeriana (*Valeriana officinalis*), el maracuyá (*Passiflora incarnata*), la hierba de San Juan (*Hypericum perforatum*) y la marihuana (*Cannabis sativa*). En tanto que, para el caso de plantas nativas mexicanas, se tiene el registro del uso de la damiana (*Turnera diffusa*) y el estafiate (*Artemisia ludoviciana*) (Corona, 2018; Din et al., 2020).

Estas plantas, utilizadas tradicionalmente en diversas culturas, están siendo cada vez más investigadas por la ciencia moderna y ofrecen enfoques complementarios que podrían mejorar la calidad de vida de los pacientes con la enfermedad de Parkinson, integrando lo mejor de la medicina tradicional y la contemporánea.

Compuestos de origen natural utilizados para el tratamiento del Parkinson

Los metabolitos secundarios son compuestos orgánicos producidos por las plantas que, aunque no son esenciales para su crecimiento y desarrollo, desempeñan un papel crucial en su interacción con el entorno y en su defensa contra herbívoros y patógenos. Muchos de estos compuestos han demostrado tener propiedades terapéuticas significativas y algunos han sido utilizados en el tratamiento de enfermedades neurodegenerativas como el Parkinson.

Algunos de los metabolitos secundarios conocidos por su potencial neuroprotector en la enfermedad de Parkinson son, por ejemplo, la levodopa, un precursor de la dopamina que se encuentra naturalmente en las semillas de la planta *Mucuna pruriens* y otras plantas más. La levodopa (Figura 2) es usada para mitigar los síntomas motores de la enfermedad de Parkinson, ya que se convierte en dopamina en el cerebro, compensando la deficiencia de este neurotransmisor en los pacientes (Srivastav et al., 2017). Sin embargo, este fármaco ocasiona reacciones adversas como náusea, baja presión arterial, confusión, alucinaciones, estreñimiento, boca seca, diarrea, pérdida del apetito, entre otros (Srivastav et al., 2017).

Otro de los compuestos de origen natural utilizados para disminuir los síntomas en la enfermedad de Parkinson es la curcumina (Figura 2), la cual posee propiedades antiinflamatorias y antioxidantes que pueden proteger las neuronas dopaminérgicas de los daños causados por el estrés oxidativo y la inflamación, dos factores clave en la progresión de esta enfermedad (Nebrisi, 2021).

La hipericina y la hiperforina (Figura 2) son compuestos obtenidos de plantas medicinales que son utilizados para tratar la depresión y han mostrado efectos neuroprotectores. Estas moléculas se encuentran presentes en las flores y hojas de la hierba de San Juan y se ha comprobado su potencial para proteger las neuronas y mejorar la función cognitiva

en el Parkinson (Velingkar et al., 2017). En diversos países ya se comercializan y están disponibles como suplemento en forma de comprimidos, bebidas y preparaciones tópicas. Sin embargo, es importante mencionar que la hierba de San Juan, aunque puede ser eficaz para tratar la depresión, se debe tener especial cuidado al consumir sus productos, ya que interactúa con muchos medicamentos y puede causar efectos secundarios graves tales como mareos, fatiga, confusión, sedación, ansiedad, entre otros (Velingkar et al., 2017).

Dentro del grupo de los flavonoides, la apigenina ha mostrado propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, y algunos estudios sugieren que puede ayudar a proteger las neuronas y mejorar la función motora en la enfermedad de Parkinson. Este compuesto se puede encontrar en varias plantas medicinales como la manzanilla (*Matricaria chamomilla*). Otros compuestos que se encuentran dentro de este grupo de fitoquímicos son el resveratrol (Figura 2), un polifenol presente en la piel de las uvas, el vino tinto y algunas bayas, y la baicalina, un flavonoide extraído de la raíz de *Scutellaria baicalensis*, utilizada en la medicina tradicional china. Estas moléculas son conocidas por sus efectos antioxidantes y antiinflamatorios, y estudios preclínicos han demostrado su potencial para proteger las neuronas y mejorar la función motora en modelos animales de Parkinson (Balakrishnan et al., 2021).

Estos metabolitos secundarios, provenientes de diversas plantas medicinales, ofrecen una promesa

significativa en el tratamiento de esta enfermedad. Su integración en terapias complementarias puede proporcionar enfoques más holísticos y efectivos, mejorando la calidad de vida de los pacientes y abordando tanto los síntomas motores como los no motores de esta enfermedad neurodegenerativa.

Conclusiones

México es un país rico en diversidad biológica. La medicina tradicional Mexicana contiene información de plantas que se usan para el tratamiento empírico de enfermedades relacionadas con el Sistema Nervioso. Sin embargo, muchas plantas medicinales no tienen estudios científicos que validen esos efectos medicinales. En nuestro grupo de investigación estamos realizando investigaciones que aprovechan las plantas medicinales Mexicanas para obtener compuestos que tengan efectos neuroprotectores. Estos estudios serán clave para el desarrollo de fármacos con propiedades terapéuticas.

Referencias

- Balakrishnan, R., Azam, S., Cho, D. Y., Su-Kim, I., Choi, D. K. (2021). Natural phytochemicals as novel therapeutic strategies to prevent and treat Parkinson's disease: current knowledge and future perspectives. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* 2021(1): 6680935.
- Bloem, B. R., Okun, M. S., Klein, C. (2021). Parkinson's disease. *The Lancet* 397(10291): 2284-2303.
- Borja-Cabrera, A. R., Espín-López, V. I., Morales-Mayorga, S. G., Simbaña-Quishpi, M. A., Córtez-Flores, C. R., Heredia-Nugra, S. M. (2023). Terapias alternativas en el manejo de pacientes con enfermedad de Parkinson. *Salud, Ciencia y Tecnología* 3: 490-490.

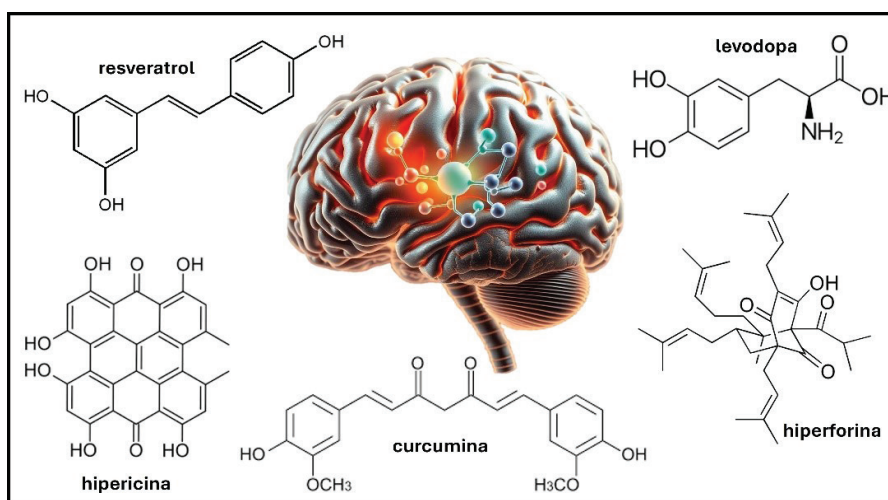


Figura 2. Compuestos que disminuyen síntomas de la enfermedad de Parkinson.
Fuente: Elaboración propia.

- Cilia, R., Cereda, E., Akpalu, A., Sarfo, F. S., Cham, M., Laryea, R., Obese, V., Oppon, K., Sorbo, F., Bonvegna, S., Zecchinelli, A., Pezzoli, G. (2020). Natural history of motor symptoms in Parkinson's disease and the long-duration response to levodopa. *Brain* 143(8): 2490-2501.
- Corona, J. C. (2018). Natural compounds for the management of Parkinson's disease and attention deficit/hyperactivity disorder. *BioMed research international* 2018(1): 4067597.
- Dar, N. J., Ahmad, M. (2020). Neurodegenerative diseases and *Withania somnifera* (L.): An update. *Journal of ethnopharmacology* 256: 112769.
- Din, I., Anwar, M., Rayees, S., Malik, F. (2020). Traditional plant compounds for the treatment of neuropsychiatric disorders. *Plant-derived Bioactives: Production, Properties and Therapeutic Applications*, 435-459.
- Instituto Nacional de las Personas Adultas Mayores (INAPAM), 2019. <https://www.gob.mx/inapam/es/articulos/parkinson-segunda-enfermedad-neurodegenerativa-mas-frecuente-en-personas-mayores-de-50-anos?idiom=es>, 11 de abril de 2019, accesado el 15 de agosto de 2024
- Nebrisi, E. E. (2021). Neuroprotective activities of curcumin in Parkinson's disease: a review of the literature. *International Journal of Molecular Sciences* 22(20): 11248.
- Poewe, W. (2006). The natural history of Parkinson's disease. *Journal of Neurology*, 253 (Suppl 7): vii2-vii6.
- Poewe, W., Seppi, K., Tanner, C. M., Halliday, G. M., Brundin, P., Volkmann, J., Schrag A. E., Lang, A. E. (2017). Parkinson disease. *Nature reviews Disease primers*, 3(1): 1-21.
- Rai, S. N., Chaturvedi, V. K., Singh, P., Singh, B. K., Singh, M. P. (2020). *Mucuna pruriens* in Parkinson's and in some other diseases: recent advancement and future prospective. *3 Biotech* 10: 1-11.
- Raudino, F. (2012). The Parkinson disease before James Parkinson. *Neurological Sciences* 33: 945-948.
- Srivastav, S., Fatima, M., Mondal, A. C. (2017). Important medicinal herbs in Parkinson's disease pharmacotherapy. *Biomedicine & Pharmacotherapy* 92: 856-863.
- Velingkar, V. S., Gupta, G. L., Hegde, N. B. (2017). A current update on phytochemistry, pharmacology and herb - drug interactions of *Hypericum perforatum*. *Phytochemistry Reviews* 16: 725-744.
- WHO (2018). The global dementia observatory reference guide. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/272669> [Consultado, Julio 31, 2024].
- Yu, D., Zhang, P., Li, J., Liu, T., Zhang, Y., Wang, Q., Zhang, J., Lu, X., Fan, X. (2021). Neuroprotective effects of *Ginkgo biloba* dropping pills in Parkinson's disease. *Journal of pharmaceutical analysis*, 11(2): 220-231.



Repositorio Institucional de la Universidad Tecnológica de la Mixteca (RI-UTM)

<http://repositorio.utm.mx/>



El **RI-UTM** es una plataforma que emplea estándares internacionales y mecanismos de acceso abierto para albergar y difundir publicaciones e información académica, científica y tecnológica generada en nuestra institución siempre y cuando haya pasado por un proceso de revisión. La visibilidad de esta producción se logra a través de la conexión con el Repositorio Nacional (RN) de CONACYT.

¿Qué se puede publicar en el RI-UTM?

Publicaciones científicas que hayan pasado por un proceso de revisión por pares y que a su vez hayan sido aceptados para su publicación.

¿Se puede difundir en el repositorio información publicada en revistas y congresos?

Sí, la mayoría de los acuerdos de derechos de autor permiten que el investigador difunda sus publicaciones (ya sea la versión publicada o el preprint/borrador) en el repositorio institucional que le corresponde.

¿Porque publicar en el RI-UTM?

- Esta incorporado al Repositorio Nacional. Actualmente se tienen 296 recursos cosechados, principalmente tesis de posgrado.
- Difundir y preservar la producción científica de manera libre, inmediata, gratuita y protegida.
- Acelerar el desarrollo del conocimiento.

¿Cómo depositar?

<http://repositorio.utm.mx/Files/informacionDepositarios.pdf>



Licencia de publicación



Colecciones del repositorio



Artículos



Revista TEMAS



Libros



Tesis de posgrado

Contacto

repositorio@mixteco.utm.mx

Extensión: 312



Fronteras de la ciencia

Ciencia	65
Salud	66
Tecnología	67
Paleontología	67
Física Cuántica	68

Ciencia

Un nuevo método para mapear en 3D la temperatura en tejidos biológicos

La medición precisa de la temperatura en el interior de los tejidos biológicos es una necesidad creciente en biomedicina. Los procesos fisiológicos y patológicos están acompañados de variaciones térmicas muy sutiles, y su detección puede proporcionar información crítica en áreas como el diagnóstico de tumores, la monitorización de terapias o el estudio del metabolismo celular. Hasta ahora, la mayoría de las técnicas de termometría lumínica se limitaban a obtener imágenes en dos dimensiones, lo que supone un obstáculo para comprender la com-

plejidad de la difusión del calor en un medio que, por naturaleza, es tridimensional.

La estrategia capaz de obtener imágenes térmicas en tres dimensiones se basó en el uso de nanopartículas de sulfuro de plata (Ag_2S). Estas cumplen tres requisitos esenciales: su emisión se produce en el rango infrarrojo cercano, lo que permite mayor penetración en tejidos; su espectro presenta cambios sensibles dentro del rango fisiológico de temperatura (20–50 °C); y la emisión se solapa con una de las bandas de absorción del agua, lo que hace que la señal se distorsione en función del grosor del tejido atravesado.

Este último punto es crucial, ya que las distorsiones espectrales inducidas por el tejido contienen información sobre la profundidad a la que se encuentran las nanopartículas. De esta manera, la señal de luminiscencia no solo refleja cambios de temperatura, sino también la ubicación espacial de las partículas en el interior del organismo. El reto consistía en procesar esas señales complejas y extraer de ellas información fiable de temperatura y profundidad al mismo tiempo.

Fuente: <https://www.muyinteresante.com/fundacion/mapeo-3d-temperatura-tejidos.html>

Un nuevo misterio en el cosmos: descubren una fuente de radio y rayos X que desconcierta a la ciencia.

Un hallazgo inesperado desconcierta a la astronomía: ASKAP J1832–0911, una fuente cósmica que emite radio y rayos X. El descubrimiento desafía lo que sabemos sobre magnetares y enanas blancas, y abre una nueva incógnita en el estudio del universo.

Gracias a los avances tecnológicos en telescopios y análisis de datos, fenómenos antes invisibles están saliendo a la luz. Uno de ellos es el de los llamados “fenómenos transitorios

de largo periodo” (Long Period Transients, o LPT, por sus siglas en inglés): son fuentes que emiten pulsos de radio con una periodicidad inusualmente larga, de decenas de minutos, mucho mayor que la de los conocidos púlsares.

Hasta hace poco, estos objetos eran detectables solo en radio, y su naturaleza seguía siendo un enigma. Pero eso acaba de cambiar. Un equipo internacional ha descubierto el primer LPT que también emite rayos X. Su nombre: ASKAP J1832–0911. Este hallazgo no solo abre una nueva ventana al estudio de estos objetos, sino que desafía las teorías existentes sobre

la física de los objetos compactos en nuestra galaxia.

ASKAP J1832–0911 fue detectado en diciembre de 2023 por el telescopio ASKAP, en el marco del proyecto VAST, que explora el cielo en busca de fuentes de radio variables. Lo que llamó la atención fue su inusual brillo: alcanzó picos de hasta 20 janskys (una unidad que mide la intensidad de la radioemisión), un valor extraordinariamente alto para este tipo de objetos.

Fuente: <https://www.muyinteresante.com/fundacion/misterio-cosmos-fuente-radio-rayos-x.html>

Adiós al bisturí: esta es la técnica que combate tumores sin cirugía

Imagina poder tratar un tumor con una precisión milimétrica, sin necesidad de pasar por el quirófano, sin bisturís, sin anestesia y en sesiones tan cortas como tomarse un café. Parece de película, pero es una realidad cada vez más presente en nuestras vidas gracias a la Radioterapia Corporal Estereotáctica de Alta Precisión, más conocida como SBRT.

Aunque su nombre todavía no suene mucho fuera del ámbito médico, esta técnica lleva más de 15 años cambiando silenciosamente la vida de miles de pacientes. Y lo mejor es que sigue evolucionando y ampliando sus posibilidades cada año. Hoy en día, la SBRT ya se considera una opción eficaz e incluso menos invasiva que la cirugía, sobre todo para aquellas personas que

no pueden operarse. Se trata, además, de una técnica multidisciplinar que requiere la intervención coordinada de oncólogos radioterápicos, radiofísicos, técnicos y personal de enfermería especialmente entrenado, lo que garantiza la seguridad y precisión del tratamiento.

La clave de la SBRT está en su capacidad para atacar con una altísima precisión tumores de pequeño tamaño o localizados, como los que aparecen en pulmón o próstata. También ha demostrado ser muy útil en casos donde el cáncer se ha extendido solo a unas pocas zonas (lo que se conoce como *metástasis limitadas*), permitiendo un control más localizado y eficaz de la enfermedad.

Uno de los aspectos más innovadores de la radioterapia SBRT es el uso de la inteligencia artificial (IA) en la planificación de los tratamientos. A través de

algoritmos avanzados, los sistemas de IA son capaces de analizar imágenes y datos clínicos de los pacientes para planificar el tratamiento de manera mucho más precisa y rápida que en métodos anteriores. La IA no solo mejora la precisión en la localización del tumor, sino que también optimiza la distribución de la dosis de radiación, asegurando que se administre de manera más eficiente y segura.

Fuente: <https://www.muyinteresante.com/fundacion/categoria-salud/sbrradioterapia-tecnica-sin-cirugia-tumores.html>

¿Qué papel juegan los telómeros en la longevidad?

Cada vez que una célula se divide, pierde parte de su historia: los telómeros se acortan. Este desgaste, invisible pero implacable, podría ser la clave del envejecimiento.

Algunos defienden que el envejecimiento es una enfermedad, otros especulan que podría ser parte del desarrollo, una fase más. Sin embargo, la idea generalmente aceptada por los científicos es que se trata de un deterioro del organismo que nos vuelve más susceptibles a padecer enfermedades neurodegenerativas, cardiovasculares, óseas, cánceres y un largo etcétera, culminando con la muerte. El deterioro comienza a nivel microscópico, celular.

Todos nosotros provenimos de una célula, el cigoto, que se dividió en

dos células embrionarias, que a su vez se dividieron en otras dos y así sucesivamente. Estas divisiones continúan hasta que se forma un individuo con sus billones de células, pero no se detienen ahí. Nuestros órganos también se renuevan mediante divisiones celulares, por lo que al final nuestro genoma se ha copiado billones de veces. Sin embargo, nuestro genoma, va perdiendo en cada división celular repeticiones TTAGGG de los extremos del cromosoma. Pero, ¿y a qué se debe? Las proteínas encargadas de copiar nuestro genoma no pueden copiar completamente los extremos. Es así como tras cada copia se pierde información y se van acortando los telómeros.

Si nos hacemos una herida de dimensiones moderadas, se epiteliza y regenera, incluso si hemos precisado puntos de sutura. Desde la regene-

ración de una mitad seccionada a la cicatrización de una herida, pasando por la regeneración de una extremidad, se necesitan células en división que repongan ese material perdido. A medida que envejecemos, los humanos perdemos esa capacidad de regeneración, nuestras heridas tardan más en sanar. Las células de nuestro cuerpo ya no se dividen tan fácilmente como antes; tienen un límite marcado, entre otros, por los telómeros.

Fuente: <https://www.muyinteresante.com/fundacion/categoria-salud/telomeros-envejecimiento-celular-longevidad.html>

Descubren que la piel de cebolla bloquea el 99.9 % de los rayos UV: el nuevo escudo vegetal que podría revolucionar las celdas solares

Este descubrimiento científico convierte un residuo vegetal común en la clave para proteger las celdas solares del futuro.

Las capas externas de una cebolla roja, esas que terminan en el fondo del cubo de basura, están hechas de algo más que celulosa y pigmentos. Contienen antocianinas, compuestos con una afinidad natural por la luz ultravioleta. Y eso, precisamente, es lo que ha captado la atención de un grupo de investigadores decididos a cambiar cómo protegemos nuestros paneles solares.

La investigación, publicada en *ACS Applied Optical Materials* y lidera-

da por científicos de las universidades de Turku y Aalto (Finlandia), junto con Wageningen (Países Bajos), ha comparado por primera vez cuatro filtros solares elaborados con materiales bio-basados. Uno de ellos, elaborado con nanocelulosa teñida con extracto de piel de cebolla roja (*Allium cepa*), superó incluso al estándar comercial basado en plástico PET. No es una metáfora: bloqueó el 99.9 % de la radiación ultravioleta por debajo de los 400 nanómetros, una cifra que dejó atrás a los filtros industriales hechos de derivados del petróleo.

Pero la verdadera sorpresa no fue solo su capacidad para detener la luz dañina, sino el hecho de que, al mismo tiempo, permitía que más del 80 % de la luz visible e infrarroja (entre los 650 y los 1100 nanómetros) pasara sin obstáculos. Y todo ello sin perder eficacia durante más de 1000 horas

de exposición continua a luz artificial, equivalente a un año completo bajo el sol centroeuropeo.

Los científicos no lo ocultan: este hallazgo no es solo técnico, es simbólico. En un mundo saturado de plásticos y urgencias medioambientales, transformar residuos vegetales en soluciones de alta tecnología tiene una carga cultural potente. La cebolla, omnipresente en la cocina, humilde en su apariencia, se convierte aquí en la inesperada heroína de una batalla contra la obsolescencia de la energía limpia.

Fuente: <https://www.muyinteresante.com/tecnologia/descubren-piel-cebolla-protector-solar-eficaz-celulas-fotovoltaicas.html>

Descubren uno de los dinosaurios más antiguos de cuello largo: vivió hace 230 millones de años en los Andes

En los altos valles de los Andes argentinos, a más de 3000 metros de altitud, un grupo de paleontólogos ha realizado un hallazgo que podría cambiar para siempre lo que sabemos sobre los primeros pasos evolutivos de los dinosaurios de cuello largo. En un remoto y árido paraje de la provincia de La Rioja, un esqueleto casi completo, perfectamente articulado y sorprendentemente bien conservado, ha salido a la luz. Se trata de una nueva especie de dinosaurio, bautizada como *Huayracursor jaguensis*, cuyo estudio ha sido publicado en la prestigiosa revista *Nature*.

No es solo un fósil más en una larga lista de descubrimientos en Sudamérica. Este ejemplar, con su ana-

tomía intermedia entre los pequeños bípedos de cuello corto y los gigantes cuadrúpedos del Jurásico, aporta pistas clave sobre cómo y cuándo se originaron dos de los rasgos más característicos de los llamados sauropodomorfos: el gran tamaño corporal y el alargamiento del cuello.

El *Huayracursor jaguensis* vivió hace unos 230 millones de años, en plena era Triásica, en un momento de gran transformación ecológica y climática. Se estima que medía cerca de dos metros de largo y pesaba unos 18 kilogramos, lo que lo hace relativamente pequeño en comparación con sus descendientes jurásicos, pero lo suficientemente grande como para destacar entre sus contemporáneos.

El estudio detallado del esqueleto, liderado por un equipo argentino del CONICET y del Centro Regional de Investigaciones Científicas de La Rioja,

no solo ha permitido definir una nueva especie, sino también reformular algunas ideas clave sobre la evolución temprana de los dinosaurios.

Si algo demuestra *Huayracursor jaguensis*, es que la historia de los dinosaurios está lejos de haberse escrito completamente. Cada nuevo hallazgo desafía verdades asumidas, abre nuevas preguntas y revela lo mucho que aún ignoramos sobre los primeros pasos de estas criaturas fascinantes. Este pequeño corredor de los vientos – como sugiere su nombre, derivado del quechua y el topónimo local – podría tener un impacto tan profundo como el de los gigantes a los que precedió.

Fuente: <https://www.muyinteresante.com/ciencia/descubren-dinosaurio-cuello-largo-andes-argentina.html>

Cuando la física cuántica se parece a una red social: los fotones siguen al grupo

Una cafetería llena suele ser más atractiva que una vacía. Aunque el café sea el mismo, algo nos empuja a sentarnos donde ya hay otros. Esta lógica social parece exclusiva de los humanos, pero un grupo de físicos en Alemania ha descubierto que los fotones, esas partículas de luz que asociamos con la física más fría y matemática, también exhiben una conducta sorprendentemente parecida: prefieren “agruparse” cuando detectan que otros lo han hecho antes.

La investigación, realizada por el equipo del profesor Martin Weitz en la Universidad de Bonn, ha mostrado que los fotones no tienden a organizarse colectivamente hasta que no hay suficientes en juego. Una vez superado cierto umbral, se comportan como si buscaran compañía, optando por un estado energético que ya está siendo ocupado por más partículas. Este comportamiento fue descrito de forma detallada en el artículo “Thermodynamics and State Preparation in a Two-State System of Light”, publicado en *Physical Review Letters*, y podría abrir puertas a nuevas tecnologías en

el diseño de láseres más potentes y sistemas cuánticos controlados.

En condiciones normales, los fotones se propagan libremente. Pero en este experimento fueron encerrados en una microcavidad óptica, un espacio diminuto lleno de una solución de colorante especial. Allí, podían elegir entre dos niveles de energía casi idénticos, lo que equivale a decir que podían adoptar dos “colores” ligeramente distintos.

Durante las primeras etapas del experimento, los fotones se distribuían casi por igual entre los dos niveles disponibles. Pero una vez que el número total aumentaba, la mayoría comenzaba a elegir el estado que ya tenía más ocupantes. Esta transición, según los datos, ocurre de forma progresiva, no abrupta. A diferencia de una condensación de Bose-Einstein, que puede presentar una transición clara de fase, en este caso se observa un cambio suave, un fenómeno denominado crossover.

Este resultado tiene consecuencias reales para el diseño de nuevas fuentes de luz coherente, como láseres más potentes o más estables. Para que diferentes fuentes de láser se sumen correctamente, sus ondas deben estar “en fase”, es decir, perfec-

tamente sincronizadas. Si no lo están, pueden interferirse negativamente y anularse entre sí.

Otro aspecto destacado del trabajo es la simplicidad relativa de su implementación experimental, al menos en comparación con otras plataformas cuánticas. Utilizando una microcavidad óptica rellena de colorante y espejos con formas cuidadosamente diseñadas, el equipo logró crear un sistema controlado donde la dinámica de los fotones podía seguirse en tiempo real.

Que los fotones no tengan conciencia no impide que actúen como si tuvieran en cuenta lo que hacen los demás. Este fenómeno, lejos de ser anecdótico, se basa en leyes estadísticas muy bien conocidas, como la distribución de Bose-Einstein. Pero verlas actuar en un sistema tan reducido y con solo dos posibles estados —algo tan simple como elegir entre dos opciones casi idénticas— da un nuevo significado a lo que llamamos “comportamiento colectivo”.

Fuente: <https://www.muyinteresante.com/ciencia/fotones-comportamiento-colectivo.html>

Recopilación

Revista *TEMAS* de Ciencia y Tecnología

Oferta Educativa de Estudios de Maestría Universidad Tecnológica de la Mixteca

Introducción

La Universidad Tecnológica de la Mixteca ha sido concebida como instrumento cultural de transformación del entorno social además de los fines tradicionales de las universidades clásicas, tiene como funciones:

- Enseñanza
- Investigación
- Difusión Cultural
- Promoción del Desarrollo

Con el correcto desempeño de estas funciones y un campus que cuente con instalaciones modernas, la UTM busca alcanzar niveles de excelencia a través de una enseñanza disciplinada con profesores y alumnos de tiempo completo.

Historia

La Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM), está localizada en la ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca. Inició sus actividades en febrero de 1990, aunque formalmente fue inaugurada el 22 de febrero de 1991 con la presencia del Presidente de México, y el Presidente de Costa Rica, así como del Gobernador del estado de Oaxaca y del Secretario de Educación Pública.

La UTM tiene como fin coadyuvar a la transformación completa de la economía y la sociedad de la Región Mixteca, del Estado y del País, a través de la formación de profesionistas de calidad que sean promotores del crecimiento económico, por lo que proporciona a los jóvenes la posibilidad de cursar una carrera profesional sin desplazarse a otros lugares.

Modelo educativo

La UTM se crea con un nuevo modelo de universidad cuyos criterios básicos de funcionamiento están referidos a la calidad académica para el desarrollo de sus funciones sustantivas de docencia, investigación, difusión de la cultura y promoción al desarrollo. Dicho modelo comprende una dedicación de tiempo completo a los estudios de licenciatura y de posgrado, por parte de estudiantes y profesores, los cuales interactúan en diversas actividades académicas como las clases teóricas, las prácticas de campo y laboratorio, las actividades programadas en salas de cómputo, biblioteca y laboratorios de idiomas.

Es una política permanente de la universidad la de garantizar las mejores condiciones de infraestructura para el adecuado desempeño académico de estudiantes y profesores, de tal forma que actualmente la UTM cuenta con instalaciones amplias, modernas y completamente equipadas conforme a las áreas de formación profesional y de investigación que realiza.

En los planes y programas de estudio de licenciatura y de posgrado se establece un equilibrio entre la formación teórica y la práctica, se tienen disponibles talleres especializados como los de:

- Plásticos
- Madera y metal
- Mecánica
- Procesamiento de alimentos
- Electrónica
- Cerámica y serigrafía

Así como laboratorios de:

- Física
- Química
- Telecomunicaciones
- Salas de idiomas

Oferta Académica de Estudios de Maestría

La Universidad Tecnológica de la Mixteca ofrece los siguientes estudios de Maestría.

- Maestría en Administración de Negocios
- Maestría en Ciencia de Datos
- Maestría en Ciencias de Materiales
- Maestría en Ciencias: Productos Naturales y Alimentos
- Maestría en Electrónica: Opción en Sistemas Inteligentes Aplicados
- Maestría en Ingeniería de Software
- Maestría en Inteligencia Artificial
- Maestría en Medios Interactivos
- Maestría en Modelación Matemática
- Maestría en Robótica
- Maestría en Tecnología Avanzada de Manufactura

Maestría en Administración de Negocios

La Maestría en Administración de Negocios tiene como misión formar profesionales altamente calificados en el ámbito de la Administración. Este programa se centra en la teoría empresarial y la práctica de la gestión administrativa, preparando a los estudiantes para que ocupen puestos clave en la toma de decisiones estratégicas de empresas tanto privadas como públicas, bajo el cambiante entorno económico nacional. Se espera que los egresados del programa sean capaces de emprender su propia empresa o implementar mejoras en aquellas donde desarrollen su actividad laboral y de esta forma generen empleos que coadyuven en el crecimiento y desarrollo económico, o en su caso continúen con su formación académica. (ver Fotografía 1).

Maestría en Ciencia de Datos

La Universidad Tecnológica de la Mixteca ofrece la Maestría en Ciencia de Datos, en la modalidad de estudios a distancia (en línea), para aquellos que no

tienen la posibilidad de asistir físicamente. La Maestría en Ciencia de Datos es un programa profesionalizante que está enfocado en satisfacer la creciente demanda nacional e internacional de profesionistas con conocimientos sólidos en la extracción de información a partir de grandes volúmenes de datos, así como a su análisis y modelado con la intención de ayudar a la toma de decisiones. (ver la Fotografía 2).

Maestría en Ciencias de los Materiales

La Ciencia de Materiales se encarga de la síntesis y el estudio de las propiedades mecánicas, eléctricas, ópticas y magnéticas de nuevos materiales, estableciendo relaciones con su estructura y composición química, así como sus aplicaciones en diferentes dispositivos. La finalidad de esta maestría es formar profesionales altamente competitivos en el área de ciencias en materiales para satisfacer los requerimientos tecnológicos actuales en el estado de Oaxaca y a nivel nacional. (ver la Fotografía 3).

Maestría en Ciencias: Productos Naturales y Alimentos

El programa de Maestría en Ciencias: Productos Naturales y Alimentos (MCPNyAI) tiene como misión la formación integral de profesionales de alto nivel académico y ético en el área de productos naturales y alimentos, a través del desarrollo de investigación básica y tecnológica de vanguardia para abordar soluciones de problemas científicos y tecnológicos de manera efectiva y eficiente. Esto, mediante la creación de vínculos con los sectores ambiental, productivo y social de la región, del estado y del país. (ver la Fotografía 4).

Maestría en Electrónica: Sistemas Inteligentes Aplicados

Formar especialistas de alto nivel capaces de innovar, desarrollar y aplicar sistemas inteligentes para resolver problemas tecnológicos en el sector público y privado, así como incursionar en la investigación y ejercer la docencia a nivel superior y de posgrado. Consolidarse como un programa de posgrado líder mediante la realización de investigación básica y aplicada, así como desarrollo tecnológico en las áreas de control de sistemas electromecánicos y visión artificial. Contribuir a la innovación y al desarrollo tecnológico estatal y nacional, consolidando las líneas de investigación actuales. (ver la Fotografía 5).

Maestría en Ingeniería de Software

La Maestría en Ingeniería de Software tiene como misión contribuir a la especialización de profesionistas, que sean capaces de impulsar el desarrollo regional, estatal y/o nacional de manera sustentable, mediante el desarrollo de sus competencias para realizar actividades de investigación de alto nivel en el área de la Ingeniería de Software, las cuales impacten en los ámbitos industrial y/o académico de la sociedad. (ver la Fotografía 6).

Maestría en Inteligencia Artificial

La Maestría en Inteligencia Artificial tiene como objetivo formar recursos humanos especializados en diversas áreas de la Inteligencia Artificial, proporcionando conocimientos y herramientas teóricas y prácticas basadas en fundamentos matemáticos y ciencias computacionales para su comprensión y aplicación en desarrollos científicos y tecnológicos. (ver la Fotografía 7).

Maestría en Medios Interactivos

La Maestría en Medios Interactivos tiene como objetivo formar especialistas en medios interactivos que desarrollen proyectos innovadores en la industria y la academia, integrando diseño, tecnología de la información y el factor humano, para fomentar cambios en sus áreas. (Ver la Fotografía 8).

Maestría en Modelación Matemática

El programa tiene como misión generar conocimiento de matemáticas y modelación que contribuya a la solución de problemas regionales y nacionales realizando investigación básica y aplicada, y formando recursos humanos a nivel maestría en modelación matemática.

Maestría en Robótica

La Maestría en Robótica tiene como objetivo capacitar a licenciados e ingenieros con los mejores estándares de calidad educativa y humana, formando profesionistas con alto nivel académico que impulsen y fortalezcan el desarrollo tecnológico regional, capaces de realizar investigación original de manera independiente en las áreas de robótica y de abordar, con soluciones, la problemática del sector productivo. (ver la Fotografía 10).

Maestría en Tecnología Avanzada en Manufactura

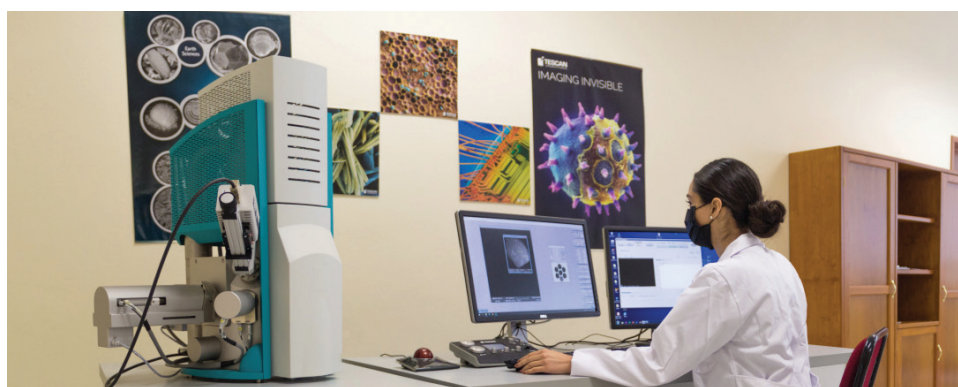
La Maestría en Tecnología Avanzada en Manufactura tiene como misión ser un posgrado líder en la formación integral de profesionistas e investigadores en áreas de manufactura, diseño de productos, y automatización industrial; comprometidos con la calidad y pertinencia de los servicios educativos, contribuyendo al desarrollo social, tecnológico y económico a nivel regional. (ver la Figura 11).



Fotografía 1. Alumnos de la Maestría en Administración de Negocios.



Fotografía 2. Profesor y alumnos realizando prácticas en las instalaciones de la UTM.



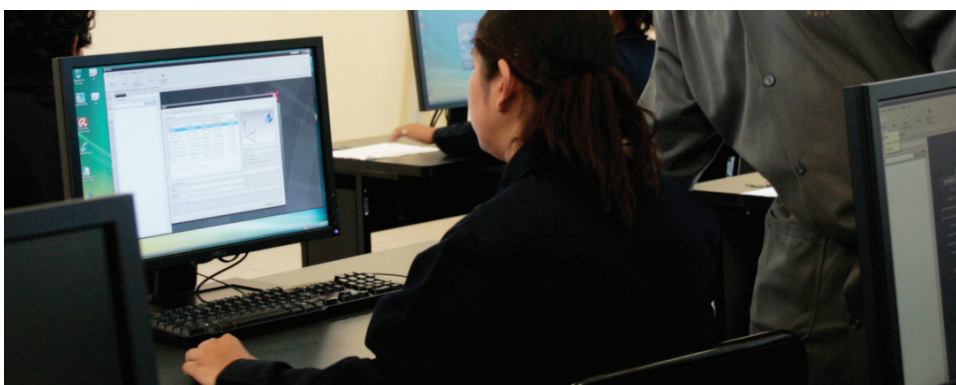
Fotografía 3. Alumna realizando prácticas en un laboratorio de la UTM.



Fotografía 4. Alumna realizando prácticas en un laboratorio de la UTM.



Fotografía 5. Carro eléctrico diseñado en las instalaciones de la UTM.



Fotografía 6. Alumna trabajando en laboratorios de la UTM.



Fotografía 7. Alumnos de educación primaria viendo el funcionamiento del robot NAO.



Fotografía 8. Instalaciones de la Maestría en Medios Interactivos en la UTM.



Fotografía 9. Impartición de clases en las instalaciones de la UTM.

Fotografía 10. Alumna de educación primaria hablando con el robot NAO.



Fotografía 11. Alumnos recibiendo instrucciones en el laboratorio de Manufactura.

Reseña de Libro

Mecánica Libro 1

Fermín Alberto Viniegra Heberlein

D.R. © Universidad Nacional Autónoma de México

1ra edición 2007, 342 pp.

El objetivo del autor al escribir este libro es que el lector aprenda el hermoso tema de la mecánica; sus fundamentos, la historia de su desarrollo, sus técnicas de ataque y resolución de los problemas y sus aplicaciones. El autor trata de convencer que la mecánica se trata de una parcela del pensamiento científico y de la investigación teórica que vale la pena explorar, pues, en contra de lo que algunos piensan, se trata de un tema que a más de cuatrocientos años de haber visto la luz, aún guarda secretos y reserva sorpresas espléndidas.

El autor desarrolla su libro utilizando cuatro vertientes básicas: la primera es la histórica, contando breves historias que sirven de soporte al tema, haciendo una lectura amena, permitiendo un momento de distracción del rigor del desarrollo científico.

La segunda vertiente es la de los conceptos fundamentales; exponiendo las ideas básicas con la mayor amplitud y claridad posible. Por ejemplo, las leyes de Newton que en la mayoría de los libros solamente se enuncian para que el estudiante las recite como una oración, en este libro se exponen las ideas que subyacen a las leyes mostrando sus alcances y limitaciones. La tercera línea es de las aplicaciones, aterrizando la teoría expuesta, invocando a ejemplos y ejercicios de la vida real, en la medida que el tema lo permite. Finalmente, la cuarta vertiente es la de hilvanar a la mecánica con otros grandes temas de la ciencia. Al final de ciertas unidades, el autor menciona como ese tópico dio lugar a ideas dentro de otras áreas de la ciencia, o bien, cómo fue posible comprender ciertos fenómenos que están fuera de la mecánica, pero que a partir de las ideas de la mecánica pudieron esclarecerse.

En la *introducción* explica que la ciencia es una disciplina teórico-experimental que busca conocimiento nuevo y verdadero acerca de la naturaleza y sus procesos. Mientras mayor es ese conocimiento, las posibilidades de aplicarlo para el provecho del ser humano son mayores también y, al menos idealmente, estas aplicaciones permiten mejorar la calidad de la vida, su duración y la trascendencia de la especie en el universo. Explica que para *hacer ciencia* hay que seguir una estrategia general que, excepto por pequeñas diferencias propias de cada campo del conocimiento, es la misma siempre. Esta estrategia se conoce como el *método científico*. Se trata de un esquema conceptual que desde su estructuración primitiva, allá por la segunda mitad del siglo XVI ha sido la guía con la cual se consigue el objetivo de esta rama de la actividad humana.

Se presenta la explicación del método científico siguiendo tres grandes etapas sucesivas; estas son, la etapa de acumulación, análisis y síntesis de la información pertinente, seguida por la de la inducción y se concluye con la etapa de la deducción.

Como se indica, la primera etapa consiste en el trabajo de hacerse de la información que concierne a ese fenómeno, ese experimento; en fin, ese hecho que se desea investigar. Todo aquello que se juzgue *a priori* pertinente al objeto de la investigación y que se tenga a la mano, como son libros, artículos, reportes; así como los resultados de observaciones hechas por el interesado, o por otras personas, se debe acumular. Todo ese material debe ser estudiado cuidadosamente para hacer una primera clasificación y evaluación de su contenido. Hay que descartar lo que no sea relevante y hay que conservar lo importante.

Aquí comienza el conocimiento, cuando de pronto, en toda aquella maraña de libros, artículos, fotos, graficas, comienzan a notarse ciertos rasgos; ciertas tendencias sistemáticas. Esta es la fase de la síntesis del conocimiento.

Con toda esa información clasificada y analizada; con todos esos detalles y rasgos importantes sintetizados, el científico está en condiciones de dar el segundo gran paso en su trabajo: establecer ciertos asertos generales, a partir de la experiencia acumulada. Esta es la fase de la inducción. Esta es, quizá, la etapa más difícil y azarosa de todo el proceso, pues inducir; esto es, afirmar (o negar) cuestiones generales a partir de datos particulares; ir de lo particular a lo general, es algo que al humano le cuesta mucho trabajo y con frecuencia se equivoca.

Una vez que el investigador accede a conocimiento nuevo a partir del método inductivo, la tercera etapa del proceso: da comienzo la fase deductiva. Aquí por lo contrario de la parte inductiva, hay que partir de aquellos asertos generales a los que se había llegado y realizar el descenso (como en un tobogán), hasta alcanzar las conclusiones menudas y prolijas que permitió el modelo.

La experimentación y la observación deben ser parte del proceso. Cada resultado de una deducción hay que contrastarlo, en el laboratorio o en el observatorio, con los datos, con las fotografías y graficas que se obtienen aquí, para estar cada vez más seguros de aquel modelo teórico que se había estructurado a partir de la síntesis, con asertos inductivos. Estos hallazgos constituirán más tarde, los elementos que otros investigadores usaran como puntos de partida para hacer sus propios ascensos por las montañas de la inducción y llegar a proponer hipótesis más generales, con las cuales el modelo actual amplíe sus alcances y fortalezca su estructura; o bien, en el caso de que algún resultado experimental contradiga de algún modo a la teoría, se deba demoler ésta completa o parcialmente y se tenga que iniciar de nueva cuenta el trabajo de construir un modelo teórico que remonte las fallas que el anterior exhibió y que no tenga puntos de discrepancia con la naturaleza. Así es el camino de la ciencia.

El capítulo 1 trata sobre los antecedentes de la mecánica. El autor explica que el objetivo de la mecánica es obtener ecuaciones que describan el

movimiento de los cuerpos o las partículas. Se explica que el esquema de la mecánica desarrollado por Isaac Newton forma parte del método científico y es empleado actualmente en una buena cantidad de esquemas teóricos de la física, como la termodinámica o el electromagnetismo. Este esquema es siempre el mismo y consta de un conjunto de etapas que es necesario cubrir para llegar a las soluciones deseadas. La primera etapa consiste en establecer en forma matemática las fórmulas generales para describir el movimiento. Esa formulación general sirve para todos los problemas de la mecánica, sin importar si se trata de una sola partícula o un conjunto de cuerpos articulados, o un planeta o una galaxia. La segunda etapa es hacer funcionar esa formulación proporcionando la información pertinente de cada caso particular que se considera. Esa información concierne a los agentes físicos que causan el movimiento. En la mecánica clásica se consideran dos clases de ellos: las fuerzas y las torcas. A esas fórmulas se les llama genéricamente *ecuaciones constitutivas*.

Al sustituir las ecuaciones constitutivas en las fórmulas generales se obtienen las llamadas ecuaciones diferenciales de movimiento. Estas forman generalmente un sistema que es necesario integrar. En la tercera etapa se concluye el proceso de integración, para esto es necesario imponer condiciones iniciales. Con este último paso de la secuencia se arriba a la meta: obtener expresiones matemáticas en forma de funciones de la posición y el tiempo, con las cuales, como se mencionó al principio, se pueden trazar curvas en un espacio tridimensional, que representan las trayectorias que deben seguir en el espacio físico los cuerpos estudiados, urgidos por la acción de agentes físicos dados. Estas funciones matemáticas se conocen como *ecuaciones de movimiento* o *ecuaciones de trayectorias*.

En este primer capítulo se hace una cronología de los comienzos de la mecánica, el autor menciona que no se sabe el *orto* de la mecánica. Hace alusión a que quizá la mecánica nació cuando algún homínido usa una rama seca y dura para mover un cuerpo pesado, o bien, cuando se inventa el arco y la flecha; o también pudo ser aquel portentoso instante en el que el ser humano levanta su mirada al cielo y empezó a estudiar el movimiento de los astros a través de la bóveda celeste.

Se describen algunos trabajos conocidos, por ejemplo, Aristóteles (384-322 a.C.) comenzó a estudiar un tema que hoy se sabe que forma parte de la mecánica: la teoría del sonido. Aristarco de Samos (≈ 270 a.C.) propuso un sistema heliocéntrico en su trabajo *Sobre el tamaño y las distancias del Sol y de la Luna*. Posteriormente en Siracusa, Arquímedes (287-212 a.C.) hizo exhaustivos estudios sobre palancas, levas, poleas y polipastos, así como sobre elasticidad y fluidos, sentando las bases de lo que hoy es la ingeniería mecánica.

Por la misma época, Eratóstenes de Alejandría (276-194 a.C.) calculó por primera vez la circunferencia de la Tierra, observando la sombra proyectada por el Sol a medio día en el solsticio de verano, en dos sitios distantes (Siena y Alejandría). El sistema geocéntrico de Claudio Ptolomeo (85-151 d.C.) es sustituido por el sistema heliocéntrico de Copérnico y Aristarco de Samos, quedando la obra de Ptolomeo como parte del acervo de la biblioteca de Alejandría. El autor señala que el método científico comenzó a ser estructurado en su forma más primitiva en el siglo XVI, cuando Nicolás Copérnico inició la práctica de observar el cielo con una tabla ranurada, anotar ordenadamente los datos de sus observaciones en hojas y hojas de registro, a lo largo de treinta años, para luego con ellos, hacer dibujos con las posiciones de los planetas, referidas al Sol. El mismo procedimiento general siguió Johannes Kepler cincuenta años después, cuando paciente, tozudamente convirtió los datos astronómicos de su colega, Tycho Brahe, en puntos sobre un papel y demostró que las órbitas de los planetas, en su tránsito alrededor del Sol no son círculos, como Copérnico había propuesto, sino elipses, en uno de cuyos focos se encuentra esta estrella. Galileo Galilei, usando nuevamente esa formidable herramienta intelectual que Copérnico y Kepler utilizaron con tanto éxito, llegó al concepto de aceleración como el cambio de la velocidad de los objetos y echó las bases de las leyes de la mecánica que otro genio habría de usar para estructurar su propio modelo teórico. Isaac Newton tomó, en efecto, esos estupendos resultados que habían sido hallados por Copérnico, por Kepler, por Galileo y otros gigantes de la misma talla que estos, y en un acto impresionante de potencia intelectual construyó la estructura que hoy, y desde hace cerca de trescientos cincuenta años, se conoce

como la mecánica clásica. Este es el tema de este primer libro de mecánica.

El capítulo 2 trata de las Leyes de Newton, el capítulo 3 sobre las ecuaciones de movimiento y el capítulo 4 trata sobre la mecánica del cuerpo rígido. Se muestra en estos capítulos como utilizando una tetralogía de elementos esenciales: el espacio euclídeo tridimensional, el tiempo absoluto, la masa y las fuerzas vectoriales, Newton construyó su mecánica. En este libro se muestra en detalle la génesis, la construcción y las aplicaciones más importantes del modelo newtoniano.

Uno de los objetivos que persigue el autor con este nuevo texto de mecánica, en efecto, consiste en mostrar al lector interesado en el tema, la forma como se construyó; las ideas prístinas que dieron lugar a él y luego, los problemas que atacó y con los cuales fue posible contemplar la escena del mundo desde una nueva y brillante perspectiva. Siguiendo la historia, se muestra en forma prolija la teoría de la gravitación newtoniana y se llega al encuentro de las tres leyes de Kepler. Aquellos asertos, que con tanto trabajo y sufrimiento fueron propuestos por el astrónomo alemán en los albores del siglo XVII, aparecen como teoremas en el formidable juego matemático de Newton. Encontrarlos, demostrar qué en efecto, se trata de teoremas a los que se llega como resultado de un proceso intelectual de deducción de las leyes de la mecánica, fue vital para el genio británico. Por una parte, fue la confirmación *a posteriori* de la validez de su modelo. Sin esos resultados toda la teoría hubiera sido totalmente inútil, excepto por su bellísima estructura, así que muy bien pudo haber quedado como una pieza del museo de la mente humana (que es muy posible que por ningún lugar del planeta se pueda hallar).

Las leyes de Kepler, una vez demostradas, fueron, en efecto, la prueba fehaciente de que la mecánica clásica funciona. Pero no nada más probaron eso, que en sí ya había constituido un espléndido logro del talento científico. Probaron, así mismo, que aquel método que Newton había ensayado por primera vez en su totalidad; desde sus primeros pasos en la búsqueda de la información, hasta el establecimiento de las leyes en forma inductiva y luego seguir la pendiente del proceso deductivo; esos *xx* pasos del incipiente método científico, conducen, en efecto, al encuentro de la verdad.

Mostrar la deducción de las leyes de Kepler es también una parte esencial, ineludible de cualquier libro sobre la mecánica. Es por ello que aquí se muestra al estudioso del tema, la forma como, a partir de aquellos primeros principios, se puede llegar a ellas, siguiendo un procedimiento matemático simple y directo.

La mecánica planetaria llevo desde aquel entonces y hasta el presente, a desarrollar la llamada astrodinámica; esto es, a comprender cabalmente el movimiento de todos los cuerpos que en el espacio se mueven bajo la acción de la fuerza gravitacional propuesta por Newton. No nada más los planetas fueron desde entonces objetos de estudio de la mecánica. Satélites, asteroides y cometas fueron también puestos en las platinas de los microscopios de los hombres y mujeres de ciencia para hallar hasta los más nimios detalles de sus conductas. Este estudio habría de abrir las puertas de la investigación espacial que hoy por hoy tiene a la humanidad a un tris de convertirse en habitante de otros planetas; de liberarse finalmente de las cadenas que desde los albores de la historia la han tenido atada a la Tierra. En este libro, naturalmente, se dedica una buena parte al estudio de la astrodinámica.

El cuerpo rígido fue otro de los más sonados éxitos que se anotó la mecánica newtoniana. El problema de describir los giros y cabeceos de cuerpos rígidos materiales bajo la acción de fuerzas y torcas, en efecto, fue uno de los grandes retos que se plantearon los investigadores desde el final del siglo XVII que comenzaron a ensayar el modelo de Newton. No fue fácil. Su planteamiento, ataque y resolución desafío a grandes talentos durante doscientos años, sin resultados importantes. Fue hasta las postrimerías del siglo XIX que una bella cuanto talentosa mujer, Sonia Kowalewskaia pudo al fin alcanzar la cima de este tema, al describir matemáticamente la rotación, la precesión y la nutación de trompos pesados, simétricos, que pivotan sobre puntos fijos, debido a la torca gravitacional que la Tierra ejerce sobre ellos.

Hoy en día, el tratamiento del trompo continúa siendo un tema obligado en el estudio de la mecánica clásica. Un tema que no siempre se expone correctamente en los libros de texto y que es causa de frecuentes confusiones y equivocaciones entre los estudiosos. Aquí se expone con profundidad este bello tema.

El asunto de los marcos de referencia no inerciales, igualmente reviste una importancia total para la mecánica. Pensándolo bien, aunque el concepto de un observador inercial es la base de la teoría y la existencia de él es la esencia de la primera ley de Newton, sin lo cual el esquema teórico no puede estructurarse, da la casualidad qué en el universo, por lo visto, no existe un solo sitio donde pueda colocarse un observador y clamar que se trata de un marco de referencia inercial.

Gustave Gaspard de Coriolis salvo este ominoso obstáculo. Su trabajo fue transcribir toda la mecánica clásica de Newton a marcos acelerados (se dice fácilmente, pero se hizo dolorosamente). Así pudo describirse el movimiento desde una perspectiva más real, más apegada a las condiciones que verdaderamente enfrenta un observador cuando desea registrar el paso de cuerpos masivos por el espacio. En este libro se aborda el tema de los marcos de referencia en rotación y se muestra al lector interesado la manera como aparecen las mal llamadas fuerzas inerciales; esas fuerzas ficticias que resultan de la adopción de un sistema coordinado que gira.

¿Qué te puede ofrecer este libro que no lo encuentres en otros? Pensándolo con cuidado, hay cientos de libros que han aparecido desde finales del siglo XVII sobre este mismo tema. Algunos de ellos han resultado ser obras maestras por su lucidez o por la profundidad de los conocimientos que ofrecen. Autores de la talla de A. Sommerfeld o de L. D. Landau y E. M. Lifshitz, sin contar con el propio I. Newton, representan monumentos científicos y literarios muy difíciles de superar.

Lo que el autor intenta con este libro es simplificar el aprendizaje de la mecánica, optimizar el material que debe aprenderse y hacer ameno el proceso de aprendizaje.

El libro proporciona material didáctico para estudiarse en dos semestres normales de mecánica dentro de alguno de los planes de estudio de posgrado en ciencias o ingeniería que se ofrecen en diferentes universidades.

Revista de divulgación "Temas de Ciencia y Tecnología"

Instrucciones para las Colaboraciones a la revista TEMAS de Ciencia y Tecnología de la UTM

Información General

La revista "TEMAS de Ciencia y Tecnología" es un órgano de divulgación y difusión científico-tecnológico de la Universidad Tecnológica de la Mixteca. Es un espacio que apoya y brinda la oportunidad de publicar a todos aquellos interesados, sus trabajos y producciones científicas como avances de investigación personales e institucionales de las diferentes universidades y centros de investigación del país y más allá de nuestras fronteras, con el sólo propósito de promover la tarea de la investigación científica.

La revista "TEMAS de Ciencia y Tecnología" busca la oportunidad de servir a la población estudiantil y a la comunidad intelectual con las últimas novedades de vanguardia tecno-científica de manera ágil, oportuna y veraz. Temas tiene una publicación cuatrimestral, contando con las siguientes secciones:

- Ensayos
- Notas
- Fronteras de la Ciencia
- Vida Académica de la UTM
- Reseña de Libros

La Revista de Divulgación "TEMAS de Ciencia y Tecnología" es multidisciplinaria, cuenta con ISSN 2007-0977 y pertenece al Índice de Revistas Mexicanas de Divulgación Científica y Tecnológica del CONACYT.

Colaboraciones

Ensayo. Artículo con una aportación analítica, crítica y documentada sobre un tema, con una interpretación personal claramente identificada, y que contiene: Resumen en español y en inglés (abstract), Palabras clave, Introducción, Desarrollo del tema (con los subtítulos que se estimen convenientes), Discusión y análisis de resultados, Conclusiones y Bibliografía.

La elaboración de un ensayo es una tarea a la cual nos enfrentamos, cuando informamos a la comunidad sobre los resultados parciales de la investigación que estamos realizando. El carácter didáctico pedagógico que posee el ensayo científico radica en poner lo complicado en términos sencillos y no limitar el conocimiento solamente para un grupo de especialistas.

Nota Científica. Artículo con hallazgos y aportaciones breves, basados en resultados de investigación reciente que aún podrían requerir verificación. Puede ser el resultado de modificación o perfeccionamiento de algún método, técnica o análisis, o resultados de inves-

tigación preliminares pero importantes y novedosos. Debe contener Introducción, Desarrollo, Conclusiones y Bibliografía.

Reseñas. Comentario sobre libros de reciente edición, que contenga un juicio crítico y descripción del mismo. Normalmente y dependiendo del estilo del reseñador, consta de tres partes, ya sea separadas o entrelazadas en el texto: la identificación del autor y de la obra en tiempo y espacio; el resumen, que muestra las hipótesis o ideas principales y aportaciones de la obra; y la crítica, que resume la importancia de la obra desde contextos como social, científico, técnico, artístico, pudiendo incluir una recomendación final de la obra.

Debido a que "Temas de Ciencia y Tecnología" es una revista de divulgación, es importante la claridad y sencillez en el lenguaje y la exposición, explicando los términos o conceptos menos usuales. Es necesario que los autores procuren que los títulos, la introducción y el resumen sean comprensibles para la mayoría de los lectores no especializados en el tema desarrollado.

Presentación del artículo

1. Los autores deben integrar sus tabajos utilizando el procesador de textos Microsoft® Word.
2. Se envía al correo electrónico temas@mixteco.utm.mx dos archivos con extensión .doc. Uno es la colaboración y otro es una hoja de datos.
3. Un archivo es la colaboración (Ensayo o Nota) en forma adecuada para la revisión ciega en su versión original; se omite el nombre del autor para guardar su anonimato en el proceso de dictaminación.
4. El otro archivo es una hoja de datos la cual debe contener la siguiente información.

- Título del trabajo
- Tipo de colaboración (Ensayo, Nota o reseña)
- Nombres de los autores con un conciso currículum académico o profesional
- Afiliación institucional
- Domicilio del lugar de trabajo
- Teléfonos
- Correo electrónico de los autores
- Correo electrónico de correspondencia

Proceso editorial

1. Los trabajos enviados a la revista deben ser inéditos y sus autores se comprometen a no someterlos simultáneamente a la consideración de otras publicaciones.
2. La revista "TEMAS de Ciencia y Tecnología" acusará recibo a los autores de los trabajos que reciba.
3. El manuscrito será revisado por el Consejo Editorial antes de proceder con la revisión externa.
4. Después de aprobado por el consejo editorial el Ensayo o Nota será enviado a revisión (doble ciego) por al menos dos expertos en la disciplina correspondiente.
5. El artículo será aceptado sin cambios, con cambios menores, con cambios mayores o rechazado de acuerdo a los informes del arbitraje externo.
6. El resultado de la evaluación será comunicado al autor de correspondencia. El fallo será inapelable.
7. Los artículos aceptados recibirán las pruebas de galera para su corrección, así como, los autores deberán de firmar la carta de sesión de derechos.
8. Los artículos aceptados serán publicados en la página de la Universidad Tecnológica de la Mixteca.
9. Cada uno de los autores tiene derecho a recibir sin costo alguno la revista en la cual se haya publicado su colaboración.

Formato del manuscrito

Manuscrito

1. Los trabajos deben ser, preferentemente, resultados o avances de investigaciones de alto nivel sobre cuestiones relacionadas con el desarrollo tecnológico y científico.
2. Los ensayos tienen como máximo 20 cuartillas a doble espacio, con letra Times New Roman de tamaño 12.
3. Las Notas y Reseñas tienen como máximo 10 cuartillas a espacio doble, con letra Times New Roman de tamaño 12.
4. Las secciones no deben numerarse.
5. Evitar las notas al pie de página, por razones de diagramación de la revista. Cualquier información que el autor considere necesario incorporar, deberá hacerlo dentro del texto.
6. En la medida de lo posible, se debe evitar un lenguaje excesivamente especializado y el uso recargado de funciones matemáticas, para el beneficio de una exposición clara correspondiente a revistas de divulgación.
7. No hacer citas excesivas de un mismo autor. Evitar también un número excesivo de citas para que la lectura resulte más amena.
8. Las oraciones utilizadas en su trabajo no deben ser tan largas que dificulten la lectura.
9. Evitar el uso de abreviaturas no convencionales, si son necesarias entonces describirlas al usarlas por primera vez. Mantener el uso de abreviaturas al mínimo.
10. Hacer un uso adecuado de las mayúsculas y minúsculas, acentuando las mayúsculas. Verificar que el trabajo no tenga errores de redacción.

Tablas

1. Las tablas se deben colocar en el lugar que les corresponde a lo largo del artículo.
2. El texto que describe a una tabla se coloca arriba de la misma y será de tamaño 10 con el siguiente formato: Tabla 1. Tabla 2.
3. El texto de la tabla será de tamaño 9.
4. Las tablas deben estar en Word. No se aceptan como imágenes.

Tablas reproducidas de otra fuente

1. Las tablas reproducidas de otra fuente deben presentar, debajo de la tabla, la referencia del autor original, aunque se trate de una adaptación.

Por ejemplo:

Fuente: Sabadini, A. A. Z., Sampaio, M. I. C., & Koller, S. H. (2009). *Publicar em psicologia: um enfoque para revista científica* (p. 175) Sao paulo: Associação Brasileira de Editores Científicos de Psicologia/Instituto de Psicologia de la Universidad de Sao Paulo.

Figuras

1. Las figuras se deben colocar en el lugar que les corresponde a lo largo del artículo.
2. Se consideran figuras a todo tipo de fotografías, gráficas o dibujos.
3. El texto que describe a una figura se coloca debajo de la misma y será de tamaño 10 con el siguiente formato: Figura 1. Figura 2.
4. Las figuras deben enviarse de forma adicional en un archivo único comprimido, identificando con claridad el número de la figura.
5. Las figuras utilizadas en la versión impresa estarán en escala de grises con una resolución adecuada para impresión.
6. Las figuras deben ocupar el ancho completo del documento. No se admitirá alinear más de una figura por renglón. Si requiere hacer un comparativo entre varias figuras, deberá realizar la composición de las imágenes en una sola imagen agrupada.
7. El ajuste de las imágenes en el documento deberá ser "En línea con el texto". No se admitirán figuras dentro de cuadros de texto.
8. No se admitirán fotografías de personas. Las fotografías en ningún caso deben permitir la identificación de los autores del manuscrito.
9. Las figuras deben ser propiedad de los autores. No utilizar figuras, tablas o gráficas obtenidas de otras publicaciones o a través de internet sin el permiso correspondiente. Es necesario citar la fuente.

Figuras reproducidas de otra fuente

Las figuras reproducidas de otra fuente deben presentar, debajo de la figura, la referencia del autor original, aunque se trate de una adaptación.

Por ejemplo:

Fuente: Sabadini, A. A. Z., Sampaio, M. I. C., & Koller, S. H. (2009). *Publicar em psicologia: um enfoque para revista científica* (p. 175) Sao paulo: Associação Brasileira de Editores Científicos de Psicologia/Instituto de Psicologia de la Universidad de Sao Paulo.

Ecuaciones

1. Las expresiones matemáticas deben estar escritas de preferencia en el editor de ecuaciones de Word y adoptando el sistema de notación internacional.
2. No escribir ecuaciones dentro del texto.
3. Para agregar símbolos dentro del texto, utilizar Insertar Símbolo del procesador de textos y no el editor de ecuaciones.

Estructura de los manuscritos

1. **El título** de los trabajos debe ser atractivo tanto para lectores expertos como para amplias audiencias que desconozcan del tema, en cumplimiento del espíritu de divulgación de la revista. Debe ser breve y descriptivo del contenido del manuscrito que se presenta, con una longitud máxima de 150 caracteres considerando los espacios. Evitar el uso de símbolos, fórmulas, abreviaturas o acrónimos, tecnicismos desconocidos, ni demasiadas preposiciones.

2. **El resumen** debe describir breve y claramente el objetivo de estudio, la justificación, importancia, metodología, los resultados más destacados y las principales conclusiones, con una extensión entre 150 a 200 palabras como máximo. Se deben enfatizar los aspectos relevantes del trabajo. El resumen debe ser informativo, pero sin ser demasiado detallado.

3. Usar un máximo de cinco **palabras clave** en orden alfabético, que no se encuentren en el título y que identifiquen los principales temas tratados.

4. **Introducción.** Describir los objetivos y fundamentos del trabajo, utilizando las citas bibliográficas estrictamente necesarias. No incluir datos experimentales, pruebas ni las conclusiones del trabajo que presenta.

5. **Desarrollo.** Los métodos y pruebas realizadas, cálculos y modelos matemáticos deben presentarse de forma conveniente para que el lector comprenda el desarrollo de la investigación. Todas las siglas deben aclararse desde su primera aparición en el texto. Evitar el uso de nombres comerciales o del lugar, institución o dependencia donde se realizó la investigación, salvo cuando sea estrictamente necesario.

6. **Discusión y análisis de resultados.** Deben tener una secuencia lógica y describir los resultados de las pruebas o de los modelos aplicados, utilizando tablas o figuras.

7. **Conclusiones.** Deben definir la contribución o innovación de la investigación realizada. Enlazar las conclusiones con el objetivo del estudio, evitando conclusiones no apoyadas por los datos del trabajo. No repetir con detalle los resultados obtenidos en el trabajo.

8. **Bibliografía.** El estilo será acorde a las normas APA. El listado de referencias al final del documento se ordena por apellido del primer autor.

Ejemplos de citas y referencias bibliográficas

Citas Bibliográficas

Las citas biblio-hemerográficas en el texto deben escribirse con el nombre del autor y año de publicación entre paréntesis y separados por una coma, por ejemplo: ...la oferta y la demanda de la mano de obra en expansión (Muñoz, 1979). Si se menciona el nombre del autor, solo se indicará el año entre paréntesis, por ejemplo: ...capital de producción, como sostiene Muñoz (1979).

Si existen dos autores se citan ambos, por ejemplo: ...(Muñoz y Oliveira, 1979) o ...Muñoz y Oliveira (1979). Para más de tres autores se citan todos la primera vez: ...(Muñoz, Oliveira, Tapia, Reyes, 1979) y después solo el apellido del primer autor seguido de la abreviatura et al: ...(Muñoz et al., 1979). Si en un texto existen diversos trabajos de un autor con igual fecha, después del apellido del autor, se agrega el año de la publicación seguido de una letra minúscula para distinguir cada una de sus obras, por ejemplo ...en lo que se ha insistido (Huxley, 1947a) ...es la importancia del desarrollo (Huxley, 1947b).

Referencias Bibliográficas

El formato será acorde al estilo APA (American Psychological Association). El listado de referencias al final del documento se ordena por orden alfabético. Las referencias de libros incluyen apellido del autor y sus iniciales, año de publicación entre paréntesis, título del libro en letra cursiva, lugar de publicación (ciudad, estado, provincia, país), seguido de dos puntos y casa editorial. Ejemplo: Vedeyen, J.T. (1995). *Laser Electronics*. New jersey: Prentice Hall.

Las referencias de artículos publicados en revistas se escriben con el apellido del autor y sus iniciales, año de publicación entre paréntesis, título del artículo, nombre de la revista en letra cursiva, volumen en cursiva, pudiendo incluirse el número de revista en paréntesis y páginas. Ejemplo: Ruiz, C. (1992). Las empresas micro, pequeñas y medianas; crecimiento con innovación tecnológica. *Comercio Exterior*. Vol. 42(2). 163-168.

Para trabajos publicados el mismo año por un solo autor, se usa una letra minúscula (a,b,c) después del año.

Los trabajos deben enviarse a:

temas@mixteco.utm.mx

Alberto Antonio García

Director de la Revista

Revista TEMAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

temas@mixteco.utm.mx

Universidad Tecnológica de la Mixteca.

Huajuapán de León, Oaxaca. C.P. 69000.

Tels. y Fax: (+52) 953 53 203 99 y 953 53 202 14 Ext. 782



ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



Ciencia y Tecnología

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

latindex