

EFFECTO DE RECUBRIMIENTO QUÍMICO EN LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE DIVERSOS SUSTRATOS

Ingenierías y desarrollo tecnológico

EFFECT OF CHEMICAL COATING ON THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF VARIOUS SUBSTRATES

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados sobre el efecto del recubrimiento químico en la conductividad eléctrica de diversos sustratos y sugiere que existe una fuerte dependencia de los procesos en la calidad del recubrimiento. Los resultados sugieren que los recubrimientos hechos con PVD son uniformes y sin defectos aparentes. Sin embargo, los recubrimientos de CdS muestran un efecto contrario debido a la falta de homogeneidad y a desprendimientos. También el Cu_2S presenta deficiencias hasta la aplicación de un pretratamiento a la fibra, lo que se traduce en un mejor desempeño. Finalmente, estos resultados sugieren que hay una fuerte correlación entre la calidad del sustrato y proceso en la adhesión del recubrimiento. Por lo tanto, es posible que, mediante la perfección de la técnica, se obtengan recubrimientos uniformes y sin defectos para el estudio de telas para termoelectricidad.

Palabras clave: Fibra de carbono, termoelectricidad, recubrimiento, conductividad eléctrica

ABSTRACT

This paper presents the results of the chemical coating effect on the electrical conductivity of various substrates. It suggests a strong dependence of the coating process on the coating's quality. The results indicate that PVD coatings are uniform and without apparent defects. However, CdS coatings show the opposite effect due to a lack of homogeneity and peeling. Cu_2S also shows deficiencies until the application of a fiber pretreatment, which results in improved performance. Finally, these results suggest a strong correlation between substrate and process quality in coating adhesion. Therefore, it is possible that, by refining the technique, uniform and defect-free coatings can be obtained for the study of fabrics for thermoelectric applications.

Keywords: Carbon fiber, thermoelectricity, coating, electrical conductivity

A. Juárez Loyola¹, E.A. Franco Urquiza², J.M. Salgado López¹, I. Guzmán Flores³, C.E. Cruz González¹

¹ CIDESI: Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. C.P. 76125, Santiago de Querétaro, Querétaro, México

² Tecnológico de Monterrey campus Querétaro. C.P. 76130, Santiago de Querétaro, Querétaro, México.

³ Facultad de Sistemas, Universidad Autónoma de Coahuila, carretera a México km. 13, Saltillo, México

Correspondencia: C.E Cruz González; Correo: ecruz@cidesi.edu.mx



CienciAcierta

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global (CG) se define como los cambios a largo plazo de los patrones climáticos y temperaturas, siendo de origen natural (actividad solar, erupciones de volcanes, etc.) o de actividades humanas (quema de carbón, petróleo y gas) (UNICEF, 2025). Este cambio, tiende a afectar los ecosistemas ya que altera las condiciones en que viven muchas especies y provoca desastres climáticos. Adicionalmente, este efecto promueve que más energía solar sea absorbida por la Tierra, que desprende más calor a la atmósfera y, al remitirse este calor, se incrementa la temperatura. Según reportes de expertos, la temperatura global ha aumentado aproximadamente 4 °C desde la industrialización de las actividades humanas (Manos Unidas, s.f.).

En los vehículos automotrices ocurre un efecto similar al del CG y suele afectar directamente el confort del usuario, así como su economía. Cunillera (2025) expuso que a temperaturas $>37^{\circ}\text{C}$ un vehículo puede sufrir degradaciones importantes como en la pintura exterior, tapicería, salpicaderos y plásticos. También, se ven afectadas las partes electrónicas del coche, el alternador y la batería (Caper, 2024). Otro punto importante está relacionado con el deterioro de la habilidad de manejo, ya que a temperaturas de $35\sim 40^{\circ}\text{C}$ la capacidad de reacción y los reflejos se reducen de forma similar a manejar bajo los efectos del alcohol (Centro médico TEKNON, 2025). Con base en lo expuesto anteriormente y considerando que solo en México hay 52 millones de vehículos, este tema no puede pasarse por alto debido a sus implicaciones (Villa, 2025). Lo anterior, ya que abre posibilidades para el desarrollo de tecnologías en beneficio de dichos usuarios.

Una alternativa, serían los dispositivos termoeléctricos (DTE) cuyo principio se basa en la capacidad de ciertos materiales para generar una diferencia de potencial eléctrico cuando existe un gradiente de temperatura (efecto Seebeck). También, es posible inducir un flujo de calor mediante un voltaje externo (efecto Peltier), que al incluir el efecto Seebeck y el Thompson se puede generar un fenómeno termoeléctrico (Soní-Castro y col., 2021; Takahagi y col., 2025). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es analizar el efecto de recubrimiento químico (sulfuro de cadmio, sulfuro cuproso) en la



conductividad eléctrica de diversos sustratos. Lo anterior, para verificar si estos recubrimientos aplicados a sustratos (fibra de carbono y probetas de polimetilmetacrilato), posibilitan que se vuelvan materiales semiconductores. Así, generar soluciones para mitigar el calor residual en vehículos e impactar en el cambio climático y confort de los usuarios.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sustratos

Se utilizaron dos sustratos, probetas de polimetilmetacrilato (PMMA) de 50×12×2 mm y telas de fibra de carbono (FC) 0-90°, 198 g m⁻², 3k plano de 1×1 y 0.25 mm de espesor, marca Quintum®.

Reactivos

Debido a su baja densidad de banda, se seleccionaron dos compuestos para los recubrimientos termoeléctricos, sulfuro de cadmio (CdS) y sulfuro cuproso (Cu₂S). Con la finalidad de generar soluciones acuosas (100 ml) para recubrir los sustratos. A continuación, se muestran los principales reactivos utilizados, así como su función dentro de los procesos de deposición:

- Cloruro de cadmio ($CdCl_2$): Fuente del catión Cd^{2+} en la síntesis del CdS.
- Tiourea (CH_4N_2S): Aporta el anión S^{2-} en medio alcalino controlado.
- Cloruro cúprico ($CuCl_2$): Precursor del Cu^{2+} en la síntesis del Cu_2S .
- Hidróxido de sodio ($NaOH$): Ajusta el pH del sistema (pH 11–12) para favorecer la disociación de tiourea y la nucleación del sulfuro metálico.
- Citrato de sodio ($Na_3C_6H_5O_7$): Actúa como agente complejante, regulando la concentración de iones metálicos libres y previniendo la precipitación prematura.
- Buffer pH 10: Mantiene la alcalinidad del medio en los procesos de baño químico.



Metodología para recubrir los sustratos

Deposición física de vapor

Para mejorar la conductividad eléctrica de los sustratos, se realizaron recubrimientos mediante la técnica de deposición física de vapor (PVD) de titanio-aluminio ($TiAl$). El recubrimiento de $TiAl$, fue realizado en un equipo marca OERLIKON modelo Domino, con dos cátodos (uno de titanio y otro de aluminio) para deposición por arco catódico. La Figura 1 muestra el equipo empleado en este experimento.



Figura 1. PVD marca OERLIKON utilizado para el recubrimiento de $TiAl$. Fuente: El autor.

Técnica de baño químico

Las películas de CdS se sintetizaron mediante la técnica del baño químico utilizando un vaso precipitado de 100 mL. Las soluciones precursoras se añadieron en el orden que se muestra en la Tabla 1, manteniendo un pH en el rango de 11-12, moderadamente alcalino, y una agitación constante para favorecer la homogeneidad del sistema. Posteriormente, la mezcla se colocó en baño de agua a una temperatura promedio de 70 °C. En esta solución, se sumergieron las tiras de PMMA recubiertas con $TiAl$ durante 30, 40 y 60 min. Asimismo, se colocó una muestra de FC recubierta con $TiAl$ durante 60 min.

Tabla 1. Reactivos usados para la formulación de CdS

Reactivo	Concentración (M)	Cantidad (ml)
$CdCl_2$	0.05	15
$Na_3C_6H_5O_7$	0.5	15
$NaOH$	0.5	2.5
CH_4N_2S	0.3	7.5
Agua desionizada	-	60

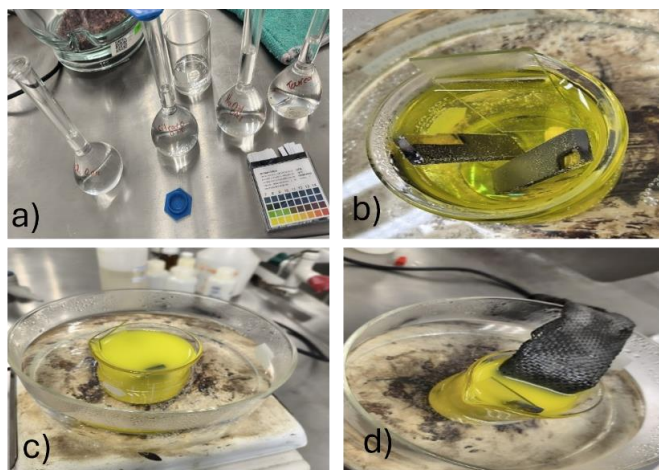


Figura 2. Preparación y realización de baño químico: a) soluciones precursoras; b) inmersión de probetas de PMMA con TiAl; c) comienzo de la reacción química; d) inmersión de FC con TiAl a la reacción química.

Técnica SILAR

El Cu_2S se obtuvo mediante la técnica SILAR (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction), que consiste en sumergir el sustrato en soluciones precursoras en ciclos que permiten la formación de capas iónicas sucesivas. Esta técnica consta de tres etapas: inmersión en el

catión precursor, enjuague, inmersión en el anión precursor. En cada etapa se cuenta con un tiempo de inmersión y un tiempo de secado antes de pasar a la siguiente. Las soluciones madre se prepararon disolviendo los reactivos en 100 mL de agua desionizada. La Tabla 2 muestra las concentraciones y cantidades empleadas.

Tabla 2. Reactivos utilizados para la formulación de Cu_2S .

Reactivo	Concentración (M)	Cantidad (gr)
$CdCl_2$	0.05	0.86
$Na_3C_6H_5O_7$	0.5	14.85
$NaOH$	0.5	2
CH_4N_2S	0.3	2.3

Tabla 3. Soluciones preparadas para la obtención de Cu_2S por medio de la técnica SILAR.

Soluciones	Inmersión/Secado		Ciclos
	(segundos)	(segundos)	
$CuCl_2$ 40ml + Citrato de sodio 40 ml + NaOH 11 ml	30	10	30
Agua desionizada	5	5	30
Tiourea 90 ml + NaOH 11 ml	30	10	30

Una vez preparadas las soluciones madre (ver Tabla 2), se mezclaron en vasos precipitados según proporciones específicas (ver Tabla 3). Luego, los vasos uno y tres que contenían a los reactivos principales, se calentaron en un rango de temperatura de 35~45°C. Cabe mencionar que el vaso que contenía el agua desionizada se mantuvo a temperatura ambiente.

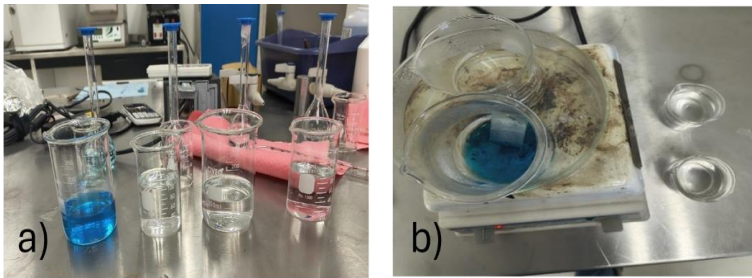


Figura 3. Preparación técnica SILAR: a) vasos con las soluciones madre; b) primer ciclo de la técnica SILAR

Caracterización de la superficie de los sustratos con los distintos recubrimientos

La caracterización morfológica, se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). El análisis composicional, se efectuó mediante espectroscopía de dispersión de energía (EDS). Finalmente, los datos obtenidos se analizaron para confirmar la presencia de los elementos característicos (Ti, Al, Cd, S y Cu) en los recubrimientos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inspección de recubrimientos PVD

En la Figura 4 se observan las muestras de FC y PMMA tras el proceso de recubrimiento con TiAl generado mediante PVD. Las superficies presentan un cambio visible en su tonalidad, adoptando un color metálico característico. Lo anterior, indica la formación efectiva de una capa conductora sobre los sustratos cuyo recubrimiento se muestra uniforme y sin fallas.

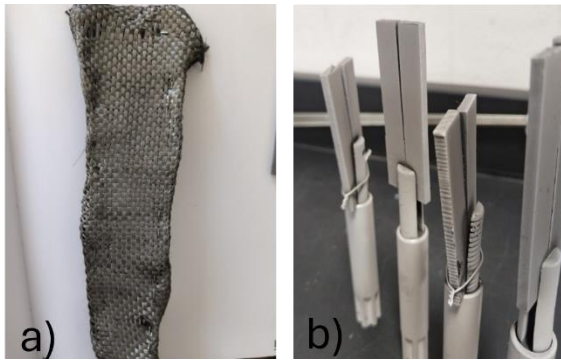


Figura 4.
Recubrimientos de TiAl realizados por PVD sobre: a) FC y b) probetas de PMMA.

Recubrimientos de CdS (Baño químico)

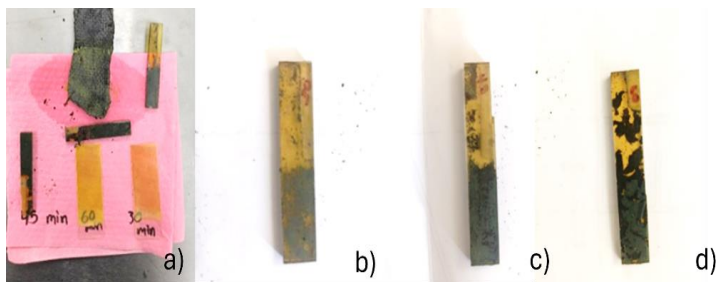


Figura 5. Resultados de recubrimiento de CdS sobre los sustratos; a) Sustratos recubiertos; probetas de PMMA con TiAl sumergidas en baño químico por b) 30, c) 45 y d) 60 minutos

La Figura 5 muestra los materiales recubiertos con CdS mediante la técnica de baño químico, previamente recubiertos con TiAl, en los que se observaron desprendimientos a los 30, 45 y 60 minutos. En contraste, la FC recubierta con TiAl no presentó dicho desprendimiento, lo que sugiere una mejor adherencia al sustrato. Lo anterior pudo deberse a la rugosidad del sustrato que, al incrementarla, propicia el anclaje.

Recubrimientos de Cu_2S (Técnica SILAR)

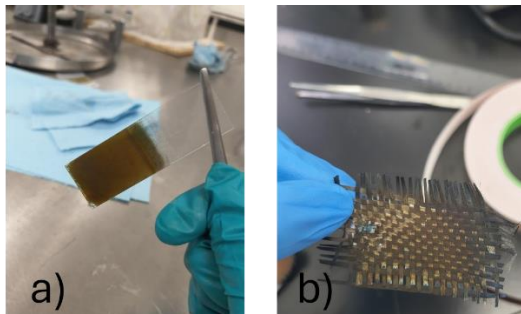


Figura 6.
Recubrimiento de Cu_2S rea, realizando 30 ciclos sobre: a) portaobjetos de vidrio; b) FC con tratamiento con HCl.

La Figura 6 muestra los materiales recubiertos con Cu_2S obtenidos mediante la técnica SILAR, que presentaron una buena adherencia al portaobjetos de vidrio. Sin embargo, en principio, se originaron desprendimientos (sobre la FC), que se corrigieron mediante un tratamiento con ácido clorhídrico (HCl), lo que activó la superficie. Este tratamiento resultó efectivo ya que se logró una formación homogénea y continua del recubrimiento de Cu_2S sobre la superficie de la fibra (ver Fig. 6b).

Morfología y composición química de los recubrimientos

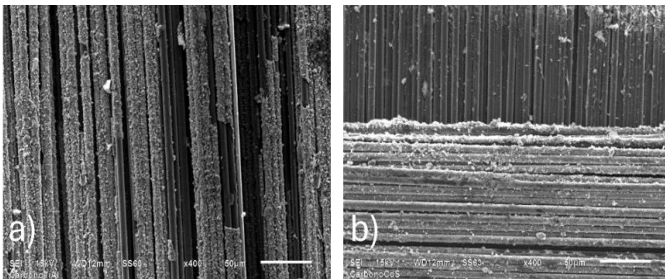


Figura 7. Imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de fibras de carbono recubiertas. (a) FC recubierta con TiAl mediante PVD. (b) FC con recubrimiento adicional de CdS aplicado FC mediante baño químico.

La Figura 7 muestra los resultados del SEM de las FC recubiertas. Se utilizó un voltaje de 15 kV y una magnificación de 400× para lograr una visualización clara de las fibras individuales. En dicha imagen, la fibra recubierta con $TiAl$, arrojó que algunas regiones no presentan recubrimiento. Esto, podría atribuirse al arreglo entre las fibras del tejido, que genera zonas con menor exposición durante el proceso (PVD). Por otro lado, en la fibra recubierta con una capa adicional de CdS (por baño químico) se observan formaciones granulares distribuidas sobre la superficie. Estas estructuras, corresponden al recubrimiento de CdS , el cual no es homogéneo, posiblemente debido a las condiciones del baño.

La Figura 8 muestra el análisis de la composición química del recubrimiento mediante espectroscopía de dispersión de energía (EDS). Se seleccionó una zona de la muestra que presentaba una alta concentración de formaciones granulares visibles en SEM (1000x). Lo anterior, permitió obtener una señal estable en los picos espectrales. En el espectro resultante, se identificaron los picos característicos de los elementos: carbono (C), titanio (Ti), aluminio (Al), azufre (S), cadmio (Cd), sodio (Na) y oxígeno (O). La presencia de Ti y Al, confirmó el recubrimiento inicial de $TiAl$ sobre la FC. Por otro lado, los picos correspondientes a S y Cd indican la formación del recubrimiento de CdS .

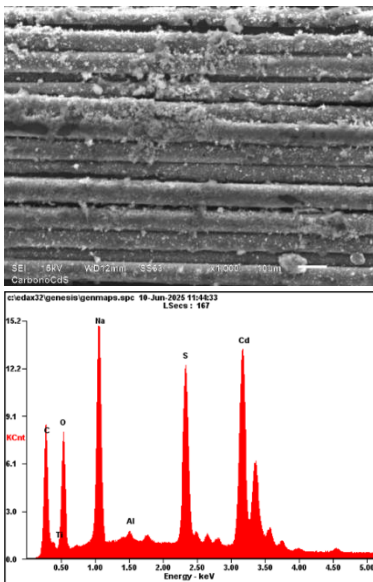


Figura 8. Análisis de la composición química de la FC recubierta con $TiAl$ y CdS , obtenido mediante espectroscopía de dispersión de energía (EDS).

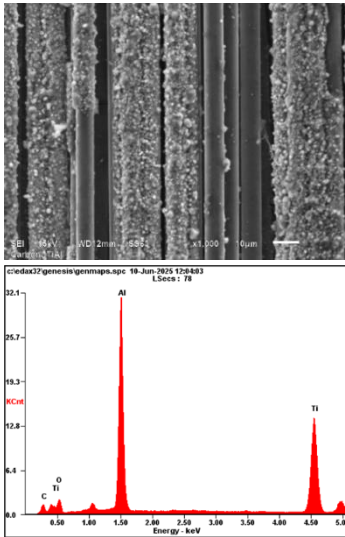


Figura 9. Análisis de la composición química de la FC recubierta con TiAl, obtenido mediante espectroscopía de dispersión de energía (EDS).

La Figura 9 muestra el EDS de la fibra recubierta con *TiAl*, obtenido con las condiciones experimentales anteriores. Se identificaron los picos característicos de los elementos carbono (C), titanio (Ti), oxígeno (O) y aluminio (Al), siendo Ti y Al los elementos predominantes. Estos resultados, confirman la composición esperada del recubrimiento aplicado por PVD.

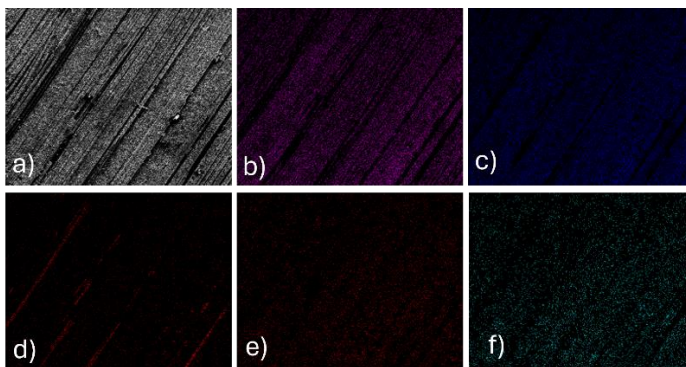


Figura 10. Mapeo químico del sustrato FC-TiAl-CdS a) imagen de referencia; b) aluminio; c) titanio; d) carbono; e) cadmio; f) azufre.

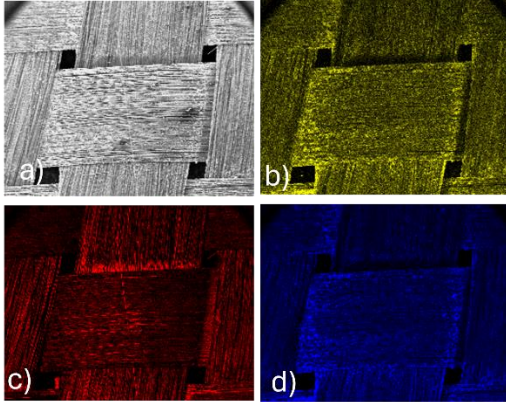


Figura 11.
Mapeo químico
del sustrato FC-
 Cu_2S : a) imagen
de referencia;
b) cobre; c)
carbono; d)
azufre.

Las Figuras 10 y 11 muestran los mapeos químicos obtenidos para los distintos sustratos analizados. La Figura 10, correspondiente al sustrato FC-TiAl-CdS , muestra que los elementos Al y Ti se encuentran en mayor proporción que el Cd y el S, lo que indica una cobertura parcial del recubrimiento semiconductor sobre la capa metálica base. Asimismo, en las zonas donde el recubrimiento presenta desprendimientos se detecta únicamente la señal de C, atribuida a la exposición directa de las fibras del sustrato.

Por su parte, la Figura 11 muestra el mapeo del sustrato $\text{FC-Cu}_2\text{S}$, en el que se observa una distribución más uniforme de los elementos Cu y S en la superficie. Esta mejora en la homogeneidad del recubrimiento se asocia al tratamiento previo con HCl diluido, que favoreció la limpieza superficial y la posterior adherencia del compuesto semiconductor.

CONCLUSIONES

Los resultados, del efecto de recubrimiento químico en la conductividad eléctrica de diversos sustratos, sugirieron que existe una fuerte dependencia de los procesos en la calidad del recubrimiento. Los recubrimientos hechos con PVD, resultaron uniformes y sin defectos aparentes. Sin embargo, los recubrimientos de CdS mostraron un efecto contrario debido a la falta de homogeneidad y a desprendimientos. También, el Cu_2S mostró deficiencias hasta que se aplicó un pretratamiento a la fibra, que redundó en un mejor desempeño. Finalmente, estos resultados

sugieren que existe una fuerte correlación entre la calidad del sustrato y el proceso de adhesión del recubrimiento. Por lo tanto, es posible que, mediante el perfeccionamiento de la técnica, se puedan generar dichos recubrimientos para estudiar su impacto en la termoelectricidad.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), a la UNAM y al CIDESI.

REFERENCIAS

Carep, A.G. (07 de 02 de 2024). Recuperado el 22 de 09 de 2025, de ¿Cómo las altas temperaturas afectan a nuestro vehículo?: <https://www.carep.cl/como-las-altas-temperaturas-afectan-a-nuestro-vehiculo/#:~:text=Las%20altas%20temperaturas%20afectan%20al,generando%20as%C3%AD%20un%20desgaste%20mayor.&text=Otros%20de%20los%20aparatos%20que,mucho%20m%C3%A1s%20durante%20el%20verano.&t>

Centro médico TEKNON. (13 de 08 de 2025). Recuperado el 22 de 09 de 2025, de Consejos para una conducción segura en verano: cómo prevenir los riesgos del calor al volante: <https://www.teknon.es/blog/es/salud-az/consejos-conduccion-segura-verano-prevenir-riesgos-calor-vo#:~:text=Cuando%20la%20temperatura%20interior%20del,tr%C3%A1fico%20y%20cometer%20m%C3%A1s%20errores>

Cunillera, L. (09 de 02 de 2025). *Drift Co.* Recuperado el 22 de 09 de 2025, de Cómo afecta el calor al interior de tu coche y qué puedes hacer al respecto: <https://mx.drift.co/en-au/blogs/news/how-heat-affects-your-car-interior>

Manos Unidas. (s.f.). Recuperado el 22 de 09 de 2025, de Calentamiento global: <https://www.manosunidas.org/observatorio/cambio-climatico/calentamiento-global>



Soní-Castro, I. D., López-Oyama, A. B., & Rodríguez-González, E. (2021). La termoelectricidad: convirtiendo el calor en electricidad. *Revista Digital Universitaria*, 1-9.

Takahagi, A., Hirai, T., Alasli, A., Park, S. J., Nagano, H., & Uchida, K.-i. (06 de 03 de 2025). *Cornell University*. Obtenido de Observación del efecto Thomson transversal: <https://arxiv.org/abs/2501.05857#:~:text=The%20thermoelectric%20Thomson%20effect%2C%20predicted,the%20Seebeck%20and%20Peltier%20effects.>

UNICEF. (12 de 02 de 2025). (¿Qué es el calentamiento global y qué consecuencias tiene?) Recuperado el 22 de 09 de 2025, de <https://www.unicef.es/blog/sostenibilidad/calentamiento-global-que-es-causas-consecuencias>

Villa, A. (23 de 06 de 2025). *Uno T.V.com*. Recuperado el 22 de 09 de 2025, de En México circulan más de 52 millones de vehículos: más que la población total de países como España o Argentina: <https://www.unotv.com/nacional/en-mexico-circulan-mas-de-52-millones-de-vehiculos-mas-que-la-poblacion-total-de-paises-como-espana-o-argentina/>

